

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos com o estudo dos hidrociclones AKW ( $D_c = 10\text{mm}$ ), Bradley ( $D_c = 10, 20$  e  $30\text{ mm}$ ), e Krebs ( $D_c = 1/2\text{ in}$ ), na separação de leveduras *Saccharomyces cerevisiae*.

Para cada hidrociclone (AKW, Bradley de 10 e 20 mm e Krebs) foram realizados experimentos com três diferentes quedas de pressão (2, 4 e 6 atm), exceto para o hidrociclone de geometria Bradley com  $D_c = 30\text{ mm}$ , que devido à sua dimensão e capacidade da bomba disponível, só foi possível realizar ensaios a 2 atm. Todos os ensaios foram replicados totalizando nesta etapa 26 experimentos.

Com a finalidade de buscar uma comparação com os dados de eficiências alcançadas com as centrífugas tubulares na separação da levedura reportados na literatura (cerca de 85%), foram realizados ensaios experimentais com hidrociclones em série. Nessa etapa, foram efetuados 13 experimentos, considerando todas as configurações geométricas e quedas de pressão estudadas para hidrociclones individuais.

Buscando avaliar o desempenho da separação de leveduras em hidrociclones, numa situação mais próxima da condição industrial, foram realizados ensaios com mosto fermentado. Nessa etapa foram realizados testes de separação utilizando apenas o hidrociclone AKW (equipamento que mostrou ser o mais eficiente nos testes preliminares) a uma queda de pressão intermediária de 4 atm. Para permitir uma comparação mais precisa, entre os resultados obtidos para o mosto fermentado e da levedura dispersa em água, realizou-se ensaios nas mesmas condições de concentração, temperatura e queda de pressão, totalizando nesta etapa 2 experimentos.

Ao final dos ensaios experimentais foram realizados 41 testes de separação em hidrociclones.

#### 4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

Para a caracterização da distribuição de tamanho da levedura foram conduzidos ensaios de análise granulométrica no MasterSizer<sup>®</sup>. Fez-se inicialmente um conjunto de ensaios preliminares para encontrar as condições adequadas para realização das análises

granulométrica, considerando a necessidade de desfazer possíveis aglomerados e também a possibilidade de matar ou inviabilizar a levedura. A velocidade de rotação utilizada foi de 2800 rpm, para garantir uma boa homogeneização da amostra. A intensidade do banho ultrassônico foi de 10 (valor intermediário) por um tempo de 30 segundos.

A densidade da levedura utilizada, fornecida pelo fabricante é de  $1,10 \text{ g/cm}^3$ . A análise granulométrica típica para esta levedura, pode ser observada na Figura 4.1. O modelo utilizado para descrever a distribuição granulométrica do material particulado foi o proposto por Rosin-Rammler-Bennet (RRB) que apresentou bom ajuste (quadrado do coeficiente de correlação superior a 99,5%).

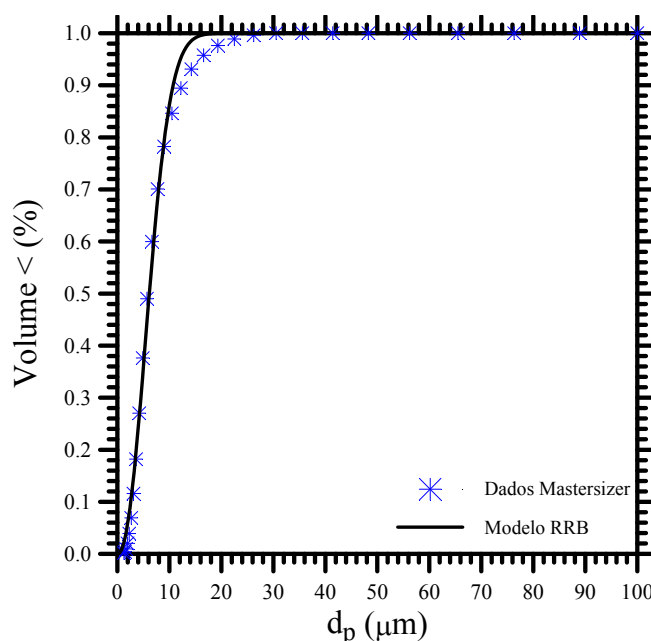


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica típica da levedura.

Observa-se claramente na Figura 4.1 que a distribuição granulométrica típica da levedura apresenta uma faixa de diâmetro volumétrico (esfera de mesmo volume) bastante estreita, no intervalo de 1,24 a 16,57  $\mu\text{m}$ .

## 4.2 – RESULTADOS HIDROCICLONES INDIVIDUAIS

### 4.2.1 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TOTAL

Na Tabela 4.1 são mostrados os resultados experimentais de vazão ( $Q$ ), concentração volumétrica ( $c_v$ ), eficiência total ( $E_T$ ), razão de líquido ( $R_L$ ) e eficiência total

reduzida ( $E'_T$ ), referentes a todos os hidrociclones e quedas de pressão estudados. A concentração de alimentação usada nestes ensaios foi de 0,25 % (massa) de fermento em água. A temperatura dos ensaios variou entre 27 e 30 °C.

Tabela 4.1 – Resultados de eficiência total para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.

| Hidrociclone | $D_c$ | $-\Delta P$<br>(atm) | $c_v$<br>(%) | $Q$<br>(cm <sup>3</sup> /s) | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) |
|--------------|-------|----------------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|
| AKW          | 10 mm | 2                    | 0,11         | 49,34                       | 54,90        | 47,00        | 14,80         |
|              |       | 4                    | 0,14         | 67,46                       | 58,40        | 46,20        | 22,80         |
|              |       | 6                    | 0,24         | 82,43                       | 61,00        | 50,60        | 21,10         |
| Bradley      | 10 mm | 2                    | 0,26         | 23,19                       | 44,90        | 35,70        | 14,30         |
|              |       | 4                    | 0,31         | 30,82                       | 45,10        | 34,50        | 16,30         |
|              |       | 6                    | 0,20         | 38,21                       | 49,70        | 34,50        | 23,0          |
|              | 20 mm | 2                    | 0,21         | 71,60                       | 39,00        | 36,40        | 4,10          |
|              |       | 4                    | 0,28         | 97,36                       | 40,00        | 39,10        | 1,50          |
|              |       | 6                    | 0,26         | 119,43                      | 45,10        | 34,20        | 16,50         |
|              | 30 mm | 2                    | 0,26         | 174,88                      | 34,60        | 30,00        | 6,40          |
|              |       | 4                    | 0,24         | 83,93                       | 29,40        | 25,40        | 5,40          |
|              |       | 6                    | 0,22         | 109,00                      | 33,80        | 25,90        | 10,60         |
| Krebs        | ½ in  | 2                    | 0,24         | 83,93                       | 29,40        | 25,40        | 5,40          |
|              |       | 4                    | 0,22         | 109,00                      | 33,80        | 25,90        | 10,60         |
|              |       | 6                    | 0,23         | 128,86                      | 35,80        | 26,40        | 12,80         |

Observa-se na Figura 4.2 a influência da pressão de operação na eficiência total para hidrociclones Bradley de 10 mm, AKW e Krebs. Os resultados mostram que, na faixa de pressão estudada, ocorre um incremento na eficiência total com o aumento da queda de pressão, o que já era esperado, pois à pressões mais elevadas, maior seria a taxa de descarregamento do sólido no orifício do *underflow*. A Figura 4.2 mostra ainda que o hidrociclone AKW apresentou maior eficiência total, seguido dos hidrociclones de geometria Bradley e Krebs, respectivamente. O mesmo comportamento não ocorre para a eficiência total reduzida, conforme ilustrado na Figura 4.4. O hidrociclone de geometria Bradley apresenta maior  $E'_T$  à queda de pressão de 6 atm, e nesse valor de queda de pressão ocorre uma diminuição na  $E'_T$  para o hidrociclone AKW, que também apresenta maiores  $E'_T$  à quedas de

pressão de 2 e 4 atm. A diminuição da  $E'_T$  para o hidrociclone AKW, pode ser explicada em virtude da alta razão de líquido (50,60%) alcançada para este equipamento à 6 atm.

Nas Figuras 4.3 e 4.5 observa-se que menores  $D_c$  acarretam maiores eficiências totais e totais reduzidas, com exceção do hidrociclone Bradley de  $D_c = 30$  mm que a uma queda de pressão de 2 atm apresentou maior eficiência total reduzida do que o hidrociclone de mesma geometria com  $D_c = 20$  mm.

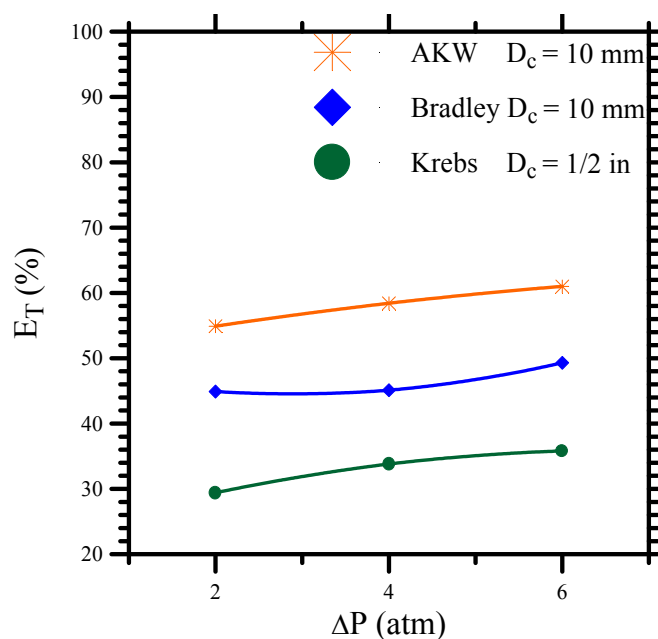


Figura 4.2 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total.

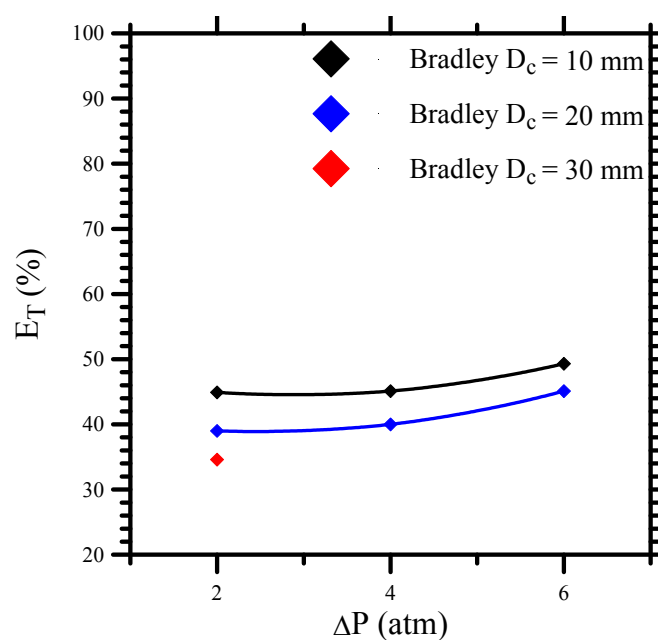


Figura 4.3 – Influência da queda de pressão e do  $D_c$  na eficiência total.

Conforme mencionado no Capítulo 3, para o hidrociclone de geometria Bradley ( $D_c = 30$  mm) foram realizados testes apenas para pressão de 2 atm, em virtude da capacidade da bomba disponível e do diâmetro do equipamento, o qual devido ao seu elevado diâmetro ( $D_c$ ) a maior queda de pressão obtida na unidade experimental foi de 2,8 atm. Desta forma não foi possível obter as curvas de eficiências de separação para este equipamento.

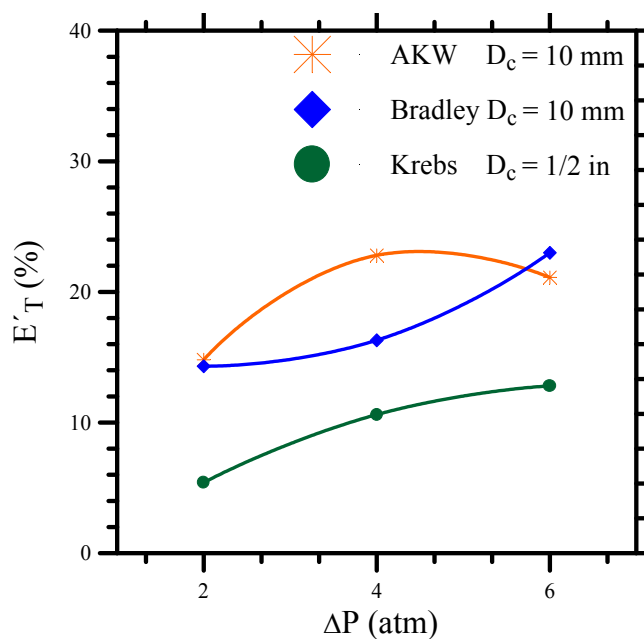


Figura 4.4 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total reduzida.

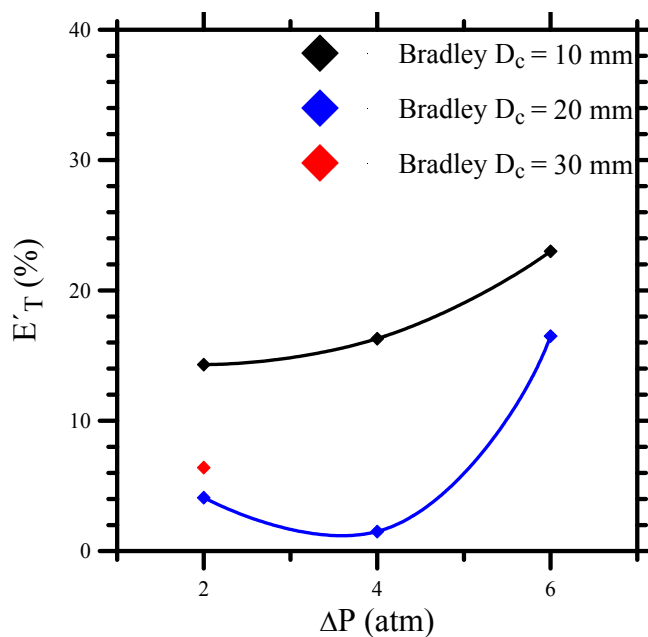


Figura 4.5 – Influência da queda de pressão e do  $D_c$  na eficiência total reduzida.

Os valores de eficiência total obtidos para o hidrociclone Bradley ( $D_c = 10$  mm) a uma pressão de operação de 2 atm ( $E_T = 45\%$ ) foram semelhantes aos resultados obtidos por MEDRONHO *et al* (2005 a) na separação de leveduras de *Saccharomyces cerevisiae*, com hidrociclone de mesma geometria, no qual alcançaram uma eficiência total de 46% operando a 2,1 bar.

#### 4.2.2 – INFLUÊNCIA DO HIDROCICLONE NA VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO

A Figura 4.6 ilustra o efeito do tipo do hidrociclone e da pressão de operação na capacidade de processamento. O hidrociclone Krebs ( $D_c = 1/2$  in) é maior e, conforme o esperado, apresentou maior capacidade de processamento quando comparado aos demais hidrociclones de menor diâmetro. Analisando os hidrociclones AKW e Bradley não seria possível prever qual apresentaria maior capacidade uma vez que ambos possuem o mesmo diâmetro, observou-se que o equipamento de geometria AKW apresentou uma capacidade duas vezes maior que o hidrociclone Bradley de igual  $D_c$ .

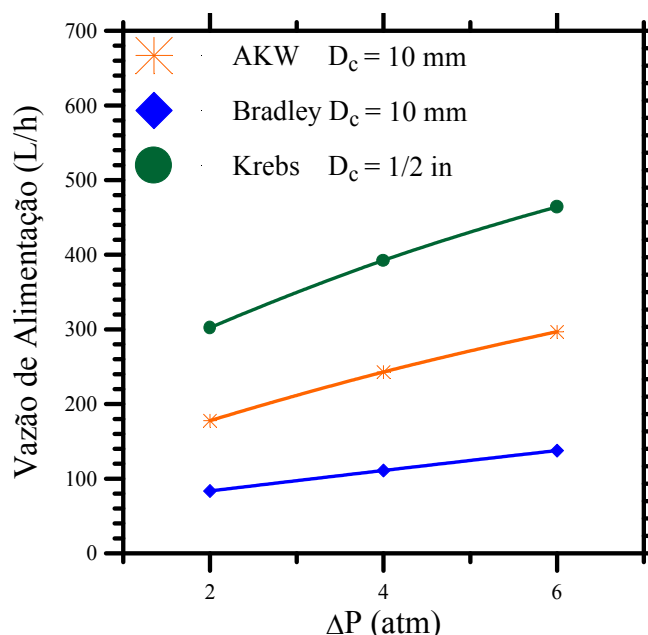


Figura 4.6 – Influência do tipo do hidrociclone na capacidade.

