

3.1 Metodologia Experimental

3.1.1 Material Particulado

A rocha fosfática, devido a sua grande disponibilidade e importância econômica na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, foi o material particulado utilizado nesse estudo. Este foi fornecido pela Valefértil S/A de Patos de Minas - MG. Cerca de 15 kg de material particulado foi homogeneizado em uma pilha e quarteado para que amostras fossem coletadas para análise granulométrica desse material. Para fins comparação de desempenho dos hidrociclones, trabalha-se com partículas de menor diâmetro, e dessa forma, constatou-se a necessidade de cominuir o material disponível. Em torno de 7 kg desse material passaram por um processo de moagem que durava 12 horas para que as partículas atingissem o valor desejado de diâmetro de alimentação. A análise granulométrica do material foi sempre realizada no equipamento Mastersizer Microplus que utiliza a técnica de difração de raios *laser*, cujo resultado obtido era o diâmetro volumétrico da partícula. O modelo de distribuição granulométrica que melhor se adequou aos dados experimentais foi o Rosin-Rammler-Bennet (RRB) representado pela Equação 3.1, cujos parâmetros $d_{63,2}$ e n são, respectivamente: $9,34 \mu\text{m}$ e $0,80$. A Figura 3.1 traz a curva de distribuição granulométrica das partículas alimentadas. O modelo RRB (Rosin-Rammler-Bennet) ajustado obteve coeficiente de correlação quadrático igual a $0,989$.

$$X = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_{63,2}} \right)^n \right] \quad (3.1)$$

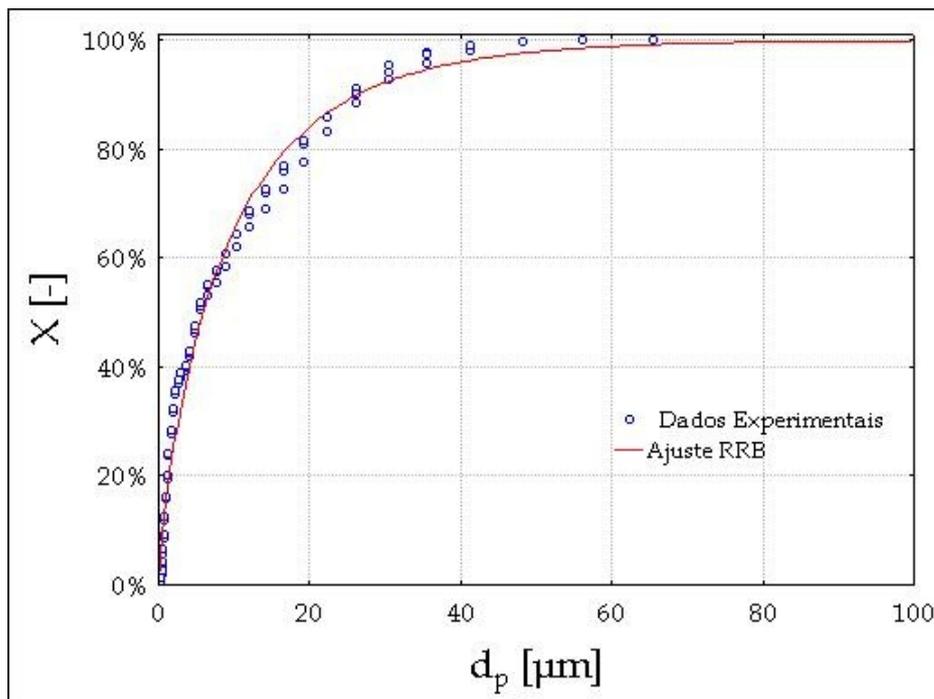


Figura 3.1: Curva de distribuição granulométrica para a rocha fosfática e ajuste previsto pelo modelo RRB.

A densidade real do material foi determinada pela técnica de picnometria a Hélio realizada no equipamento *AccuPyc 1331* da Micromeritics. O valor encontrado para esse material foi de $2860,0 \pm 0,6 \text{ kg/m}^3$.

3.1.2 Os Hidrociclones

Conforme mencionado no Capítulo 1, o objetivo deste trabalho foi, primeiramente, avaliar como o posicionamento de uma seção cilíndrica filtrante modificava o desempenho do hidrociclone frente aos desempenhos apresentados pelo hidrociclone convencional e cônico-filtrantes, todos segundo a geometria otimizada por Vieira (2006). Dessa forma, as partes maciças de cada hidrociclone foram confeccionadas em latão e as seções filtrantes cônica e cilíndrica foram manufaturadas de partículas de bronze sinterizado pela empresa especializada MetalSinter.

Tabela 3.1: Relações geométricas para o hidrociclones.

D_a/D_c	0,26
D_o/D_c	0,22
L/D_c	6,90
L_1/D_c	2,22
θ	11,2°

Para todos os equipamentos, o diâmetro da seção cilíndrica, o diâmetro do orifício de *underflow* e comprimento do duto de *vortex finder* foram, respectivamente, iguais a $3 \cdot 10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-3}$ e $1,2 \cdot 10^{-2}$ m. A Tabela 3.1 apresenta as relações entre as principais dimensões geométricas características de um hidrociclone, que seguem a mesma relação do hidrociclone otimizado por Vieira (2006) apresentada anteriormente pela Table 2.4

Após a análise do efeito do posicionamento das matrizes porosas em diferentes seções do equipamento, o segundo objetivo deste trabalho foi avaliar, então, como a permeabilidade dos cilindros porosos influenciava o desempenho do hidrociclone cilíndrico-filtrante em relação aos hidrociclones convencional e cônico-filtrante. Sendo assim, foi necessário caracterizar as três matrizes cilíndricas porosas estudadas e lançar mão do valor de permeabilidade da parede da seção cônica apresentada no trabalho de Vieira (2006), já que nos experimentos realizados nessa dissertação foram realizados com o mesmo tronco de cone filtrante utilizado na tese desse autor. Para diferenciar os hidrociclones filtrantes, adotar-se-á a seguinte nomenclatura para estes equipamentos: HCoF para o hidrociclone convencional, HCoF para o hidrociclone cônico-filtrante e HCoF-k₁, HCoF-k₂, HCoF-k₃ para os hidrociclones cilíndrico filtrantes nas três permeabilidades estudadas.

As três modalidades de hidrociclone são apresentadas na Figura 3.2 na ordem anteriormente mencionada, dando destaque para as respectivas seções maciças e filtrantes (permeáveis). As partes dos hidrociclones foram manufaturadas separadamente para facilitar o manuseio do equipamento. Os dutos *underflow* e *overflow* eram acoplados ao cone e ao cilindro, respectivamente, por meio de um sistema de roscas. Por sua vez, a união das duas seções era feita através de um sistema de travas mecânicas. As propriedades das matrizes porosas (k - permeabilidade e ϵ - porosidade) utilizadas neste trabalho são especificadas pela Tabela 3.2. As permeabilidades dos cilindros filtrantes foram determinadas por meio de teste de bancada simples como aqueles realizados por Vieira (2006) após processo de colmatção de cada uma das matrizes porosas. Maiores detalhes do procedimento utilizado podem ser obtidos no Apêndice B.

Tabela 3.2: Propriedades das matrizes porosas cilíndricas e cônica.

Equipamento	$k \cdot 10^{16}$ [m ²]	ϵ [-]
HCoF	6,63	0,100
HCoF-k ₁	$1,71 \pm 0,43$	0,138
HCoF-k ₂	$2,95 \pm 0,38$	0,129
HCoF-k ₃	$3,60 \pm 1,15$	0,143

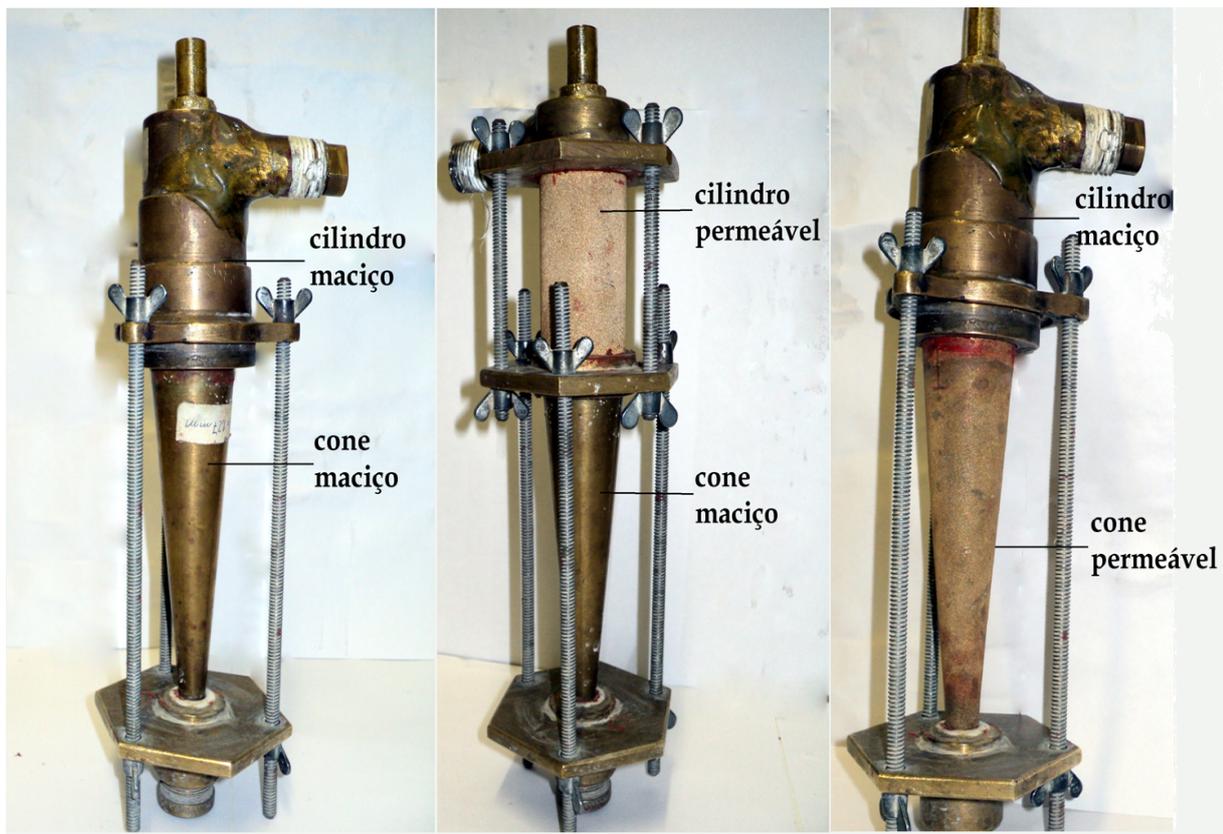


Figura 3.2: Hidrociclones: a) convencional (HCon), b) cilíndrico-filtrante (HCiF) e c) cônico-filtrante (HCoF).

3.1.3 Unidade Experimental

A unidade experimental desse trabalho foi montada LSP/FEQUI/UFU, sendo que esta foi a mesma utilizada no trabalho de Vieira (2006). Era constituída de um tanque de 250 L (1), que armazenava a suspensão de rocha fosfática, bem como de um agitador mecânico (2) acoplado a um motor de 1/2 cv para homogeneizar a suspensão. Com intuito de melhorar essa homogeneização, chicanas foram instaladas dentro do tanque anteriormente citado. A bomba utilizada era do tipo helicoidal com potência de 5 cv (3). A tubulação que saía do recalque desta era dividida em duas correntes, uma de *bypass* (4), cuja função era auxiliar na homogeneização da suspensão e no ajuste da vazão e a parte superior que consistia na linha de alimentação do hidrociclone (5). Para medir a queda de pressão, era utilizado um manômetro digital (6) cujo limite superior era de 700 ± 1 kPa. É importante destacar que os testes com todos os hidrociclones foram realizados nessa unidade, visto que era necessário somente acoplar e desacoplar os equipamentos na seção da tubulação logo após o manômetro digital. A Figura 3.3 apresenta a unidade experimental e Figura 3.4 apresenta o sistema de agitação para homogeneizar a suspensão.



Figura 3.3: Unidade experimental de hidrociclonação.



Figura 3.4: Detalhe sobre a agitação e homogeneização da suspensão de rocha fosfática.

3.1.4 Procedimento Experimental

Após a escolha do tipo de hidrociclone que seria utilizado nos experimentos, o mesmo era acoplado à unidade experimental. Neste estudo adotou-se a mesma faixa experimental utilizada por Vieira (2006), dessa forma, as condições de queda de pressão utilizadas nos ensaios experimentais foram as seguintes: 88, 118, 147 e 177 kPa.

A concentração volumétrica da suspensão durante os experimentos esteve ao redor de 1,0%, sendo que esta suspensão foi preparada adicionando-se em torno de 6,2 kg de material particulado para ter-se 200 L de suspensão. Para inicializar os ensaios experimentais, primeiro ligava-se o agitador para homogeneizar a suspensão e em seguida a bomba helicoidal para direcionar a suspensão, inicialmente, somente para o duto de *bypass*. Com auxílio de válvulas globo e gaveta, te direcionava-se a suspensão para o duto superior que alimentava o hidrociclone. Após obter-se uma queda de pressão estável no valor desejado, iniciava-se o experimento.

Começado o experimento, eram medidas as vazões de alimentação, *underflow* e *overflow* para o hidrociclone convencional. Quando se trabalhou com os hidrociclones filtrantes também houve a medição da vazão de filtrado além das anteriormente citadas. Todas essas medidas eram realizadas por meio de técnicas de gravimetria (balança com precisão de $\pm 0,01$ g).

A determinação da concentração mássica de sólidos para as correntes de alimentação, *underflow* e *overflow* era realizada por meio da retirada de amostras das respectivas correntes, e após aferir suas massas, eram encaminhadas para a estufa por um período de 24 h na temperatura de 105°C. Para cada corrente, o procedimento era feito em triplicata. Esse procedimento não fora realizado para a corrente de filtrado, pois esta era isenta de sólidos.

Outras amostras dessas correntes eram retiradas com intuito de se realizar a análise granulométrica das partículas presentes. Essa análise foi realizada com o auxílio do equipamento *Malvern Mastersizer Microplus*, que utiliza a técnica de difração de raios *laser* e que fornece como resultado o diâmetro volumétrico das partículas. Anterior à realização da análise de cada amostra experimental, era realizada a calibração do sistema óptico do sistema, com uma diluição de 20 mL da solução 25 g/L de hexametáfosfato de sódio (dispersante) em 500 mL de água destilada e deionizada, chamada de “branco”. Após esse procedimento, adicionava-se a amostra experimental ao “branco” preparado, e aplicava-se um banho ultra-sônico durante 30 s, cuja função era romper os possíveis aglomerados de partículas existentes na amostra. O dispersante tinha função de manter as partículas dispersas e evitar a formação de novos aglomerados.

