



República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102014025371-8 A2



(22) Data do Depósito: 10/10/2014

(43) Data da Publicação: 03/05/2016

(RPI 2365)

(54) Título: SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO

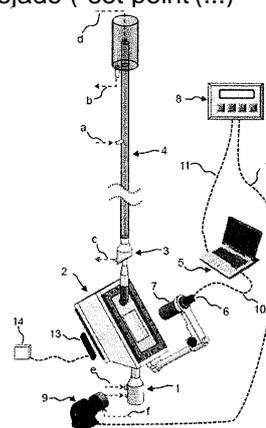
(51) Int. Cl.: B03D 1/02; B03D 1/14

(52) CPC: B03D 1/028; B03D 1/14

(73) Titular(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

(72) Inventor(es): RAFAEL TEIXEIRA RODRIGUES, CRISTIANE OLIVEIRA RODRIGUES

(57) Resumo: SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO. A presente invenção descreve um sistema "online" de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolhas para ensaios piloto ou de bancada de flotação em coluna. Sua principal área de aplicação é a do processamento mineral. O sistema é acoplado na base de colunas de flotação, sendo composto basicamente por 3 partes: câmara de geração de bolhas; câmara de visualização para obtenção de imagens digitais das bolhas e câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação. As bolhas geradas, de forma controlada, na câmara de geração de bolhas, ascendem até a câmara de visualização onde são obtidas imagens digitais das bolhas, sendo estas imagens processadas e analisadas em um computador em tempo real (online). Após, as bolhas são introduzidas na base da coluna de flotação através de uma câmara de injeção de bolhas. O controle automatizado do tamanho de bolha é realizado variando-se a dosagem (vazão) de tensoativo injetado na câmara de geração de bolhas em função da diferença entre o diâmetro de bolha medido e o diâmetro de bolha desejado ("set point"(...))



## SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO

### **Campo da invenção**

**[001]** A presente invenção compreende um sistema “*online*” de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolha para ensaios de flotação em coluna, em escala de bancada e/ou piloto. O invento representa um avanço para a realização de pesquisas sobre a flotação, pois determina, monitora e controla o tamanho de bolha durante a realização de ensaios piloto ou de bancada. Sua principal área de aplicação é a do processamento mineral, em especial a concentração de minérios e separação sólido-líquido por flotação.

### **Antecedentes da Invenção**

**[002]** O processo de flotação é amplamente utilizado na indústria mineral para separação seletiva (concentração) de minérios. Basicamente, o processo consiste na separação de partículas minerais (de tamanho micrométrico, tipicamente entre 10 e 200 micrômetros) via adesão a bolhas de ar (de tamanho milimétrico, normalmente entre 0,3 e 5 milímetros). Inicialmente o minério finamente cominuído é misturado com água (processo a úmido) para formação de uma polpa mineral, ou simplesmente polpa. Na polpa são adicionados reagentes surfactantes (denominados de coletores), entre outros, com a finalidade de tornar a superfície de determinadas espécies minerais hidrofóbicas, normalmente as espécies as quais se desejam flotar. Os demais minerais, normalmente os minerais sem valor econômico (ganga) permanecem com sua superfície hidrofílica. Esta polpa, ao passar pelo equipamento de flotação (células mecânicas ou colunas) recebe a injeção de ar na forma de bolhas. Os minerais hidrofóbicos aderem as bolhas de ar e são transportados até a superfície pelas mesmas, formando e acumulando-se em uma camada de espuma. Esta espuma pode ser removida da célula de flotação por raspagem e/ou transbordo natural, e deste modo, separam-se seletivamente os minerais. O desempenho do processo de flotação é impactado por diversos parâmetros relativos às fases envolvidas, como por exemplo, as vazões de sólido (minério), líquido (água) e ar, o tamanho das partículas e bolhas, entre outros. Apesar da

grande importância atribuída ao tamanho das bolhas no processo de flotação, poucos são os equipamentos disponíveis para esta análise, principalmente no que se refere a equipamentos de flotação destinados a estudos técnico-científicos em pequena escala, como os equipamentos de bancada e piloto. Em sua grande maioria são equipamentos invasivos e tecnicamente inviáveis para medição de tamanho de bolha em colunas de flotação de pequeno diâmetro, sendo aplicáveis somente em equipamentos de grande porte.

**[003]** Dentre os métodos empregados para determinação do tamanho de bolha o mais direto e comum é o fotográfico com processamento e análise de imagens digitais, usado diretamente ou para calibração de métodos alternativos. Neste caso, o tamanho, a forma geométrica e até mesmo a velocidade da bolha pode ser precisamente determinada se uma imagem nítida for obtida. A técnica para medição do tamanho de bolha em células de flotação por análise de imagens (fotografias e mais recentemente imagens digitais) obtidas em câmaras ou visores externos vem sendo bastante utilizada como ferramenta em trabalhos de pesquisas, sendo que já existem equipamentos disponíveis no mercado para esta finalidade. Tais equipamentos tratam da avaliação (somente medição) do tamanho de bolha em células piloto e industriais, das bolhas amostradas da zona de polpa, pelo topo de células (ou colunas) de flotação, ou seja, as câmaras operando com pressão interna negativa (similar ao princípio do Barômetro de Torricelli). O equipamento proposto utiliza o mesmo princípio para medição do tamanho de bolha, que é o da captura, processamento e análise de imagens digitais, entretanto, foram realizadas modificações quanto a sua aplicação para permitir a medição e controle “*online*” do tamanho de bolha geradas na base de colunas de flotação, entre outros equipamentos. Os equipamentos de flotação em coluna piloto (tipicamente de 1 a 4 polegadas), amplamente utilizados em pesquisas, principalmente na flotação de minérios, atualmente não possuem a medição, monitoramento e controle em tempo real do tamanho de bolha (normalmente geradas utilizando tubos porosos ou *spargers* comumente empregados para este fim). A medição, monitoramento e controle do tamanho de bolha servirão

para aumento do controle das condições operacionais dos ensaios de flotação, assim como maior entendimento e conhecimento do efeito da distribuição do tamanho de bolha no processo de flotação de diferentes minérios.

**[004]** Existem diversos equipamentos similares utilizados apenas para determinação (apenas medição) de tamanho de bolha em equipamentos industriais e pilotos de flotação de minérios baseados na análise de imagens digitais das bolhas obtidas em câmaras de visualização externa. Cita-se o equipamento desenvolvido pela McGill University (Hernandez-Aguilar et al. 2003 e 2004), HUT/Helsinki University of Technology (Grau e Heiskanen, 2002 e 2003) e o equipamento comercializado pela Stone Three (África do Sul) denominado de Anglo Platinum Bubble Sizer (<http://www.stonethreemining.com/products/bubble-sizer/>). Entretanto, estes equipamentos possuem aplicações em equipamentos industriais, visto que realizam uma amostragem de parte do fluxo de bolhas pela parte superior do equipamento de flotação, tipicamente através de um tubo amostrador que coleta (conduz) as bolhas desde o interior da polpa até a câmara de visualização externa. Deste modo, não podem ser aplicados em equipamentos de bancada ou piloto de pequeno porte, pois por serem invasivos, retiram parte do fluxo, além do fato de acumularem partículas sólidas no interior da câmara de visualização (fato inerente a amostragem do fluxo de agregados bolha-partículas), o que torna a obtenção de imagens por luz transmitida mais difícil a medida que o ensaio avança, sendo necessário paradas frequentes para limpeza da câmara de visualização.

**[005]** O presente invento se destina a medição, monitoramento e controle “online” de tamanho de bolhas por análise de imagens para ensaios de bancada ou piloto de flotação em coluna, tipicamente em colunas desde uma (01”) polegada até diâmetros de aproximadamente seis (06”) polegadas ou ligeiramente superior.

**[006]** No presente invento a medição não interfere na dinâmica do processo, visto que a medição e controle do tamanho de bolhas é realizada previamente a entrada das bolhas no equipamento de flotação (coluna de flotação) e o fluxo

de polpa, ou do material flotado, não passam pela câmara de visualização de bolhas, garantindo a mesma qualidade das imagens e operação de forma contínua. De forma alternativa, para reduzir o conteúdo de sólidos suspensos (partículas) na câmara de visualização, pode ser realizado uma recirculação da água contida na câmara de visualização de bolhas, coletando-se as partículas em uma garrafa ou filtro externo, caso a sua concentração venha a influenciar na qualidade das imagens. Também a injeção de água e/ou solução de tensoativo na câmara de geração de bolhas, em diferentes pontos, proporciona, além do controle mais rápido do tamanho de bolha, uma diminuição da entrada de partículas na câmara de visualização, principalmente das partículas coloidais, as quais ocasionam maior turbidez.