A uma queda de pressão de 6 atm, por exemplo, os hidrociclones de geometria Krebs, AKW e Bradley apresentam uma capacidade de operação de 464 L/h, 297 L/h e de 138 L/h, respectivamente.

Analisando os resultados obtidos o hidrociclone Krebs apresentou uma capacidade

uma vez e meia (1,5) maior que o AKW e três vezes maior que o de geometria Bradley.

Comparando os dados de capacidade de uma centrífuga tubular (cerca de 60000 L/h), estima-se um número cento e trinta hidrociclones Krebs, por exemplo, operando em paralelo a uma pressão de operação de 6 atm para obter a mesma capacidade de alimentação. Para o hidrociclone de geometria AKW o número de equipamentos em paralelo para obter capacidades iguais a de uma centrífuga tubular seria de duzentos e dois e para hidrociclones Bradley este número seria de quatrocentos e trinta e cinco equipamentos operando em paralelo a uma pressão de operação de 6 atm.

Na Figura 4.7 verifica-se a influência da dimensão característica ( $D_c$ ) e queda de pressão, para equipamentos de mesma geometria, na vazão de alimentação. Observa-se nesta figura que para equipamentos de mesma geometria os de maior diâmetro possuem maior capacidade de processamento o que já estava previsto.

Estima-se um número de três hidrociclones de geometria Bradley de  $D_c = 30$  mm operando em paralelo a 2 atm para obter a mesma capacidade de alimentação de uma centrífuga tubular.

Com relação à capacidade de processamento a utilização de vários mini hidrociclones operando em paralelo seria perfeitamente viável na substituição das centrífugas por hidrociclones, uma vez que este equipamentos apresentam menores custos de confecção, instalação e manutenção.

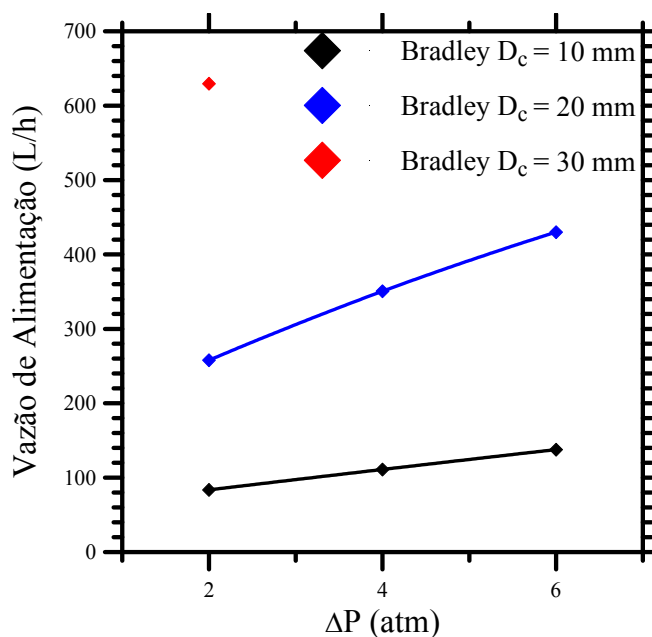


Figura 4.7 – Influência do  $D_c$  na capacidade do hidrociclone.

### 4.2.3 – CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE

A Tabela 4.2 mostra os valores dos diâmetros de corte ( $d_{50}$ ) e diâmetros de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) dos hidrociclones estudados. Observa-se nesta tabela que o valor do diâmetro de corte para o hidrociclone AKW a 6 atm não foi encontrado, pode-se concluir então que para este hidrociclone a esta queda de pressão todas os diâmetros de partículas apresentaram eficiências granulométricas maiores que 50%, com base na definição de diâmetro de corte.

Tabela 4.2 – Resultados de diâmetro de corte para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.

| Hidrociclone | $D_c$            | $-\Delta P$ (atm) | $d_{50}$ ( $\mu m$ ) | $d'_{50}$ ( $\mu m$ ) |
|--------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| AKW          | 10 mm            | 2                 | 6,13                 | 10,42                 |
|              |                  | 4                 | 6,17                 | 7,62                  |
|              |                  | 6                 | —                    | 8,28                  |
| Bradley      | 10 mm            | 2                 | 6,27                 | 7,40                  |
|              |                  | 4                 | 5,95                 | 6,96                  |
|              |                  | 6                 | 4,92                 | 6,42                  |
|              | 20 mm            | 2                 | 9,00                 | 10,36                 |
|              |                  | 4                 | 8,35                 | 9,92                  |
|              |                  | 6                 | 5,68                 | 6,13                  |
|              | 30 mm            | 2                 | 11,10                | 12,16                 |
| Krebs        | $\frac{1}{2}$ in | 2                 | 11,92                | 12,92                 |
|              |                  | 4                 | 9,23                 | 9,98                  |
|              |                  | 6                 | 8,72                 | 9,81                  |

Na Tabela 4.3 encontram-se os dados dos adimensionais obtidos experimentalmente (colunas 4, 5 e 7) e os valores calculados pelas correlações provenientes das Equações 2.22 e 2.23, propostas por CASTILHO; MEDRONHO (2000), válidas para os hidrociclones de geometria Bradley (colunas 6 e 8). Analisando estes resultados, observa-se que os valores dos adimensionais calculados pelas correlações e experimentalmente, apresentam valores da mesma ordem de grandeza para todos os hidrociclones Bradley.

Observa-se na Tabela 4.3 que os maiores valores de  $Re$  foram obtidos para os hidrociclones Krebs, AKW e Bradley, respectivamente e estes valores também foram maiores para quedas de pressão mais elevadas. Comparando hidrociclones de mesma geometria e diferentes diâmetros (Bradley) os maiores valores de  $Re$  foram obtidos para hidrociclones de maior diâmetro e todos os hidrociclones analisados apresentaram regime turbulento.

Tabela 4.3 – Valores dos adimensionais para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.

| Hidrociclone | $D_c$            | $-\Delta P$<br>(atm) | $Re$<br>(exp.) | $Eu$<br>(exp.) | $Eu$<br>Eq. (2.23) | $Stk_{50}Eu$<br>(exp.) | $Stk_{50}Eu$<br>Eq. (2.22) |
|--------------|------------------|----------------------|----------------|----------------|--------------------|------------------------|----------------------------|
| AKW          | 10 mm            | 2                    | 7393           | 1030           | —                  | 0,05                   | —                          |
|              |                  | 4                    | 10107          | 1102           | —                  | 0,04                   | —                          |
|              |                  | 6                    | 12350          | 1107           | —                  | 0,05                   | —                          |
| Bradley      | 10 mm            | 2                    | 3551           | 4661           | 5312               | 0,05                   | 0,04                       |
|              |                  | 4                    | 4718           | 5281           | 5900               | 0,07                   | 0,04                       |
|              |                  | 6                    | 5724           | 5153           | 6338               | 0,07                   | 0,05                       |
|              | 20 mm            | 2                    | 5247           | 7826           | 6138               | 0,06                   | 0,05                       |
|              |                  | 4                    | 7294           | 8464           | 6933               | 0,09                   | 0,05                       |
|              |                  | 6                    | 8947           | 8439           | 7477               | 0,04                   | 0,06                       |
|              | 30 mm            | 2                    | 7802           | 8322           | 7108               | 9E-5                   | 0,05                       |
| Krebs        | $\frac{1}{2}$ in | 2                    | 9902           | 926            | —                  | 0,05                   | —                          |
|              |                  | 4                    | 12860          | 1098           | —                  | 0,05                   | —                          |
|              |                  | 6                    | 15871          | 1179           | —                  | 0,06                   | —                          |

Observando as Figuras 4.8 e 4.10, nota-se que o hidrociclone Bradley apresenta menores valores de  $d_{50}$  e  $d'_{50}$ , seguido pelos hidrociclones AKW e Krebs, respectivamente. Para o hidrociclone AKW operando a pressão de 6 atm não foi possível calcular o diâmetro de corte ou de outra forma, todas as leveduras presentes na alimentação apresentaram eficiências superiores a 50%. Como tendência predominante nos resultados apresentados nessas figuras, nota-se que o diâmetro de corte, usualmente, diminui com o aumento da queda de pressão.

Observando atentamente as Figuras 4.9 e 4.11 nota-se que menores valores  $D_c$  resultam em menores  $d_{50}$  e  $d'_{50}$ , como exceção temos o Bradley,  $D_c = 20$  mm, que à pressão

de 6 atm, apresentou um  $d'_{50}$  menor que o Bradley,  $D_c = 10$  mm. Como foi mencionado anteriormente, a faixa granulométrica das leveduras é estreita e, esse fato se acentua quando operamos com escoamento caracterizado por elevados níveis de cisalhamento. Nessas condições as curvas de distribuição granulométrica das leveduras presentes nas correntes são praticamente verticais e, quaisquer eventuais desvios nos ajustes dos parâmetros dos modelos têm impacto direto no cálculo do diâmetro de corte. Essas peculiaridades podem explicar o fato do diâmetro de corte do Bradley de 20 mm ser menor que o 10 mm, operando a 6 atm.

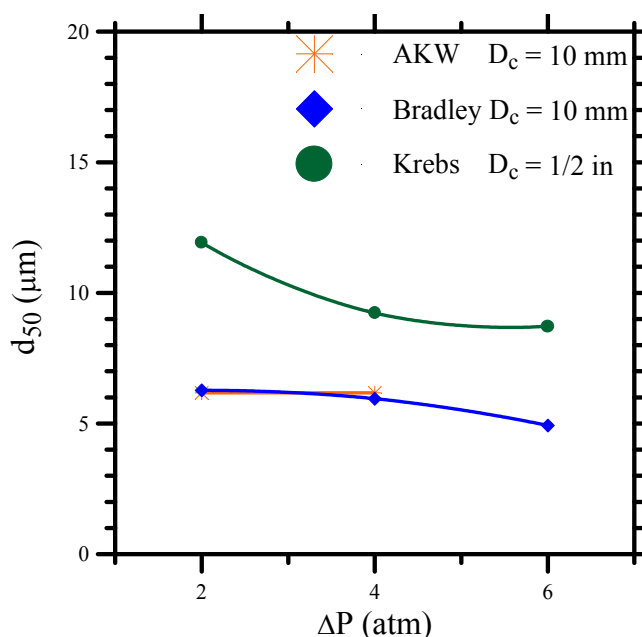


Figura 4.8 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone no diâmetro de corte.

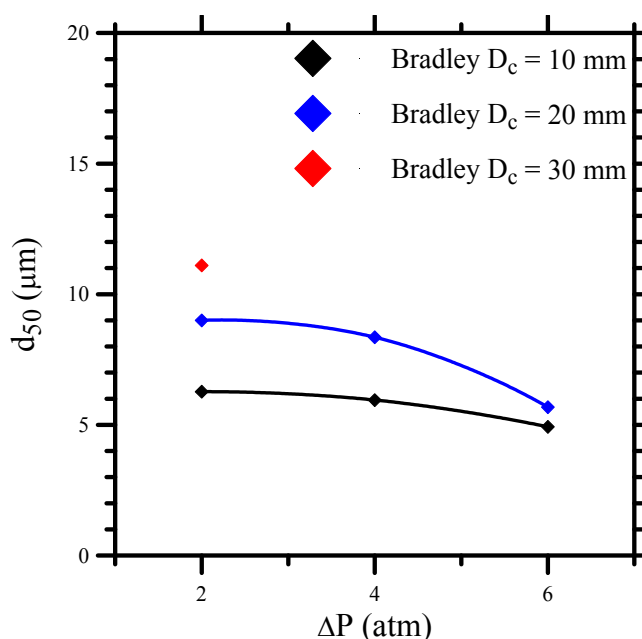


Figura 4.9 – Influência da queda de pressão e do  $D_c$  no diâmetro de corte.

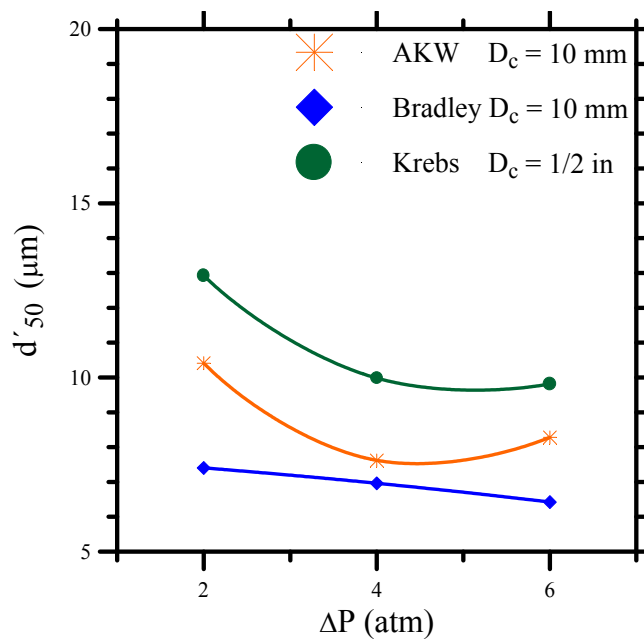


Figura 4.10 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone no diâmetro de corte reduzido.

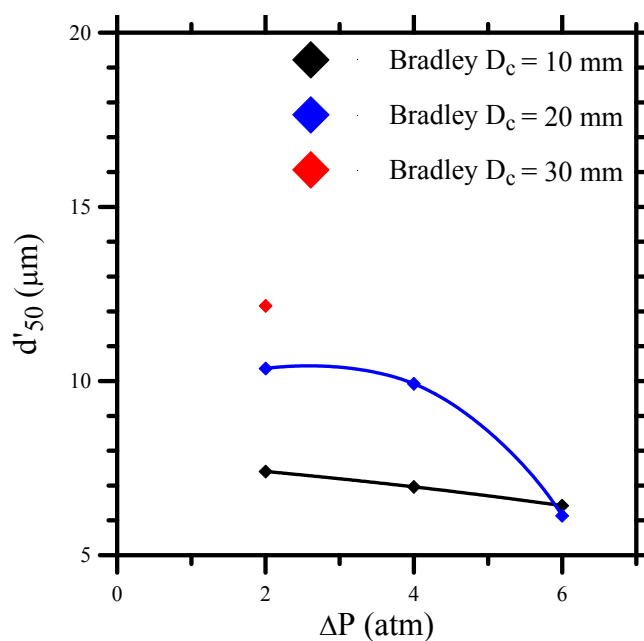


Figura 4.11 – Influência da queda de pressão e do  $D_c$  no diâmetro de corte reduzido.

#### 4.2.4 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA

Analisando a Figura 4.12 observa-se a influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência individual de coleta para leveduras com uma determinada dimensão. Para os hidrociclones AKW e Krebs e um diâmetro de levedura igual a  $2,28 \mu m$ , por exemplo, a eficiência granulométrica apresenta um pequeno incremento quando a pressão

de operação aumenta de 2 para 4 atm, seguida de pequena redução para pressão de 6 atm. Para o hidrociclone Bradley observa-se um comportamento inverso, ou seja, uma redução de eficiência de separação (levedura de  $2,28\ \mu\text{m}$ ) na pressão de 4 atm, seguida de um aumento a 6 atm. Desta forma, no que diz respeito à eficiência de coleta, cada diâmetro de levedura apresenta um comportamento diferente, dependendo do tipo ou geometria do separador e pressão de operação.