Depois das etapas supracitadas, os dados de diâmetro volumétrico e fração volumétrica acumulativa fornecidos pelo sistema de aquisição e análise do *Malvern Mastersizer Microplus* eram colocados em uma planilha eletrônica. Finalmente, com esses dados, foram estimados os parâmetros do modelo RRB por meio da técnica de regressão não-linear utilizando-se o *software* comercial *Statistica*[®].

3.1.5 Cálculo das Grandezas Associadas aos Hidrociclones

Para avaliar o desempenho dos hidrociclones estudados, os dados experimentais (vazões, distribuições granulométricas, concentrações) obtidos por meio dos procedimentos supracitados foram inseridos nas equações subsequentes com intuito de se obter os valores das principais respostas associadas aos hidrociclones, como concentrações volumétricas, vazões volumétrica, número de Euler, razão de líquido, eficiência total, eficiência total reduzida, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido.

As concentrações volumétricas foram obtidas a partir das concentrações mássicas aferidas pela técnica de gravimetria e pelas densidades do material particulado (obtido por picnometria) e do fluido. As Equações 3.2 e 3.3 fornecem as concentrações volumétricas para as correntes de alimentação e de *underflow* respectivamente.

$$C_v = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_w} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.2)$$

$$C_{vu} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_{wu}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.3)$$

As vazões volumétricas de alimentação, *underflow* e *overflow* foram calculadas a partir das vazões mássicas e densidade das respectivas correntes conforme mostrado nas Equações 3.4, 3.5 e 3.6.

$$Q_a = \frac{W}{\rho_{susp}} \quad (3.4)$$

$$Q_u = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (3.5)$$

$$Q_o = \frac{W_o}{\rho_o} \quad (3.6)$$

Por sua vez, as densidades da suspensão nas correntes de alimentação, *underflow* e *overflow* eram calculadas como apresentado pelas Equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$\rho_{susp} = \frac{\rho}{1 - C_w \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)} \quad (3.7)$$

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wu} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)} \quad (3.8)$$

$$\rho_o = \frac{\rho}{1 - C_{wo} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)} \quad (3.9)$$

Com a vazão de alimentação há possibilidade de calcular-se a velocidade do fluido na seção cilíndrica e, por conseguinte, calcular-se o número adimensional Euler, que se relaciona com o gasto energético de bombeamento da suspensão. A Equação 3.10 apresenta como a velocidade do fluido era calculada e a Equação 3.11 mostra como o número de Euler foi obtido.

$$u_c = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (3.10)$$

$$Eu = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho \cdot u_c^2}{2}} \quad (3.11)$$

A Eficiência Total (η) considera todos os sólidos que foram coletados na corrente de *underflow* e foi calculada conforme a Equação 3.12, cujo valor obtido é a razão entre a vazão mássica de sólidos no *underflow* e aquela presente na alimentação.

$$\eta = \frac{C_{wu}}{C_w} \cdot \frac{W_u}{W} \quad (3.12)$$

Por sua vez, a Eficiência Total Reduzida (η') leva em conta somente a separação das partículas devido à ação do campo centrífugo sobre as mesmas, excluindo o efeito de divisão de correntes (“Efeito T”). A Equação 3.13 mostra como essa eficiência foi calculada.

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (3.13)$$

Na equação anterior, R_L é a Razão de Líquido que é definida com a razão entre a vazão volumétrica de líquido direcionada para a corrente de *underflow* e aquela que é alimentada ao hidrociclone conforme mostrado na Equação 3.14

$$R_L = \frac{(1 - C_{vu})}{(1 - C_v)} \cdot \frac{Q_u}{Q} \quad (3.14)$$

O diâmetro de corte (d_{50}) e o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) estão relacionados com o poder de separação do hidrociclone. São os diâmetros de partícula que são separados com eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G') de 50%. Na eficiência granulométrica estão contabilizados os efeitos de separação centrífugo e de divisão de correntes, já a eficiência granulométrica reduzida representa somente o efeito de separação do campo centrífugo. As Equações 3.15 e 3.16 apresentam como foi realizado o cálculo das respectivas eficiências.

$$G = \eta \cdot \frac{\frac{dX_u}{d(d_p)}}{\frac{dX}{d(d_p)}} \quad (3.15)$$

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (3.16)$$

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados experimentais obtidos durante a realização desse trabalho. E o mesmo foi dividido em duas seções para facilitar o entendimento e visualização do que foi constatado experimentalmente. A Seção 4.1 apresenta e discute os resultados para analisar o efeito do posicionamento do meio filtrante em seções distintas do hidrociclone e a Seção 4.2 visa à apresentação e discussão dos dados que auxiliam a verificar como a permeabilidade da seção cilíndrica porosa influencia no desempenho do hidrociclone cilíndrico-filtrante.

4.1 Efeito do Posicionamento do Meio Filtrante em Seções Distintas do Hidrociclone.

O objetivo desta seção é apresentar, comparar e discutir os resultados característicos de um hidrociclone para os equipamentos convencional (HCon), cônico-filtrante (HCoF) e cilíndrico-filtrante de menor permeabilidade (HCiF- k_1), tendo em vista avaliar como o posicionamento das matrizes porosas influenciou o desempenho desses equipamentos. Ressalta-se que, como fora mencionado no Capítulo 3, todos os equipamentos foram construídos segundo a geometria otimizada por Vieira (2006). Ressalta-se que a escolha do hidrociclone cilíndrico-filtrante k_1 (HCiF - k_1) se deu por questões cronológicas e pela maior facilidade de colmatção deste cilindro filtrante.

A vazão de alimentação para uma dada queda de pressão é uma resposta importante, pois serve de base de comparação entre os equipamentos quanto à capacidade de processamento. Deseja-se que, em uma mesma condição de queda de pressão operacional,

o hidrociclone obtenha uma maior vazão de alimentação, pois se poderá processar mais suspensão com um custo energético menor ao que se tinha com a configuração anterior. A Figura 4.1 apresenta os valores de vazão de alimentação para os equipamentos HCon, HCoF e HCiF- k_1 para as condições experimentais estudadas.

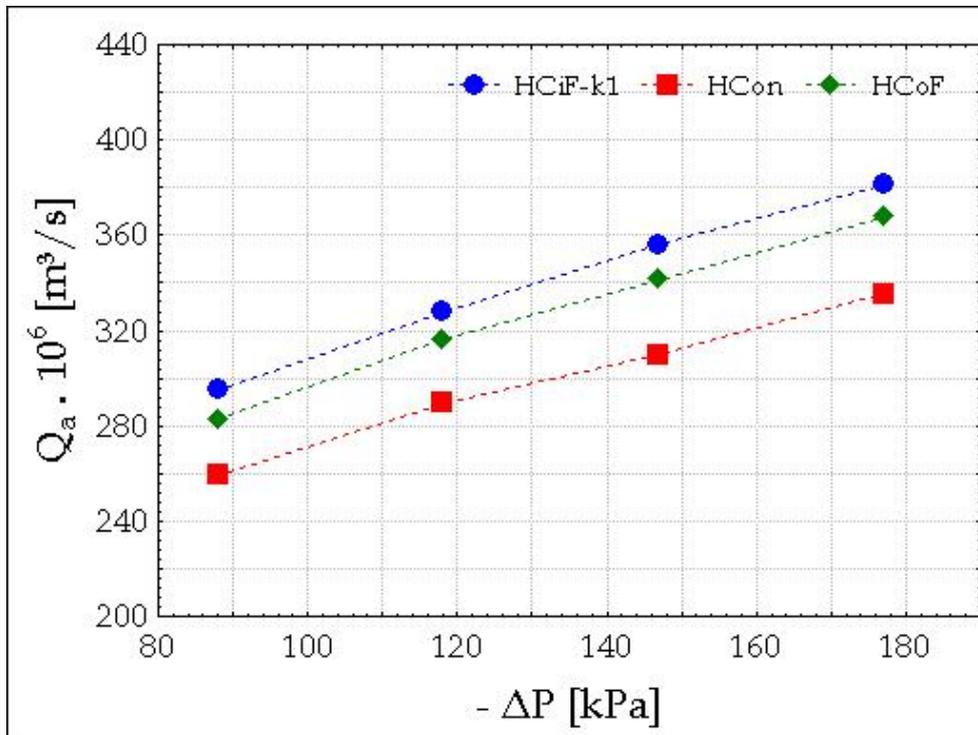


Figura 4.1: Valores para vazão de alimentação para os hidrociclones convencional (HCon), cônico-filtrante (HCoF) e cilíndrico-filtrante (HCiF- k_1).

Observou-se que a associação da filtração com a hidrociclonação apresentou benefícios ao desempenho dos hidrociclones filtrantes frente ao convencional, já que para ambos os casos, houve aumento na capacidade de processamento do equipamento em uma mesma condição operacional. De acordo com os dados experimentais apresentados na Figura 4.1, houve um acréscimo médio na vazão de alimentação de aproximadamente 10% para o hidrociclone HCoF quando comparado ao hidrociclone HCon. Já para o hidrociclone HCiF, a filtração provocou um acréscimo médio na vazão volumétrica de alimentação de aproximadamente 13% quando comparado ao similar convencional. Entre os equipamentos filtrantes, a vazão volumétrica de alimentação do separador HCiF foi, em média, cerca de 3% maior do que a hidrociclone HCoF.

Acredita-se que tal fenômeno ocorreu pelo fato do escoamento, logo de início, deparar-se com uma estrutura cilíndrica porosa que lhe ofereceu um caminho preferencial, retirando-lhe uma pequena vazão de filtrado (0,22% da vazão volumétrica de alimentação). Apesar da produção de filtrado ser pequena, tal comportamento certamente foi capaz de modificar a relação existente entre as principais componentes de velocidade do fluido (axial,

tangencial e radial), cujo reflexo foi a diminuição da perda de carga oferecida pelo sistema que permitiu uma injeção maior de suspensão pelo duto de alimentação do separador.

Já que houve aumento da capacidade para uma mesma queda de pressão experimental, esperava-se que isso refletiria no número de Euler, que está relacionado com os custos de bombeamento em uma unidade de hidrociclonagem. A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos para os três equipamentos em questão.

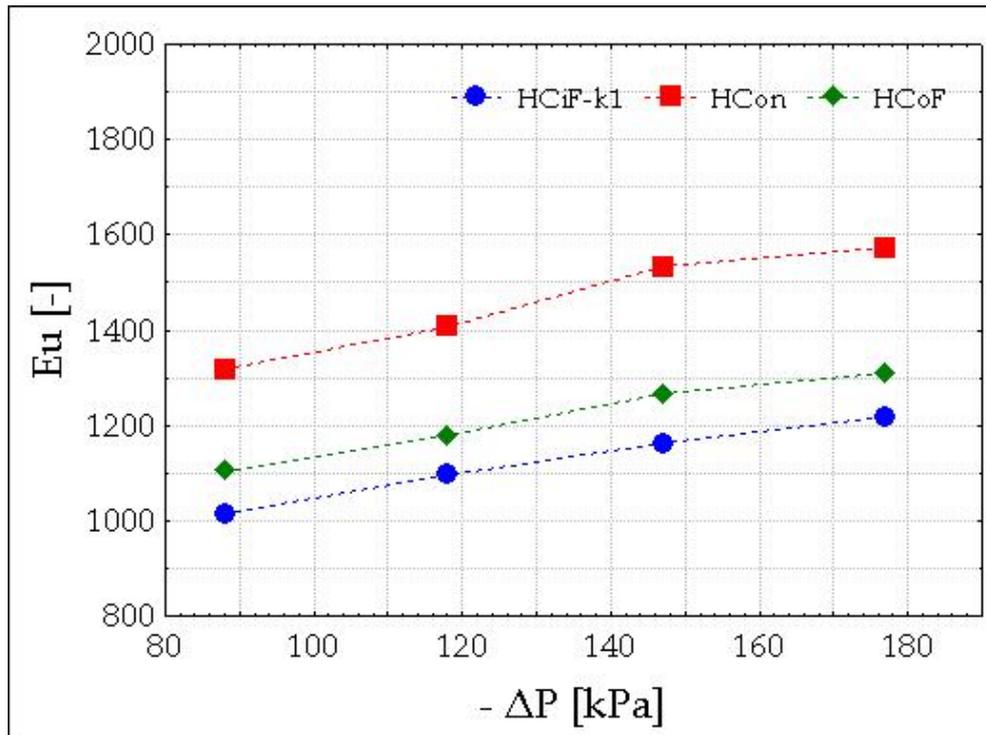


Figura 4.2: Número de Euler para os hidrociclones convencional, cônico e cilíndrico filtrantes.

Como já era esperado, tanto na modalidade do hidrociclone HCiF, quanto na do HCoF, a presença da filtração fez com que tais equipamentos apresentassem decréscimos no número de Euler quando comparados ao similar convencional (HCon). Em relação ao hidrociclone HCon, houve um decréscimo médio no número de Euler de aproximadamente 17% para o hidrociclone HCoF. Já para o hidrociclone HCiF, a filtração provocou um decréscimo médio no número de Euler de aproximadamente 22% quando comparado ao equipamento convencional. Entre os equipamentos filtrantes, o número de Euler do separador HCiF foi, em média, cerca de 7% menor do que a hidrociclone HCoF. Isso coloca os hidrociclones filtrantes como opção para o uso industrial, principalmente nos casos em que o gasto energético do equipamento convencional é significativo e uma redução desta grandeza poderia gerar recursos adicionais para investimento em outras partes do processo.

A Razão de Líquido (R_L) é uma resposta interessante para o processo de separação porque está diretamente relacionada com o poder de classificação ou concentração dos hidrociclones. A Figura 4.3 apresenta os dados experimentais para Razão de Líquido obtidos para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante.