**[007]** O estado da técnica contempla poucos exemplos de sistemas de medição de tamanho de bolha por análise de imagens. Cita-se a patente **WO 2013/024198 AI, 21/02/2013, “Probe Arrangement for a Flotation Cell”**, essa invenção apresenta um método para medidas da altura (posição) de interfaces em tanques, entre outros equipamentos, contendo camadas de diferentes materiais, especialmente no processo de flotação para identificação da altura interface polpa-espuma, ou seja, do nível da polpa no interior do equipamento de flotação. O método utiliza uma sonda contendo diversos eletrodos, a qual, uma vez submersa e em contato com as camadas de diferentes materiais, aplicam-se e medem-se correntes ou voltagens elétricas através destes eletrodos, determinando-se a distribuição de condutividade do material e utilizando-se de modelos matemáticos para determinação do perfil vertical de condutividade através dos diferentes materiais. Deste modo, é possível a determinação da posição de interfaces formadas por materiais de diferentes condutividades, como a interface polpa-espuma (altura de polpa) no processo de flotação. Adicionalmente, esta invenção pode compreender uma câmara para monitorar a superfície da espuma em uma célula de flotação. Deste modo é possível avaliar o tamanho de bolha na superfície da camada de espuma, ou seja, no topo da célula de flotação, assim como eventuais distúrbios que a camada de espuma venha a sofrer. Neste caso, devido à coalescência das

bolhas na camada de espuma, estas são apenas um indicativo, não muito preciso e confiável, do tamanho das bolhas geradas no interior da célula (ou coluna) de flotação.

**[008]** Ainda o pedido **US5152175, 6/10/1992, “Bubble measurement cell”**, descreve uma célula de medição de bolhas, na qual fotografias das bolhas são obtidas através de uma câmara visualizadora inserida próximo a parede (lateral) de colunas de flotação, a qual deve possuir uma janela transparente para permitir a visualização das bolhas ao passarem por esta câmara visualizadora. Assim, este sistema é capaz de medir as bolhas (ou a mistura de bolhas e partículas) na zona de polpa, ou seja, próximo a parede, de uma coluna de flotação.

### **Sumário da invenção**

**[009]** O presente invento se destina para aplicação na medição, monitoramento e controle “*online*” do tamanho de bolha (distribuição de tamanho e diâmetro médio) para ensaios de flotação, piloto ou de bancada, com diâmetro desde aproximadamente 25 mm até aproximadamente 6 polegadas, ou ligeiramente superior.

**[010]** A medição do tamanho de bolhas é realizada via análise de imagens digitais, obtidas em uma câmara visualizadora, previamente a entrada das bolhas no equipamento de flotação (coluna de flotação), de modo que o fluxo de polpa ou do material flotado não passam pela câmara de visualização de bolhas, garantindo, assim, a qualidade das imagens e permitindo a operação de forma contínua por longos períodos de tempo (horas ou até mesmo dias).

**[011]** A trajetória realizada pelas bolhas desde a câmara de visualização (onde as imagens digitais são capturadas) até a sua entrada na coluna de flotação pode levar a coalescência de bolhas. Entretanto, este inconveniente é drasticamente minimizado se a concentração de tensoativo na câmara de geração de bolhas estiver acima da concentração crítica de coalescência, a qual é rapidamente obtida devido a difusão do tensoativo na câmara de geração de bolhas. O tensoativo escolhido para modificar o tamanho de bolha

deve ser cuidadosamente escolhido, de modo a não interferir em outras etapas do processo de flotação, dando preferência a tensoativos não iônicos.

**[012]** Tempos muito longos de operação podem dificultar a medida de tamanho de bolha quando há “contaminação” da câmara de visualização com partículas coloidais, o que pode ser controlado (eliminado) pela injeção de água e/ou solução de tensoativo na câmara de geração de bolhas. A entrada de partículas grossas (> 100 micrômetros) na câmara de visualização não interfere nas medidas, visto que as mesmas são coletadas em uma calha localizada no interior da câmara de visualização. Estas partículas podem ser removidas durante o ensaio, ou quando for necessário, através da recirculação da água da câmara e passagem por um filtro ou garrafa externos.

**[013]** É um objeto da presente invenção um sistema “*online*” de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolhas para ensaios piloto ou de bancada de flotação em coluna, adaptado na base da coluna de flotação, composto por:

1. Câmara de geração de bolhas;
2. Câmara de visualização para obtenção de imagens digitais das bolhas;
3. Câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação.

**[014]** Em uma realização preferencial a medição do tamanho de bolhas é realizada via análise de imagens digitais, obtidas em uma câmara visualizadora, previamente a entrada das bolhas no equipamento de flotação.

**[015]** Em outro aspecto, sendo, portanto, um adicional objeto da presente invenção, a utilização de coluna com diâmetros de 25 mm até 6 polegadas, sem restringir-se a essas medidas.

### **Descrição das Figuras**

**[016]** Figura 1 – Apresenta o esquema geral do sistema para medição, monitoramento e controle do tamanho de bolhas em coluna de flotação piloto, composto por:

- 1) câmara de geração de bolhas

- 2) câmara de visualização de bolhas
- 3) câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação
- 4) coluna de flotação
- 5) computador
- 6) câmara filmadora
- 7) lente de aumento ("zoom")
- 8) controlador de processos (CLP)
- 9) bomba dosadora de tensoativo (espumante)
- 10) cabo de comunicação da câmara fotográfica com o computador
- 11) cabo de comunicação do computador com o controlador de processos
- 12) cabo de comunicação do controlador de processos com a bomba dosadora de tensoativo
- 13) placa de iluminação (LED)
- 14) fonte de alimentação da placa de iluminação
  - a) fluxo de alimentação da coluna de flotação
  - b) fluxo do material flotado na coluna de flotação
  - c) fluxo do afundado (não-flotado) na coluna de flotação
  - d) fluxo de água de lavagem da coluna de flotação
  - e) fluxo de ar injetado na câmara de geração de bolhas
  - f) fluxo de tensoativo injetado na câmara de geração de bolhas

**[017]** Figura 2 – Representa uma perspectiva da câmara de geração de bolhas (geração de bolhas com tubo poroso), composto por:

- 15) corpo cilíndrico da câmara de geração de bolhas
- 16) Ponto para drenagem ou enchimento da câmara
- 17) Derivação para injeção de ar comprimido, ou de uma mistura de ar comprimido e tensoativo, para produção de bolhas
- 18) Derivação para injeção de água limpa ou de uma solução de tensoativo
- 20) corpo cônico da câmara de geração de bolhas

21) terminação tubular para acoplamento na câmara de visualização de bolhas

41) Derivação para injeção de água limpa ou de uma solução de tensoativo

g) fluxo de água (enchimento ou drenagem da câmara)

h) fluxo ascendente de bolhas

i) fluxo de ar comprimido ou mistura de ar comprimido e tensoativo para produção de bolhas

j) fluxo de água ou de solução de tensoativo

q) fluxo de água ou de solução de tensoativo

**[018]** Figura 2.1 – Apresenta um corte em perspectiva da câmara de geração de bolhas, composto por:

15) corpo cilíndrico da câmara de geração de bolhas

16) Ponto para drenagem ou enchimento da câmara

17) Derivação para injeção de ar comprimido, ou de uma mistura de ar comprimido e tensoativo, para produção de bolhas

18) Derivação para injeção de água limpa ou de uma solução de tensoativo

19) tubo poroso para geração de bolhas

20) corpo cônico da câmara de geração de bolhas

21) terminação tubular para acoplamento na câmara de visualização de bolhas

41) Derivação para injeção de água limpa ou de uma solução de tensoativo

g) fluxo de água (enchimento ou drenagem da câmara)

h) fluxo ascendente de bolhas

i) fluxo de ar comprimido ou mistura de ar comprimido e tensoativo para produção de bolhas

j) fluxo de água ou de solução de tensoativo

q) fluxo de água ou de solução de tensoativo

**[019]** Figura 2.2 – Apresenta um corte em perspectiva da câmara de geração de bolhas (geração externa das bolhas), composto por:

- 15) corpo cilíndrico da câmara de geração de bolhas
- 20) corpo cônico da câmara de geração de bolhas
- 21) terminação tubular para acoplamento na câmara de visualização de bolhas
- 22) bomba de recirculação
- 23) constritor de fluxo para geração de bolhas (podendo ser: um venturi, placa de orifício, válvula agulha, misturador estático ou outro elemento que produza um gradiente de pressão para o cisalhamento da mistura ar-água para geração de bolhas)
- 41) Derivação para injeção de água limpa ou de uma solução de tensoativo
  - g) fluxo de água (enchimento ou drenagem da câmara
  - h) fluxo ascendente de bolhas
  - k) fluxo contendo bolhas geradas externamente
  - l) fluxo de ar comprimido, ou de uma mistura de ar comprimido e tensoativo
  - m) fluxo de recirculação da solução de tensoativo da câmara de geração de bolhas
  - q) fluxo de água ou de solução de tensoativo
  - r) fluxo de água nova externa

**[020]** Figura 3 – Apresenta a câmara de visualização de bolhas, composta por:

- 24) janela de vidro da tampa anterior
- 25) tampa anterior
- 26) flange anterior
- 27) tubo para conexão com a câmara de injeção de bolhas
- 28) corpo principal (caixa) da câmara de visualização de bolhas
- 29) flange posterior
- 30) tubo para conexão com a câmara de geração de bolhas
  - h) fluxo ascendente de bolhas (entrada)

n) fluxo ascendente de bolhas (saída)

**[021]** Figura 3.1 – Vista explodida da câmara de visualização de bolhas, composta por:

- 24) janela de vidro da tampa anterior
- 25) tampa anterior
- 26) flange anterior
- 27) tubo para conexão com a câmara de injeção de bolhas
- 28) corpo principal (caixa) da câmara de visualização de bolhas
- 29) flange posterior
- 30) tubo para conexão com a câmara de geração de bolhas
- 31) janela de vidro posterior
- 32) rótula
- 33) *o'ring*
  - h) fluxo ascendente de bolhas (entrada)
  - n) fluxo ascendente de bolhas (saída)

**[022]** Figura 3.2 – Apresenta uma perspectiva da tampa anterior da câmara de geração de bolhas, mostrando a sua parte interna à câmara de visualização de bolhas, composta por:

- 24) janela de vidro da tampa anterior
- 25) tampa anterior
- 27) tubo para conexão com a câmara de injeção de bolhas
- 34) dispositivo guia de bolhas da tampa anterior
  - n) fluxo ascendente de bolhas (saída)

**[023]** Figura 3.3 – Apresenta uma perspectiva da tampa anterior da câmara de geração de bolhas com o sistema de coleta de partículas acoplado, mostrando a sua parte interna à câmara de visualização de bolhas, composta por:

- 24) janela de vidro da tampa anterior
- 25) tampa anterior
- 27) tubo para conexão com a câmara de injeção de bolhas
- 34) dispositivo guia de bolhas da tampa anterior

- 40) calha para coleta de partículas
- n) fluxo ascendente de bolhas (saída)

**[024]** Figura 3.4 – Apresenta um corte em perspectiva da tampa anterior da câmara de visualização de bolhas, composta por:

- 24) janela de vidro da tampa anterior
- 25) tampa anterior
- 27) tubo para conexão com a câmara de injeção de bolhas
- 34) dispositivo guia de bolhas da tampa anterior
- 40) calha para coleta de partículas
- r) trajetória do fluxo descendente de partículas

**[025]** Figura 4 – Apresenta uma perspectiva do dispositivo de injeção de bolhas na coluna de flotação, composto por:

- 35) câmara de expansão
- 36) derivação para saída do material afundado (não-flotado)
- 37) terminação tubular para acoplamento à câmara de visualização de bolhas
- 38) corpo cônico
- 39) terminação tubular para acoplamento à coluna de flotação
- f) fluxo de saída do material não-flotado
- n) fluxo de bolhas provenientes da câmara de visualização de bolhas
- p) fluxo de bolhas para a coluna de flotação

**[026]** Figura 4.1 – Apresenta um corte em perspectiva do dispositivo de injeção de bolhas na coluna de flotação, composto por:

- 35) câmara de expansão
- 36) derivação para saída do material afundado (não-flotado)
- 37) terminação tubular para acoplamento à câmara de visualização de bolhas
- 38) corpo cônico
- 39) terminação tubular para acoplamento à coluna de flotação
- f) fluxo de saída do material não-flotado
- n) fluxo de bolhas provenientes da câmara de visualização de bolhas

p) fluxo de bolhas para a coluna de flotação

**[027]** Figura 5 – Histórico de medição e monitoramento do diâmetro médio de bolha em função do tempo, para injeção contínua de tensoativo

**[028]** Figura 6 – Histórico do monitoramento e medição do diâmetro médio de bolha em função do tempo, com controle do tamanho médio de bolha ajustado para 2 mm, pela injeção (on-off) de tensoativo

**[029]** Figura 7 – Histórico de medição do diâmetro médio de bolha em função do tempo, com controle do tamanho médio de bolha pela variação da dosagem de tensoativo

**[030]** Figura 8 – Apresenta exemplos de típicas imagens capturadas durante a medição do tamanho de bolha. (A) sem tensoativo; (B) 3 mL/min. Concentração da solução mãe de DF250 = 800 mg/L.

### **Descrição Detalhada da Invenção**

**[031]** A presente invenção compreende um sistema “*online*” de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolha para colunas de flotação. O sistema é acoplado na base de colunas de flotação em escala de bancada ou piloto, sendo composto basicamente por 3 partes:

1. Câmara de geração de bolhas;
2. Câmara de visualização para obtenção de imagens digitais das bolhas;
3. Câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação.

**[032]** A Figura 1 apresenta um esquema geral do sistema de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolha. As bolhas geradas, de forma controlada, na câmara de geração de bolhas (1) ascendem até a câmara de visualização (2). Imagens digitais das bolhas são obtidas na câmara de visualização (2), utilizando uma câmera filmadora (6) acoplada a uma lente de aumento (7). As imagens digitais são processadas e analisadas em um computador (5) utilizando um software de análise de imagens, sendo a distribuição de tamanho de bolha e os diâmetros médios determinados imediatamente (*online*). Outro software, para gerenciamento de dados, ou o

mesmo utilizado para análise das imagens, é responsável pela gravação do histórico de dados e geração de tabelas e gráficos (monitoramento) de distribuição de tamanho e diâmetros médios, também de forma “*online*”. Após, as bolhas são introduzidas na base da coluna de flotação (4) através da câmara de injeção de bolhas (3). A coluna de flotação possui os fluxos característicos de entrada, que são: alimentação (a), água de lavagem (d) e ar comprimido (e) e os fluxos característicos de saída, que são: flotado (b) e não-flotado (c). O controle automatizado do tamanho de bolha é realizado variando-se a dosagem (vazão) de tensoativo (f) injetado na câmara de geração de bolhas (1) em função da diferença entre o diâmetro de bolha medido e o diâmetro de bolha desejado (“*set point*”). Para reduzir o tamanho de bolha o sistema de controle, implementado através de um controlador lógico programável (8) aumenta a dosagem (vazão de injeção) de tensoativo através de uma bomba dosadora (9) e para aumentar o tamanho de bolha o sistema de controle diminui (ou interrompe) a dosagem de tensoativo. Para o controle automatizado do tamanho de bolha foi utilizado um controlador de processos (8) e uma bomba dosadora (9) com controle de vazão externo através de um sinal analógico.