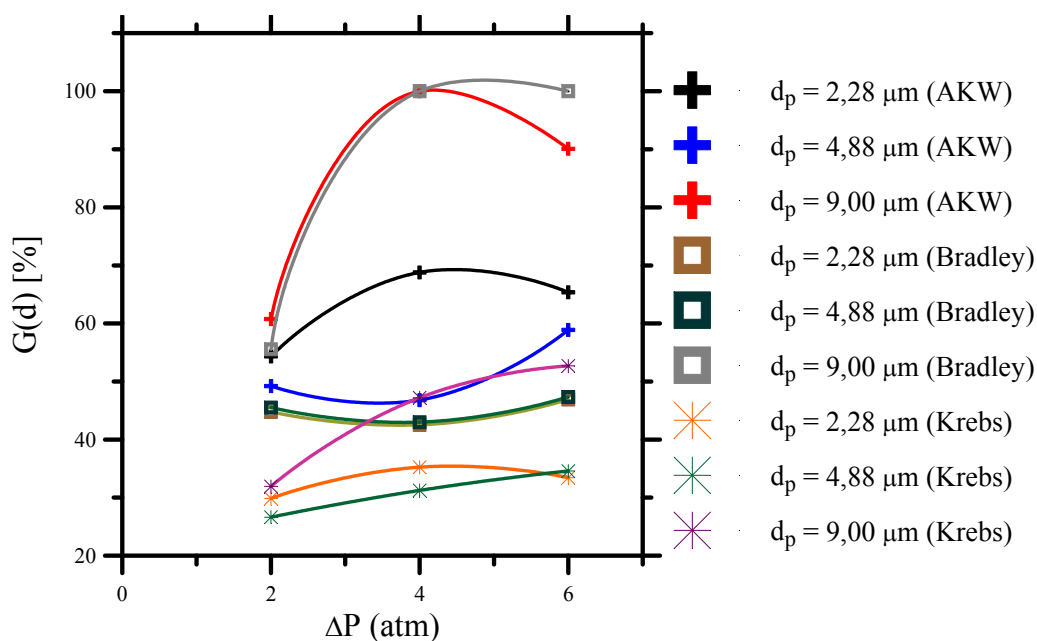


Figura 4.12 – Influência do tipo do hidrociclone e da queda de pressão na eficiência granulométrica.

A Figura 4.13 mostra a influência da pressão na eficiência granulométrica para o hidrociclone AKW. Observa-se que todas as curvas apresentam o efeito *fish hook*. Como foi relatado anteriormente, para esse tipo de hidrociclone operando a pressão de 6 atm, não foi possível calcular o diâmetro de corte. Com o propósito de apresentar uma tendência para essa condição (6 atm), optou-se por apresentar uma curva ilustrativa e, que na verdade se trata de uma extrapolação a partir do valor do diâmetro de corte reduzido obtido. A curva tracejada da Figura 4.13 foi obtida considerando uma variação linear do diâmetro de corte com a pressão. As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, mostram o efeito da pressão nas grades de eficiência para o hidrociclone Bradley de 10 mm, Bradley de 20 e 30 mm e Krebs, respectivamente. Nota-se nessas figuras que o denominado efeito *fish hook* é bem suave em determinadas condições e mais pronunciado em outras situações.

Analisando as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 observa-se que as maiores eficiência

granulométricas foram obtidas quando os hidrociclones foram operados a 6 atm. O que comprova o que foi avaliado em termos de eficiência total, que pressões mais elevadas geram maiores eficiências (total e granulométrica) e que no estudo de hidrociclones de mesma geometria e diferentes diâmetros os equipamentos de maior  $D_c$  geram menores eficiências totais e granulométricas.

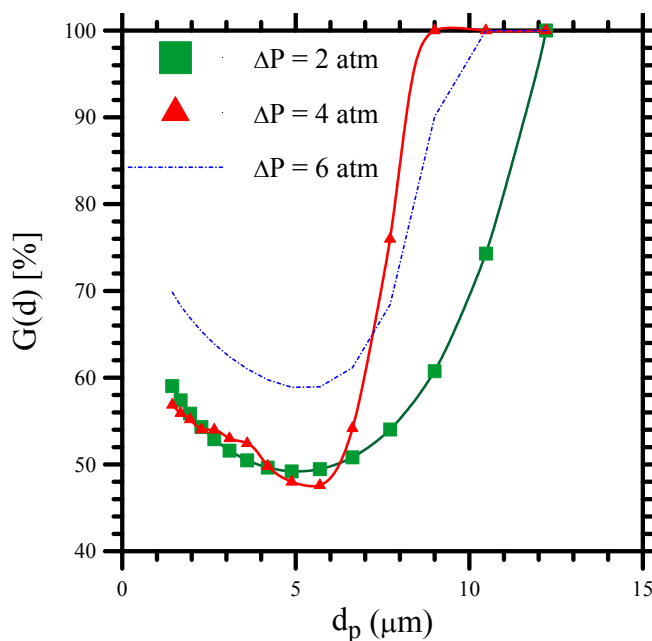


Figura 4.13 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica AKW.

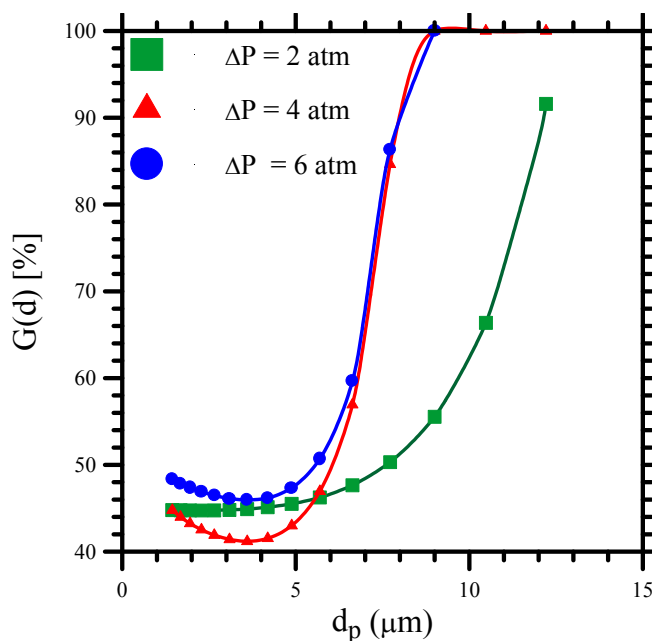


Figura 4.14 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Bradley  $D_c=10mm$ .

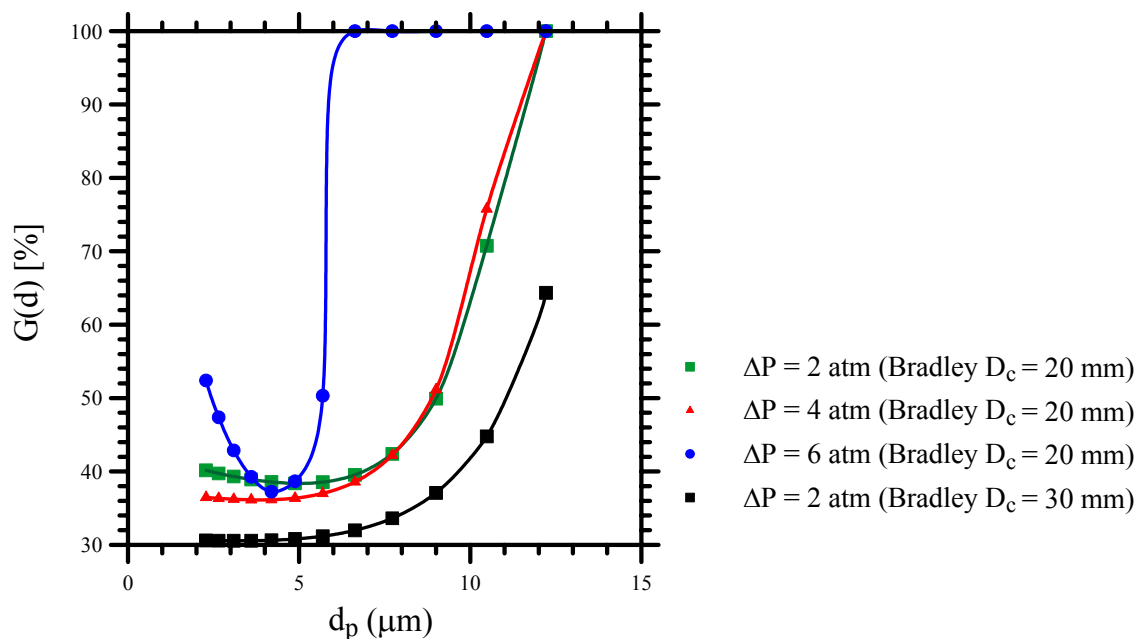


Figura 4.15 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Bradley,  $D_c = 20$  e 30 mm.

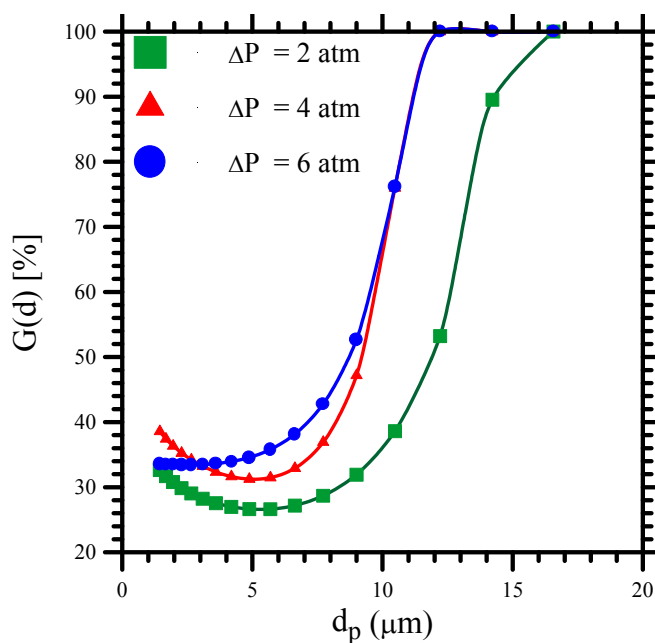


Figura 4.16 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Krebs.

Na Figura 4.17 observa-se a curva de eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro adimensional para o hidrociclone AKW. Nota-se que todas as curvas apresentaram o formato *fish hook*, sendo mais acentuado à pressão de 4 atm.

Na Figura 4.18 verifica-se que a curva de eficiência granulométrica reduzida apresenta o formato *fish hook* apenas para quedas de pressão de 2 e 4 atm para o hidrociclone Bradley

$D_c = 10$  mm. Por outro lado, para o hidrociclone Bradley ( $D_c = 20$  mm) na Figura 4.19 este formato é verificado em todas as quedas de pressão, sendo mais acentuado a 6 atm. Para a o hidrociclone Bradley de 30 mm este fenômeno não foi observado. Na curva de eficiência granulométrica reduzida obtida para o hidrociclone Krebs (Figura 4.20) o efeito *fish hook* é observado para as pressões de 2 e 4 atm, sendo este efeito mais acentuado a 2 atm.

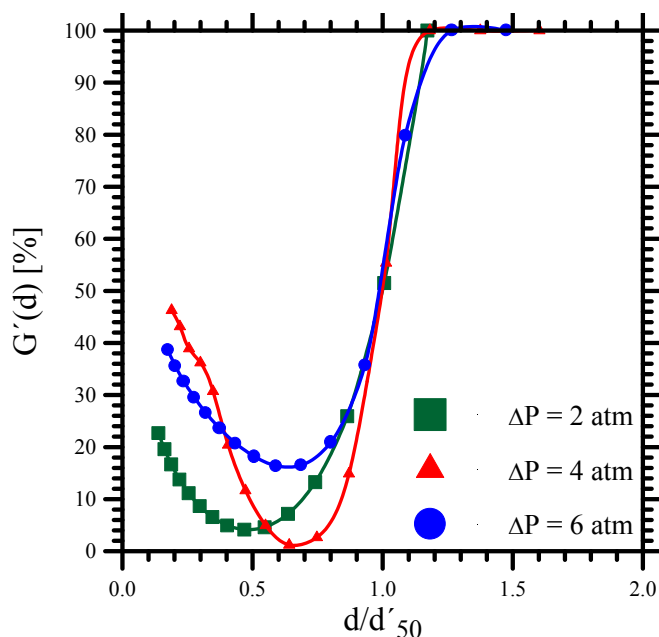


Figura 4.17 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida AKW.

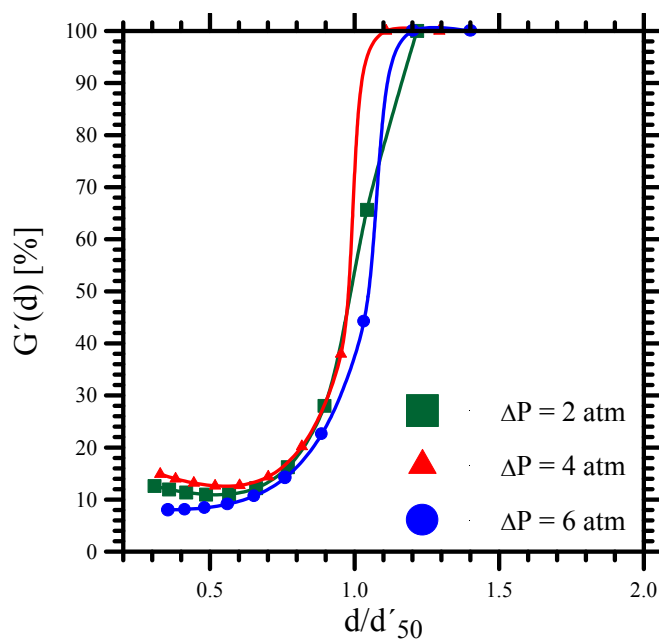


Figura 4.18 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Bradley  $D_c = 10$  mm.

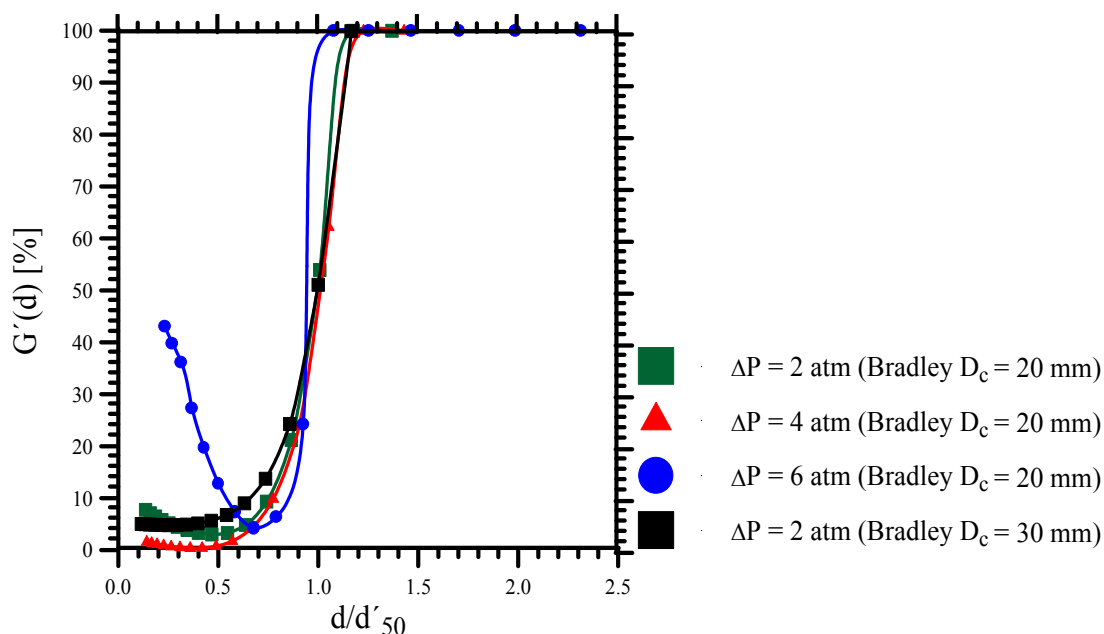


Figura 4.19 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Bradley  $D_c = 20$  e 30 mm.