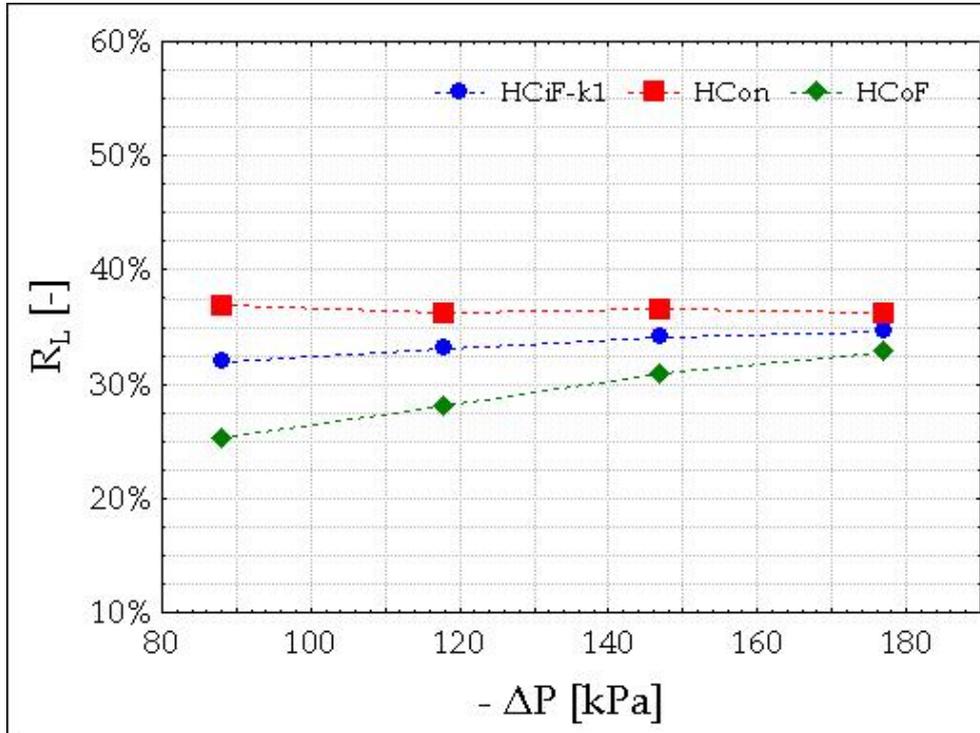


Figura 4.3: Resultados de R_L para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante.

Para o caso dos hidrociclones filtrantes foi possível observar que a filtração também foi um fator que influenciou essa resposta, já que a associação da hidrociclonação com esta operação unitária indicou que houve diminuição da razão de líquido, ocasionando uma corrente de *underflow* mais concentrada em sólidos. De acordo com os dados experimentais apresentados na Figura 4.3, é possível observar que, nas duas modalidades de hidrociclone filtrante (HCiF e HCoF), a retirada de filtrado fez com que tais equipamentos, em relação ao separador convencional, tivessem decréscimos em suas Razões de Líquido na ordem de 7% para o primeiro e de 20% para o segundo.

Acredita-se que a presença das matrizes porosas, bem como o aumento na capacidade de alimentação dos hidrociclones filtrantes alteraram a relação intrínseca mantida existente entre as componentes de velocidade do fluido (axial, radial e tangencial) de modo a diminuir a porcentagem de líquido que passou a ser descarregada na corrente de *underflow*.

O hidrociclone HCoF, nas mesmas condições operacionais dos hidrociclones HCiF e HCon, foi o equipamento que apresentou as menores Razões de Líquido. Entre os

equipamentos filtrantes, o hidrociclone HCoF teve Razão de Líquido cerca de 8% menor que aquela verificada para o hidrociclone HCiF. Os menores patamares de Razão de Líquido verificados para o hidrociclone HCoF em relação ao hidrociclone HCiF certamente foram por causa da maior área disponível à filtração na região cônica (cerca de 8%), que por sua vez, era também dotada de uma maior permeabilidade ($6,63 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) quando comparada à da matriz porosa cilíndrica ($1,71 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$).

Certamente, os menores valores de Razão de Líquido verificados para os hidrociclones filtrantes (HCiF e HCoF) tiveram impacto direto sobre a capacidade de separação centrífuga destes equipamentos, no sentido de provavelmente, diminuí-la. A fim de verificar tal afirmação, os valores experimentais de Eficiência Total Reduzida dos hidrociclones em face de diferentes quedas de pressão podem ser contemplados na Figura 4.4.

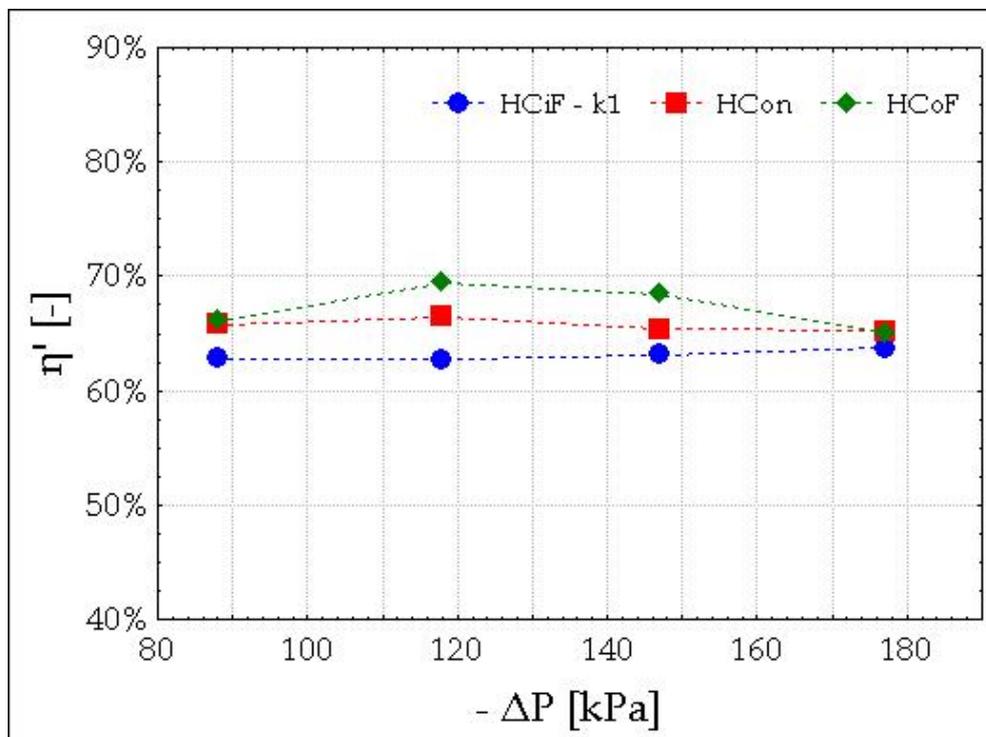


Figura 4.4: Valores de eficiência total reduzida (η') para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante.

De acordo com as principais informações contidas na Figura 4.4, foi possível verificar que, no que se refere à separação do material particulado, a filtração foi uma operação unitária benéfica para o hidrociclone HCoF e prejudicial para o hidrociclone HCiF.

De acordo com os resultados alcançados, houve um aumento na eficiência total reduzida de aproximadamente 3% para o hidrociclone HCoF quando comparado ao hidrociclone HCon. Já para o hidrociclone HCiF, a filtração provocou um decréscimo de aproximadamente 4% quando comparado ao similar convencional. Entre os equipamentos

filtrantes, a eficiência total reduzida do separador HCoF foi, em média, cerca de 7% maior que a hidrociclone HCoF.

Sugere-se que, no caso do hidrociclone HCoF (menores eficiências totais reduzidas), em um primeiro momento, as partículas presentes no vórtice externo até tenderam a ir mais rapidamente em direção à parede do cilindro em face da retirada de filtrado (comportamento fluidodinâmico benéfico à separação). Todavia, quando o vórtice externo adentrou na sua região cônica (parede maciça), a componente radial do fluido certamente voltou a aumentar no sentido da parede para o centro do equipamento, arrastando consigo e com maior facilidade as partículas que, por ventura, já se encontravam naquela região. Como o arraste das partículas para a região central ocorreu antes de que elas alcançassem o orifício de *underflow*, uma parcela que antes era coletada nas modalidades HCon e HCoF, foi inevitavelmente deslocada em direção ao eixo de simetria do equipamento e levada com maior facilidade ao tubo de *overflow* por causa da diminuição da Razão de Líquido, já discutida anteriormente.

Assim como o número de Euler (Eu) está diretamente relacionado com a vazão volumétrica de alimentação (Q_a), mesmo fato deverá ocorrer com o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) em relação à Eficiência Total Reduzida (η') em hidrociclones. Em outras palavras, certamente hidrociclones que apresentam as menores eficiências totais reduzidas deverão ser aqueles que têm os maiores diâmetros de corte reduzidos e vice-versa. A fim de corroborar esta informação, a Figura 4.5 apresenta os valores de diâmetros de corte reduzidos experimentais em função da queda de pressão para as três modalidades de hidrociclones utilizados nesta dissertação.

Da Figura 4.5, é possível observar que, em relação ao hidrociclone HCon, houve um decréscimo médio no diâmetro de corte reduzido de aproximadamente 6% para o hidrociclone HCoF. Já para o hidrociclone HCoF, a filtração provocou um acréscimo médio de aproximadamente 3% quando comparado aos diâmetros de corte reduzidos do equipamento convencional. Entre os equipamentos filtrantes, o diâmetro de corte reduzido do hidrociclone HCoF foi 9% menor que os do hidrociclone HCoF.

A escolha do “melhor” hidrociclone para determinada tarefa industrial depende do interesse particular de cada usuário, bem como das condições operacionais disponíveis (distribuição granulométrica) em cada caso.

Nas condições operacionais utilizadas e de acordo com os principais resultados experimentais obtidos neste trabalho, o equipamento cônico-filtrante (HCoF) seria o separador mais indicado na separação sólido-líquido, haja vista ter apresentado, dentre todas modalidades, os menores diâmetros de corte reduzidos associados a baixos consumos energéticos.

Na faixa granulométrica utilizada nesta dissertação, o separador cilíndrico-filtrante

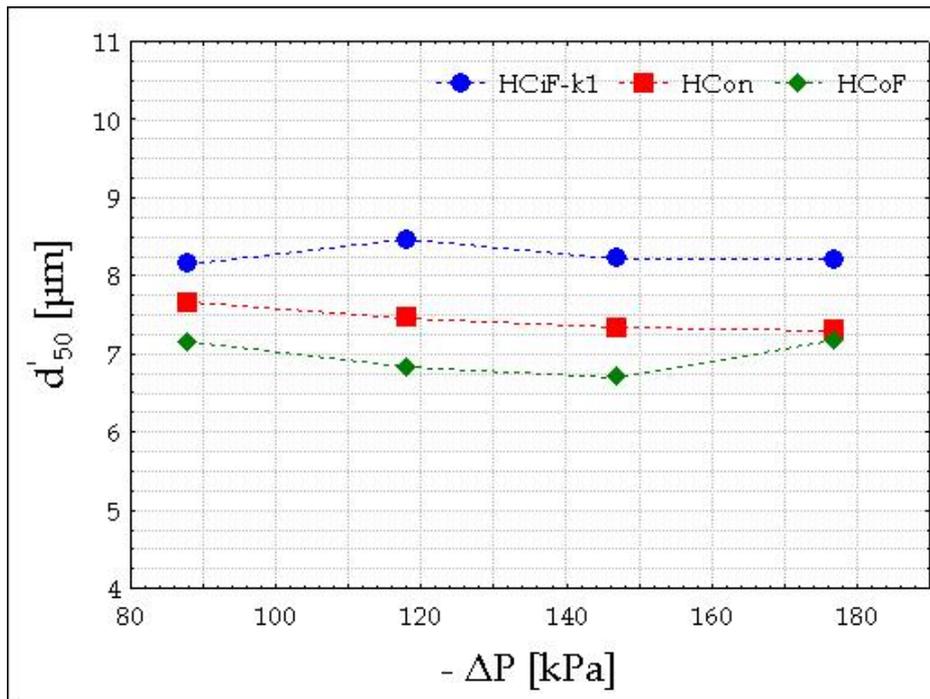


Figura 4.5: Valores de diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante.

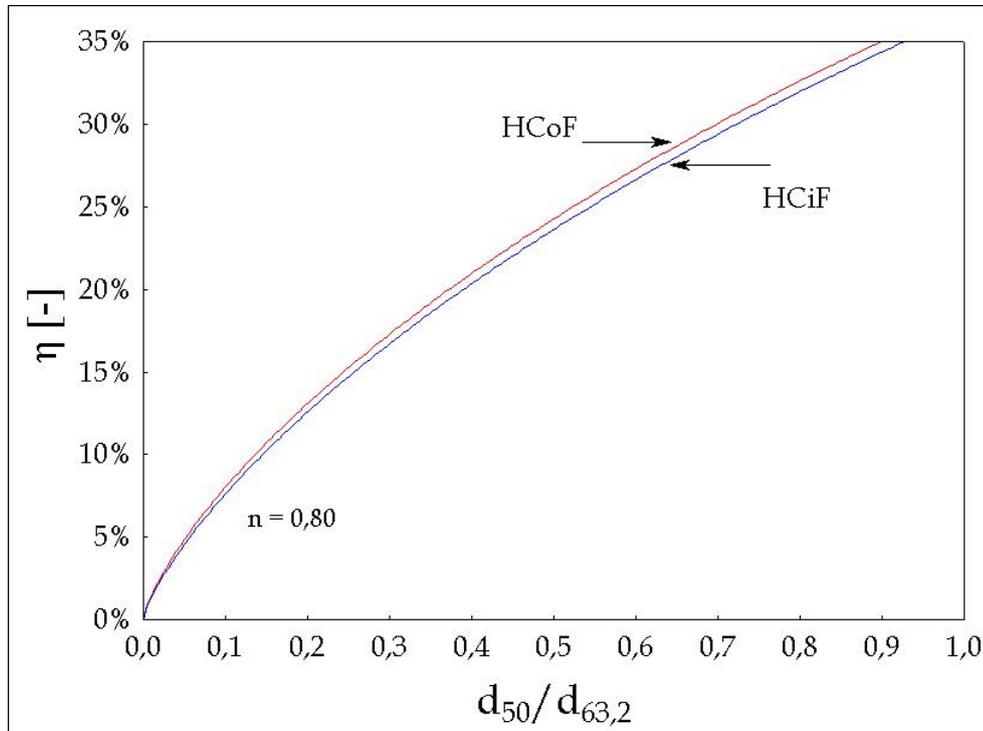


Figura 4.6: Curvas de Eficiência Total (η) para os hidrociclones HCoF e HCiF para uma distribuição granulométrica fina.

(HCiF) não obteve o mesmo desempenho do hidrociclone HCoF no que tange ao poder centrífugo de separação porque apresentou os maiores diâmetros de corte reduzidos (menores eficiências totais reduzidas). Tal afirmação pode ser constatada pela Figura 4.6 que apresenta as curvas de Eficiência Total (η) levantadas experimentalmente para os hidrociclones HCiF e HCoF em uma distribuição granulométrica considerada fina ($d_{63,2}/d'_{50} \leq 1$ e $n = 0,80$).

Embora não seja indicado para o processamento de “finos”, o hidrociclone HCiF pode ser viável naqueles casos nos quais o sólido a ser separado seja dotado de partículas maiores (corriqueiramente denominados de “grossos”), similar ao que acontece com a retirada de areia de águas fluviais para a irrigação ou de suspensões provenientes de sondas de perfuração de poços de petróleo e gás. Verifica-se que para materiais particulados considerados “grossos”, o hidrociclone HCiF passaria a ser o equipamento mais vantajoso quando comparado às demais modalidades (HCon e HCoF) porque tenderia a patamares superiores ou idênticos de separação, bem como conseguiria simultaneamente tratar um maior volume de suspensão por unidade de tempo, já que apresenta o menor Número de Euler dentre todos os equipamentos. Esta constatação fica evidenciada mediante análise da Figura 4.7 que apresenta as curvas de Eficiência Total levantadas experimentalmente para os hidrociclones HCiF e HCoF em uma distribuição granulométrica considerada “grossa” ($d_{63,2}/d'_{50} > 1$ e $n = 2,5$).

