

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**JOANA BRETZ DE SOUZA**

**MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL APLICADA AOS SEPARADORES  
DINÂMICOS DE PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Belo Horizonte

2008

**JOANA BRETZ DE SOUZA**

**MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL APLICADA AOS SEPARADORES  
DINÂMICOS DE PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Dissertação apresentada à Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Soares Oliveira

Belo Horizonte

2008

S729m

Souza, Joana Bretz de.

Mecânica dos fluídos computacional aplicada aos separadores dinâmicos de primeira geração da indústria cimenteira [manuscrito] / Joana Bretz de Souza. – 2008.

63 f., enc.: il.

Orientador: Leandro Soares de Oliveira.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Dinâmica dos fluídos - Teses. 3. Cimento - Indústria. I. Oliveira, Leandro Soares de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 66.01(043)

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

JOANA BRETZ DE SOUZA

MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL APLICADA AOS SEPARADORES DINÂMICOS DE  
PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Dissertação apresentada à Pós-Graduação em Engenharia Química  
da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à  
obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 31 de dezembro de 2008.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira

Orientador

Prof. Dr. Geraldo Augusto Campolina França

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Marcio Arêdes Martins

Universidade Federal de Viçosa

---

---

Aos meus amigos Rodrigo, Artur, Bruno, Daniel e Diego,  
cujo apoio tornou possível a conclusão deste trabalho.

---

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus por mais essa conquista.

À minha família e aos meus amigos pela torcida, apoio incondicional e por perdoarem minha ausência em função do desenvolvimento desse trabalho.

Ao Rodrigo Cesar de Miranda por todo carinho, paciência e companheirismo nas horas mais difíceis.

Aos professores Solange Vaz Coelho, Sérgio Luiz Cabral da Silva e Marcelo Borges Mansur por todas as conversas e aconselhamento no processo de decisão em conciliar o mestrado e meu trabalho na indústria.

Aos professores Leandro Soares de Oliveira e Adriana Silva França não somente por me apresentarem ao CFD ou pela valiosa orientação durante o desenvolvimento do trabalho, mas também pela amizade e por constituírem para mim um exemplo de conduta pessoal e profissional.

Ao Sr. Pedro Lucas Ladeira por me designar a missão de otimizar um circuito de moagem de farinha enquanto eu ainda era uma mera estagiária de graduação, mostrando-me o quão limitado era meu conhecimento sobre o assunto. Além, é claro, da sugestão do tema de mestrado.

Aos Srs. Marcone Campos de Souza, Alexandre Moreira Rossi e Paulo Roberto Zscaber que como meus superiores, desde o início não hesitaram em me apoiar, transmitir conhecimentos e investir em minha formação.

A toda equipe da Holcim, em especial aos amigos da Unidade Barroso, por toda colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Aos Srs. Rogerson Miranda e Rodrigo Borges da Magnesita S.A. pela troca de experiências na aplicação de CFD a problemas industriais, e, principalmente, por me apresentarem a ESSS.

A ESSS e toda sua equipe pelo fornecimento do software, licença, treinamento e suporte técnico. Em especial aos Srs Marcus Reis, Leonardo Rangel, Lucas Kostetzer e Jairo Zago de Souza por serem verdadeiros parceiros no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Sr. Marco Aurélio Soares Martins da CEMI por compartilhar seu conhecimento e experiência na otimização de separadores dinâmicos.

---

---

Aos Srs. Tom Lowes, Frederick Lockwood, Tahir Abbas, Naminda Kandamby, Shan Raza e Michalis Akritopoulos da Cinar Ltd. pelas produtivas discussões durante meu treinamento em Londres.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização desse trabalho.

---

---

*“O rio atinge seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.”*

*Lao-Tsé*

---

---

## RESUMO

Souza, J. B. **Mecânica dos Fluidos Computacional aplicada aos Separadores Dinâmicos de Primeira Geração da Indústria Cimenteira**. Belo Horizonte, 2008. 63p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais.