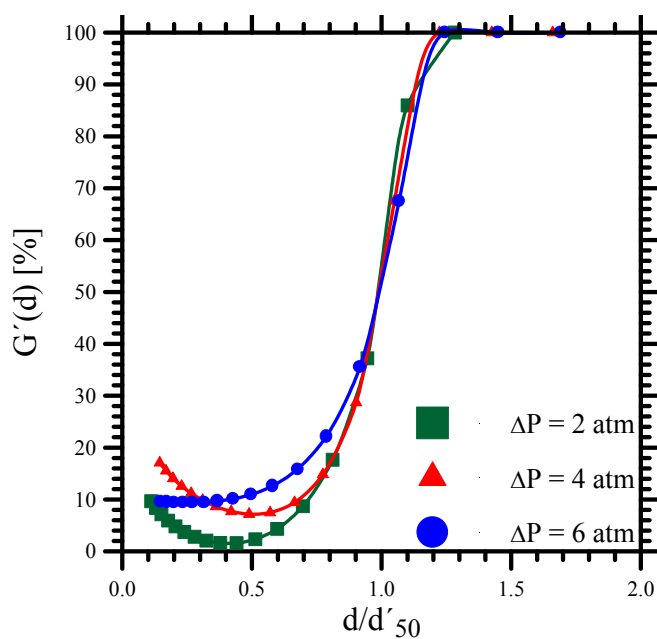


Figura 4.20 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Krebs.

#### 4.2.5 – TESTE DE REPRODUTIBILIDADE DOS RESULTADOS

Para se obter maior confiabilidade dos resultados, foram realizadas réplicas dos ensaios experimentais para os hidrociclones AKW, Bradley e Krebs, às pressões de 2, 4 e 6 atm. A Tabela 4.4 apresenta os valores encontrados para a razão de líquido no ensaio e na

réplica. Os valores obtidos nos ensaios e nas réplicas mostraram boa concordância, comprovando boa reprodutibilidade dos resultados experimentais obtidos.

Tabela 4.4 – Razão de líquido do ensaio e da réplica.

| Hidrociclone | D <sub>c</sub><br>(mm) | -ΔP<br>(atm) | Ensaio<br>(%) | Réplica<br>(%) | Média | Desvio<br>Médio<br>(%) | Desvio<br>Padrão |
|--------------|------------------------|--------------|---------------|----------------|-------|------------------------|------------------|
| AKW          | 10                     | 2            | 47,00         | 48,00          | 47,5  | 0,5                    | 0,707107         |
|              |                        | 4            | 46,20         | 46,00          | 46,1  | 0,1                    | 0,141421         |
|              |                        | 6            | 50,60         | 52,80          | 51,7  | 1,1                    | 1,555635         |
| Bradley      | 10                     | 2            | 35,70         | 36,10          | 35,9  | 0,2                    | 0,282843         |
|              |                        | 4            | 34,40         | 34,10          | 34,25 | 0,15                   | 0,212132         |
|              |                        | 6            | 34,30         | 34,40          | 34,35 | 0,05                   | 0,070711         |
|              | 20                     | 2            | 36,40         | 36,30          | 36,35 | 0,05                   | 0,070711         |
|              |                        | 4            | 39,10         | 36,90          | 38    | 1,1                    | 1,555635         |
|              |                        | 6            | 34,20         | 34,70          | 34,45 | 0,25                   | 0,353553         |
|              | 30                     | 2            | 30,20         | 31,80          | 31    | 0,80                   | 1,131371         |
| Krebs        | ½ in                   | 2            | 25,40         | 25,50          | 25,45 | 0,05                   | 0,070711         |
|              |                        | 4            | 25,90         | 26,70          | 26,3  | 0,4                    | 0,565685         |
|              |                        | 6            | 26,40         | 27,50          | 26,95 | 0,55                   | 0,777817         |

### 4.3 – RESULTADOS HIDROCICLONES EM SÉRIE

Com o objetivo de alcançar maiores eficiências de separação, foram realizados ensaios com hidrociclones em série, a partir de um ensaio experimental, no qual, foi possível efetuar a simulação física de dois hidrociclones em série. Tal procedimento foi detalhadamente descrito no item 3.4.2. do capítulo anterior. Nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 estão apresentados os dados experimentais para os hidrociclones AKW, Bradley e Krebs, respectivamente. Nestas tabelas são mostrados os resultados de  $E_T$ ,  $R_L$  e  $E_T'$  para as duas etapas de separação e para o conjunto, simulando operação com dois hidrociclones em série, conforme ilustrado na Figura 3.7 do capítulo anterior. A eficiência total do conjunto foi

calculada somando as frações de sólidos (etapa 1 e 2) obtidas no orifício do concentrado pela fração de sólidos alimentada.

Tabela 4.5 – Eficiência total para AKW em série.

| $-\Delta P$<br>(atm) | Etapa 1      |              |               | Etapa 2      |              |               | Conjunto     |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
|                      | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) |
| 2                    | 54,90        | 47,00        | 14,80         | 56,70        | 48,00        | 16,60         | 80,50        |
| 4                    | 58,40        | 46,20        | 22,80         | 59,60        | 46,00        | 25,30         | 83,20        |
| 6                    | 61,00        | 50,60        | 21,10         | 62,80        | 52,80        | 21,20         | 85,50        |

Tabela 4.6 – Eficiência total para Bradley em série.

| $D_C$<br>(mm) | $-\Delta P$<br>(atm) | Etapa 1      |              |               | Etapa 2      |              |               | Conjunto     |
|---------------|----------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
|               |                      | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) |
| 10            | 2                    | 44,90        | 35,70        | 14,30         | 46,30        | 36,10        | 15,90         | 70,40        |
|               | 4                    | 45,10        | 34,40        | 16,30         | 47,90        | 34,10        | 21,00         | 71,40        |
|               | 6                    | 49,70        | 34,60        | 23,20         | 49,90        | 34,40        | 23,50         | 74,80        |
| 20            | 2                    | 39,00        | 36,40        | 4,10          | 40,90        | 36,30        | 7,20          | 63,90        |
|               | 4                    | 40,00        | 39,10        | 1,50          | 42,10        | 36,90        | 8,20          | 65,30        |
|               | 6                    | 45,10        | 34,20        | 16,50         | 46,40        | 34,70        | 17,90         | 70,60        |
| 30            | 2                    | 34,60        | 30,20        | 6,40          | 33,90        | 31,80        | 4,50          | 56,80        |

Tabela 4.7 – Eficiência total para Krebs em série.

| $-\Delta P$<br>(atm) | Etapa 1      |              |               | Etapa 2      |              |               | Conjunto     |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
|                      | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $E_T$<br>(%) |
| 2                    | 29,40        | 25,40        | 5,40          | 30,30        | 25,50        | 6,40          | 50,80        |
| 4                    | 33,80        | 25,90        | 10,60         | 34,40        | 26,70        | 10,60         | 56,60        |
| 6                    | 35,80        | 26,40        | 12,80         | 36,00        | 27,50        | 11,80         | 58,90        |

Na Figura 4.21 observa-se os gráficos de eficiência total em série para os hidrociclones de geometria AKW, Bradley e Krebs. Assim como ocorreu para os hidrociclones individuais o hidrociclone AKW apresentou maiores eficiências totais, seguido pelos hidrociclones Bradley e Krebs, respectivamente. Na Figura 4.22 observa-se que equipamentos de maior diâmetro apresentam também menores eficiências totais em série, quando comparados a equipamentos de mesma geometria e menores diâmetros.

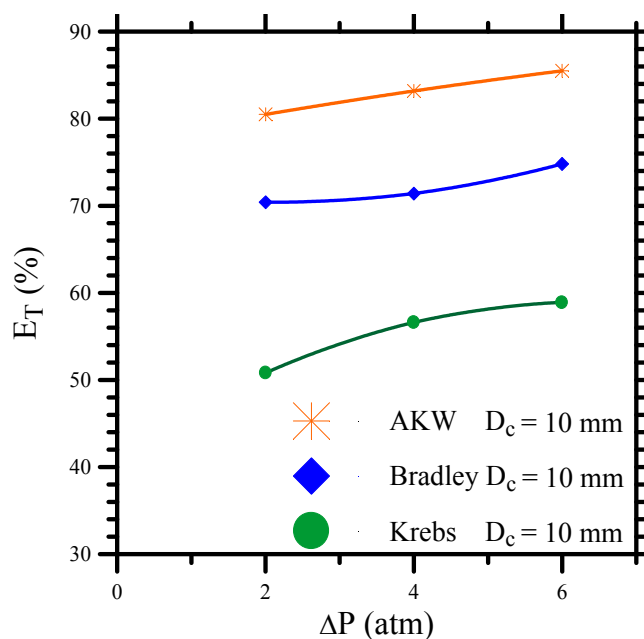


Figura 4.21 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total para hidrociclones em série.

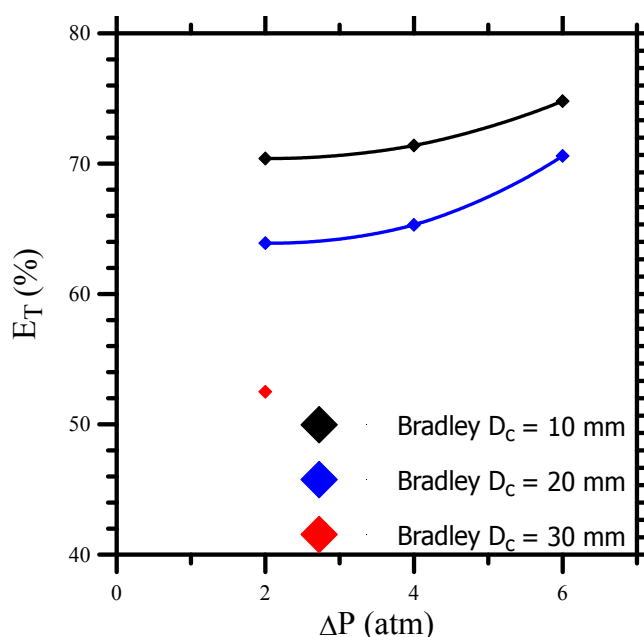


Figura 4.22 – Influência da queda de pressão e do  $D_c$  na eficiência total para hidrociclones em série.

Comparando a Figura 4.22 (hidrociclones Bradley em série) e a Figura 4.3 (hidrociclones Bradley individuais) observa-se que ambas apresentaram a mesma tendência, ou seja, um crescimento praticamente linear da eficiência total com o incremento da pressão, o hidrociclone Bradley de  $D_c = 30\text{mm}$ , por exemplo, a eficiência total é aumentada de 35%, quando o hidrociclone é operado individualmente para 57% quando o mesmo equipamento é operado em série. O hidrociclones Bradley de  $D_c = 20\text{mm}$  a uma queda de pressão de 6 atm tem sua eficiência total aumentada de 45 para 71%, quando operado em série.

Fazendo uma comparação dos melhores resultados de eficiência total obtidos para os hidrociclones em série (86% para AKW e 75% para Bradley, ambos operando a 6 atm), observou-se resultados bastante similares daqueles obtidos por centrífugas tubulares industriais operando em série (85%).

#### 4.4 – EFEITO DA PRESSÃO NA GRANULOMETRIA DA LEVEDURA

Nas Figuras 4.23, 4.25, 4.27 e 4.29 observou-se o efeito da pressão na distribuição granulométrica do *underflow* para os hidrociclones operando individualmente. A pressão de operação exerce influência na distribuição de tamanho das leveduras, pois a faixa de distribuição granulométrica é maior para 2 atm. A intensidade do cisalhamento presente no escoamento da mistura pode explicar esse efeito. Os aglomerados de leveduras foram desfeitos quando os testes foram realizados a pressões maiores.

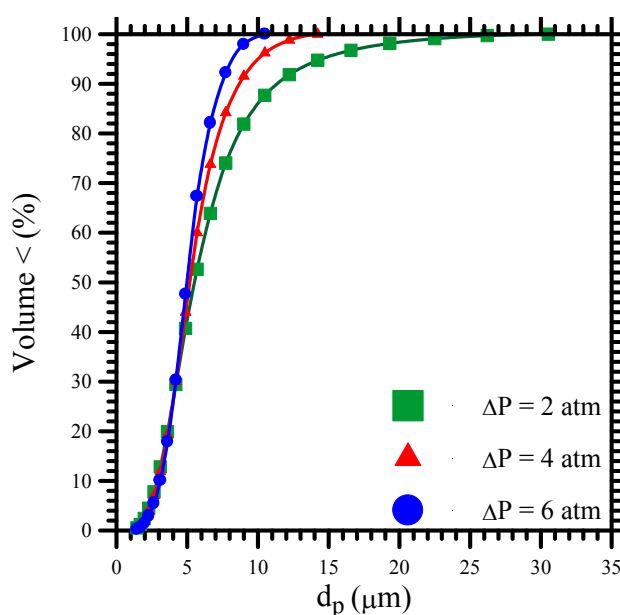


Figura 4.23 – Distribuição granulométrica do *underflow* (AKW individual).

Para hidrociclones em série, a faixa de diâmetro das leveduras recolhidas no *underflow* da etapa 2 é mais estreita e praticamente independente da pressão de operação, como mostram as Figuras 4.24, 4.26, 4.28 e 4.30. Dois efeitos podem explicar essas características da distribuição granulométrica: alimentação da etapa 2 é proveniente do *overflow* da etapa 1 (presença de partículas mais finas nesta etapa) e o efeito da intensidade do cisalhamento imposta à suspensão após duas etapas de separação.

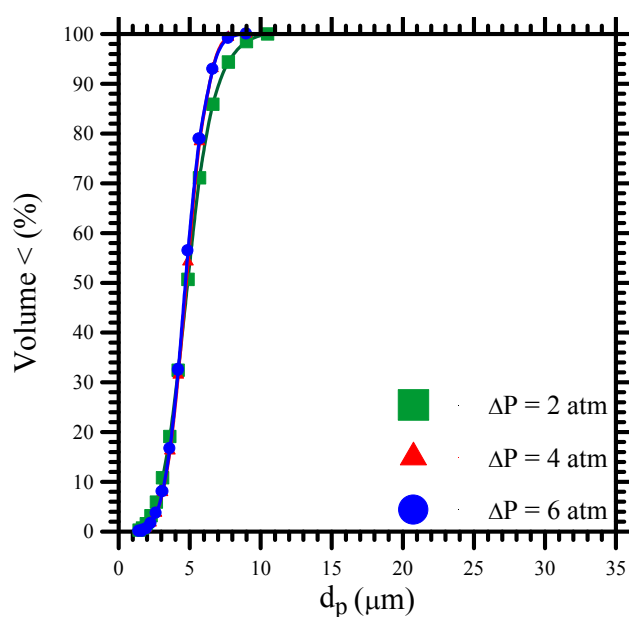


Figura 4.24 – Distribuição granulométrica do *underflow* da etapa 2 (AKW em série).

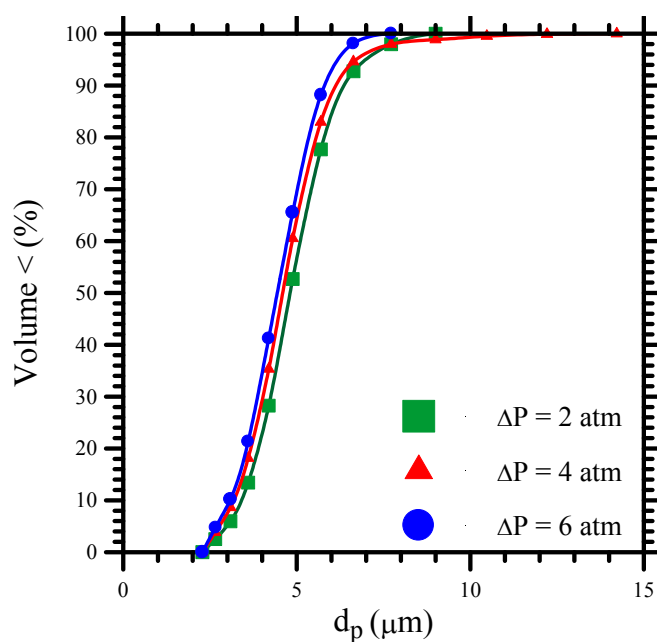


Figura 4.25 – Distribuição granulométrica do *underflow* (Bradley individual,  $D_c = 10$  mm).