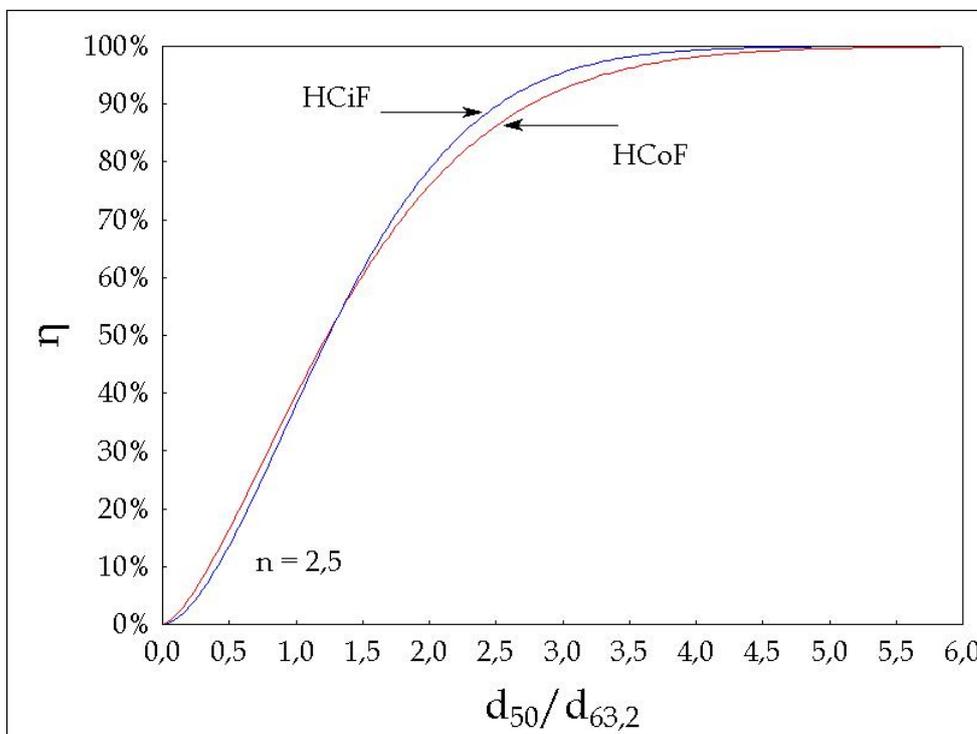


Figura 4.7: Curvas de Eficiência Total (η) para os hidrociclones HCoF e HCiF para uma distribuição granulométrica grossa

4.2 Análise da Influência da Permeabilidade no Desempenho dos Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes

Como mencionado no Capítulo 1, um outro objetivo deste trabalho foi avaliar como a permeabilidade do meio filtrante cilíndrico influenciava o desempenho dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes (HCiF) em comparação ao equipamento convencional (HCon), todos segundo a geometria otimizada por Vieira (2006).

Analogamente à seção anterior, serão apresentados os resultados obtidos para vazão de alimentação, número de Euler, Razão de Líquido, Eficiência Total Reduzida e Diâmetro de Corte Reduzido.

Primeiramente, serão apresentados os valores de vazão de filtrado (F) para as três permeabilidades estudadas (k_1, k_2, k_3), apresentados pela Figura 4.8.

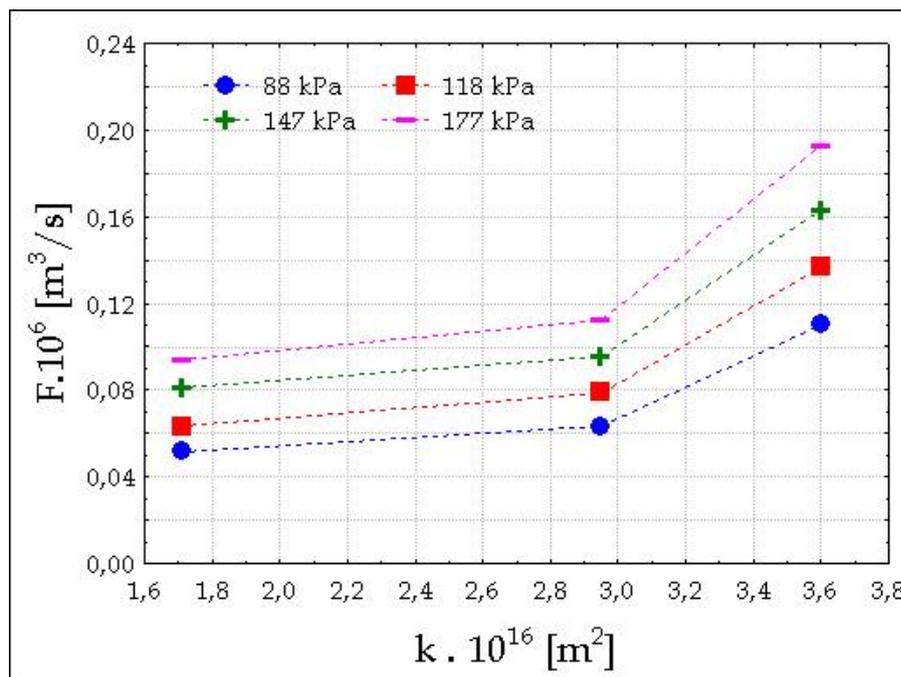


Figura 4.8: Vazões de filtrado em função das permeabilidades dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes após procedimento de colmatação.

Como já era esperado, houve aumento da vazão de filtrado com o aumento da permeabilidade, bem como houve um incremento dessa vazão com o aumento da queda de pressão durante o funcionamento dos hidrociclones HCiF. De qualquer forma, verificou-se que as vazões de filtrado, independentemente de cada uma das permeabilidades estudadas, foram ínfimas, consistindo no máximo 0,67% da vazão volumétrica inicialmente alimentada nos hidrociclones.

Como já fora apresentado e discutido na seção 4.1, mesmo a vazão de filtrado (F) sendo aparentemente desprezível em relação à vazão volumétrica de suspensão, tal fato por si próprio foi capaz de modificar o desempenho dos hidrociclones HCiF quando comparado com o hidrociclone HCon nas mesmas condições operacionais.

A influência da permeabilidade no funcionamento do hidrociclone HCiF pôde ser observada já nas respostas das vazões volumétricas de alimentação (Q_a). A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos para vazão volumétricas dos hidrociclones filtrantes de permeabilidades k_1 ($1,71 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), k_2 ($2,95 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) e k_3 ($3,60 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) e compara-os com aqueles obtidos para o hidrociclone convencional. Um primeiro aumento da permeabilidade, de k_1 para k_2 (em torno de 72,5 %), majorou a capacidade de processamento do equipamento como era esperado e como anteriormente fora observado para os hidrociclones cônico-filtrantes (SOUZA, 1999). No entanto, em um segundo incremento, de k_2 para k_3 (em torno de 22%), resultou em um decréscimo da vazão de alimentação, aproximando-a dos valores encontrados para o hidrociclone convencional.

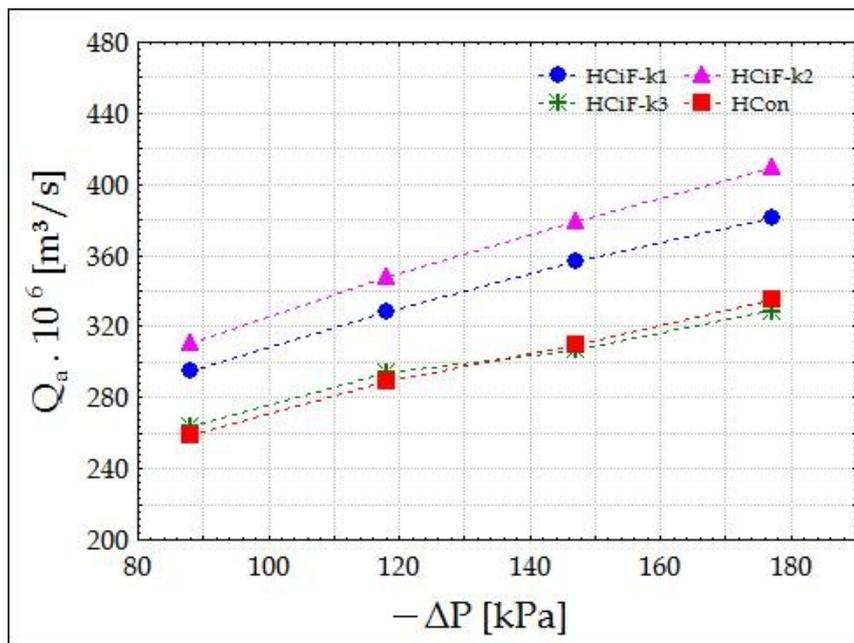


Figura 4.9: Valores experimentais de vazão de alimentação para os hidrociclones das modalidades HCiF e HCon.

De acordo com a Figura 4.9, foi possível constatar que a vazão de alimentação não aumentou indefinidamente com o incremento da permeabilidade. Pelo contrário, a vazão de alimentação atingiu um máximo em um valor de permeabilidade intermediário (k_2), independente da queda de pressão utilizada, conforme mostra a Figura 4.10.

Em termos quantitativos, vislumbra-se da Figura 4.9 que as vazões volumétricas dos hidrociclones HCiF- k_1 , HCiF- k_2 e HCiF- k_3 apresentaram, em relação ao hidrociclone

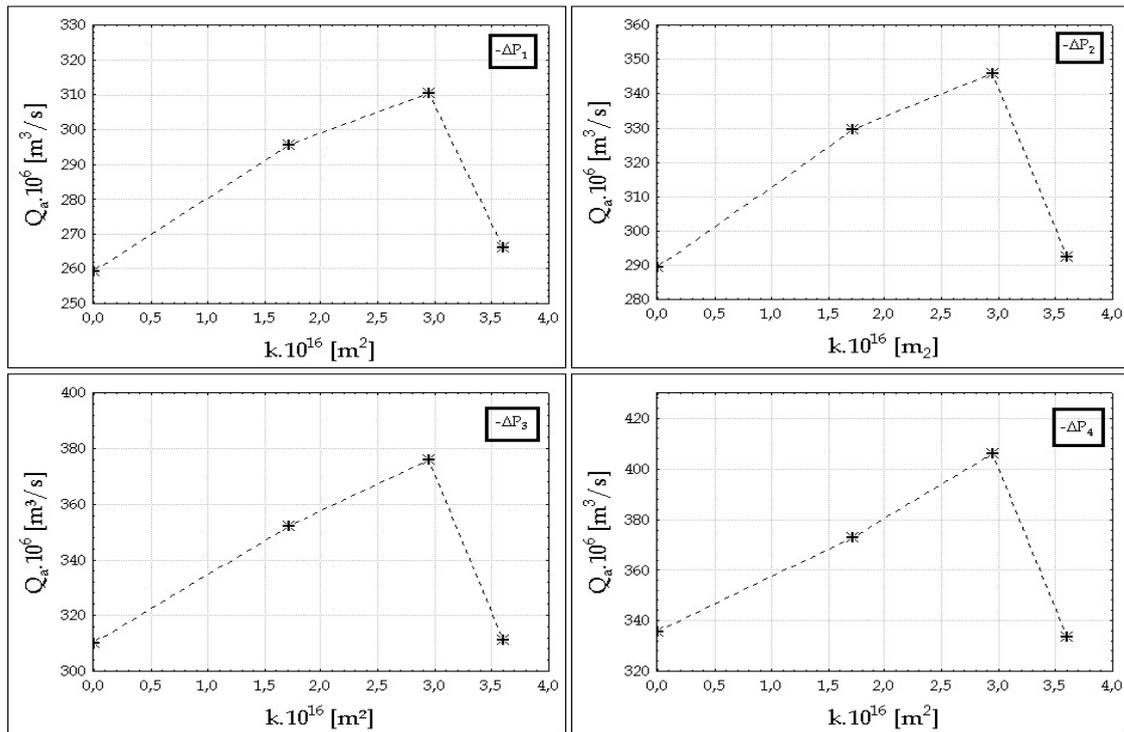


Figura 4.10: Vazões de alimentação obtidas experimentalmente em função da permeabilidade da parede cilíndrica dos hidrociclones para cada queda de pressão avaliada.

HCon, acréscimos médios de 13, 21 e 1%, respectivamente. De acordo ainda com as informações contidas na Figura 4.10, acredita-se que valores altos de permeabilidade devem ser evitados durante a hidrociclonação com os hidrociclones HCiF porque não trazem qualquer benefício à capacidade de alimentação do equipamento, deixando-a, inclusive, nos mesmos patamares do hidrociclone convencional (HCon), ou mesmo em valores inferiores aos obtidos por este. Acredita-se que a maior permeabilidade da matriz filtrante k_3 deveu-se à presença de fissuras em regiões específicas desse meio filtrante, que mascaram o procedimento de permeamtria, já que este é baseado somente na relação da queda de pressão com valor da vazão de filtrado. Sendo assim, apesar de uma maior permeabilidade aparente, é possível que nas outras regiões nas quais não há fissuras, a permeabilidade média seja menor que os valores obtidos para as matrizes k_1 e k_2 , o que justificaria o comportamento atípico observado para o HCiF - k_3 . Notou-se que esse comportamento se repetiu para as demais respostas avaliadas neste trabalho.

A Figura 4.11 apresenta os números de Euler (Eu) dos hidrociclones HCiF em função da queda de pressão e a Figura 4.12 apresentam os números de Euler em função das permeabilidades utilizadas

Como já era esperado, foi possível constatar que o número de Euler não decaiu indefinidamente com o aumento da permeabilidade. Pelo contrário, o número de Euler atingiu

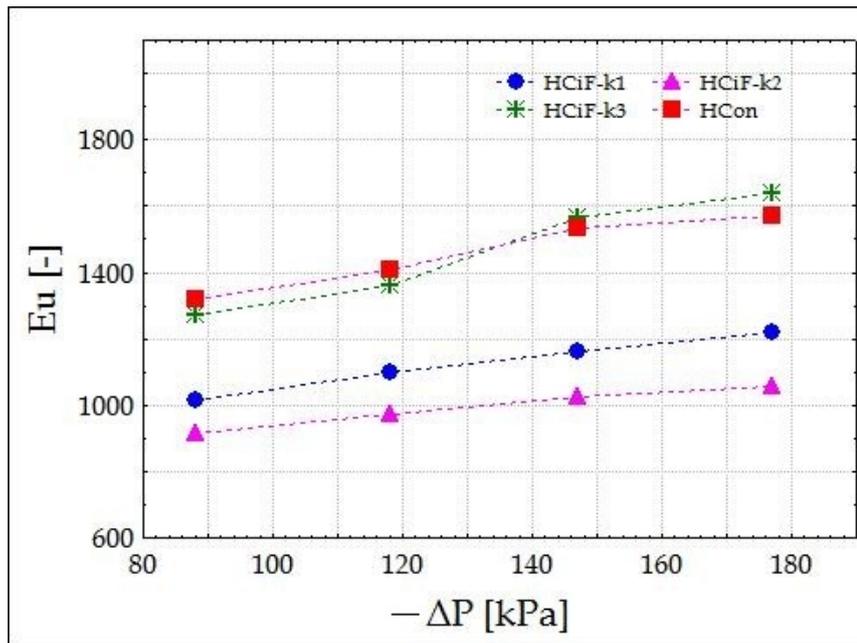


Figura 4.11: Resultados experimentais de número de Euler para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3 .