A fabricação industrial de cimento engloba processos químicos, mecânicos e térmicos. A origem está nas atividades de mineração, e, posteriormente, envolve as etapas de britagem, moagem e homogeneização da mistura crua (farinha), clínquerização, dosagem, moagem e ensacamento do cimento. O processo de moagem ideal seria aquele em que uma partícula da alimentação pudesse ser descarregada do circuito tão logo fosse reduzida ao tamanho requerido, de forma que o gasto de energia com sobremoagem fosse evitado. Para controlar o tamanho de partícula descarregada do circuito de moagem são utilizados aparatos de separação como separadores mecânicos. Os separadores dinâmicos funcionam de forma a promover a dispersão uniforme das partículas em uma corrente de ar. A separação se dá segundo o equilíbrio entre a ação da força de arrasto, devido ao escoamento do ar, e da força de centrifugação, produzida pela rotação do ar, sobre as partículas. O presente trabalho tem por objetivo estudar o escoamento no interior de um separador dinâmico de primeira geração utilizando CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*), visando conhecer os efeitos de seus elementos rotativos e estáticos e identificar alterações geométricas para redução do *by-pass* e melhor controle da granulometria do produto. A simulação numérica do escoamento interno do separador indicou que retirada dos whizzers proporcionaria ganhos de eficiência de separação das frações de sólidos. Uma vez implementada experimentalmente a retirada dos whizzers provocou a redução de 20% de *by-pass*, a redução de R\$ 0.30/tonelada produzida e redução no desvio padrão do retido em 90 $\mu$ m. Desta forma, uma inversão de mais de USD\$ 1.000.000 na troca do separador de primeira geração por um de geração superior foi evitada.

**Palavras Chave:** Mecânica dos fluidos computacional (CFD), separadores dinâmicos, redução de *by-pass*.

---

---

## ABSTRACT

SOUZA, J. B. **Mecânica dos Fluidos Computacional aplicada aos Separadores Dinâmicos de Primeira Geração da Indústria Cimenteira**. 2008. 63p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais.

The industrial cement manufacture process is a combination of chemical, mechanical and thermal steps. It starts on mining activities, and, passes through crushing, grinding, raw meal homogenization, clinkerization, dosing systems to finish with cement grinding and packing. The cost associated to electrical energy corresponds to 15% of total production cost, 11.6% of which come from grinding operation. In the ideal grinding process every particle from mill feed that achieves required size goes direct to final product stream, hence the energy consumption is exclusively related to big particles breaking. Once in the real grinding systems it is not possible, mechanical separators are applied to control the size of final product particles. Dynamics separators works by a principle to promote a uniform dispersion on air flow stream. Particles are classified according to the equilibrium of drag force, due to air flow, and centrifugal force, due to air rotation, acting direct on the particles. The goal of this study is to apply CFD (Computational Fluid Dynamics) for an internal flow assessment of dynamic separation of first generation, in order to determine the effects of rotating and static components and to identify potential by-pass reduction and product fineness control strategy based on geometry modifications. A numerical simulation of separator internal flow had indicated that taking off whizzers separation efficiency could increase. And when separator operates without whizzers more benefits had been proven as reduction of 20% in by-pass, reduction of R\$ 0.30/ton produced in the operational cost and reduction in the standard deviation of 90 $\mu$ m residues.

**Key words:** Computational Fluid Mechanics (CFD); dynamic separators; by-pass reduction.

---

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo industrial de fabricação de cimento: etapas e subprodutos .....	17
Figura 2 – Exemplos de separadores: (a) primeira geração, (b) segunda geração, (c) terceira geração e (d) quarta geração .....	25
Figura 3 – Curva Tromp: (a) separação ideal e (b) separação real .....	29
Figura 4 – Curva Tromp: (a) vazão de 70.000m <sup>3</sup> /h, (b) vazão de 215.000m <sup>3</sup> /h e (c) vazão de 250.000m <sup>3</sup> /h .....	30
Figura 5 – Informações adicionais da curva Tromp .....	31
Figura 6 – Separador FLSmidth tipo CV: (a) separador e (b) detalhe câmara de separação	37
Figura 7 – Separador FLSmidth tipo CV: desenho esquemático das trajetórias esperadas .	37
Figura 8 – Domínio de cálculo: (a) layout do separador dinâmico e (b) geometria simplificada para simulação .....	38
Figura 9 – Detalhes da geometria: (a) zona de separação e (b) gelosias .....	39
Figura 10 – Detalhes da geometria: (c) ventilador e (d) prato distribuidor .....	39
Figura 11 – Dimensões principais da geometria .....	40
Figura 12 – Malha superficial para separador dinâmico .....	41
Figura 13 – Divisão do domínio de cálculo: em amarelo o domínio rotativo, em laranja a superfície da interface entre domínios e em vermelho o domínio estático .....	42
Figura 14 – Planos de análise: (a) plano prato: plano XZ equidistante as duas faces do prato distribuidor; (b) plano gelosia; plano XZ localizado a meia altura das gelosias e (c) plano zona de separação: plano XY (z = 0) passa pelo centro do separador .....	47
Figura 15 – Campo de pressão no plano prato .....	48
Figura 16 – Gráfico velocidade média circunferencial em função da distância radial na região do ventilador (plano y = -0.6m) .....	49
Figura 17 – Volante externo e eixo para giro das gelosias .....	50
Figura 18 – Vetores velocidade no plano gelosia .....	51
Figura 19 – Campo de pressão no plano prato .....	52
Figura 20 – Linhas de fluxo no plano zona de separação .....	53
Figura 21 – Componente vertical da velocidade no plano zona de separação .....	53
Figura 22 – <i>Whizzers</i> como obstáculo a passagem de partículas .....	54