### **Câmara de geração de bolhas**

**[033]** A câmara de geração de bolhas (1) consiste de uma câmara tubular (15), podendo ou não possuir uma seção superior de formato cônico (20) (redução concêntrica) para adequar o diâmetro da terminação cilíndrica (21) para conexão à câmara de visualização das bolhas (2). A câmara de geração de bolhas (1) possui quatro orifícios que são destinados a entrada e/ou saída de fluidos (água, tensoativo, ar ou misturas água-ar). O orifício “17” destina-se a injeção de um fluxo de ar comprimido (i), ou então, misturas de ar comprimido e solução de tensoativo, através de um tubo poroso (19) para geração das bolhas. De forma alternativa, a geração de bolhas pode ser realizada via algum método externo, como por exemplo, através da recirculação de água utilizando-se uma bomba (22) e injeção de um fluxo de ar (L), sendo a mistura ar/água forçada a passar por uma constrição de fluxo (23) tipo placa de orifício,

misturador estático, “venturi”, válvula tipo agulha, entre outras singularidades que forneçam o cisalhamento necessário para “quebra” do ar sob a forma de bolhas. A geração de bolhas também pode ser realizada por injeção de água saturada com ar a pressões elevadas (tipicamente  $4 \text{ kgf/cm}^2$ ) para formação de microbolhas, típicas do processo de flotação por ar dissolvido. O emprego simultâneo de mais de um método de geração de bolhas também pode ser utilizado, principalmente quando o objetivo é a geração de uma distribuição de tamanho de bolha de grande amplitude (de poucos micrômetros até poucos milímetros). Através do orifício “18” é injetado água, ou uma solução de tensoativo, para evitar que sólidos (partículas) entrem na câmara de visualização, de modo que o fluxo “h” consiste de uma mistura de ar (bolhas) e água (solução de tensoativo). Através do orifício “18” também pode ser realizada a retirada do líquido quando se utiliza um método externo de geração de bolhas com recirculação de água da câmara e injeção da mistura ar/água através do orifício (17). O orifício (18) também pode ser utilizado para injeção de tensoativo quando, por exemplo, o mesmo não for injetado juntamente com o ar comprimido. De forma alternativa, pode-se também injetar uma solução de tensoativo (q) em uma derivação (41) acima do tubo poroso, quando o objetivo é diminuir a coalescência após a geração das bolhas, sem contudo diminuir o tamanho das mesmas. O orifício de drenagem da câmara de geração de bolhas (16) destina-se a drenagem e/ou enchimento da câmara.

#### **Câmara de visualização para obtenção das imagens digitais das bolhas**

**[034]** A câmara de visualização de bolhas (2) tem a função de expor as bolhas para obtenção de imagens digitais. A câmara possui duas janelas com vidro transparentes. A janela posterior (31) para provimento de iluminação e a janela anterior (24) para visualização-obtenção de imagens digitais das bolhas. As janelas são fixadas por meio de flanges (26 e 29), os quais são aparafusados no corpo principal da câmara (28). A câmara de visualização (2) possui uma entrada na parte inferior (25), para ingresso do fluxo de bolhas (h) gerados na câmara de geração de bolhas (2) e uma saída tubular (27) na parte superior da tampa anterior (25), para condução do fluxo de bolhas (n) até a câmara de

injeção de bolhas (3) localizada na base da coluna de flotação (4). A vedação é realizada utilizando-se anéis tipo *o'ring* localizados em canais no corpo da câmara (33). A iluminação é realizada pela janela posterior e na janela anterior são obtidas as imagens através de uma câmera filmadora (6). Com este modo de iluminação, conhecido como luz transmitida, ou seja, com o objeto em análise (fluxo de bolhas) localizado entre a fonte de luz e o dispositivo ótico (filmadora), se obtém imagens com excelente contraste. O corpo principal da câmara de visualização (28) possui as seguintes dimensões internas: 27 x 16,5 x 11 cm (altura x largura x profundidade). A câmara de geração de bolhas é conectada à câmara de visualização através de uma rótula (32) de 60 mm de diâmetro externo, confeccionada em aço inoxidável e com vedação por anéis em teflon, localizada na base (fundo inclinado) da câmara de visualização, permitindo assim o ajuste da inclinação da câmara de visualização. As modificações realizadas na câmara de visualização em relação às câmaras descritas na literatura são as seguintes:

1. Sistema externo de recirculação para coleta ou filtragem, para limpeza da água da câmara. O objetivo é manter a turbidez abaixo de níveis críticos que possam prejudicar a obtenção de imagens com contraste adequado a identificação dos objetos (bolhas) nas imagens capturadas e/ou coletar as partículas que adentrem na câmara de visualização e se depositem no sistema coletor de partículas (40);
2. Janela anterior da câmara com um sistema coletor de bolhas (34) para condução das mesmas até o orifício de saída (27) para injeção na coluna de flotação (4) através da câmara de injeção (3).
3. Janela anterior da câmara com sistema coletor de partículas (40) para coleta de partículas que porventura adentrarem na câmara de visualização de bolhas (2).
4. Operacionalmente, a injeção de água ou solução de tensoativo na câmara de geração de bolhas proporciona um fluxo ascendente de bolhas e solução de tensoativo que impedem a entrada de partículas

coloidais na câmara de visualização de bolhas, evitando a turvação da água.

**[035]** A janela posterior (31), constitui de uma placa de vidro, com espessura suficiente para resistir à pressão interna. A tampa anterior (25), confeccionada em nylon, possuía uma janela de vidro transparente (24) de 123 x 83 mm. Internamente à tampa anterior existe um sistema para coleta das bolhas (34) em formato de um “V” invertido (sistema coletor de bolhas). O coletor de bolhas (34) foi fabricado em nylon, com 20 mm de espessura e aparafusado internamente à janela anterior. A função do coletor de bolhas é conduzir as bolhas para o orifício de saída (direcionando as bolhas para a câmara de injeção) de forma menos turbulenta possível. O sistema coletor de bolhas (34) possui uma calha para coleta de partículas (40) acoplado ao mesmo, com a finalidade de coletar as partículas mais grossas que conseguirem adentrar na câmara de visualização de bolhas (2).

**[036]** As bolhas geradas na câmara de geração de bolhas (2) ao entrarem em contato com a janela anterior (24) da câmara de visualização (4) ascendem em contato com a mesma até o momento em que são conduzidas pelo coletor de bolhas (34) para o orifício de saída (27).

**[037]** O controle do tamanho de bolha pode ser feito de modo manual, ou seja, com a intervenção de um operador, o qual deve ajustar as condições do processo, como:

- i) vazão de solução de tensoativo injetado;
- ii) concentração da solução de tensoativo;
- iii) vazão de ar;
- iv) vazão de água injetada abaixo do borbulhador.

**[038]** Este procedimento visa adequar o tamanho de bolha medido, ou então, de forma automatizada, ou seja, utilizando um controlador de processos, no qual o valor de tamanho de bolha medido servirá de base comparativa a um valor pré-determinado (*set point*), caso o valor esteja acima ou abaixo do valor indicado o controlador irá atuar tendo sempre como alvo o valor pré-determinado (*set point*).

**[039]** A determinação do tamanho de bolha por análise de imagens digitais, obtidas em câmaras visualizadoras externas (inclinadas e horizontais), vem sendo cada vez mais utilizada em trabalhos de pesquisa e em medidas em equipamentos industriais de flotação (Chen et al., 2001; Grau e Heiskanen, 2002; Grau e Heiskanen, 2003; Hernandez-Aguilar et al, 2004.).

**[040]** A captura, processamento e análise das imagens digitais obtidas das bolhas foram automatizadas com auxílio de uma filmadora (6), uma placa de captura e um software de análise de imagens. Neste caso foram utilizados uma filmadora (progressive scan com resolução de 1024 x 768 pixels), acoplada à uma lente de zoom (7), uma placa de captura de vídeo e o software de análise de imagens. Com este sistema foi possível capturar e analisar aproximadamente 5 a 6 imagens a cada minuto. A iluminação do sistema foi realizada por uma placa de LED (13) de 10 x 10 cm. A maior área fotografada (campo de visão) foi de 44,1 cm<sup>2</sup> (7,67 x 5,75 cm), o que representa praticamente a totalidade da largura da janela anterior (24), e deste modo amostrando todo o fluxo de bolhas que passa através dela. A menor área fotografada depende da lente de aumento acoplada à câmera filmadora, mas como bons procedimentos em amostragem esta deve ser em torno de 10 vezes o tamanho dos objetos e amostrar a totalidade do fluxo, ou seja, toda a largura do fluxo de bolhas ascendentes, principalmente se este não for homogêneo.