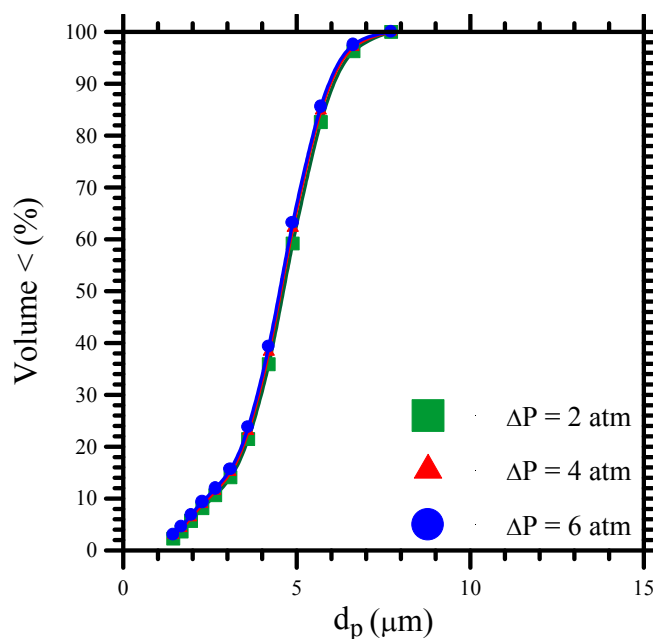


Figura 4.26 – Distribuição granulométrica do *underflow* etapa 2 (Bradley série,  $D_c = 10$  mm).

Nas Figuras 4.27 e 4.28 estão ilustradas as curvas de distribuição granulométrica para os hidrociclone de geometria Bradley,  $D_c = 20$  e 30 mm, operando individualmente e em série, respectivamente.

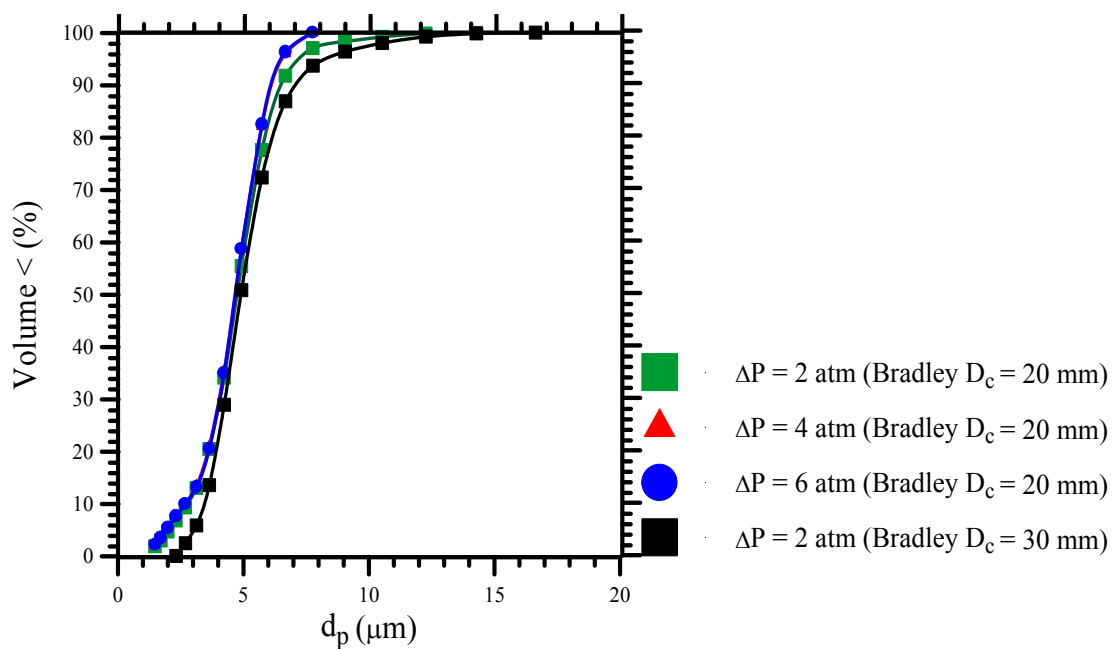


Figura 4.27 – Distribuição granulométrica *underflow* (Bradley individual,  $D_c = 20$  e 30 mm).

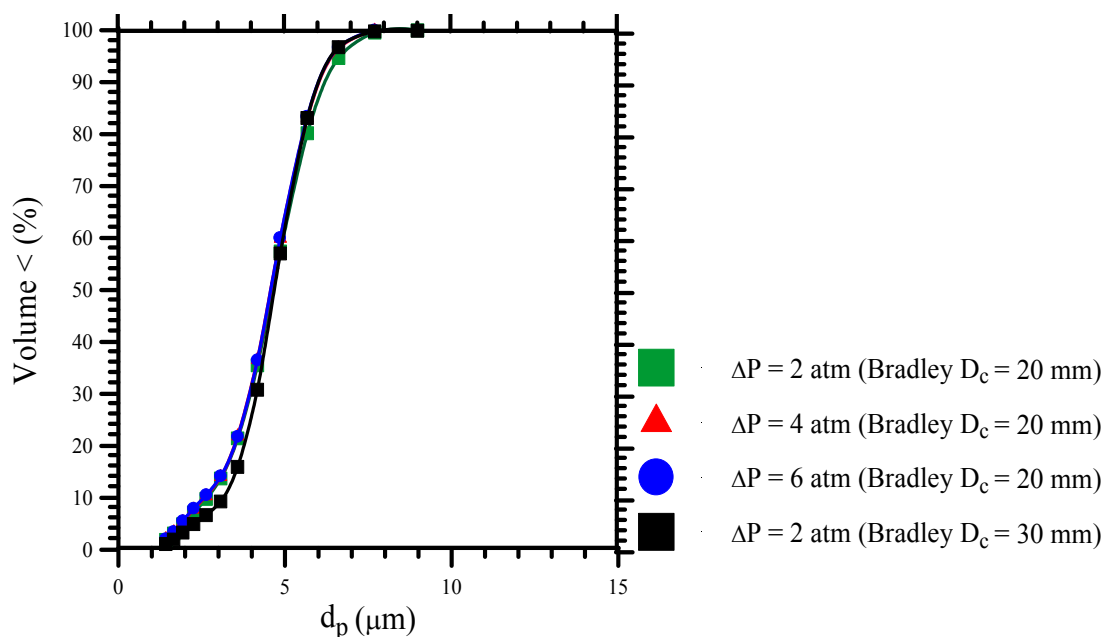


Figura 4.28 – Distribuição granulométrica *underflow* etapa 2 (Bradley série,  $D_c=20$  e 30mm).

Utilizou-se amostra da corrente do *underflow* para plotar o efeito da pressão na distribuição granulométrica com o intuito de se observar o efeito do cisalhamento na separação, o que não seria possível ao observando a curva da corrente de alimentação.

Nas Figuras 4.29 e 4.30 estão ilustradas as curvas de distribuição granulométrica para os hidrociclones de geometria Krebs, operando individualmente e em série, respectivamente.

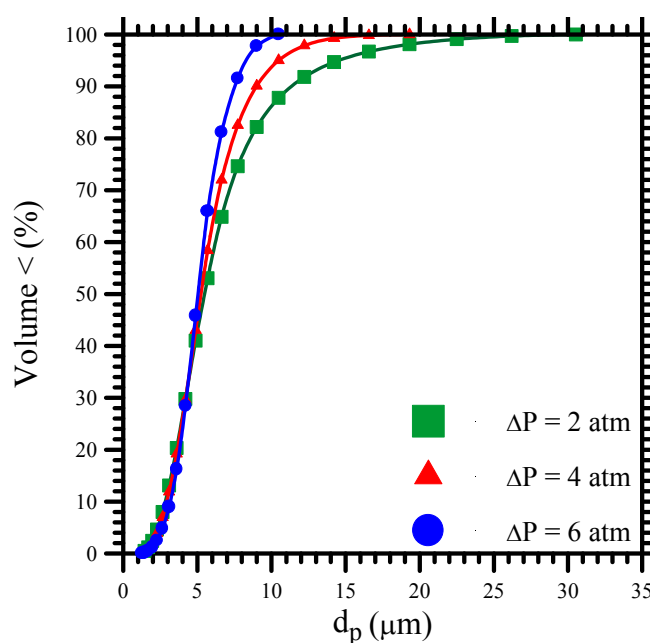


Figura 4.29 – Distribuição granulométrica do *underflow* (Krebs individual).

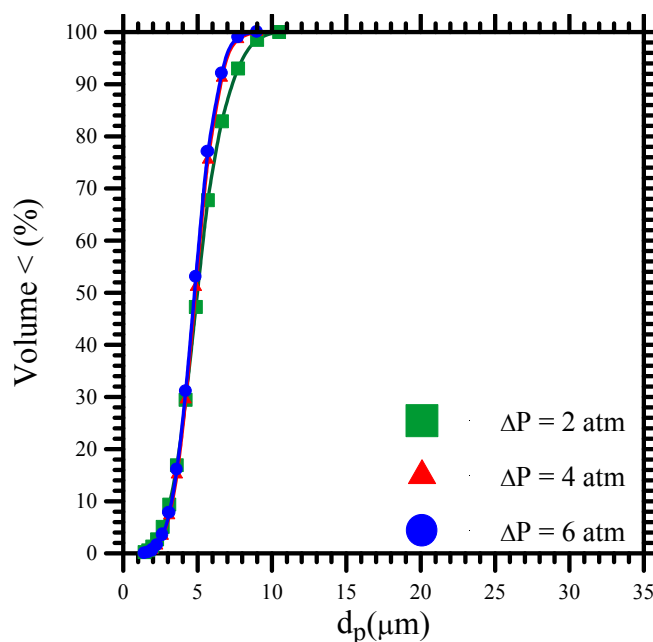


Figura 4.30 – Distribuição granulométrica do *underflow* etapa 2 (Krebs em série).

#### 4.5 – ANÁLISE DA VIABILIDADE CELULAR

Após a separação das leveduras em hidrociclone, identificou-se a necessidade de avaliar a viabilidade celular da corrente concentrada em relação à corrente de alimentação.

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram os resultados de viabilidade obtidos para os hidrociclones operando individualmente e em série, respectivamente. Em todos os casos a viabilidade diminuiu com o aumento da pressão, porém, esta viabilidade apresentou resultados superiores a 82% para hidrociclones individuais e 80% para hidrociclones operando em série. Comparando os resultados de eficiência e viabilidade Figuras 4.2 e 4.31, respectivamente, observa-se que o hidrociclones AKW apresenta maior eficiência, porém maior queda de viabilidade celular, enquanto que para o hidrociclone de geometria Krebs ocorre o inverso, este apresenta menor eficiência total e menor queda de viabilidade celular, desta forma todos os hidrociclones avaliados possuem vantagens e desvantagens, por isto são selecionados de acordo com o tipo de separação a ser realizada.

Comparando equipamentos de mesma geometria e diâmetros diferentes (hidrociclones Bradley), o separador de menor valor de  $D_c$  apresentou menor queda na viabilidade celular. Esse fato é discordante com a teoria de separação em hidrociclones, a qual descreve que os equipamentos de menor diâmetro geram maiores níveis de cisalhamento e conseqüentemente, maiores quedas na viabilidade celular. Este fato pode ser explicado em

virtude de possíveis falhas, ou seja, presença de arestas e/ou rugosidades na confecção dos hidrociclones de geometria Bradley. Pois os hidrociclones de geometria Bradley utilizados no trabalho não são comerciais e foram confeccionados (usinados, soldados etc) na oficina da FEQUI e depois de montados não foi possível fazer uma verificação com precisão das dimensões finais do corpo-cônico cilíndrico e também checar o tipo de acabamento interno.

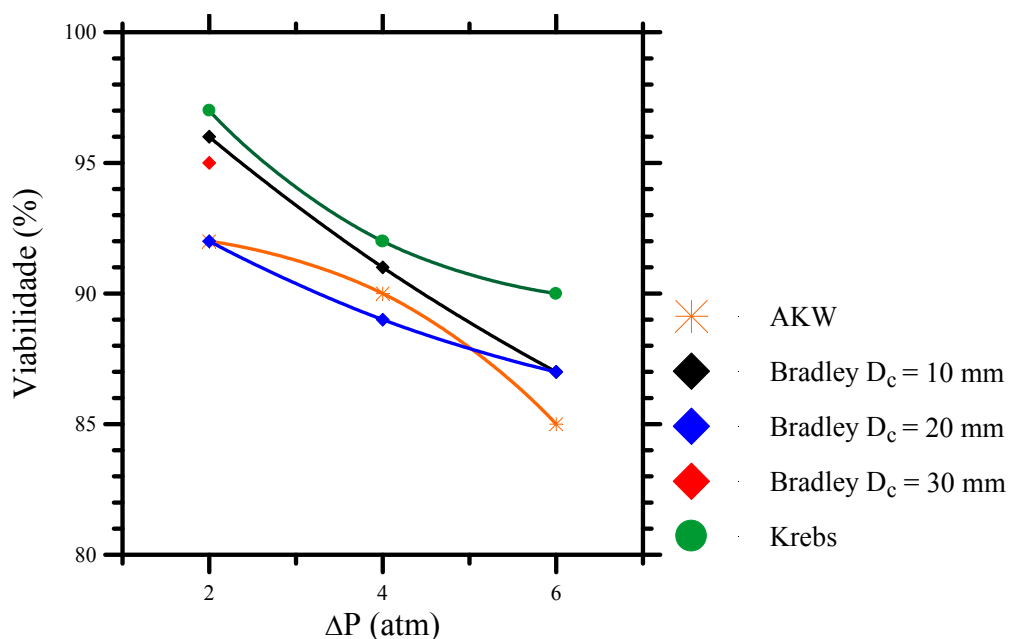


Figura 4.31 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na viabilidade celular para hidrociclones individuais.

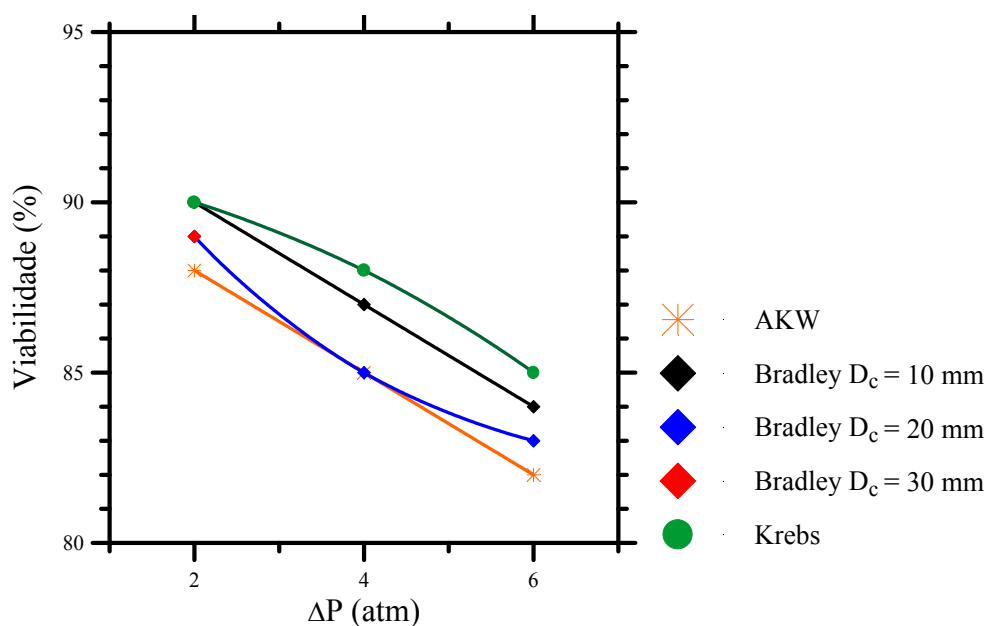


Figura 4.32 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na viabilidade celular para hidrociclones em série.

#### 4.6 – SEPARAÇÃO COM O MOSTO FERMENTADO

Para possibilitar uma comparação da separação em hidrociclones de leveduras e o mosto fermentado, proveniente da fermentação alcoólica, realizou-se ensaios de separação utilizando o hidrociclone AKW (mais eficiente) a uma queda de pressão de 4 atm. A queda de pressão escolhida (4 atm) foi a que combinou maior eficiência total e pequena queda da viabilidade. A Figura 4.33 apresenta a distribuição granulométrica típica para o mosto fermentado, o diâmetro das leveduras variou entre 2,62 e 9  $\mu\text{m}$ . A faixa de diâmetros apresentada para o fermentado é estreita, quando comparada a faixa de diâmetros do fermento puro 1,24 e 30,4  $\mu\text{m}$ , isto pode ser explicado pelo fato da formação de aglomerados ser menor para o mosto em virtude do meio utilizado, em que há a presença de células ativas (realizando a fermentação).