---

---

Figura 23 – Módulo da componente vertical da velocidade no plano zona de separação .....	55
Figura 24 – Módulo da velocidade no plano zona de separação .....	55
Figura 25 – Velocidade Resultante no plano XZ, $y = -1.4\text{m}$ : (a) vetores vista Z+ e (b) módulo vista Y+ .....	57
Figura 26 – Resultados de curva Tromp (a) antes e (b) após a retirada dos <i>whizzers</i> .....	58

---

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Características dos separadores dinâmicos .....	26
Tabela 2 – Símbolos do balanço de massas no separador dinâmico .....	27
Tabela 3 – Condições de contorno no domínio rotativo .....	44
Tabela 4 – Condições de contorno no domínio estático .....	45
Tabela 5 – Condições de contorno nas interfaces e tubulação lateral .....	46

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP : Associação Brasileira de Cimento Portland

CFD : Mecânica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

ESSS : *Engineering Simulation and Scientific Software*

GGI : *General Grid Interface*

UFMG : Universidade Federal de Minas Gerais

USD : Dólar americano

RMS : Valor quadrático médio (*Root Mean Square*)

RSM : Modelo do tensor de Reynolds (*Reynolds Stress Model*)

---

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

A : Vazão mássica da alimentação do separador  
a : Granulometria passante da alimentação do separador  
a' : fração de *by pass*  
d : Diâmetro de partícula de alimentação  
F : Vazão mássica da fração fina  
f : Granulometria passante da fração fina  
k : energia cinética turbulenta  
M : Vazão mássica da alimentação do moinho  
R : Vazão mássica da fração grossa  
r : Granulometria passante da fração grossa  
s : rigorosidade de separação  
tr : função Tromp  
rpm : rotação por minuto  
X : eixo-x  
XZ : plano paralelo aos eixos X e Z  
Y : eixo-y  
Y+ : eixo-y positivo  
y : local do eixo-y  
Z : eixo-z  
Z+ : eixo-z positivo  
z : local do eixo-z  
 $\varepsilon$  : taxa de dissipação turbulenta  
u : carga circulante  
 $\eta$  : eficiência do separador

---

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4	SEPARADORES DINÂMICOS .....	23
4.1	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO.....	27
4.2	CARGA CIRCULANTE E EFICIÊNCIA .....	27
4.3	CURVA TROMP.....	28
5	MOAGEM, SEPARAÇÃO E CFD .....	32
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	33
6	CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO .....	36
6.1	O SEPARADOR TIPO CV .....	36
6.2	GEOMETRIA .....	38
6.3	MALHA .....	41
6.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	42
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
7.1	FUNÇÕES E IMPORTÂNCIA DOS COMPONENTES INTERNOS.....	47
7.1.1	O Ventilador.....	48
7.1.2	As Gelasias.....	50
7.1.3	Os Pratos Cônicos.....	52
7.1.4	Os <i>Whizzers</i> .....	54
8	CONCLUSÕES.....	59
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	61
	REFERÊNCIAS .....	62

---

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Na forma de concreto, é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água de acordo com dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2008).

A fabricação industrial de cimento atual conserva praticamente a mesma combinação de processos químicos, mecânicos e térmicos patenteados por Joseph Aspedin em 1824 no início da industrialização do produto. A origem está nas atividades de mineração, e, posteriormente, envolve as etapas de britagem, moagem e homogeneização da mistura crua (farinha), clinquerização, dosagem, moagem e ensacamento do cimento. O cimento é obtido da moagem do clínquer, produto da calcinação da farinha, com adições de materiais tais como gesso, cuja proporção varia em função do tipo de cimento desejado, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Processo industrial de fabricação de cimento: etapas e subprodutos.