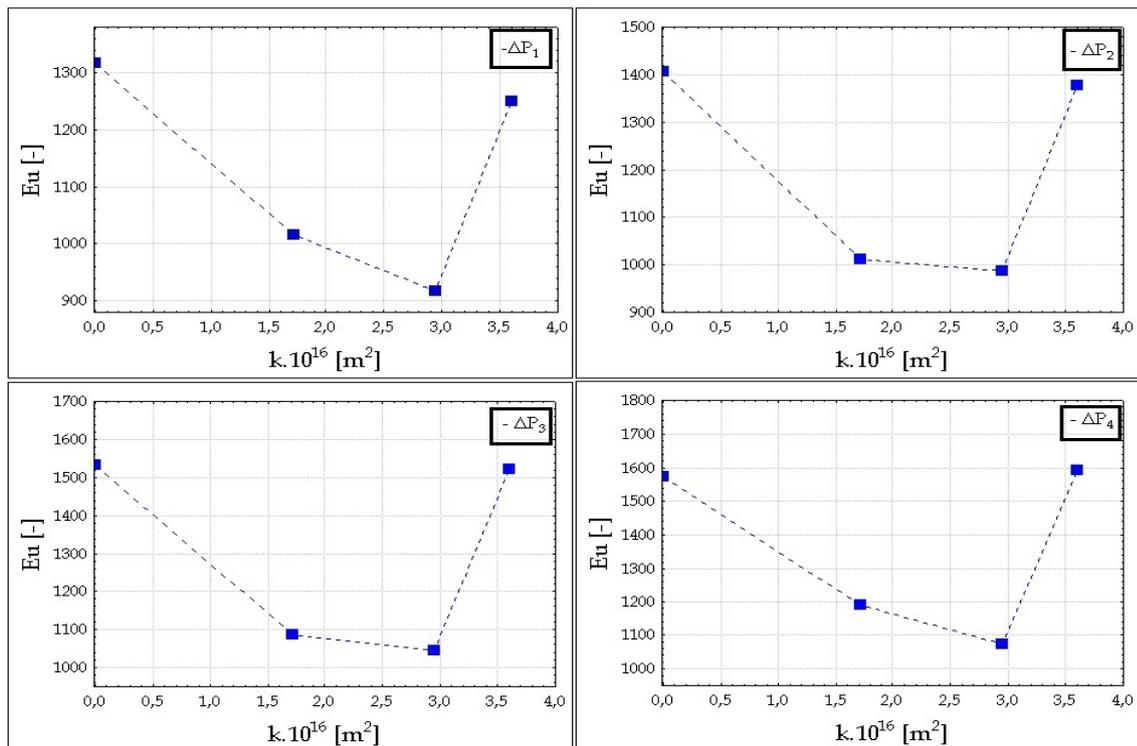


Figura 4.12: Valores experimentais de Número de Euler em função da permeabilidade da parede cilíndrica para as quedas de pressão avaliadas.

um mínimo em um valor de permeabilidade intermediário (k_2). Em termos quantitativos, foi possível observar para esta resposta que os hidrociclones HClF- k_1 , HClF- k_2 e HClF- k_3

apresentaram decréscimos médios de 22, 31 e 3%, respectivamente. Analisando, única e exclusivamente pela óptica do consumo energético, pôde-se categoricamente afirmar que o hidrociclone HCiF- k_2 seria o mais indicado para uma unidade de hidrociclonação, haja vista proporcionar os menores consumos de energia (menor número de Euler) dentre todos separadores.

A Figura 4.13 apresenta os dados experimentais de Razão de Líquido (R_L dos hidrociclones filtrantes e convencional em função da queda de pressão.

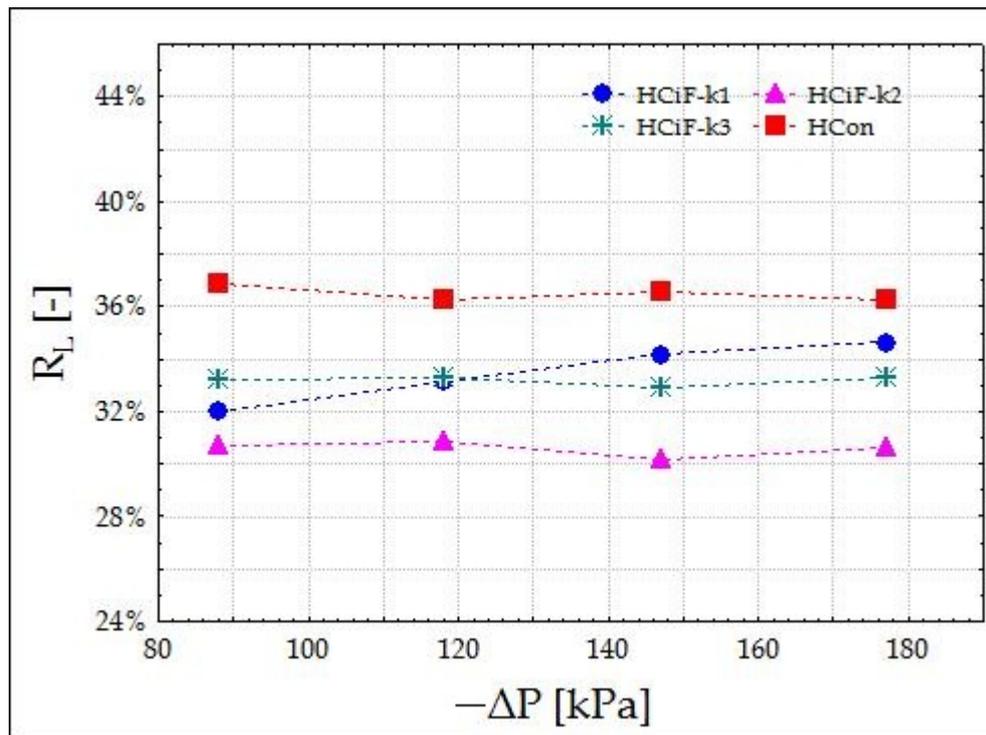


Figura 4.13: Resultados experimentais de Razão de Líquido para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3 .

Similarmente ao comportamento do Número de Euler, as Razões de Líquido dos hidrociclones HCiF não decaíram indefinidamente com incremento de permeabilidade. Neste caso, a Razão de Líquido alcançou novamente um valor mínimo para um patamar intermediário de permeabilidade (k_2), conforme está ilustrado na Figura 4.14.

A quantificação do efeito da permeabilidade sobre a Razão de Líquido mostrou que os decréscimos foram de 7, 17 e 10% para os hidrociclones HCiF- k_1 , HCiF- k_2 e HCiF- k_3 , respectivamente, quando comparados ao hidrociclone HCon. Outro detalhe importante é que, nas condições operacionais, as Razões de Líquido para um determinado hidrociclone (convencional ou filtrantes) foram praticamente constantes com variações na queda de pressão, mostrando que tal grandeza independeu do Número de Reynolds, diferentemente do sugerido por Svarovsky (2000), sendo função apenas das dimensões geométricas,

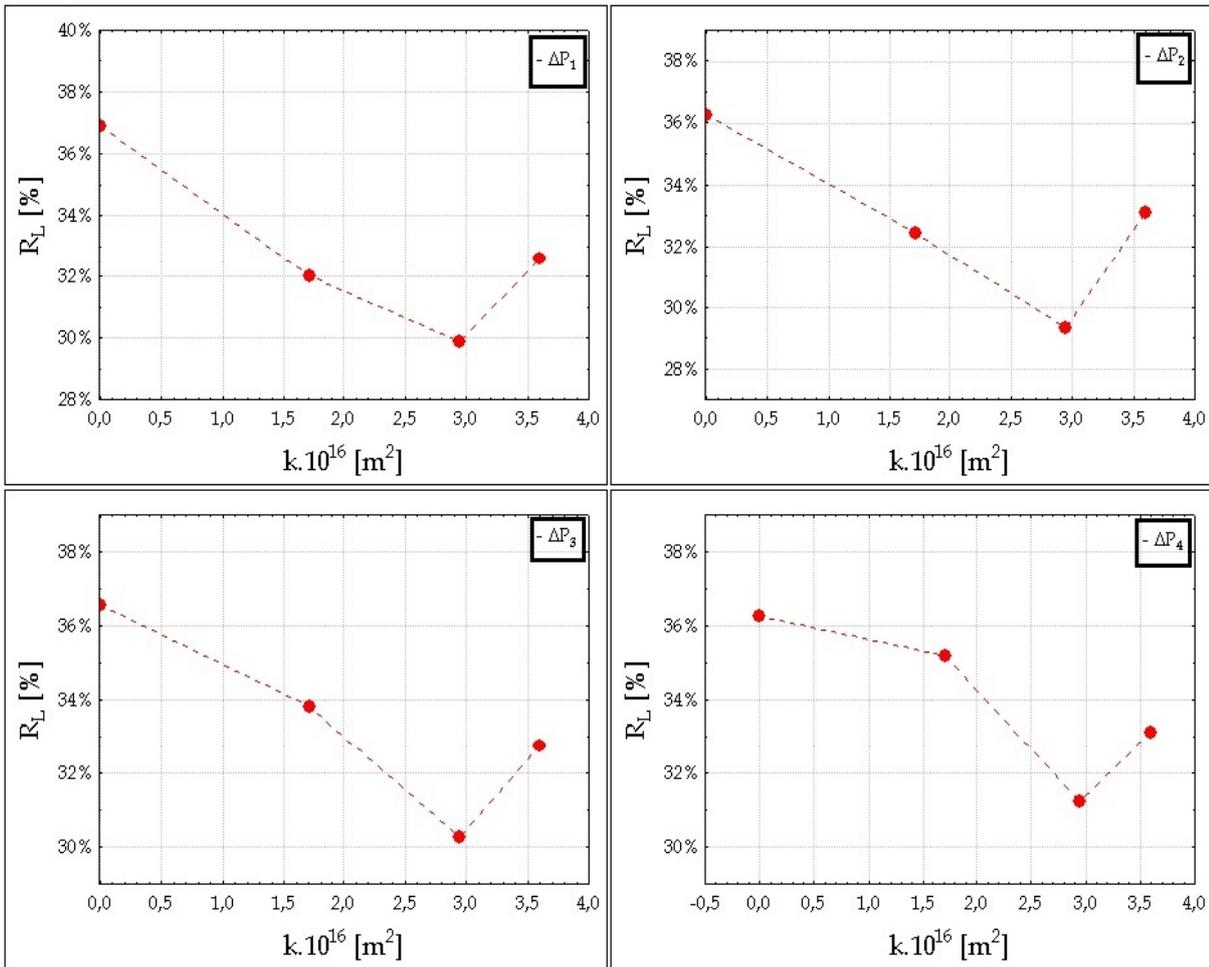


Figura 4.14: Valores experimentais de Razão de Líquido em função da permeabilidade da seção cilíndrica nas quedas de pressão estudadas.

conforme retratado por Massarani (1989).

Os resultados experimentais de Razão de Líquido mostram que os hidrociclones filtrantes podem ser uma alternativa interessante nas operações unitárias de concentração de sólidos, especialmente o hidrociclone HCiF- k_2 , porque levam a correntes de *underflow* mais concentradas quando comparadas àquelas apresentadas pelo hidrociclone convencional.

Dando continuidade à apresentação dos principais resultados experimentais verificados para os hidrociclones HCiF, são apresentados na Figura 4.15 os valores de Eficiência Total Reduzida (η') dos separadores em função da queda de pressão, bem como os respectivos Diâmetros de Corte Reduzido (d'_{50}) na Figura 4.16.

A partir das informações trazidas pela Figura 4.15 ou 4.16, foi possível observar que, analogamente ao comportamento verificado para o Número de Euler e a Razão de Líquido,

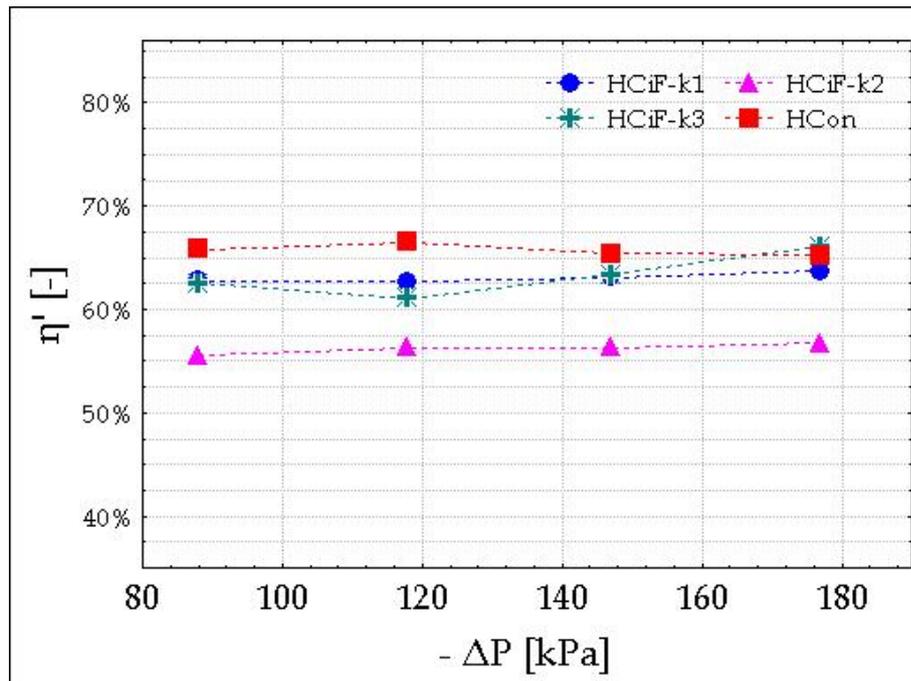


Figura 4.15: Resultados experimentais de Eficiência Total Reduzida para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3 .