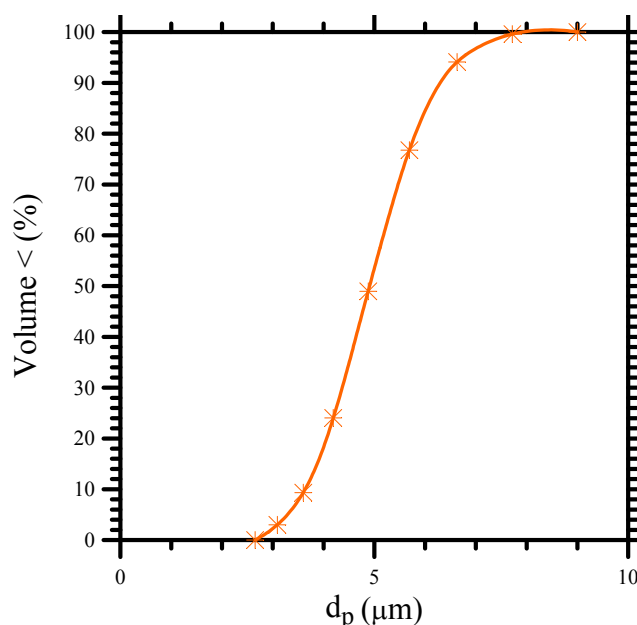


Figura 4.33 – Distribuição granulométrica típica para o mosto fermentado.

Na Tabela 4.8 são mostrados os resultados experimentais comparativos de eficiência total, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido obtidos na separação do mosto fermentado e da suspensão de levedura pura, a uma concentração de 3% em massa, para o hidrociclone AKW a uma queda de pressão de 4 atm.

Na Tabela 4.9 encontram-se os valores dos adimensionais obtidos experimentalmente. Na Figura 4.34 observa-se o perfil do consumo de açúcar ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) presentes no mosto fermentado em função do tempo.

Tabela 4.8 – Resultados de separação do mosto fermentado e da suspensão de fermento puro para o hidrociclone AKW a 4 atm.

| Meio utilizado             | $c_v$<br>(%) | Q<br>(cm <sup>3</sup> /s) | $E_T$<br>(%) | $R_L$<br>(%) | $E'_T$<br>(%) | $d_{50}$<br>( $\mu$ m) | $d'_{50}$<br>( $\mu$ m) |
|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|-------------------------|
| Mosto fermentado           | 3,28         | 38,12                     | 38,50        | 37,90        | 1,00          | 8,80                   | 9,97                    |
| Suspensão de fermento puro | 2,37         | 37,15                     | 41,00        | 38,20        | 4,60          | 8,36                   | 9,51                    |

Tabela 4.9 – Valores dos adimensionais para o hidrociclone AKW a 4 atm na separação do mosto fermentado e a suspensão de fermento puro a 3% em massa.

| Meio utilizado             | $u_c$<br>(cm/s) | Re   | Eu   | $Stk_{50}Eu$ |
|----------------------------|-----------------|------|------|--------------|
| Mosto fermentado           | 48,54           | 5711 | 3551 | 0,0012       |
| Suspensão de fermento puro | 47,31           | 5567 | 3633 | 0,0017       |

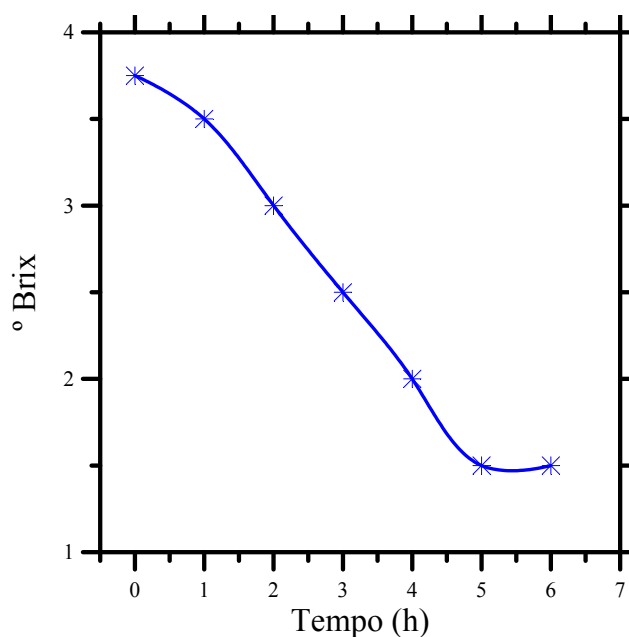


Figura 4.34 – Perfil do consumo de açúcar em função do tempo de fermentação.

À partir de cinco horas de fermentação (Figura 4.34) o Brix permaneceu constante, assim, é razoável afirmar que após este tempo, o açúcar alimentado já havia sido consumido, e assim, o processo de fermentação terminado. Teoricamente, considera-se que o processo de fermentação encontra-se encerrado, quando o grau Brix, chega a zero. Entretanto nos testes experimentais foi utilizado açúcar comercial, o qual devido as condições de produção e embalagem, uma certa quantidade de impurezas é incorporada ao produto.

A Figura 4.35 mostra que o fermento e o mosto fermentado apresentaram eficiências totais em torno de 40%, sendo que o fermento puro apresentou maior eficiência total e total reduzida, quando comparado ao mosto fermentado, operados em um mesmo hidrociclone, submetidos às mesmas condições de temperatura, concentração e pressão. A Figura 4.36 mostra os valores do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido para o mosto e o fermento puro. Pode-se observar que os resultados obtidos foram similares, fornecendo diâmetros de corte ligeiramente menores para o fermento puro.

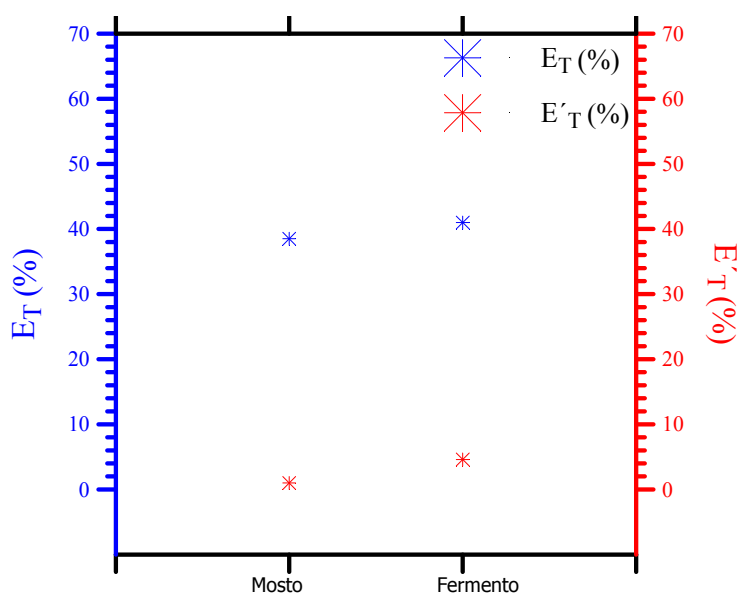


Figura 4.35 – Eficiência total e total reduzida na separação do mosto fermentado e do fermento para o hidrociclone AKW.

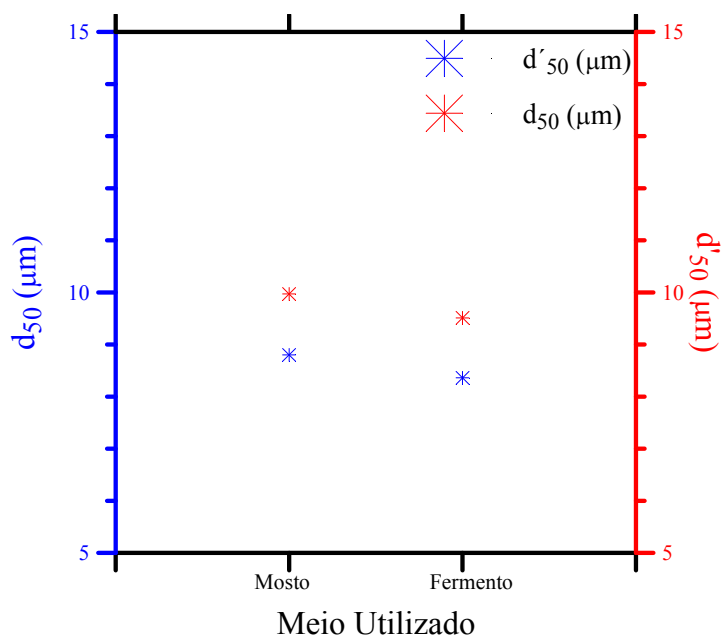


Figura 4.36 – Valores do diâmetro de corte diâmetro de corte reduzido na separação do mosto fermentado e do fermento para o hidrociclone AKW.

Nas Figuras 4.37 e 4.38 são encontrados os valores da eficiência granulométrica e granulométrica reduzida, respectivamente. Observa-se que o mosto fermentado apresenta eficiências granulométricas e granulométricas reduzidas inferiores ao fermento puro. A curva de eficiência granulométrica do mosto fermentado praticamente não apresenta o efeito *fish hook*, enquanto que este efeito é bem definido na curva de eficiência do fermento puro.

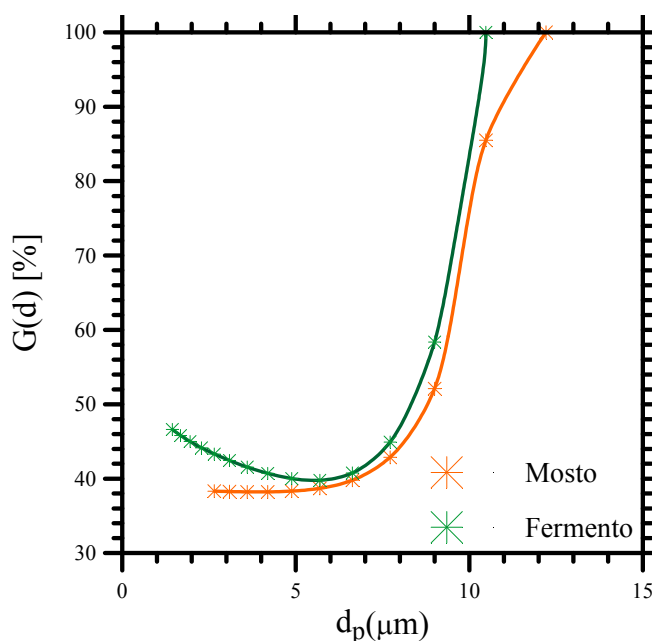


Figura 4.37 – Curva de eficiência granulométrica para o mosto fermentado e o fermento puro.

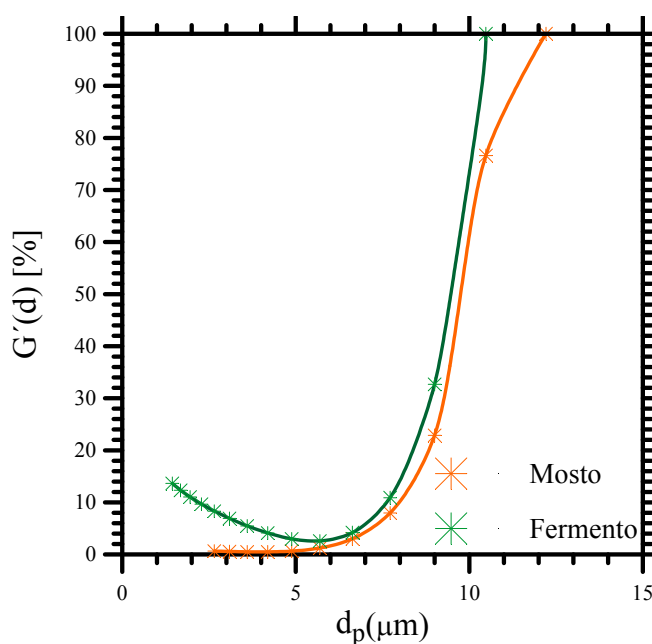


Figura 4.38 – Curva de eficiência granulométrica reduzida para o mosto fermentado e o fermento puro.

Analisando a Figura 4.39, observa-se o efeito do meio na distribuição granulométrica da corrente do *underflow*. A distribuição granulométrica mais estreita do mosto fermentado pode ser explicada pelo crescimento celular das leveduras.

Na Figura 4.40 observa-se a influência do meio utilizado na viabilidade celular, notando-se que o fermento puro possui viabilidade superior ao mosto fermentado.

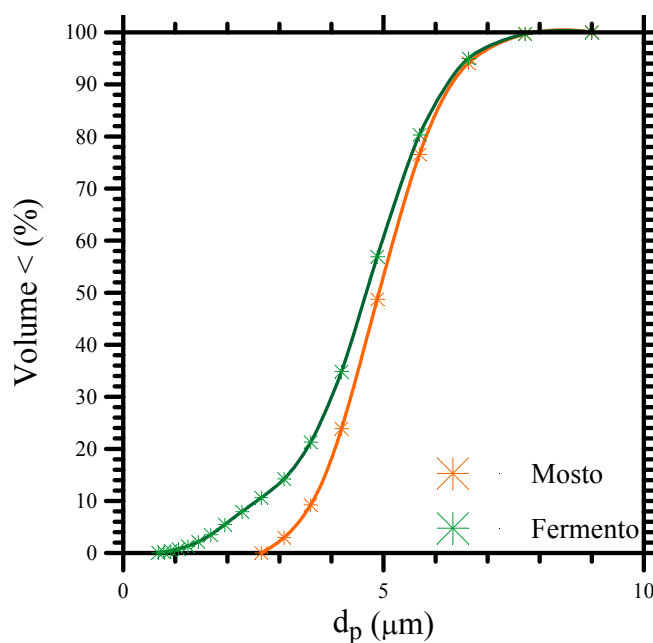


Figura 4.39 – Influência do meio na distribuição granulométrica para o hidrociclone AKW.

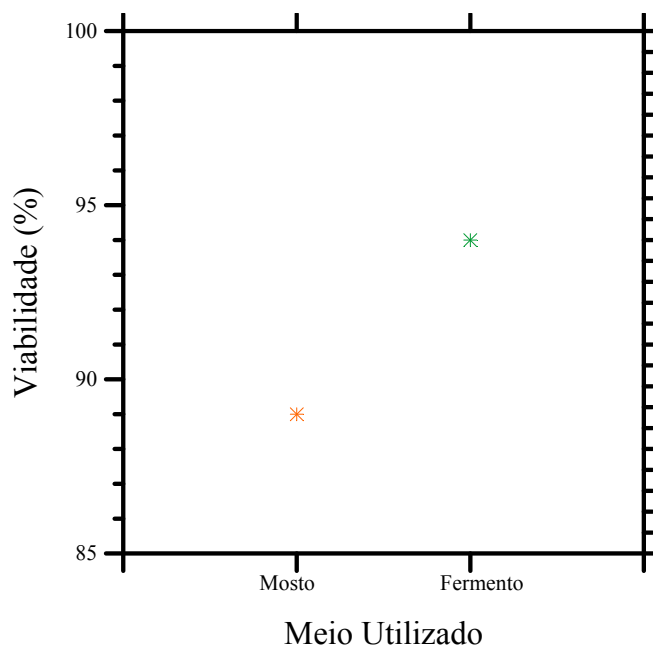


Figura 4.40 – Influência do meio na viabilidade celular.

Observa-se na Figura 4.40, que a queda de viabilidade celular é maior para o mosto fermentado do que para o fermento puro. Isto pode ser explicado devido ao fato do mosto fermentado apresentar crescimento celular, deixando as células mais frágeis ao cisalhamento que ocorre no interior do hidrociclone ou a presença de células mais frágeis no mosto fermentado.

De um modo geral os resultados obtidos para o fermento apresentaram valores semelhantes para o fermentado, quando os testes experimentais foram conduzidos nas mesmas condições de temperatura, concentração e pressão. A concordância dos resultados também se aplica aos resultados reportados na literatura.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 – CONCLUSÕES**

Tomado por base os resultados obtidos neste trabalho, juntamente com as informações reportadas na literatura, pode-se destacar as seguintes conclusões:

##### **5.1.1 – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO**

Das três diferentes geometrias de hidrociclones estudadas, a que apresentou maior eficiência total foi a do hidrociclone AKW, porém o hidrociclone de geometria Bradley apresentou maior eficiência total reduzida à queda de pressão de 6 atm.