A indústria cimenteira é caracterizada como indústria de capital intensivo, sendo o investimento inicial para instalação de uma unidade de médio porte de USD\$ 300.000,00 e o tempo mínimo de três anos do projeto ao início da operação. O Brasil é um dos dez maiores

---

produtores de cimento no mundo, sendo o maior produtor da América Latina com 58 fábricas instaladas, das quais 26 encontram-se na região sudeste. Em 2007, somente nas 113 fábricas dos Estados Unidos foram produzidas 95 milhões de toneladas de cimento. As vendas deste produto movimentaram 60 bilhões de dólares, correspondendo a aproximadamente 0,5% do PIB americano. Neste mesmo ano o Brasil produziu cerca de 40 milhões de toneladas (U.S. Geological Survey, 2008).

Embora o alto consumo de energia térmica de 3,2-3,5MJ/kg de clínquer seja destaque na análise de custos da produção de cimento, o consumo de energia elétrica em todas as etapas, principalmente nos processos de cominuição, não pode ser negligenciado (MASTORAKOS, 1999). A cominuição é certamente uma das operações de engenharia, usadas industrialmente, que mais movimenta capital, ultrapassando, por exemplo, processos comuns de engenharia como mistura de sólidos, cristalização, filtração, flotação, extração por solvente e pelotização (AUSTIN ET AL, 1984). Estima-se que estejam associados à cominuição 3% do consumo mundial de energia elétrica (ARAÚJO, 2007). Para uma fábrica brasileira, que produz aproximadamente um milhão de toneladas de cimento por ano, os gastos com energia elétrica representam 15% do custo total de produção, dos quais 11,6% correspondem as operações de moagem e 2,6% correspondem à etapa de moagem de farinha. Embora a tendência atual seja redução do consumo térmico, focando a utilização de combustíveis alternativos, a redução granulométrica da farinha constitui necessidade iminente. Além de contribuir para o aumento da eficiência de recuperação de energia térmica dos gases de exaustão do forno, uma farinha mais fina permite a diminuição da temperatura de clínquerização.

O processo de moagem ideal seria aquele em que uma partícula da alimentação pudesse ser descarregada do circuito tão logo fosse reduzida ao tamanho requerido. Desta forma, a energia seria gasta apenas com as partículas de tamanho excessivo. Na prática, uma partícula recém admitida necessita de 30 a 40 minutos para passar através do moinho e durante este tempo é exposta a 6 impactos de bolas. De fato, apenas 1 milésimo dos impactos de corpos moedores realizam trabalho de redução de tamanho, enquanto o resto é perdido em movimentação em vazio, com os corpos moedores golpeando-se entre si ou chocando-se contra o revestimento (DECASPER, 2005). Devido à baixa eficiência dos moinhos tubulares, converter toda a massa alimentada a produto final em única etapa implica em oneroso processo de sobremoagem.

Para controlar o tamanho máximo de partícula descarregada do circuito de moagem são utilizados aparatos de separação como separadores mecânicos ou dinâmicos. O objetivo é

---

fazer com que o material acima da granulometria requerida retorne ao moinho enquanto o material com granulometria desejada segue para descarga de produto final. Assim a recirculação de finos é evitada possibilitando economia de energia e maior controle de qualidade do produto.

Os separadores dinâmicos são largamente utilizados na indústria de cimento. Esses equipamentos funcionam de forma a promover a dispersão uniforme das partículas em uma corrente de ar de separação. A separação ocorre segundo o equilíbrio entre a ação da força de arrasto, devido ao escoamento do ar, e da força de centrifugação, produzida pela rotação do ar, sobre as partículas. Portanto, os separadores devem ser ajustados a condições operacionais que proporcionem o equilíbrio entre essas forças de tal forma a granulometria do produto do separador atenda as especificações almejadas.

É prática comum em ambientes industriais a aplicação da metodologia tentativa e erro na otimização de equipamentos. Em função dos custos associados à parada de equipamentos e a pressão por geração rápida de resultados, freqüentemente a metodologia científica é negligenciada. Diversas alterações são realizadas simultaneamente sem que se possam identificar seus efeitos individuais. A utilização da modelagem e simulação de equipamentos via CFD (*Computational Fluid Dynamics*) torna-se uma opção interessante e viável por oferecer resultados em tempo hábil sem a necessidade de parada dos equipamentos ou mesmo interferir em sua operação. Através modelagem do comportamento fluidodinâmico interno de um separador é possível inferir sobre como alterações geométricas podem contribuir para melhorar seu desempenho. O aumento da eficiência do separador certamente implica na redução do consumo específico de energia elétrica e melhor controle da granulometria do produto, que representam umas das principais metas da indústria cimenteira na atualidade.