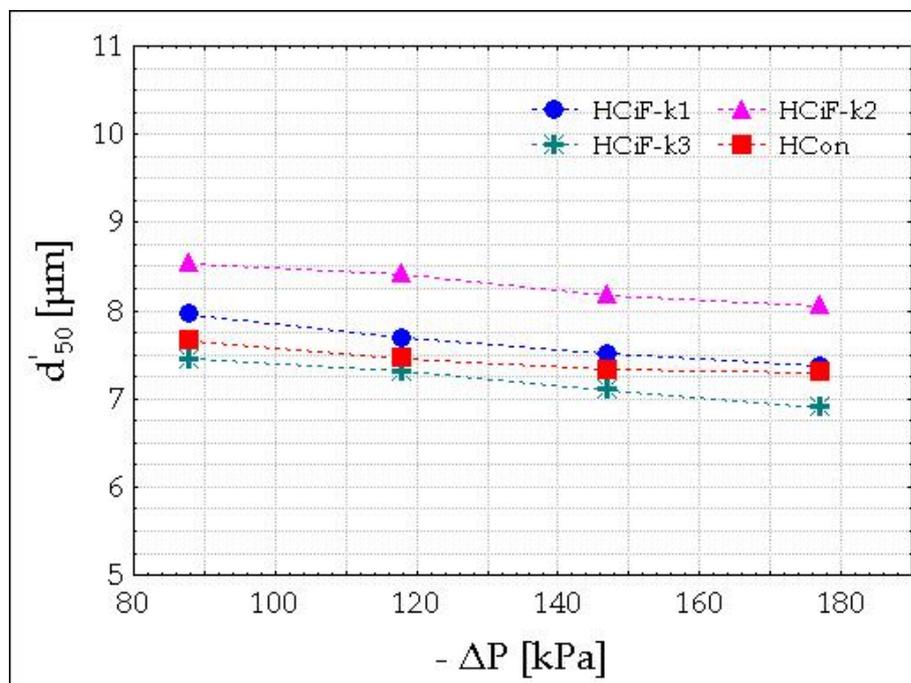


Figura 4.16: Resultados experimentais de Diâmetro de Corte Reduzido para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3 .

a Eficiência Total Reduzida e o Diâmetro de Corte Reduzido também não decaíram ou aumentaram de forma indefinida com acréscimo da permeabilidade do cilindro, apresentando os menor valor para (η') e os maior valor para (d'_{50}) nos ensaios cuja parede cilíndrica

filtrante tinha permeabilidade k_2 , nos termos da Figura 4.17 e 4.18.

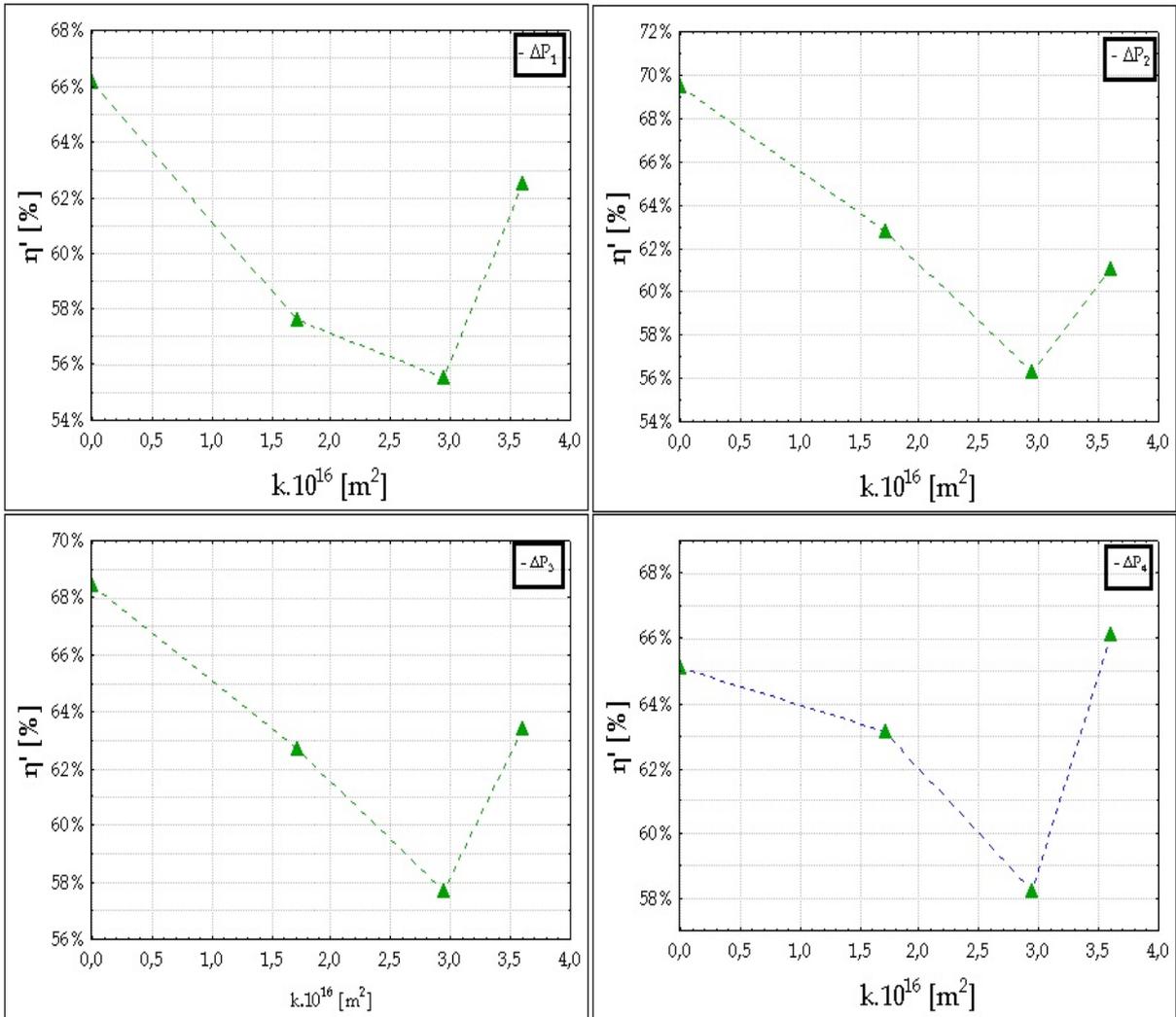


Figura 4.17: Valores experimentais de Eficiência Total Reduzida (η') em função da permeabilidade da seção cilíndrica para todas as quedas de pressão estudadas.

No caso dos hidrociclones HClF- k_1 , HClF- k_2 e HClF- k_3 , as eficiências totais reduzidas sofreram diminuições médias de 4, 13 e 4%, respectivamente, quando comparadas ao hidrociclone convencional (HCon). Em se tratando da análise apenas da eficiência total reduzida, concluiu-se que a permeabilidades mais alta prejudicaria a separação centrífuga de sólidos (maiores diâmetros de corte reduzidos). Neste contexto, em específico, o hidrociclone HClF- k_1 e o HClF - k_3 seriam os menos drásticos quanto às perdas de material particulado para a corrente de *overflow* durante a hidrociclonação.

Este comportamento resultante da dinâmica de separação dos hidrociclones HClF faz acreditar que, se determinada suspensão for composta de material particulado considerado “fino”, a melhor opção dentre os hidrociclones filtrantes seria o HClF- k_1 , pois ele não teria uma perda tão acentuada na sua eficiência total reduzida (apenas 4%) e man-

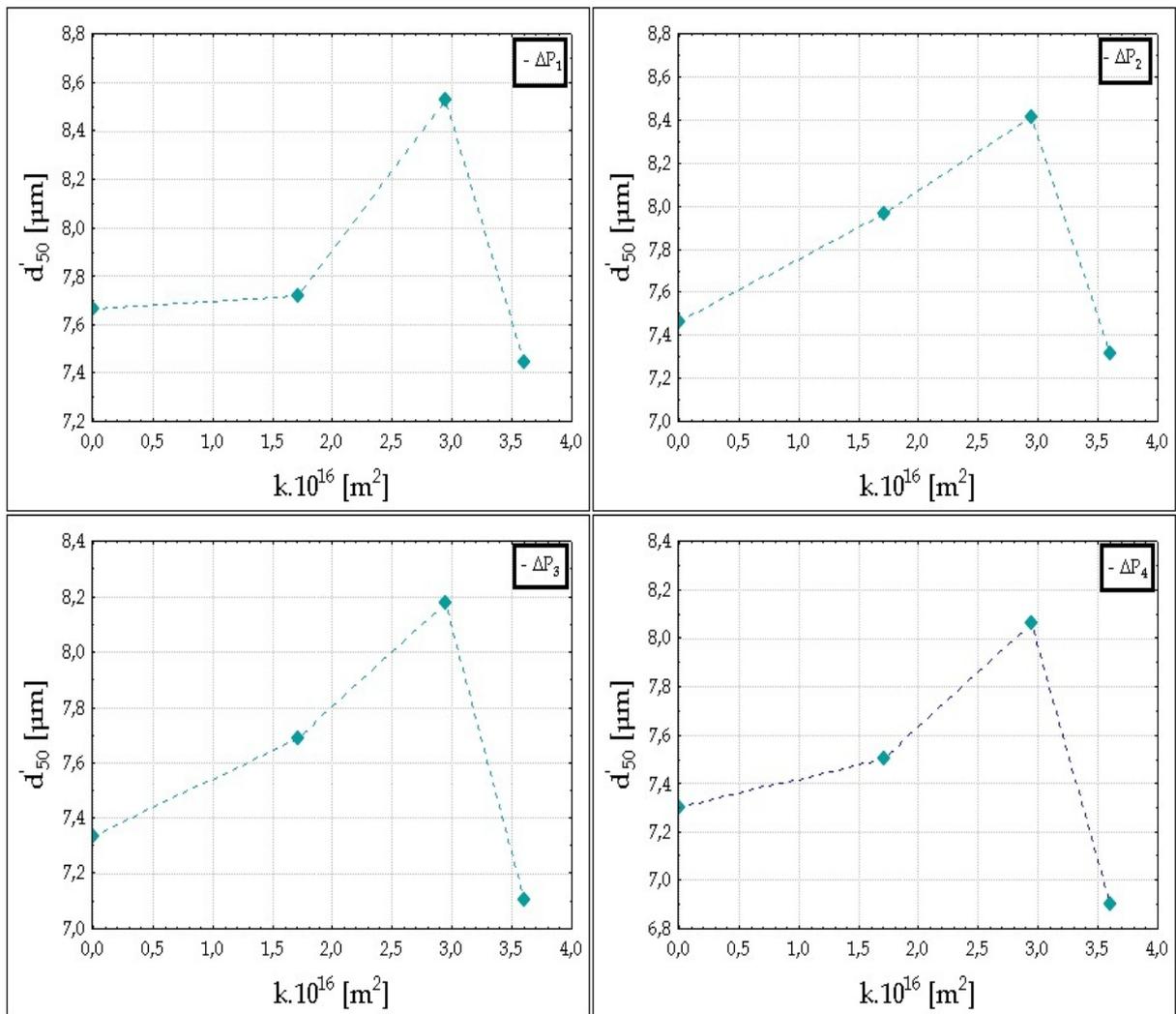


Figura 4.18: Valores experimentais de Diâmetro de Corte Reduzido (d'_{50}) em função da permeabilidade da seção cilíndrica para cada queda de pressão.

teria um decréscimo ainda viável tecnicamente para o Número de Euler (22%). Todavia, imagina-se que, se o material particulado presente na suspensão for considerado “grosso”, é provável que os hidrociclones filtrantes apresentem patamares praticamente idênticos de separação. Neste contexto, o hidrociclone HCiF- k_2 seria o mais indicado à hidrociclogagem do material de interesse, haja vista que o número de Euler foi praticamente 31% menor do que aquele verificado para o hidrociclone convencional.

Dos dados experimentais vislumbra-se ainda que, em se tratando de hidrociclones do tipo HCiF, não valeria à pena empregar meios filtrantes muito permeáveis ($k > k_3$), pois tudo indica que, em termos de separação, seriam piores ou no máximo idênticos ao hidrociclone convencional a depender se o material particulado fosse considerado “fino” ou “grosso”, respectivamente, ao passo que, em termos energéticos, consumiriam a mesma quota já utilizada pelo similar convencional.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desse trabalho assim como sugestões para trabalhos futuros, que possam aumentar o conhecimento sobre os hidrociclones filtrantes.

5.1 Principais Conclusões

Influência do Posicionamento do Meio Filtrante sobre o Desempenho do Hidrociclone Filtrante

- A filtração aplicada simultaneamente à separação centrífuga modificou o desempenho do hidrociclone convencional.
- Em uma mesma condição operacional (distribuição granulométrica, concentração de sólidos e queda de pressão), o desempenho do hidrociclone convencional (HCon) teve diferentes comportamentos a depender se a filtração ocorria na parte cilíndrica (HCiF) ou na parte cônica (HCoF).
- A utilização da filtração mostrou que os hidrociclones HCiF e HCoF, a depender do tipo de resposta a se analisar, podem ter a mesma tendência de comportamento (número de Euler, Razão de Líquido) ou contrária (diâmetro de corte reduzido e eficiência total reduzida).
- Tanto na modalidade do hidrociclone HCiF quanto na do HCoF, a presença da filtração fez com que tais equipamentos apresentassem decréscimos no número de Euler quando comparados ao equipamento convencional (HCon). Em relação a este

equipamento, houve um decréscimo médio no número de Euler em torno de 17% para o hidrociclone HCoF. Já para o hidrociclone HCiF, a filtração acarretou uma diminuição média de aproximadamente 22% em relação ao equipamento convencional. Entre os equipamentos filtrantes, o número de Euler do separador HCiF foi, em média, cerca de 7% menor que aquele apresentado pelo HCoF.