Outro fator que contribuiu positivamente na eficiência total e na eficiência total reduzida foi o aumento da queda de pressão, pois para todos os hidrociclones estudados, as maiores eficiências foram obtidas à pressão de 6 atm, com exceção do hidrociclone AKW que apresentou uma pequena queda na eficiência total reduzida a 6 atm.

Comparando os resultados de eficiência total para os hidrociclones de geometria Bradley, pode-se concluir que o hidrociclone de menor diâmetro da parte cilíndrica apresentou maior eficiência total e menor capacidade de alimentação.

O hidrociclone de geometria Krebs apresentou as menores eficiências totais, porém apresentou maior capacidade de alimentação, quando comparado aos hidrociclones de geometria Bradley ( $D_c = 10 \text{ mm}$ ) e AKW.

Todos os hidrociclones estudados apresentaram elevadas razões de líquido entre 47 e 50% para o hidrociclone AKW, entre 30 e 39% para os hidrociclones de geometria Bradley e entre 25 e 26% para o hidrociclone Krebs. Essa característica acaba resultando em um grande volume de suspensão que precisa ser reprocessada para obter carga concentrada.

As suspensões de fermento e mosto fermentado apresentaram eficiência total em torno de 40%, sendo que o fermento puro apresentou maior eficiência total e total reduzida, quando

comparados ao mosto fermentado, operados em um mesmo hidrociclone (AKW), submetidos às mesmas condições de temperatura, concentração e pressão.

### 5.1.2 – DIÂMETRO DE CORTE

O hidrociclone de geometria Bradley apresentou os menores diâmetros de corte e diâmetros de corte reduzido, obtidos dentre as diferentes geometrias. Comparando os hidrociclones Bradley de diferentes diâmetros, o equipamento de menor dimensão apresentou menores diâmetros de corte.

O aumento da queda de pressão contribuiu de forma positiva na redução do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido.

O hidrociclone de geometria Krebs apresentou os maiores diâmetros de corte e diâmetro de corte reduzido.

Os valores do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido para o mosto e o fermento puro foram similares, fornecendo diâmetros de corte ligeiramente menores para o fermento puro.

### 5.1.3 – CURVA DE EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA

Os resultados experimentais obtidos mostram o efeito da pressão nas grades de eficiência para todos os hidrociclones e, que o denominado *efeito fish hook* é bem suave em determinadas condições e mais pronunciado em outras situações.

### 5.1.4 – HIDROCICLONES EM SÉRIE

Nos ensaios com hidrociclones em série, conseguiu-se uma melhora significativa na eficiência total para a separação de leveduras em água. A eficiência passou de 61 para 86% combinando dois hidrociclones de geometria AKW à queda de pressão de 6 atm. De 50 para 75% combinando dois hidrociclones Bradley,  $D_c = 10$  mm a 6 atm. De 36 para 59% combinando dois hidrociclones Krebs a 6 atm.

Entretanto um grande volume de água é separado com o fermento recuperado no

*underflow*, dessa forma esta suspensão tem que passar por outro processo de concentração para reaproveitamento da levedura.

#### **5.1.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO *UNDERFLOW***

A pressão de operação exerce influência na distribuição de tamanho das leveduras, pois a faixa de distribuição granulométrica é maior para 2 atm. A intensidade do cisalhamento presente no escoamento da mistura pode explicar esse efeito. Para hidrociclones em série, a faixa de diâmetro das leveduras recolhidas no *underflow* da etapa 2 é mais estreita e praticamente independente da pressão de operação.

#### **5.1.6 – VIABILIDADE CELULAR**

Para os testes de viabilidade celular realizados com hidrociclones individuais ou em série, tal viabilidade apresentou resultados superiores a 80%. Observou-se uma queda mais acentuada na viabilidade celular para quedas de pressão mais elevadas.

A queda de viabilidade celular é maior para o mosto fermentado do que para o fermento puro.

#### **5.1.7 – GERAL**

Os resultados obtidos em termos de eficiência total de separação indicam que os equipamentos estudados têm potencialidades para a separação de leveduras. Entretanto a pequena quantidade de sólidos presentes no *underflow* mostra a necessidade de operações posteriores de concentração desta corrente.

A baixa capacidade destes hidrociclones pode ser contornada utilizando uma bateria de separadores.

De um modo geral, os resultados de eficiência total e viabilidade celular obtidos para o fermento e o fermentado foram concordantes com os dados reportados na literatura.

Com relação à alternativa proposta neste trabalho, ou seja, a substituição das centrífugas por hidrociclones na separação do mosto fermentado, proveniente da fermentação alcoólica,

torna-se viável em termos de capacidade e eficiência total. Uma centrífuga industrial, que possui em média uma capacidade de 60000 L/h, pode ser substituída por cerca de 130 mini-hidrociclones Krebs, em paralelo, para atingir a mesma vazão de processamento ou dois mini-hidrociclones AKW em série, para atingir a mesma eficiência total (85%). Os dados de eficiência total, capacidade e número de hidrociclones em paralelo para atingir a mesma capacidade de processamento obtida pelas centrífugas, podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados de eficiência e capacidade para os hidrociclones estudados a 6 atm

| Hidrociclone                           | $E_T$<br>individual<br>(%) | $E_T$<br>dois em série<br>(%) | Capacidade<br>(L/h) | Nº de<br>equipamentos<br>em paralelo |
|----------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| AKW,<br>$D_c=10$ mm                    | 61                         | 86                            | 297                 | 202                                  |
| Bradley,<br>$D_c=10$ mm                | 50                         | 75                            | 138                 | 435                                  |
| Bradley,<br>$D_c=20$ mm                | 45                         | 71                            | 435                 | 138                                  |
| Bradley,<br>$D_c=30$ mm <sup>(*)</sup> | 35                         | 57                            | 635                 | 95                                   |
| Krebs,<br>$D_c=1/2$ in                 | 36                         | 59                            | 464                 | 130                                  |

<sup>(\*)</sup> Dados obtidos a uma pressão de operação de 2 atm.

## 5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudos de separação com outros mini-hidrociclones comerciais, otimizados para separação sólido-líquido como, por exemplo, Dorr-Oliver e Mozley;
- Realizar ensaios com modelos de mini-hidrociclones destinados à separação líquido-líquido, eficientes para processar misturas com elevado grau de dificuldade, ou seja, pequenas gotículas e baixo gradiente de densidade;

- Realizar testes com o mosto fermentado obtido em alambiques, com o intuito de simular condições industriais para a separação como, por exemplo, a presença de sujeira, bactérias etc;
- Utilizar outras técnicas, consideradas mais eficientes, de quantificação da viabilidade celular como, por exemplo, o plaqueamento;
- Utilizar outros equipamentos para a separação prévia ou posterior do mosto fermentado, com o intuito de eliminar o grande volume de mosto obtido junto com o fermento;
- Aplicar técnicas numéricas de fluidodinâmica computacional (CFD) para descrever o escoamento das fases e a separação nos mini-hidrociclones.

## **ANEXO 1**

Neste Anexo são apresentados os resultados de caracterização do sólido e o cálculo das eficiências total e granulométrica para cada um dos hidrociclones estudados.

Nos Anexos A1.1, A1.2 e A1.3 estão apresentados os resultados obtidos para o hidrociclone AKW;

Nos Anexos A1.4, A1.5 e A1.6 estão apresentados os resultados obtidos para o hidrociclone Bradley  $D_c = 10$  mm;

Nos Anexos A1.7, A1.8 e A1.9 estão apresentados os resultados obtidos para o hidrociclone Bradley  $D_c = 20$  mm;

No Anexo A1.10 estão apresentados os resultados obtidos para o hidrociclone Bradley  $D_c = 30$  mm;

Nos Anexos A1.11, A1.12 e A1.13 estão apresentados os resultados obtidos para o hidrociclone Krebs.

## A1.1 – Resultados obtidos nas corridas experimentais para o hidrociclone AKW a 2 atm.

### Hidrociclone AKW individual

Dados:

Hidrociclone: AKW<sup>®</sup> individual, D<sub>c</sub>:10 mm

Temperatura: 28 °C

Suspensão alimentada: levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) em água a 0,25% em massa.

Tabela A.1 - Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e *underflow*, AKW individual  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm.

| Corrente de alimentação |        | Corrente do <i>underflow</i> |        |
|-------------------------|--------|------------------------------|--------|
| d (µm)                  | X (%)  | d (µm)                       | X (%)  |
| 1,44                    | 0,46   | 1,44                         | 0,54   |
| 1,68                    | 1,07   | 1,68                         | 1,20   |
| 1,95                    | 2,27   | 1,95                         | 2,42   |
| 2,28                    | 4,37   | 2,28                         | 4,50   |
| 2,65                    | 7,75   | 2,65                         | 7,80   |
| 3,09                    | 12,95  | 3,09                         | 12,81  |
| 3,60                    | 20,42  | 3,60                         | 19,95  |
| 4,19                    | 30,36  | 4,19                         | 29,42  |
| 4,88                    | 42,28  | 4,88                         | 40,72  |
| 5,69                    | 55,05  | 5,69                         | 52,64  |
| 6,63                    | 67,64  | 6,63                         | 63,90  |
| 7,72                    | 77,80  | 7,72                         | 74,02  |
| 9,00                    | 85,48  | 9,00                         | 81,89  |
| 10,48                   | 90,90  | 10,48                        | 87,71  |
| 12,21                   | 94,49  | 12,21                        | 91,86  |
| 14,22                   | 96,76  | 14,22                        | 94,75  |
| 16,57                   | 98,15  | 16,57                        | 96,76  |
| 19,31                   | 99,01  | 19,31                        | 98,16  |
| 22,49                   | 99,54  | 22,49                        | 99,11  |
| 26,20                   | 99,87  | 26,20                        | 99,72  |
| 30,53                   | 100,00 | 30,53                        | 100,00 |

Tabela A.2 - Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm

| Amostra                | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | W (g/s) | W <sub>média</sub> (g/s) |
|------------------------|------------------------------------|---------------------|---------|--------------------------|
| A <sub>1</sub>         | 855                                | 740                 | 49,33   | 49,20                    |
| A <sub>2</sub>         | 840                                | 725                 | 48,33   |                          |
| A <sub>3</sub>         | 855                                | 740                 | 49,33   |                          |
| A <sub>4</sub>         | 855                                | 740                 | 49,33   |                          |
| A <sub>5</sub>         | 860                                | 745                 | 49,67   |                          |
| U <sub>1</sub>         | 465                                | 350                 | 23,33   | 23,13                    |
| U <sub>2</sub>         | 460                                | 345                 | 23,00   |                          |
| U <sub>3</sub>         | 465                                | 350                 | 23,33   |                          |
| U <sub>4</sub>         | 455                                | 340                 | 22,67   |                          |
| U <sub>5</sub>         | 465                                | 350                 | 23,33   |                          |
| M <sub>b</sub> = 115 g |                                    |                     |         |                          |
| t = 15 s               |                                    |                     |         |                          |

Tabela A.3 - Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm.

| Amostra        | $M_b$ (g) | $M_{sp} + M_b$ (g) | $M_p + M_b$ (g) | $M_{sp}$ (g) | $M_p$ (g) | $c_w$  | $c_w$ média |
|----------------|-----------|--------------------|-----------------|--------------|-----------|--------|-------------|
| A <sub>1</sub> | 64,2926   | 89,4862            | 64,3304         | 25,1936      | 0,0378    | 0,0015 | 0,0013      |
| A <sub>2</sub> | 35,2505   | 66,9790            | 35,2980         | 31,7285      | 0,0475    | 0,0015 |             |
| A <sub>3</sub> | 46,5171   | 73,2630            | 46,5558         | 26,7459      | 0,0387    | 0,0014 |             |
| A <sub>4</sub> | 46,5042   | 57,3240            | 46,5118         | 10,8198      | 0,0076    | 0,0007 |             |
| A <sub>5</sub> | 43,4271   | 55,0497            | 43,4403         | 11,6226      | 0,0132    | 0,0011 |             |
| U <sub>1</sub> | 40,5817   | 53,0749            | 40,6012         | 12,4932      | 0,0195    | 0,0016 | 0,0015      |
| U <sub>2</sub> | 29,2860   | 38,1744            | 29,2983         | 8,8884       | 0,0123    | 0,0014 |             |
| U <sub>3</sub> | 29,2733   | 43,1911            | 29,2931         | 13,9178      | 0,0198    | 0,0014 |             |
| U <sub>4</sub> | 29,7097   | 55,9886            | 29,7542         | 26,2789      | 0,0445    | 0,0017 |             |
| U <sub>5</sub> | 34,6992   | 52,3357            | 34,7217         | 17,6365      | 0,0225    | 0,0013 |             |

Tabela A.4 - Resultados das correntes de alimentação e *underflow* para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm.

| Corrente de alimentação      |              |                                     |                                     |              |                    |                   |      |
|------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------|-------------------|------|
| W (g/s)                      | $c_w$ (%)    | $\rho_{alim}$ (g/cm <sup>3</sup> )  | Q (cm <sup>3</sup> /s)              | $c_v$ (%)    | R <sup>2</sup> (%) | d <sub>63,2</sub> | n    |
| 49,20                        | 0,13         | 0,99711                             | 49,34                               | 0,11         | 99,59              | 6,49              | 2,43 |
| Corrente do <i>underflow</i> |              |                                     |                                     |              |                    |                   |      |
| W <sub>u</sub> (g/s)         | $c_{wu}$ (%) | $\rho_{under}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Q <sub>u</sub> (cm <sup>3</sup> /s) | $c_{vu}$ (%) | R <sup>2</sup> (%) | d <sub>63,2</sub> | n    |
| 23,13                        | 0,15         | 0,99713                             | 23,20                               | 0,13         | 99,42              | 6,83              | 2,24 |

Tabela A.5 - Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm .

| $E_T$ (%) | $R_L$ (%) | $E'_T$ (%) | $d_{50}$ ( $\mu m$ ) | $d'_{50}$ ( $\mu m$ ) |
|-----------|-----------|------------|----------------------|-----------------------|
| 54,90     | 47,00     | 14,80      | 6,13                 | 10,42                 |

Tabela A.6 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 2 \pm 0,20$  atm .

| $d(\mu m)$ | $G(d)$ [%] | $G'(d)$ [%] |
|------------|------------|-------------|
| 1,44       | 59,03      | 22,69       |
| 1,68       | 57,39      | 19,59       |
| 1,95       | 55,86      | 16,69       |
| 2,28       | 54,31      | 13,78       |
| 2,65       | 52,91      | 11,14       |
| 3,09       | 51,60      | 8,67        |
| 3,60       | 50,48      | 6,55        |
| 4,19       | 49,64      | 4,96        |
| 4,88       | 49,21      | 4,15        |
| 5,69       | 49,45      | 4,61        |
| 6,63       | 50,81      | 7,17        |
| 7,72       | 54,03      | 13,26       |
| 9,00       | 60,75      | 25,93       |
| 10,48      | 74,31      | 51,51       |
| 12,21      | 100,00     | 100,00      |

### Hidrociclones AKW em série ( 2 estágios )

Dados:

Hidrociclones: AKW<sup>®</sup> em série, D<sub>c</sub>:10 mm

Temperatura: 28 °C.

Suspensão alimentada: suspensão obtida da corrente do *overflow* do 1º hidrociclone (etapa 1 ).