---

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo estudar o escoamento no interior de um separador dinâmico de primeira geração utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*), visando conhecer os efeitos de seus elementos rotativos e estáticos e identificar alterações geométricas para redução do *by-pass* e do custo específico de produção de um circuito de moagem de farinha.

---

---

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros separadores dinâmicos utilizados na indústria cimenteira datam de 1889, antes mesmo dos moinhos tubulares inventados por Davidsen em 1891. Mas, apenas em 1904 é que uso dos moinhos tubulares em circuito fechado com separadores dinâmicos se difundiu (CHATTERJEE, 2004). Desde então, os separadores dinâmicos vem sendo aprimorados e atualmente encontram-se disponíveis no mercado separadores de quarta geração. Basicamente, o que se tem feito para melhorar a desempenho desses equipamentos é aumentar a relação ar-material e introduzir diferentes obstáculos geométricos na zona de separação. Considerando que o princípio de funcionamento ainda se fundamenta na ação de forças fluidodinâmicas, a chave está em compreender o comportamento do escoamento interno e os respectivos efeitos de arrasto e sustentação do ar sobre as partículas.

Muitos dos classificadores usados na produção de materiais finos empregam duas forças para separar partículas de acordo com seu tamanho. Essas são: a força de arrasto, devido ao fluxo de ar, e a força de centrifugação produzida pela rotação do ar. A precisão do corte depende da adequada dispersão do material alimentado e de manter o equilíbrio de forças sobre partículas de mesmo tamanho, independente de sua posição na zona de separação. Resultados computacionais mostram que os campos de escoamento centrífugos produzidos por rotores estão longe de serem uniformes, e não é fácil antecipar o comportamento das partículas a partir do conhecimento da mecânica dos fluidos clássica. Assim, a condição para o equilíbrio das forças não é tão fácil de determinar como gostaríamos. Alguns cálculos computacionais de trajetória, mesmo considerando a condição ideal de separação, revelam que, de fato, há diferença na forma como as partículas se movimentam nos diferentes tipos de vórtice. Em um vórtice forçado, parece haver uma separação por tamanhos bastante precisa. O que não é o caso para vórtice livre, no qual alguns tamanhos parecem encontrar trajetórias preferenciais estáveis na zona de separação. Em um vórtice de mistura também há a propensão a caminhos preferenciais, contudo é possível obter trajetórias suficientemente distintas para possibilitar um corte da ordem de dois a três microns (JOHANSEN e SILVA, 1996).

Jinyu et al, 2005 avaliou a eficiência de separação de um ciclone dinâmico, dotado de um classificador giratório, através da análise do campo de escoamento via CFD. O pó utilizado foi um talco cuja granulometria é muito próxima a dos microcimentos. Comparativamente, medidas experimentais comprovaram a validade do modelo usado na

---

simulação RSM (*Reynolds Stress Model*) para descrever o escoamento no ciclone dinâmico.

Os efeitos de geometria, posição, rotação, número e ângulo de paletas do classificador discutidos no estudo de Jinyu et al podem ser reproduzidos em separadores existentes em plantas de cimento, executando modificações de baixo custo. Tal metodologia e modelos empregados podem ser aplicados para realizar simulações dos separadores existentes, avaliando potenciais de melhorias e propondo as implementações necessárias.

---

---

## 4 SEPARADORES DINÂMICOS

Muitas tecnologias, incluindo filtros, precipitadores eletrostáticos, ciclones e separadores dinâmicos são empregados para separação gás-sólido no processo de fabricação de cimento. Esta separação é de fundamental importância na eficiência dos sistemas de moagem tanto da mistura crua quanto dos cimentos.

Os filtros e precipitadores eletrostáticos não são viáveis para muitas aplicações industriais, devido ao seu alto investimento inicial e custos de operação. Apesar disso, estes são utilizados no sistema de purificação dos gases de exaustão do forno e no circuito de moagem de cimentos ultrafinos, pois, apresentam alta eficiência na separação de partículas finas.

Os ciclones e separadores dinâmicos são largamente utilizados por apresentar vantagens como estrutura simples e baixo custo. Entretanto, a separação depende da força de inércia das partículas e geralmente ciclones convencionais têm baixa eficiência de separação para partículas finas.