- Considerando que o hidrociclone HCiF, nas mesmas condições operacionais dos hidrociclones HCoF e HCon, foi o equipamento que, dentre todos, apresentou os menores número de Euler (maiores vazões volumétricas de alimentação), acredita-se que tal fenômeno ocorreu pelo fato do escoamento, logo de início, deparar-se com uma estrutura cilíndrica porosa que lhe ofereceu um caminho preferencial e mais oportuno, diminuindo-lhe a perda de carga e, conseqüentemente, aumentando-lhe a capacidade de alimentação.
- Nas duas modalidades de hidrociclone filtrante (HCiF e HCoF), a retirada de filtrado fez com que tais equipamentos, em relação ao separador convencional, tivessem decréscimos em suas Razões de Líquido na ordem de 7% para o primeiro e de 20% para o segundo. Acredita-se que a presença das matrizes porosas, bem como o aumento na capacidade de alimentação dos hidrociclones filtrantes alteraram a relação intrínseca existente entre as componentes de velocidade do fluido (axial, radial e tangencial) de modo a diminuir a porcentagem de líquido que passou a ser descarregada na corrente de *underflow*.
- No que se refere à separação do material particulado, foi possível verificar que a filtração foi benéfica para o hidrociclone HCoF e prejudicial para o hidrociclone HCiF. Em relação ao hidrociclone HCon, houve um aumento na eficiência total reduzida de aproximadamente 3% para o hidrociclone HCoF. Por outro lado, para o hidrociclone HCiF a filtração provocou um decréscimo de aproximadamente 4% quando comparado ao similar convencional. Entre os equipamentos filtrantes, a eficiência total reduzida do separador HCoF foi, em média, cerca de 7% maior do que a hidrociclone HCiF.
- Por fim, foi possível concluir que para materiais particulados mais “finos” o hidrociclone HCoF parece ser o mais vantajoso quando comparado às demais modalidades (HCon e HCiF) porque melhora a eficiência de separação (menores diâmetros de corte reduzido) com redução simultânea nos custos com energia de bombeamento. No entanto, acredita-se que para materiais particulados mais “grossos”, o hidrociclone HCiF passa ser o mais vantajoso quando comparado às demais modalidades (HCon e HCoF) porque manteria o mesmo desempenho de separação e conseguiria simultaneamente tratar um maior volume de suspensão por unidade de tempo.

Influência da Permeabilidade do Cilindro Filtrante sobre o Desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante

- O desempenho do hidrociclone HCiF pode sofrer alterações significativas de acordo com a permeabilidade empregada na região cilíndrica filtrante.
- Pôde ser verificado para os hidrociclones HCiF, independentemente do desempenho deste em relação aos hidrociclones HCoF e HCon, que houve, no domínio experimental, um valor intermediário de permeabilidade que resultou nos maiores ou menores valores das repostas de interesse (número de Euler, Eficiência Total Reduzida, Diâmetro de Corte Reduzido e Razão de Líquido), levando-se a acreditar que haja, nesse mesmo domínio, um valor de permeabilidade que venha a maximizar e minimizar as repostas de interesse.
- A provável presença de fissuras em regiões específicas da matriz cilíndrica porosa k_3 pode ter ocasionado o comportamento atípico obtido pelo hidrociclone HCiF - k_3 , ou seja, apesar de possuir a maior permeabilidade aparente, o que poderia levá-lo a um melhor desempenho, observou-se que o HCiF - k_3 obteve desempenho semelhante ao hidrociclone convencional.
- Foi possível constatar que o número de Euler não decaiu indefinidamente com o aumento da permeabilidade. Pelo contrário, o número de Euler atingiu menor valor em um nível de permeabilidade intermediária (k_2). Em termos quantitativos, foi possível observar para esta resposta que os hidrociclones HCiF- k_1 , HCiF- k_2 e HCiF- k_3 apresentaram decréscimos médios de 22, 31 e 3% em relação ao similar convencional, respectivamente. Analisando, única e exclusivamente pela óptica do consumo energético, pôde-se afirmar que o hidrociclone HCiF- k_2 seria o mais indicado para uma unidade de hidrociclonagem, haja vista proporcionar os menores números de Euler dentre todos separadores.
- Similarmente ao comportamento do número de Euler, as Razões de Líquido dos hidrociclones HCiF não decaíram indefinidamente com incremento de permeabilidade. Neste caso, a Razão de Líquido alcançou novamente um menor valor para um patamar intermediário de permeabilidade (k_2). A quantificação do efeito da permeabilidade sobre a Razão de Líquido mostrou que os decréscimos foram de 7, 17 e 10% para os hidrociclones HCiF- k_1 , HCiF- k_2 e HCiF- k_3 em relação ao equipamento convencional, respectivamente.
- Analogamente ao comportamento verificado para o número de Euler e a Razão de Líquido, foi possível comprovar que a Eficiência Total Reduzida também não decaiu indefinidamente com acréscimo da permeabilidade do cilindro. No caso dos hidrociclones HCiF- k_1 , HCiF- k_2 e HCiF- k_3 , as Eficiências Totais Reduzidas sofreram

diminuições médias de 4, 13 e 11% em relação ao convencional, respectivamente. Em se tratando da análise apenas da Eficiência Total Reduzida, pôde-se concluir que permeabilidades mais altas da seção cilíndrica prejudicariam a separação de sólidos. Neste caso, em específico, o hidrociclone HCiF-k₁ seria o equipamento no qual haveria uma perda menos acentuada de material particulado no processo de hidrociclonagem.

- De acordo com os principais resultados, acredita-se que se determinada suspensão for composta de material particulado considerado “fino”, a melhor opção dentre os hidrociclones filtrantes seria o HCiF-k₁, pois ele não teria uma perda tão significativa na sua Eficiência Total Reduzida (apenas 4%) e manteria um decréscimo ainda viável tecnicamente para o número de Euler (22%). Todavia, imagina-se que se o material particulado presente na suspensão for considerado “grosso”, é provável que os hidrociclones filtrantes apresentem patamares praticamente idênticos de separação àqueles apresentados pelos hidrociclones HCoF e HCon. Neste contexto, o hidrociclone HCiF-k₂ seria o mais indicado à hidrociclonagem do material de interesse, haja vista que o número de Euler foi praticamente 31% menor do que aquele verificado para o hidrociclone convencional.
- Foi possível concluir que, em se tratando de hidrociclones do tipo HCiF, não valeria à pena empregar meios filtrantes muito permeáveis ($k > k_3$), pois tudo indica que, em termos de separação, seriam piores ou no máximo idênticos ao hidrociclone convencional (a depender se o material particulado fosse considerado “fino” ou “grosso”, respectivamente) e em termos energéticos, consumiriam a mesma quota já utilizada pelo similar convencional.
- Em suma, imagina-se que um hidrociclone híbrido seria capaz de conjugar as potencialidades até então verificadas experimentalmente para os hidrociclone HCiF e HCoF. Neste caso, este separador híbrido (HCiCoF) teria simultaneamente o cilindro e o cone filtrantes.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

- Lançar mão de técnicas de CFD para auxiliar na explicação do escoamento interno do hidrociclone cilíndrico-filtrante.
- Investigar a não linearidade do efeito da permeabilidade com mais níveis desta variável.
- Realizar estudos experimentais e fluidodinâmicos com um hidrociclone do tipo HCiCoF - no qual as duas seções serão substituídas por matrizes porosas.

- Realizar uma análise financeira sobre a viabilidade de implementação de hidrociclones filtrantes em escala industrial.
- Realizar testes de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) nas matrizes porosas com intuito de verificar como está disposta a distribuição de poros dessa estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, M. M.; IBRAHIM, G. A.; FARGHALY, M. Performance of a three-product hydrocyclone. *International Journal of Mineral Processing*, v. 91, p. 34–40, 2009.
- ALMEIDA, C. A. K. *Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder*. Dissertação (Mestrado) — UFU, 2007.
- ARRUDA, E. B. *Performance de hidrociclones filtrantes com geometria Demco*. Dissertação (Mestrado) — UFU, Uberlândia, MG, 185p., 2003.
- ARRUDA, E. B. et al. Avaliação do comportamento de hidrociclones filtrantes de krebs. In: *XXX Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos, São Carlos*. [S.l.: s.n.], 2002.
- BHASKAR, K. et al. Classification studies of lead-zinc ore fines using water-injection cyclone. *International Journal of Mineral Processing*, v. 77, p. 80–94, 2005.
- BLOOR, M. I. G.; INGHAM, D. B. Turbulent spin in a cyclone. *Trans I. Chem. E.*, v. 15, p. 1–6, 1975.
- BLOOR, M. I. G.; INGHAM, D. B.; LAVERACK, S. D. An analysis of boundary layer effects in a hydrocyclone. In: *International Conference on Hydrocyclones*. [S.l.: s.n.], 1980. p. 49–62.
- CHU, L. et al. Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core. *Chemical Engineering Processing*, v. 43, p. 1441–1448, 2004.
- COELHO, M. A. Z.; MEDRONHO, R. A. A model for performance prediction of hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*, v. 84, p. 7–14, 2001.
- CRINER, H. E. The vortex thickener. In: *International Conference on Coal Preparation*. Paris: [s.n.], 1950.
- DABIR, B. *Mean velocity measurements in a 3"-hydrocyclone using Laser Doppler Anemometry*. Tese (Doutorado) — Chemical Engineering Department, Michigan State University, East Lansing, MI, 1983.

- DAMASCENO, J. J. R.; MASSARANI, G. Estudo de um sedimentador contínuo com fundo filtrante. In: *XIV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas*. [S.l.: s.n.], 1986. p. 283–290.
- DRIESSEN, M. G. Review of industrial mining. *Special Issue No. 4*, p. 449–461, 1951.
- DUECK, J. et al. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection. *Minerals Engineering*, v. 23, p. 289–294, 2010.
- DUIJN, G. van; RIETEMA, K. *Segregation of fluidized solids Parts I and II*. [S.l.]: Delft University Press, 1982. 29-93 p.
- EVANS, W.; SUKSANGPANOMRUNG, A.; NOWAKOWSKI, A. The simulation of the flow within a hydrocyclone operating with an air core and with an inserted metal rod. *Chemical Engineering Journal*, v. 143, p. 51–61, 2008.
- FAHLSTROM, P. H. In: INSTITUTE OF MINING AND METALURGY. *Proceedings International Mineral Processing Congress*. [S.l.], 1960. p. 632–643.
- HENRIQUE, H. M.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo da dinâmica de um sedimentador filtrante. In: *XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*. Uberlândia: [s.n.], 1987. p. 303–310.
- HONAKER, R. Q. et al. Apex water injection for improved hydrocyclone classification efficiency. *Minerals Engineering*, v. 14, n. 11, p. 1445–1457, 2001.
- LANNA, A. E.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. *Revista Ciência & Engenharia*, p. 175–186, 1992.
- MAINZA, A.; POWELL, M. S.; KNOPJES, B. Differential classification of dense material in a three-product cyclone. *Minerals Engineering*, v. 17, p. 573–579, 2004.
- MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: *Anais do XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 125–136.
- MEDRONHO, R. A.; SVAROVSKY, L. Tests to verify hydrocyclone scale-up procedure. In: *II International Conference on Hydrocyclone, Bath, UK*. [S.l.: s.n.], 1984.
- OBENG, D. P.; MORRELL, S. The jk three-product cyclone - performance and potential applications. *International Journal of Mineral Processing*, v. 69, p. 129–142, 2003.
- PRATARN, W.; WIWURT, T.; YOSHIDA, H. Classification of silica fine particles using a novel electric hydrocyclone. *Science and technology of advanced materials*, v. 6, p. 364–369, 2005.
- PRATARN, W. et al. Effect of ph of fine silica suspension and central rod diameter on the cut size of an electrical hydrocyclone with and without underflow. *Separation and Purification Technology*, v. 63, p. 452–459, 2008.
- RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclones, parts i to iv. *Chemical Engineering Science*, v. 15, 1961.

- ROCHA, S. M. S.; VIEIRA, L. G. M. Experimental determination of the permeability of non-planar porous structures during operation of equipment in own industrial unit. Eight International Latin-American Conference in Powder Technology. 2012.
- SCHAPPEL, S. C.; CHASE, G. G. Modeling of hydrocyclone flow with permeable walls. *Advances in Filtration and Separation Technology*, v. 11, p. 33–36, 1998.
- SCHUBERT, H.; NEESE, T. A hydrocyclone separation model in consideration of the turbulent multiphase flow. In: *Proceedings of International Conference on Hydrocyclones*. [S.l.: s.n.], 1980. p. 23–36.
- SILVA, M. A. P.; MEDRONHO, R. A. Um método de distribuição granulométrica. In: *XIV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas*. [S.l.: s.n.], 1986. p. 267–275.
- SILVA, M. A. P.; MEDRONHO, R. A. Modelos que preveem o desempenho de hidrociclones: uma avaliação crítica. In: *XVI Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 353–361.
- SOUZA, F. J. *Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante*. Dissertação (Mestrado) — UFU, 1999.
- SOUZA, F. J.; NETO, A. S.; BARROZO, M. A. S. Simulação numérica de escoamentos turbulentos em hidrociclones com modelagem submalha. In: *II Escola Brasileira de Transição e Turbulência - ETT2000, Uberlândia, p.358-368*. [S.l.: s.n.], 2000.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclones*. [S.l.]: Technomic Publishing Co., Inc, 1984. 198 p.
- SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 4th. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.
- VIEIRA, L. G. M. *Análise da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclone Filtrante*. [S.l.], 1997.
- VIEIRA, L. G. M. *Estudo da performance de hidrociclones filtrantes Rietema*. Dissertação (Mestrado) — UFU, Uberlândia, MG, 141p., 2001.
- VIEIRA, L. G. M. *Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes*. Tese (Doutorado) — UFU, Uberlândia, MG, 297p., 2006.

Resultados Experimentais para Hidrociclones Convencional e Filtrantes

Tabela A.1: Resultados experimentais para o hidrociclone convencional - HCon.

ΔP [kPa]	Q [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	Re [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μ m]	d' ₅₀ [μ m]	C _{va} [-]	F [cm ³ /s]
88	259	36,9	1317	11638	78,4	65,8	5,59	7,66	0,95	-
118	289	36,2	1408	12999	78,6	66,5	5,49	7,46	0,95	-
147	310	36,6	1533	13925	78,0	65,4	5,35	7,33	0,95	-
177	335	36,3	1573	15062	77,8	65,2	5,30	7,30	0,95	-

Tabela A.2: Resultados experimentais para hidrociclone cônico-filtrante (HCoF).

$-\Delta P$ [kPa]	Q [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	Re [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μ m]	d' ₅₀ [μ m]	C _{va} [-]	F [cm ³ /s]
88	283	25,2	1105	13355	73,9	65,1	5,69	7,15	1,02	0,081
118	316	28,0	1178	14938	77,3	68,4	5,28	6,83	1,02	0,101
147	341	30,9	1266	16111	78,9	69,4	5,04	6,70	1,02	0,128
177	368	32,8	1310	17399	77,6	66,2	5,36	7,17	1,02	0,151

Os testes para os hidrociclones cilíndrico-filtrantes (HCiF) foram realizados em réplicas, dessa maneira, após cada tabela com os resultados obtidos foram construídas outras duas que apresentam os dados de intervalo com 95% de confiança e desvios padrão para cada uma das respostas.

Tabela A.3: Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de menor permeabilidade (HCiF-k₁).