Tabela A.7 - Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do *underflow* AKW em série  $\Delta P : 2 \pm 0,10$  atm .

| Corrente de alimentação |        | Corrente do <i>underflow</i> |        |
|-------------------------|--------|------------------------------|--------|
| d (µm)                  | X (%)  | d (µm)                       | X (%)  |
| 1,24                    | 0,10   | 1,24                         | 0,10   |
| 1,44                    | 0,27   | 1,44                         | 0,29   |
| 1,68                    | 0,65   | 1,68                         | 0,72   |
| 1,95                    | 1,43   | 1,95                         | 1,59   |
| 2,28                    | 2,83   | 2,28                         | 3,19   |
| 2,65                    | 5,24   | 2,65                         | 5,95   |
| 3,09                    | 9,61   | 3,09                         | 10,82  |
| 3,60                    | 17,45  | 3,60                         | 19,11  |
| 4,19                    | 30,79  | 4,19                         | 32,42  |
| 4,88                    | 49,91  | 4,88                         | 50,69  |
| 5,69                    | 71,39  | 5,69                         | 71,11  |
| 6,63                    | 86,50  | 6,63                         | 85,89  |
| 7,72                    | 94,79  | 7,72                         | 94,38  |
| 9,00                    | 98,65  | 9,00                         | 98,49  |
| 10,48                   | 100,00 | 10,48                        | 100,00 |

Tabela A.8 - Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW em série  $\Delta P : 2 \pm 0,10$  atm .

| Amostra        | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | W (g/s) | W <sub>média</sub> (g/s) |
|----------------|------------------------------------|---------------------|---------|--------------------------|
| A <sub>1</sub> | 705                                | 590                 | 39,33   | 39,00                    |
| A <sub>2</sub> | 700                                | 585                 | 39,00   |                          |
| A <sub>3</sub> | 700                                | 585                 | 39,00   |                          |
| A <sub>4</sub> | 700                                | 585                 | 39,00   |                          |
| A <sub>5</sub> | 695                                | 580                 | 38,67   |                          |
| U <sub>1</sub> | 395                                | 280                 | 18,67   | 18,73                    |
| U <sub>2</sub> | 390                                | 275                 | 18,33   |                          |
| U <sub>3</sub> | 405                                | 290                 | 19,33   |                          |
| U <sub>4</sub> | 390                                | 275                 | 18,33   |                          |
| U <sub>5</sub> | 400                                | 285                 | 19,00   |                          |

M<sub>b</sub> = 115 g

t = 15 s

Tabela A.9 - Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW em série  
 $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$ .

| Amostra        | M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | M <sub>p</sub> (g) | c <sub>w</sub> | c <sub>w</sub> média |
|----------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------------|
| A <sub>1</sub> | 41,3617            | 47,5780                             | 41,3653                            | 6,2163              | 0,0036             | 0,0006         | 0,0005               |
| A <sub>2</sub> | 35,2363            | 48,3588                             | 35,2388                            | 13,1225             | 0,0025             | 0,0002         |                      |
| A <sub>3</sub> | 64,3030            | 72,4589                             | 64,3080                            | 8,1559              | 0,0050             | 0,0006         |                      |
| A <sub>4</sub> | 29,1561            | 38,9833                             | 29,1682                            | 9,8272              | 0,0121             | 0,0012         |                      |
| A <sub>5</sub> | 29,7197            | 42,1202                             | 29,7201                            | 12,4005             | 0,0004             | 0,0000         |                      |
| U <sub>1</sub> | 39,6757            | 46,3571                             | 39,6794                            | 6,6814              | 0,0037             | 0,0006         | 0,0006               |
| U <sub>2</sub> | 34,7111            | 41,2711                             | 34,7145                            | 6,5600              | 0,0034             | 0,0005         |                      |
| U <sub>3</sub> | 39,5093            | 49,9446                             | 39,5161                            | 10,4353             | 0,0068             | 0,0007         |                      |
| U <sub>4</sub> | 39,0483            | 46,2534                             | 39,0575                            | 7,2051              | 0,0092             | 0,0013         |                      |
| U <sub>5</sub> | 41,3124            | 50,4207                             | 41,3135                            | 9,1083              | 0,0011             | 0,0001         |                      |

Tabela A.10 - Resultados das correntes de alimentação e *underflow* para o hidrociclone AKW em série  $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$ .

| Corrente de alimentação      |                     |                                            |                                     |                     |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| W (g/s)                      | c <sub>w</sub> (%)  | $\rho_{\text{alim}}$ (g/cm <sup>3</sup> )  | Q(cm <sup>3</sup> /s)               | c <sub>v</sub> (%)  |
| 39,00                        | 0,05                | 0,9970                                     | 39,11                               | 0,048               |
| Corrente do <i>underflow</i> |                     |                                            |                                     |                     |
| W <sub>u</sub> (g/s)         | c <sub>wu</sub> (%) | $\rho_{\text{under}}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Q <sub>u</sub> (cm <sup>3</sup> /s) | c <sub>vu</sub> (%) |
| 18,73                        | 0,06                | 0,9971                                     | 18,79                               | 0,057               |

Tabela A.11 – Eficiência total para hidrociclones AKW em série  $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$ .

| E <sub>T</sub> (%) | R <sub>L</sub> (%) | E' <sub>T</sub> (%) | E <sub>T</sub> (%) (conjunto) |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| 54,90              | 47,00              | 14,80               | 80,50                         |

## A1.2 – Resultados obtidos nas corridas experimentais para o hidrociclone AKW a 4 atm.

### Hidrociclone AKW individual

Dados:

hidrociclone: AKW<sup>®</sup> individual, D<sub>c</sub>:10 mm

Temperatura: 28 °C

Suspensão alimentada: levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) em água a 0,25% em massa.

Tabela A.12 - Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do *underflow*, AKW individual  $\Delta P: 4 \pm 0,10$  atm .

| Corrente de alimentação |        | Corrente do <i>underflow</i> |        |
|-------------------------|--------|------------------------------|--------|
| d (μm)                  | X (%)  | d (μm)                       | X (%)  |
| 1,44                    | 0,18   | 1,44                         | 0,35   |
| 1,68                    | 0,51   | 1,68                         | 0,89   |
| 1,95                    | 1,27   | 1,95                         | 2,01   |
| 2,28                    | 2,78   | 2,28                         | 4,05   |
| 2,65                    | 5,51   | 2,65                         | 7,44   |
| 3,09                    | 10,35  | 3,09                         | 12,81  |
| 3,60                    | 18,33  | 3,60                         | 20,77  |
| 4,19                    | 30,48  | 4,19                         | 31,66  |
| 4,88                    | 46,64  | 4,88                         | 44,90  |
| 5,69                    | 65,12  | 5,69                         | 59,11  |
| 6,63                    | 80,11  | 6,63                         | 72,96  |
| 7,72                    | 90,20  | 7,72                         | 83,83  |
| 9,00                    | 96,11  | 9,00                         | 91,61  |
| 10,48                   | 98,96  | 10,48                        | 96,61  |
| 12,21                   | 100,00 | 12,21                        | 99,40  |
| —                       | —      | 14,22                        | 100,00 |

Tabela A.13 - Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW individual  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm

| Amostra                | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | W (g/s) | W <sub>média</sub> (g/s) |
|------------------------|------------------------------------|---------------------|---------|--------------------------|
| A <sub>1</sub>         | 1120                               | 1005                | 67,00   | 67,27                    |
| A <sub>2</sub>         | 1115                               | 1000                | 66,67   |                          |
| A <sub>3</sub>         | 1115                               | 1000                | 66,67   |                          |
| A <sub>4</sub>         | 1150                               | 1035                | 69,00   |                          |
| A <sub>5</sub>         | 1120                               | 1005                | 67,00   |                          |
| U <sub>1</sub>         | 590                                | 475                 | 31,67   | 31,07                    |
| U <sub>2</sub>         | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |
| U <sub>3</sub>         | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |
| U <sub>4</sub>         | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |
| U <sub>5</sub>         | 575                                | 460                 | 30,67   |                          |
| M <sub>b</sub> = 115 g |                                    |                     |         |                          |
| t = 15 s               |                                    |                     |         |                          |

Tabela A.14 - Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Amostra        | $M_b$ (g) | $M_{sp} + M_b$ (g) | $M_p + M_b$ (g) | $M_{sp}$ (g) | $M_p$ (g) | $c_w$  | $c_w$ média |
|----------------|-----------|--------------------|-----------------|--------------|-----------|--------|-------------|
| A <sub>1</sub> | 39,6665   | 50,3581            | 39,6822         | 10,6916      | 0,0157    | 0,0015 | 0,0015      |
| A <sub>2</sub> | 40,5697   | 52,6368            | 40,5865         | 12,0671      | 0,0168    | 0,0014 |             |
| A <sub>3</sub> | 41,2966   | 55,7916            | 41,3186         | 14,4950      | 0,0220    | 0,0015 |             |
| A <sub>4</sub> | 29,1329   | 50,1604            | 29,1714         | 21,0275      | 0,0385    | 0,0018 |             |
| A <sub>5</sub> | 41,3373   | 55,9828            | 41,3554         | 14,6455      | 0,0181    | 0,0012 |             |
| U <sub>1</sub> | 29,1274   | 49,9615            | 29,1637         | 20,8341      | 0,0363    | 0,0017 | 0,0019      |
| U <sub>2</sub> | 39,4845   | 54,2570            | 39,5047         | 14,7725      | 0,0202    | 0,0014 |             |
| U <sub>3</sub> | 39,0427   | 58,2722            | 39,0747         | 19,2295      | 0,0320    | 0,0017 |             |
| U <sub>4</sub> | 41,3082   | 56,5960            | 41,3315         | 15,2878      | 0,0233    | 0,0015 |             |
| U <sub>5</sub> | 39,4942   | 57,2097            | 39,5495         | 17,7155      | 0,0553    | 0,0031 |             |

Tabela A.15 - Resultados das correntes de alimentação e *underflow* para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Corrente de alimentação      |              |                                     |                                     |              |                    |                   |      |
|------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------|-------------------|------|
| W (g/s)                      | $c_w$ (%)    | $\rho_{alim}$ (g/cm <sup>3</sup> )  | Q (cm <sup>3</sup> /s)              | $c_v$ (%)    | R <sup>2</sup> (%) | d <sub>63,2</sub> | n    |
| 67,27                        | 0,15         | 0,99714                             | 67,46                               | 0,13         | 99,82              | 5,70              | 3,36 |
| Corrente do <i>underflow</i> |              |                                     |                                     |              |                    |                   |      |
| W <sub>u</sub> (g/s)         | $c_{wu}$ (%) | $\rho_{under}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Q <sub>u</sub> (cm <sup>3</sup> /s) | $c_{vu}$ (%) | R <sup>2</sup> (%) | d <sub>63,2</sub> | n    |
| 31,07                        | 0,19         | 0,99718                             | 31,15                               | 0,17         | 99,76              | 6,05              | 2,77 |

Tabela A.16 - Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$ .

| $E_T (\%)$ | $R_L (\%)$ | $E'_T (\%)$ | $d_{50} (\mu\text{m})$ | $d'_{50} (\mu\text{m})$ |
|------------|------------|-------------|------------------------|-------------------------|
| 58,40      | 46,20      | 22,80       | 6,17                   | 7,62                    |

Tabela A.17 – Eficiência granulométrica corte para o hidrociclone AKW individual a  $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$ .

| $d (\mu\text{m})$ | $G(d) [\%]$ | $G'(d) [\%]$ |
|-------------------|-------------|--------------|
| 1,44              | 56,86       | 46,28        |
| 1,68              | 55,90       | 43,15        |
| 1,95              | 54,18       | 38,9         |
| 2,28              | 54,02       | 36,21        |
| 2,65              | 53,98       | 30,70        |
| 3,09              | 53,00       | 20,41        |
| 3,60              | 52,44       | 11,66        |
| 4,19              | 48,83       | 4,946        |
| 4,88              | 46,8        | 1,186        |
| 5,69              | 47,59       | 2,64         |
| 6,63              | 54,17       | 14,88        |
| 7,72              | 75,98       | 55,38        |
| 9,00              | 100,00      | 100,00       |

### Hidrociclones AKW em série ( 2 estágios )

Dados:

hidrociclones: AKW<sup>®</sup> em série, D<sub>c</sub>:10 mm

Temperatura: 28 °C

Suspensão alimentada: suspensão obtida da corrente do *overflow* do 1º hidrociclone (etapa 1).

Tabela A.18 - Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do *underflow* AKW em série  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Corrente de alimentação |        | Corrente do <i>underflow</i> |        |
|-------------------------|--------|------------------------------|--------|
| d (µm)                  | X (%)  | d (µm)                       | X (%)  |
| 1,24                    | 0,02   | 1,24                         | 0,02   |
| 1,44                    | 0,08   | 1,44                         | 0,08   |
| 1,68                    | 0,25   | 1,68                         | 0,26   |
| 1,95                    | 0,72   | 1,95                         | 0,72   |
| 2,28                    | 1,75   | 2,28                         | 1,72   |
| 2,65                    | 3,82   | 2,65                         | 3,71   |
| 3,09                    | 8,14   | 3,09                         | 7,86   |
| 3,60                    | 16,72  | 3,60                         | 16,21  |
| 4,19                    | 32,48  | 4,19                         | 31,46  |
| 4,88                    | 56,43  | 4,88                         | 54,21  |
| 5,69                    | 79,07  | 5,69                         | 78,37  |
| 6,63                    | 93,04  | 6,63                         | 93,06  |
| 7,72                    | 99,22  | 7,72                         | 99,37  |
| 9,00                    | 100,00 | 9,00                         | 100,00 |

Tabela A.19 - Cálculo da vazão mássica para hidrociclones AKW em série a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Amostra        | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | W (g/s) | W <sub>média</sub> (g/s) |
|----------------|------------------------------------|---------------------|---------|--------------------------|
| A <sub>1</sub> | 1130                               | 1015                | 67,67   | 67,40                    |
| A <sub>2</sub> | 1120                               | 1005                | 67,00   |                          |
| A <sub>3</sub> | 1125                               | 1010                | 67,33   |                          |
| A <sub>4</sub> | 1130                               | 1015                | 67,67   |                          |
| A <sub>5</sub> | 1125                               | 1010                | 67,33   |                          |
| U <sub>1</sub> | 575                                | 460                 | 30,67   | 31,00                    |
| U <sub>2</sub> | 585                                | 470                 | 31,33   |                          |
| U <sub>3</sub> | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |
| U <sub>4</sub> | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |
| U <sub>5</sub> | 580                                | 465                 | 31,00   |                          |

M<sub>b</sub> = 115 g

t = 15 s

Tabela A.20 - Cálculo da concentração mássica para hidrociclones AKW em série a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Amostra        | M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>p</sub> +M <sub>b</sub> (g) | M <sub>sp</sub> (g) | M <sub>p</sub> (g) | c <sub>w</sub> | c <sub>w</sub> média |
|----------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------------|
| A <sub>1</sub> | 46,4895            | 56,5780                             | 46,4960                            | 10,0885             | 0,0065             | 0,0006         | 0,0007               |
| A <sub>2</sub> | 35,2397            | 46,3588                             | 35,2490                            | 11,1191             | 0,0093             | 0,0008         |                      |
| A <sub>3</sub> | 64,2862            | 72,4589                             | 64,2946                            | 8,1727              | 0,0084             | 0,0010         |                      |
| A <sub>4</sub> | 39,0440            | 48,9833                             | 39,0510                            | 9,9393              | 0,0070             | 0,0007         |                      |
| A <sub>5</sub> | 41,3144            | 49,1202                             | 41,3175                            | 7,8058              | 0,0031             | 0,0004         |                      |
| U <sub>1</sub> | 34,7161            | 46,3571                             | 34,7257                            | 11,6410             | 0,0096             | 0,0008         | 0,0009               |
| U <sub>2</sub> | 39,6579            | 45,2711                             | 39,6676                            | 5,6132              | 0,0097             | 0,0017         |                      |
| U <sub>3</sub> | 29,2684            | 39,9446                             | 29,2712                            | 10,6762             | 0,0028             | 0,0003         |                      |
| U <sub>4</sub> | 40,5723            | 46,2534                             | 40,5755                            | 5,6811              | 0,0032             | 0,0006         |                      |
| U <sub>5</sub> | 29,7246            | 38,4207                             | 29,7359                            | 8,6961              | 0,0113             | 0,0013         |                      |

Tabela A.21 - Resultados das correntes de alimentação e *underflow* para hidrociclones AKW em série a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| Corrente de alimentação      |                     |                                            |                                     |                     |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| W (g/s)                      | c <sub>w</sub> (%)  | $\rho_{\text{alim}}$ (g/cm <sup>3</sup> )  | Q(cm <sup>3</sup> /s)               | c <sub>v</sub> (%)  |
| 67,40                        | 0,07                | 0,99707                                    | 67,60                               | 0,07                |
| Corrente do <i>underflow</i> |                     |                                            |                                     |                     |
| W <sub>u</sub> (g/s)         | c <sub>wu</sub> (%) | $\rho_{\text{under}}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Q <sub>u</sub> (cm <sup>3</sup> /s) | c <sub>vu</sub> (%) |
| 31,00                        | 0,09                | 0,99709                                    | 31,09                               | 0,08                |

Tabela A.22 - Eficiência total para hidrociclones AKW em série a  $\Delta P : 4 \pm 0,10$  atm .

| E <sub>T</sub> (%) | R <sub>L</sub> (%) | E' <sub>T</sub> (%) | E <sub>T</sub> (%) (conjunto) |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| 58,40              | 46,20              | 22,80               | 83,20                         |