**[041]** As principais etapas do processamento de imagens, para identificação e análise dos objetos, foram constituídas por etapas de conversão das imagens para tons de cinza (256 tons – 8 bits), limiarização (“threshold”), preenchimento do interior das bolhas (fill holes) e segmentação de objetos agrupados (“watershed”).

#### **Dispositivo de injeção das bolhas na coluna de flotação**

**[042]** A câmara de injeção de bolhas (3) se destina a injeção das bolhas na base de uma coluna de flotação e também possui a função de prevenir a entrada de partículas da polpa mineral (suspensão água + partículas de minério) na câmara de visualização de bolhas (2), assim como retirar a polpa mineral contendo o material não-flotado (c) do processo. Consiste de uma

câmara cilíndrica (35) com fundo inclinado a 45 %, onde, na parte mais inferior, se encontra a derivação (36) para retirada do fluxo de material não-flotado (c), prevenindo assim a sua sedimentação e acumulação no interior da câmara de injeção. A câmara de injeção de bolhas possui uma entrada inferior concêntrica (37) para entrada do fluxo de bolhas provenientes da câmara de visualização (2). Esta entrada inferior deve possuir o diâmetro próximo ao da coluna de flotação ao qual o sistema está acoplado, sendo que a variação deste diâmetro pode favorecer ou não a entrada de partículas na câmara de visualização. A seção superior da câmara de injeção de bolhas possui forma cônica (redução concêntrica) (38) e terminação em forma cilíndrica (39) de mesmo diâmetro da coluna de flotação ao qual será acoplada.

**[043]** Todos os acoplamentos entre as partes do sistema foram realizados através de uma junção elástica, tipo luva de silicone, permitindo o alinhamento entre as partes e diminuição de esforços.

**[044]** Neste invento os ensaios de flotação em coluna de bancada e/ou piloto são realizados com maior controle e reprodutibilidade, visto que o tamanho de bolha é um fator crítico determinante da eficiência do processo.

**[045]** Entre as vantagens inerentes a medição em tempo real (*on line*) do tamanho de bolhas destacam-se:

1. Maior consistência na operação e nos resultados metalúrgicos;
2. Histórico de dados de tamanho de bolha;
3. Alta frequência de medição;
4. Medidas precisas tornam possível o controle automatizado do tamanho de bolha ("*closed loop control*");
5. Monitoramento em tempo real da distribuição de tamanho de bolha e tamanho médio [a determinação do tamanho médio também permitirá o cálculo de outros parâmetros, como por exemplo, o fluxo superficial de bolhas (*bubble surface área flux* - "*Sb*")].
6. Maior reprodutibilidade dos resultados.

**[046]** A utilização deste sistema, além de permitir a medição do tamanho de bolha produzido no processo de flotação em coluna, em escala de bancada ou piloto em tempo real (*on line*), também se destina ao controle do tamanho de bolha realizado através da variação dos seguintes parâmetros:

- i) dosagem de tensoativo
- ii) vazão de ar
- iii) pressão
- iv) tipo de tensoativo
- v) vazão de recirculação (em sistemas de geração de bolha tipo placa de orifício ou *venturi*, entre outros parâmetros.
- vi) vazão de injeção de água abaixo do tubo poroso (borbulhador).

#### **Exemplo**

**[047]** Foram realizados ensaios acoplado-se o equipamento em uma coluna de flotação mini piloto de 27,5 mm de diâmetro interno e 200 cm de altura, confeccionada em vidro, conforme configuração apresentada na Figura 1. Para geração de bolhas utilizou-se um tubo poroso, fabricado em pó de aço inox sinterizado, com medidas externas de 15 x 30 mm (diâmetro x comprimento) e espessura de parede de 2,3 mm.

**[048]** Os ensaios realizados, até o momento, foram conduzidos somente com água, nas seguintes condições:

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Vazão de alimentação da coluna	100 mL/min
Vazão de água de lavagem	120 mL/min
Vazão de ar comprimido	100 mL/min
Vazão do afundado (não-flotado)	100 mL/min
Vazão de água injetada na câmara de geração de bolhas, abaixo do tubo poroso (borbulhador)	0 ml/min
Local de injeção da solução de tensoativo	Juntamente com o fluxo de ar comprimido no tubo poroso.
Tipo de tensoativo	Éter Metílico de Polipropilenoglicol (nome comercial: DF250)
Concentração da solução mãe de tensoativo	100 mg/L

[049] As Figuras 5, 6 e 7 apresentam o histórico de medição do tamanho de bolha (monitoramento e controle em tempo real) para as condições descritas acima. A Figura 5 apresenta um caso de medição da variação do diâmetro médio de bolha para injeção contínua de tensoativo. A dosagem de tensoativo foi de 5 mL/min de uma solução mãe de concentração igual a 100 mg/L. O tensoativo foi injetado juntamente com o ar comprimido no tubo poroso. O tamanho de bolha inicial, ou seja, antes do início da injeção de tensoativo, foi de aproximadamente 3,25 mm. Com a injeção contínua da solução de tensoativo, o diâmetro médio atingiu 1,5 mm após 45 minutos de operação e manteve-se praticamente constante até 90 minutos de operação. A Figura 6 apresenta a variação do diâmetro médio de bolha com o controle do tamanho de bolha em modo “*on-off*” de injeção do tensoativo. Toda a vez que o diâmetro médio de bolha foi superior a 2mm a bomba dosadora de injeção de tensoativo foi ligada automaticamente e quando o diâmetro médio de bolha atingiu valores inferiores a 2mm a bomba foi desligada automaticamente. Neste caso, foi possível controlar o tamanho médio de bolha com uma variação do diâmetro médio de  $2 \pm 0,25$  mm. A Figura 7 apresenta o histórico do diâmetro médio de bolha para diferentes dosagens de tensoativo. Neste exemplo foi adotada a seguinte sequência para vazão de dosagem de tensoativo: 0 - 3 - 5 - 10 - 5 - 3 e 0 ml/min. Foi possível observar que o sistema responde rapidamente, alterando o tamanho de bolha, quando a vazão de tensoativo é modificada. A Figura 8 apresenta imagens (tons de cinza) obtidas para diferentes tamanho de bolha; (A) 3,4 mm e (B) 1,5 mm.

### **Reivindicações**

1) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO, **caracterizado por** compreender um sistema online de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolha para colunas de flotação, sendo esse sistema acoplado na base de colunas de flotação e composto por três partes:

- i) Câmara de geração de bolhas;
- ii) Câmara de visualização para obtenção de imagens digitais das bolhas;
- iii) Câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação.

2) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO de acordo com o item i) da reivindicação 1, **caracterizado por:**

- a) câmara de geração de bolhas constituída de uma câmara tubular, podendo ou não possuir uma seção superior de formato cônico (redução concêntrica);
- b) possuir quatro orifícios que são destinados a entrada e/ou saída de fluidos (água, tensoativo, ar ou misturas água-ar); um orifício destinado a injeção de um fluxo de ar comprimido, ou então, misturas de ar comprimido e solução de tensoativo, através de um tubo poroso para geração das bolhas;
- c) através de outro orifício é injetado água, ou uma solução de tensoativo; através de outro orifício também pode ser realizada a retirada do líquido quando se utiliza um método externo de geração de bolhas com recirculação de água da câmara e injeção da mistura ar/água através de orifício;
- d) o orifício também pode ser utilizado para injeção de tensoativo abaixo do tubo poroso, quando o mesmo não for injetado juntamente com o ar comprimido;
- e) de forma alternativa, pode-se também injetar uma solução de tensoativo em uma derivação acima do tubo poroso, quando o objetivo

é diminuir a coalescência após a geração das bolhas, sem contudo diminuir o tamanho das mesmas;

f) o orifício de drenagem da câmara de geração de bolhas destina-se a drenagem e/ou enchimento da câmara.

3) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado por:**

a) de forma alternativa, a geração de bolhas pode ser realizada via algum método externo, através da recirculação de água utilizando-se uma bomba e injeção de um fluxo de ar, sendo a mistura ar/água forçada a passar por uma constrição de fluxo tipo placa de orifício, misturador estático, “venturi”, válvula tipo agulha, entre outras singularidades que forneçam o cisalhamento necessário para “quebra” do ar sob a forma de bolhas;

b) a geração de bolhas também pode ser realizada por injeção de água saturada com ar a pressões elevadas (tipicamente 4 kgf/cm<sup>2</sup>) para formação de microbolhas, típicas do processo de flotação por ar dissolvido;

c) O emprego simultâneo de mais de um método de geração de bolhas também pode ser utilizado, principalmente quando o objetivo é a geração de uma distribuição de tamanho de bolha de grande amplitude (de poucos micrômetros até poucos milímetros).

4) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO de acordo com o item ii) da reivindicação 1, **caracterizado:**

a) pela câmara possuir duas janelas com vidro transparentes;

b) por janelas fixadas por meio de flanges, os quais são aparafusados no corpo principal da câmara;

c) por possuir uma entrada na parte inferior, para ingresso do fluxo de bolhas gerados na câmara de geração de bolhas e uma saída tubular na parte superior da tampa anterior, para condução do fluxo de bolhas

até a câmara de injeção de bolhas localizada na base da coluna de flotação

d) a vedação é realizada utilizando-se anéis tipo *o'ring* localizados em canais no corpo da câmara;

e) a iluminação é realizada pela janela posterior e na janela anterior são obtidas as imagens através de uma câmera filmadora;

f) o corpo principal da câmara de visualização possui as seguintes dimensões internas: 27 x 16,5 x 11 cm (altura x largura x profundidade);

g) a câmara de geração de bolhas é conectada à câmara de visualização através de uma rótula de 60 mm de diâmetro externo, confeccionada em aço inoxidável e com vedação por anéis em teflon, localizada na base (fundo inclinado) da câmara de visualização.

5) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelas** modificações realizadas na câmara de visualização compreenderem também:

a) sistema externo de recirculação para coleta ou filtragem, para limpeza da água da câmara;

b) janela anterior da câmara com um sistema coletor de bolhas para condução das mesmas até o orifício de saída para injeção na coluna de flotação através da câmara de injeção;

c) janela anterior da câmara com sistema coletor de partículas para coleta de partículas que porventura adentrarem na câmara de visualização de bolhas;

d) a janela posterior, constitui de uma placa de vidro, com espessura suficiente para resistir à pressão interna;

e) a tampa anterior, confeccionada em nylon, possui uma janela de vidro transparente de 123 x 83 mm;

f) internamente à tampa anterior existe um sistema para coleta das bolhas em formato de um "V" invertido (sistema coletor de bolhas);

g) o coletor de bolhas é fabricado em nylon, com 20 mm de espessura e aparafusado internamente à janela anterior;

h) o sistema coletor de bolhas possui uma calha para coleta de partículas acoplado ao mesmo, com a finalidade de coletar as partículas mais grossas que conseguirem adentrar na câmara de visualização de bolhas.

6) SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO de acordo com o item iii) da reivindicação 1, **caracterizado por:**

a) consistir de uma câmara cilíndrica com fundo inclinado a 45 %, onde, na parte mais inferior, se encontra a derivação para retirada do fluxo de material não-flotado;

b) a câmara de injeção de bolhas possui uma entrada inferior concêntrica para entrada do fluxo de bolhas provenientes da câmara de visualização;

c) a entrada inferior deve possuir o diâmetro próximo ao da coluna de flotação ao qual o sistema está acoplado, sendo que a variação deste diâmetro pode favorecer ou não a entrada de partículas na câmara de visualização;

d) a seção superior da câmara de injeção de bolhas possui forma cônica (redução concêntrica) e terminação em forma cilíndrica de mesmo diâmetro da coluna de flotação ao qual será acoplada;

e) todos os acoplamentos entre as partes do sistema são realizados através de uma junção elástica, tipo luva de silicone, permitindo o alinhamento entre as partes e diminuição de esforços.