$-\Delta P$ [kPa]	Q [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	Re [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μ m]	d' ₅₀ [μ m]	C _{va} [-]	F [cm ³ /s]
88	295,7	32,4	1012	14078	74,9	62,8	6,13	7,96	1,04	0,052
118	329,6	33,8	1086	15693	75,3	62,7	5,80	7,69	1,04	0,063
147	352,2	35,2	1190	16772	76,1	63,1	5,57	7,51	1,04	0,081
177	373,2	34,7	1271	17771	76,3	63,7	5,50	7,37	1,04	0,094

Tabela A.4: Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta referentes aos dados experimentais obtidos para o HCiF-k₁ para todos os valores de queda de pressão.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	(293 ; 298)	(315 ; 344)	(332 ; 372)	(356 ; 391)
R _L	(30,8 ; 34,1)	(29,2 ; 38,4)	(32,3 ; 37,7)	(34,3 ; 35,1)
Eu	(994 ; 1030)	(994 ; 1179)	(1052 ; 1327)	(1154 ; 1389)
Re	(13599 ; 14557)	(14823 ; 16562)	(15507 ; 18037)	(16291 ; 19252)
η	(66,9 ; 82,8)	(69,6 ; 80,9)	(71,1 ; 81,0)	(71,0 ; 81,6)
η'	(51,6 ; 74,0)	(56,6 ; 68,9)	(56,8 ; 69,4)	(55,6 ; 71,8)
d ₅₀	(5,49 ; 6,76)	(4,94 ; 6,65)	(5,30 ; 5,83)	(5,32 ; 5,67)
d' ₅₀	(7,30 ; 8,62)	(6,85 ; 8,53)	(7,18 ; 7,89)	(7,21 ; 7,52)
F	(0,028 ; 0,076)	(0,039 ; 0,087)	(0,074 ; 0,088)	(0,087 ; 0,100)

Tabela A.5: Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCiF-k₁ em todas as quedas de pressão.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	1,07	5,70	8,03	7,06
R _L	0,006	0,018	0,010	0,002
Eu	7	37	55	47
Re	193	350	509	596
η	3,2	2,3	2,0	2,1
η'	4,5	2,5	2,5	3,2
d ₅₀	0,26	0,34	0,11	0,07
d' ₅₀	0,26	0,34	0,13	0,06
F	0,0096	0,0098	0,0028	0,0026

Tabela A.6: Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de permeabilidade intermediária (HCiF-k₂).

$-\Delta P$ [kPa]	Q [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	Re [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μ m]	d' ₅₀ [μ m]	C _{va} [-]	F [cm ³ /s]
88	311	29,9	917	14932	68,8	55,5	6,75	8,53	1,04	0,063
118	346	29,3	986	16632	69,1	56,3	6,66	8,41	1,04	0,079
147	376	30,2	1044	18073	70,5	57,7	6,41	8,18	1,04	0,095
177	406	31,2	1073	19525	71,2	58,2	6,25	8,03	1,04	0,112

Tabela A.7: Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta referentes aos dados experimentais obtidos para o HCiF-k₂ para todos os valores de queda de pressão.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	(309 ; 312)	(342 ; 350)	(364 ; 388)	(399 ; 413)
R _L	(27,9 ; 31,8)	(25,7 ; 32,9)	(26,6 ; 33,9)	(24,9 ; 37,6)
Eu	(908 ; 926)	(962 ; 1010)	(977 ; 1111)	(1037 ; 1109)
Re	(13761 ; 16104)	(15207 ; 18057)	(16424 ; 19723)	(17741 ; 21309)
η	(65,4 ; 72,2)	(65,6 ; 72,6)	(65,1 ; 75,8)	(63,2 ; 79,2)
η'	(49,5 ; 61,5)	(49,1 ; 63,5)	(50,7 ; 64,6)	(48,7 ; 67,7)
d ₅₀	(5,87 ; 7,63)	(6,41 ; 6,92)	(6,21 ; 6,61)	(5,90 ; 6,60)
d' ₅₀	(7,55 ; 9,51)	(8,01 ; 8,81)	(8,05 ; 8,31)	(7,65 ; 8,47)
F	(0,053 ; 0,074)	(0,066 ; 0,091)	(0,085 ; 0,106)	(0,104 ; 0,121)

Tabela A.8: Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCiF-k₂ em todas as quedas de pressão.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	0,65	1,74	4,84	2,82
R_L	0,008	0,015	0,015	0,026
Eu	4	10	27	15
Re	472	573	664	718
η	0,014	0,014	0,022	0,032
η'	0,024	0,029	0,028	0,038
d_{50}	0,35	0,10	0,08	0,14
d'_{50}	0,39	0,16	0,05	0,16
F	0,0041	0,0050	0,0042	0,0033

Tabela A.9: Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de maior permeabilidade (HCiF-k₃).

ΔP [kPa]	Q [cm ³ /s]	R_L [%]	Eu [-]	Re [-]	η [%]	η' [%]	d_{50} [μ m]	d'_{50} [μ m]	C_{va} [-]	F [cm ³ /s]
88	266	32,6	1251	12531	74,7	62,5	5,69	7,45	1,07	0,110
118	293	33,1	1379	13786	73,9	61,1	5,54	7,31	1,07	0,137
147	311	32,7	1522	14666	75,4	63,4	5,37	7,10	1,07	0,163
177	333	33,1	1593	15705	77,4	66,1	5,23	6,90	1,07	0,192

Tabela A.10: Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta referentes aos dados experimentais obtidos para o HCiF-k₃ para todos os valores de queda de pressão.*
 - Intervalos com 80% de confiança, pois com o valor anteriormente proposto havia um intervalo que não era fisicamente significante.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	(242 ; 290)	(271 ; 314)	(257 ; 365)	(375 ; 392)
R _L	(24,6 ; 40,6)	(31,2 ; 35,1)	(30,8 ; 34,7)	(30,9 ; 35,3)
Eu	(1018 ; 1484)	(1180 ; 1577)	(989 ; 2055)	(1030 ; 2156)
Re	(9973 ; 15089)	(8699 ; 18874)	(12877 ; 16456)	(13813 ; 17597)
η	(59,4 ; 90,1)	(71,0 ; 76,9)	(69,3 ; 81,5)	(74,7 ; 80,0)
η'	(44,2 ; 80,8)	(57,8 ; 64,3)	(53,3 ; 73,5)	(61,1 ; 71,2)
d ₅₀	(2,47 ; 8,91)	(5,08 ; 6,00)	(4,98 ; 5,76)	(5,22 ; 5,24)
d ₅₀ '	(4,21 ; 10,68)	(7,04 ; 7,59)	(6,33 ; 7,87)	(6,89 ; 6,92)
F*	(0,044 ; 0,177)	(0,078 ; 0,200)	(0,127 ; 0,199)	(0,191 ; 0,194)

Tabela A.11: Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCiF-k₃ em todas as quedas de pressão.

Resposta	$-\Delta P_1$	$-\Delta P_2$	$-\Delta P_3$	$-\Delta P_4$
Q	2,71	2,39	6,02	6,51
R _L	0,89	0,22	0,21	0,25
Eu	26	22	59	63
Re	285	566	199	211
η	1,71	0,33	0,68	0,29
η'	2,04	0,37	0,11	0,56
d ₅₀	0,36	0,05	0,043	0,001
d ₅₀ '	0,36	0,031	0,086	0,002
F	0,023	0,020	0,012	0,0004

Determinação da Porosidade e
Permeabilidade dos Cilindros Porosos

B.1 Determinação da Porosidade dos Cilindros Filtrantes

A porosidade (ϵ) é uma importante propriedade no estudo dos hidrociclones filtrantes, já que um valor médio dessa deve ser fornecida ao simulador utilizado neste trabalho.

Dessa forma, nesta seção é apresentada uma metodologia para cálculo desse parâmetro, bem como os resultados médios obtidos para a porosidade dos cilindros manufaturados de bronze sinterizado utilizados nos ensaios experimentais.

Para tanto, deve-se conhecer o volume ocupado pela estrutura cilíndrica que é representado pela Equação B.1.

$$V_t = \pi H (R_e^2 - R_i^2) \quad (\text{B.1})$$

A massa de cada cilindro sinterizada foi medida antes (M_1) e após (M_2) o processo de colmatagem com a suspensão de rocha fosfática com a finalidade de avaliar qual foi a massa de material particulado que foi retida no interior dos poros do cilindro. As densidades do material particulado e das partículas de bronze sinterizados utilizadas para cálculo dos volumes foram, respectivamente, 2,86 (LSP/FEQUI/UFU) e 6,50 (Metalsinter) g/cm³.

Dessa maneira, a Tabela B.1 apresenta as principais dimensões geométricas dos cilindros bem como as massas dos cilindros limpos e colmatados.

Tabela B.1: Dimensões geométricas e massas M_1 e M_2 dos cilindros.

Cilindro	R_e [cm]	R_i [cm]	H [cm]	M_1 [g]	M_2 [g]
1	1,77	1,51	7,00	100,48	102,59
2	1,77	1,51	7,00	96,94	102,43
3	1,77	1,51	7,00	103,13	103,73

A Tabela B.2, por sua vez, apresenta os dados calculados para o volume total do cilindro (V_T), assim como para os volumes ocupado pelas partículas de bronze sinterizado (V_b) e de rocha fosfática (V_s). Nessa também estão contidos os valores encontrados para as respectivas porosidades.

Tabela B.2: Valores calculados de V_T , V_b , V_s e ϵ .

Cilindro	V_T [cm ³]	V_b [cm ³]	V_s [cm ³]	ϵ [-]
k ₁	18,75	15,46	0,74	0,136
k ₂	18,75	15,46	1,92	0,102
k ₃	18,75	15,46	2,68	0,143

B.2 Determinação da Permeabilidade dos Cilindros Porosos

A permeabilidade dos cilindros filtrantes (k) é um parâmetro igualmente importante no estudo dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes, principalmente por servir como informação de entrada na simulação computacional. Dessa maneira, nesse estudo aplicou-se a metodologia proposta por Vieira (2006) em sua tese.

Os cilindros foram manufaturados com partículas de bronze de diferentes granulometrias (grossa, média e fina), o que permitiu a obtenção de permeabilidades diferentes para cada cilindro filtrante.

Para realizar o cálculo da permeabilidade dos três cilindros baseou-se na Lei de Darcy que se aplica para escoamento laminar em meios porosos, representada por:

$$-\nabla P = \frac{\mu}{k} \cdot q \quad (\text{B.2})$$

Abrindo a Equação B.2 em coordenadas cilíndricas, considerando que há simetria radial para a matriz filtrante e que o gradiente de pressão ao longo do cilindro é uniforme, obtém-se:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k} \cdot q = \frac{\mu}{k} \cdot \frac{F}{A_{lateral}} \quad (\text{B.3})$$

em que,

$A_{lateral}$: área lateral do cilindro;

F: vazão volumétrica de filtrado;

k: permeabilidade do cilindro filtrante;

P: pressão;

q: velocidade superficial do fluido;

r: posição na direção radial;

μ : viscosidade do fluido

A área pela qual o fluido percolou é descrita pela área lateral do cilindro descrita pela Equação B.4.

$$A_{lateral} = 2\pi \cdot H \cdot r \quad (B.4)$$

Das Equações B.3 e B.4 tem-se que:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k} \cdot \frac{F}{2\pi \cdot H \cdot r} \quad (B.5)$$

Integrando a Equação B.5 obtemos uma expressão que permite relacionar a vazão de filtrando com a queda de pressão no cilindro, dada pela Equação B.6.

$$-\Delta P = \frac{\mu}{2\pi \cdot H \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) \cdot F \quad (B.6)$$

Reorganizando a Equação B.6 obtem-se a Equação B.7

$$F = [\Psi] \cdot \Delta P \quad (B.7)$$

em que,

$$\Psi = \frac{2\pi \cdot H \cdot k}{\mu \cdot \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)} \quad (B.8)$$

E dessa forma, a fim de estimar o valor de Ψ , foram obtidas, experimentalmente, valores de vazão volumétrica de filtrado (a 25°C) para cada queda de pressão. Esses valores estão contidos na Tabela B.3.

Tabela B.3: Valores experimentais para vazão volumétrica de filtrado para cada matriz porosa em função da queda de pressão.

- ΔP [kPa]	$F \cdot 10^8$ [cm^3]/s	
	k_1	k_2
10	1,54	2,61
15	1,82	2,96
20	2,07	3,41
25	2,23	3,86
30	2,38	4,20
35	2,39	4,82
40	2,75	5,00
45	3,09	5,35
50	3,27	5,70
55	3,52	5,73
60	3,75	6,04
70	4,20	6,64
80	4,55	7,20
90	4,88	8,03
100	5,18	8,62
110	5,43	9,30
120	5,82	9,85
130	6,23	10,5
140	7,26	11,0

A Tabela B.4 apresenta os respectivos valores encontrados para Ψ e para k .

Tabela B.4: Valores para Ψ e para k para HCiF- k_1 e HCiF- k_2 .

Equipamento	$\Psi \cdot 10^{12}$ [$m^3 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$]	$k \cdot 10^{16}$ [m^2]
HCiF - k_1	1,85	1,71
HCiF - k_2	1,08	2,95

Devido à alta porosidade do cilindro do hidrociclone HCiF- k_3 , não foi possível realizar o procedimento supracitado para estimar a permeabilidade dessa matriz porosa. No entanto, é encontrado na literatura (ROCHA; VIEIRA, 2012) um procedimento alternativo para estimativa de uma permeabilidade equivalente, que pode ser realizado durante os testes experimentais. Nesse artigo, a estimativa é feita para a geometria de um tronco de cone e encontrou valores estimados durante o teste experimental próximos àqueles encontrados pelo teste de bancada. Dessa forma, como nesta dissertação foram realizados testes com um cilindro poroso, acredita-se que essa estimativa seja válida, já que, diferentemente do tronco de cone poroso, o cilindro não tem mudança de área transversal ao longo do seu eixo axial. Este procedimento alternativo, consiste em retirar amostras de filtrado durante

os testes experimentais em cada queda de pressão avaliada, e posteriormente, estimar, a partir da Equação B.7, a permeabilidade da matriz porosa. A Tabela B.5 apresenta os valores de vazão de filtrado (a 25,8°C) em função da queda de pressão com intuito de estimar a permeabilidade do meio poroso que constitui a seção cilíndrica do equipamento HClF-k₃.

Tabela B.5: Valores de vazão de filtrado em função da queda de pressão experimental, para estimativa da permeabilidade do cilindro poroso do hidrociclone HClF-k₃

$-\Delta P$ [kPa]	$F \cdot 10^7$ [m ³ /s]
88	1,27
88	1,24
88	1,26
88	1,26
88	1,25
88	1,27
118	1,51
118	1,47
118	1,48
118	1,52
118	1,51
118	1,50
147	1,69
147	1,71
147	1,70
147	1,72
147	1,72
147	1,71
177	1,92
177	1,91
177	1,91
177	1,93
177	1,92
177	1,93

A Tabela B.6 apresenta o valor de permeabilidade estimado para o cilindro poroso do hidrociclone HClF-k₃.

Tabela B.6: Valores para Ψ e para k para HClF-k₃.

Equipamento	$\Psi \cdot 10^{12}$ [m ³ · Pa ⁻¹ · s ⁻¹]	k · 10 ¹⁶ [m ²]
HClF - k ₃	1,17	3,60