**Figuras**

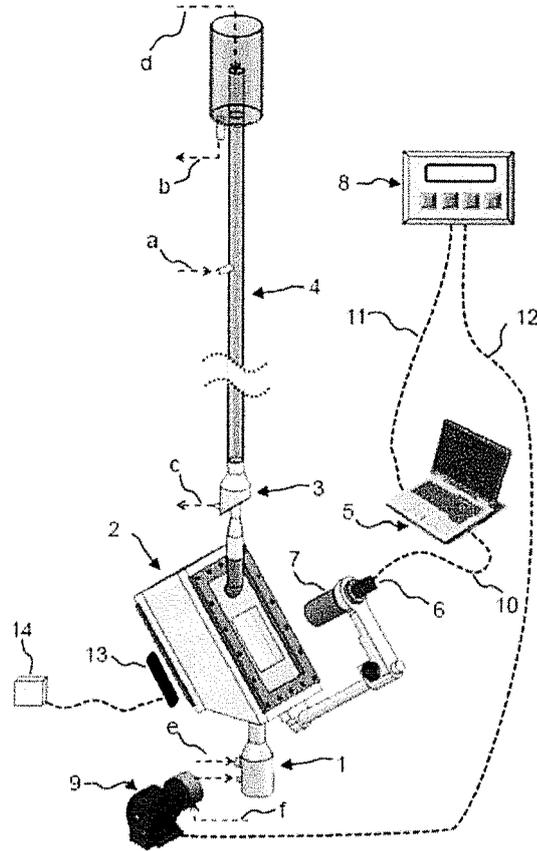


Figura 1

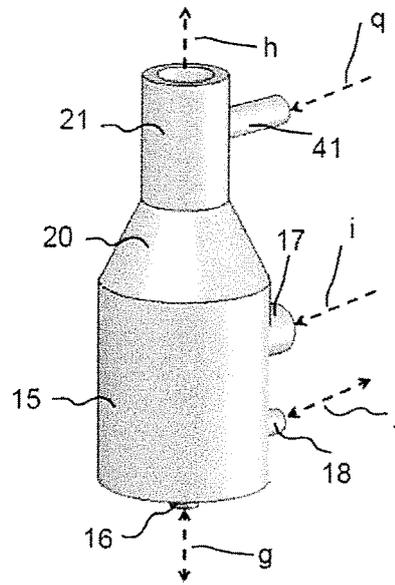


Figura 2

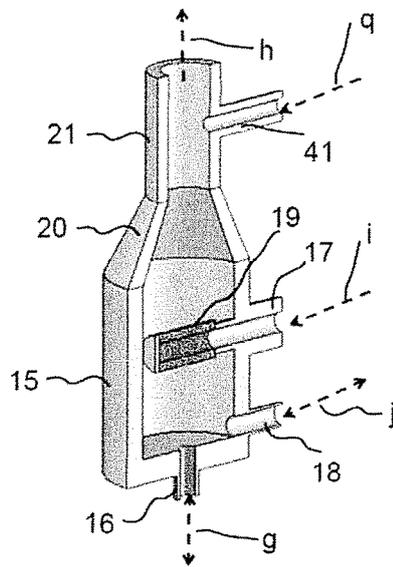


Figura 2.1

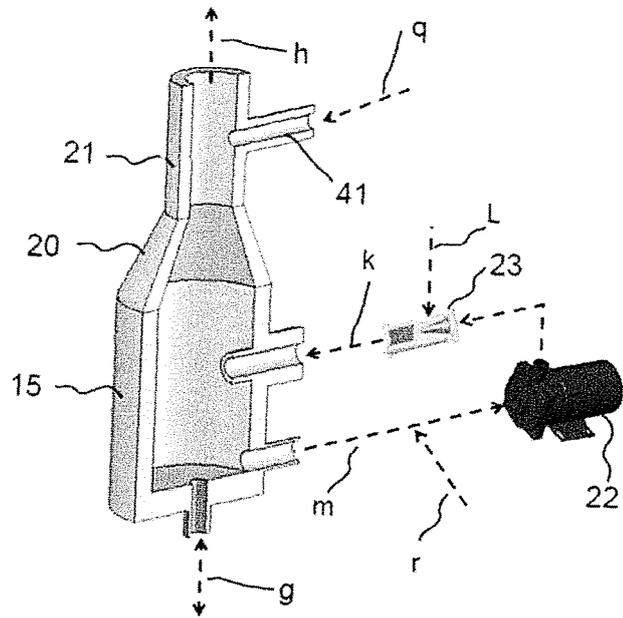


Figura 2.2

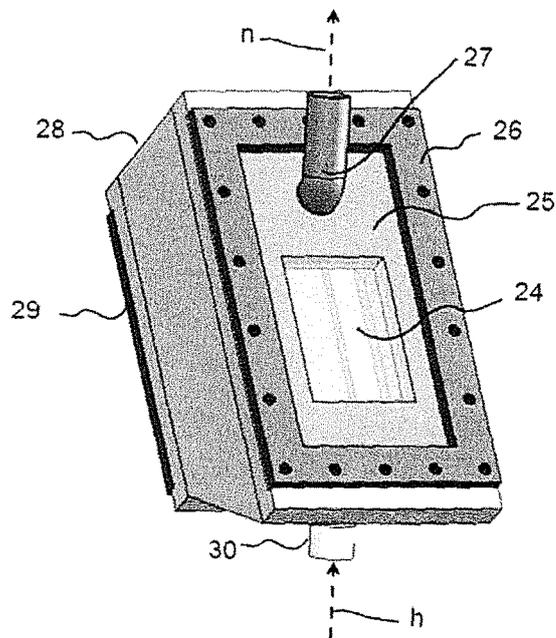


Figura 3

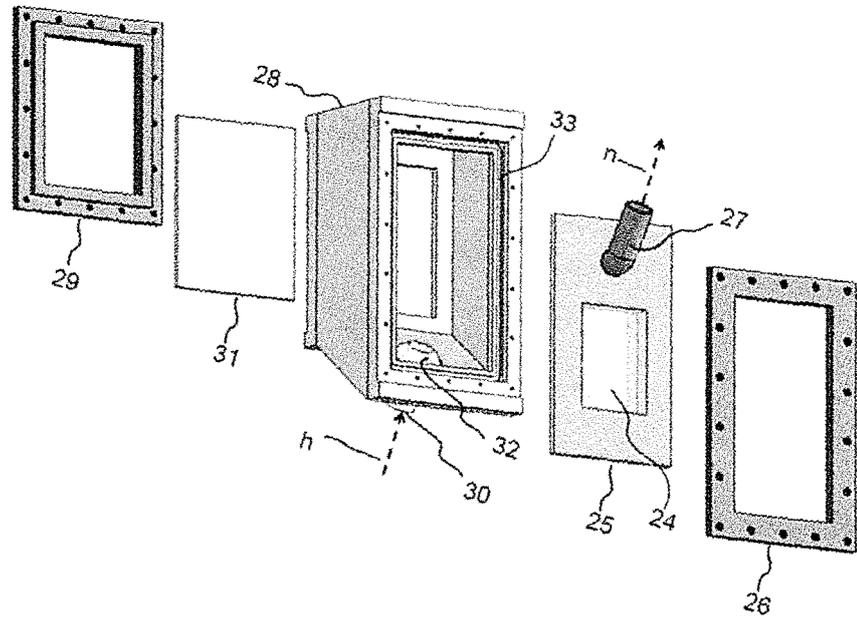


Figura 3.1

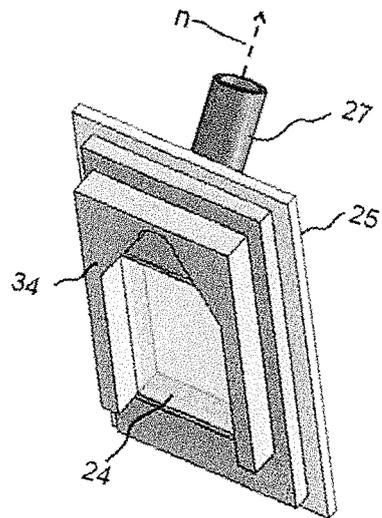


Figura 3.2

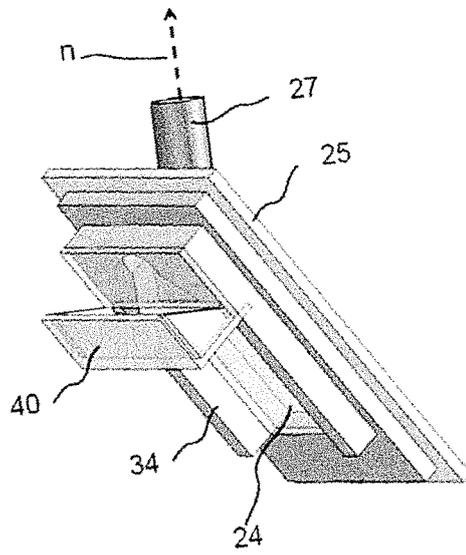


Figura 3.3

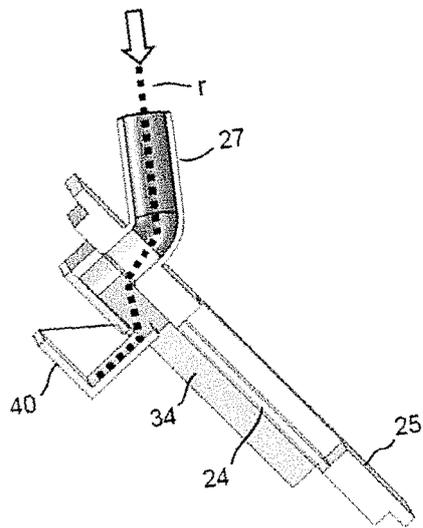


Figura 3.4

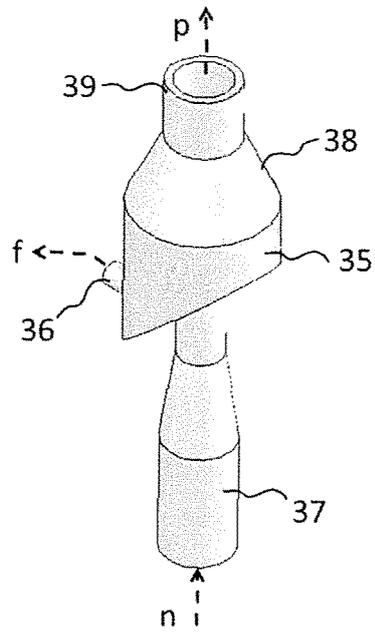


Figura 4

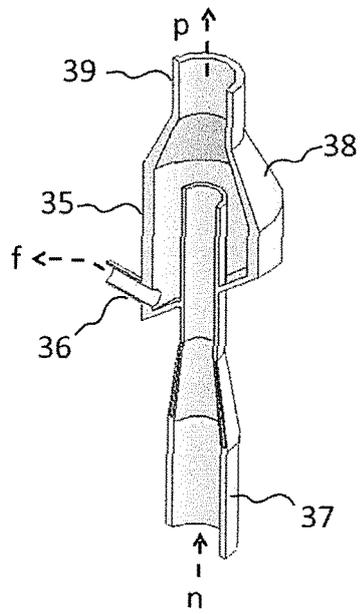


Figura 4.1

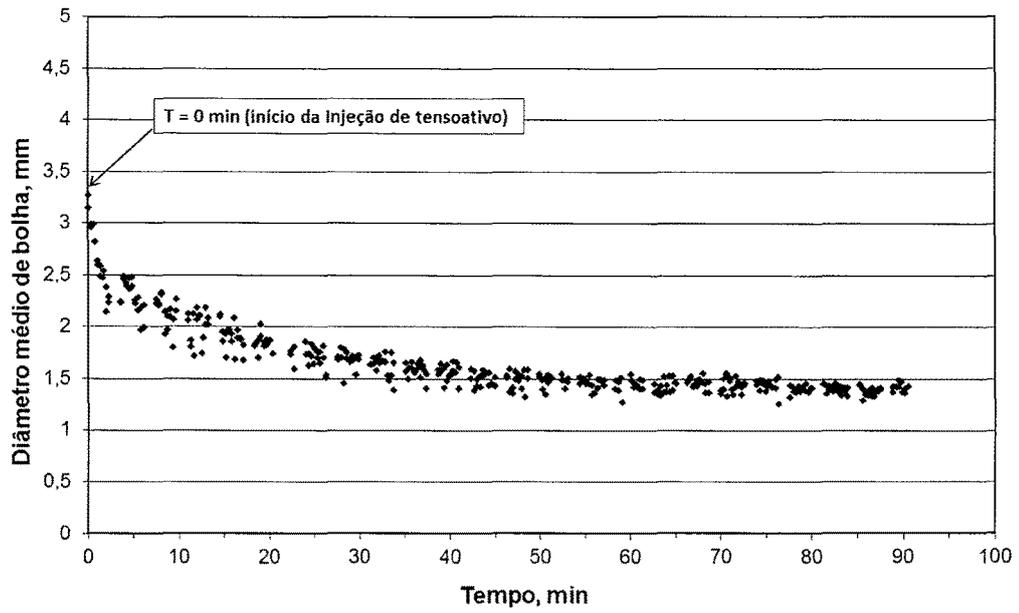


Figura 5

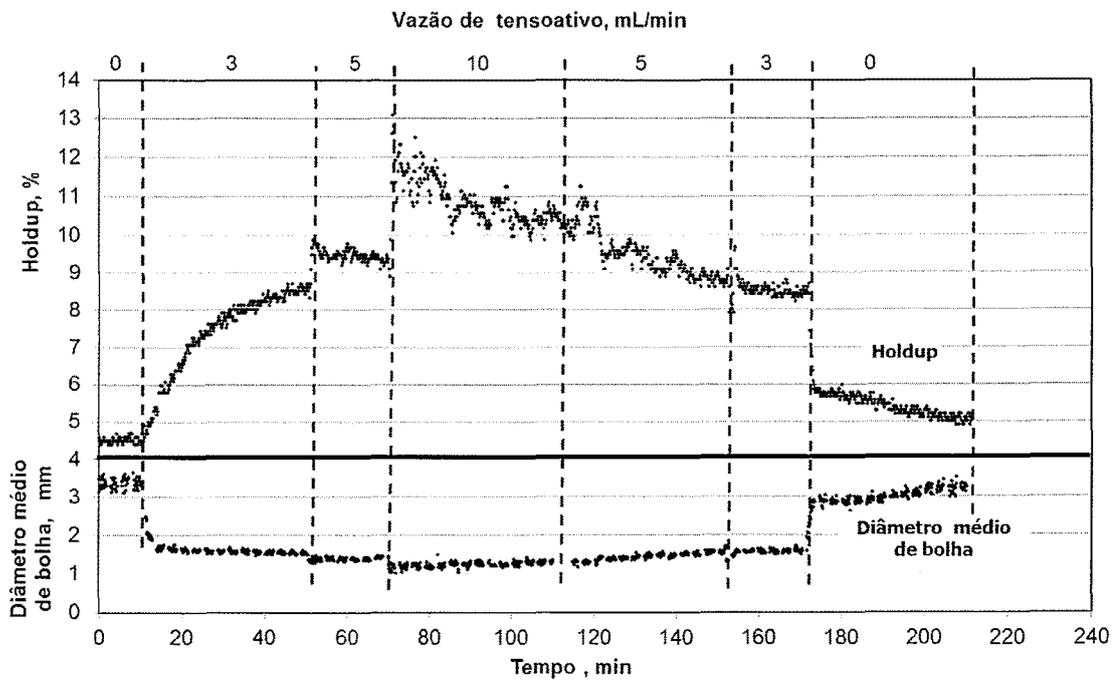


Figura 6

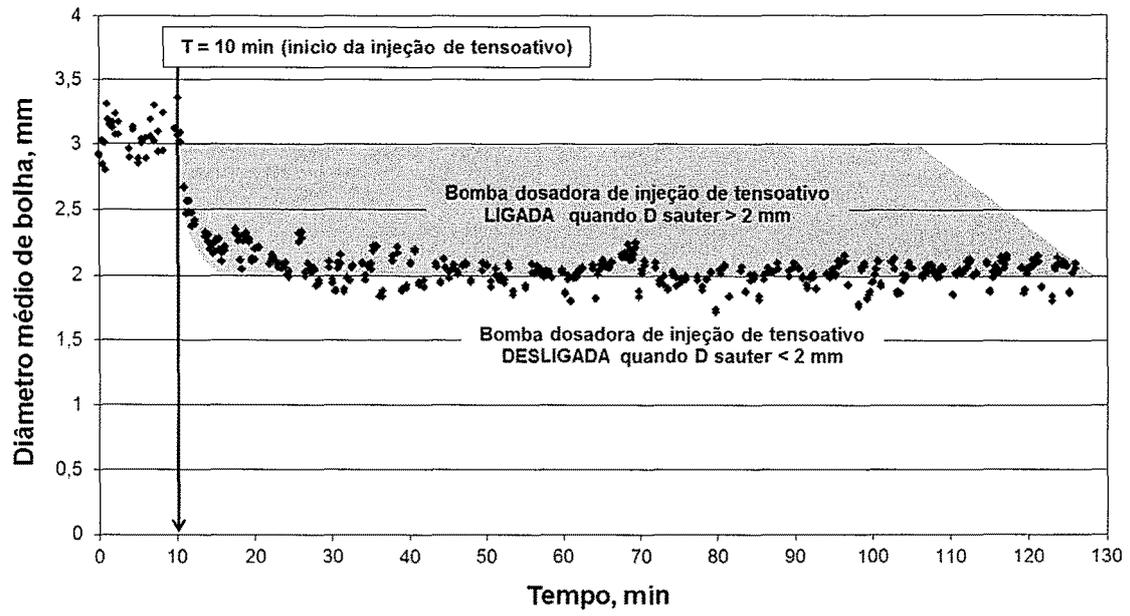


Figura 7

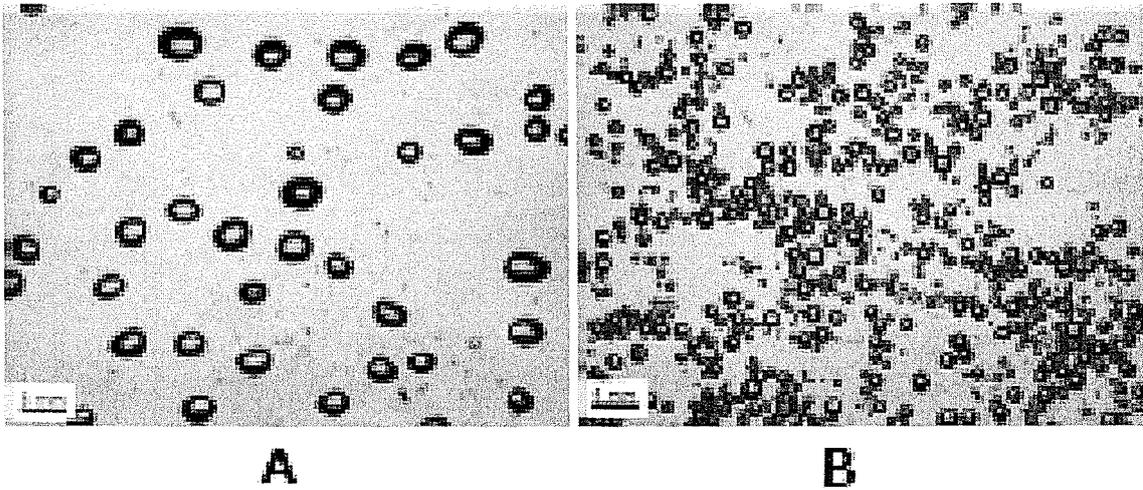


Figura 8

## **Resumo**

### SISTEMA PARA MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO

A presente invenção descreve um sistema “*online*” de medição, monitoramento e controle do tamanho de bolhas para ensaios piloto ou de bancada de flotação em coluna. Sua principal área de aplicação é a do processamento mineral. O sistema é acoplado na base de colunas de flotação, sendo composto basicamente por 3 partes: câmara de geração de bolhas; câmara de visualização para obtenção de imagens digitais das bolhas e câmara de injeção das bolhas na coluna de flotação. As bolhas geradas, de forma controlada, na câmara de geração de bolhas, ascendem até a câmara de visualização onde são obtidas imagens digitais das bolhas, sendo estas imagens processadas e analisadas em um computador em tempo real (*online*). Após, as bolhas são introduzidas na base da coluna de flotação através de uma câmara de injeção de bolhas. O controle automatizado do tamanho de bolha é realizado variando-se a dosagem (vazão) de tensoativo injetado na câmara de geração de bolhas em função da diferença entre o diâmetro de bolha medido e o diâmetro de bolha desejado (“*set point*”).