Separadores dinâmicos de primeira geração são constituídos de uma câmara externa e uma câmara interna. O material alimentado por um prato rotativo é disperso no interior da câmara interna e o ar, oriundo da câmara externa, atravessa essa cortina de material dispersado na alimentação, elutriando partículas intermediárias e finas da alimentação. O material elutriado passa pela chamada zona de separação, na qual as partículas finas são separadas, e as partículas intermediárias retornam para corrente das partículas grossas. As partículas finas são transportadas pelo ar da câmara interna para externa, passando pela turbina do ventilador que mantém a circulação forçada de ar. A rotação das partículas e do ar na câmara externa ajuda a produzir a separação sólido-fluido, o sólido é descarregado e o ar reintroduzido na câmara interna. Ao retornar para a câmara interna o ar passa por gelosias, placas planas capazes de direcionar o ar conforme sua inclinação. Ao mudar a direção do ar as gelosias exercem efeito de classificação: as partículas maiores tendem a manter sua trajetória devido ao momento de inércia enquanto as partículas finas tendem a seguir a trajetória do fluido. As partículas maiores se chocam contra as gelosias, perdem velocidade e decantam sobre ação da força de gravidade (AUSTIN et al, 1984).

Os separadores dinâmicos são os de utilização mais representativa na indústria de cimento. O princípio de funcionamento desses pressupõe a dispersão uniforme das partículas, mediante ajuste da velocidade do distribuidor, em uma corrente de ar de separação. Sobre

---

cada partícula atuam principalmente as forças centrífugas, gravitacionais e de fluxo. Para um mesmo peso específico de cada partícula da alimentação, as partículas de menor tamanho tenderão a sofrer ação preferencial da força de fluxo do ar de separação. Enquanto sob as partículas maiores será predominante a influência da combinação das forças centrífugas e gravitacionais. Para as partículas com o chamado diâmetro de corte há um equilíbrio entre as forças de massa e de fluxo. Portanto os separadores devem ser ajustados a condições operacionais que proporcionem este equilíbrio entre essas forças, ou um diâmetro de corte, que atenda as especificações do produto final.

Diversos são os designs de separadores dinâmicos existentes sendo eles classificados como a seguir:

- Primeira geração: separadores nos quais o ar de separação é gerado por um ventilador interno e a classificação é feita por pás seletoras;
- Segunda geração: separadores nos quais o ar de separação é gerado por um ventilador externo e a classificação é feita por pás seletoras;
- Terceira geração: separadores nos quais o ar de separação é gerado por um exaustor externo e a classificação é realizada por um rotor;
- Quarta geração: separadores que possuem um exaustor externo e um ventilador interno, classificação inicial por rotor e separação interna dos finos.

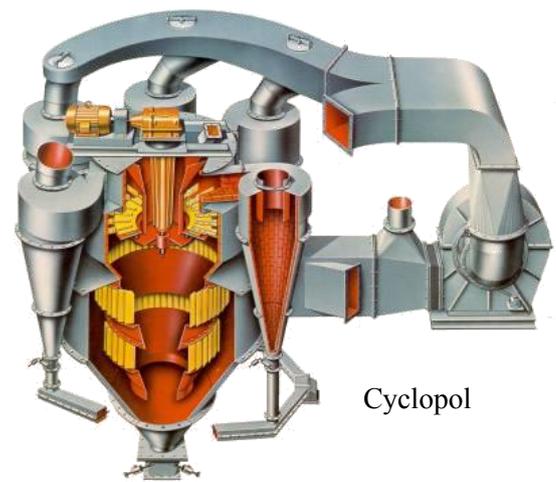
A Figura 2 apresenta exemplos de separadores dos quatro tipos.

---



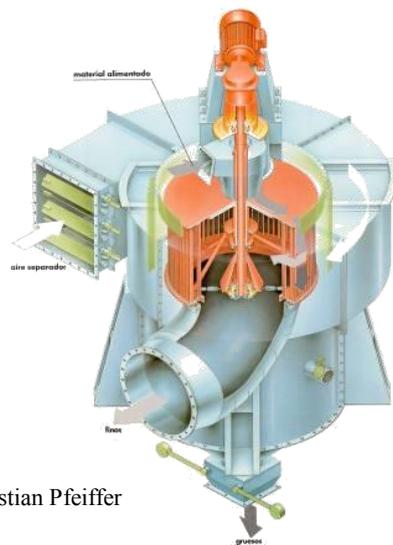
Polysius Turbo Windsichter

(a)



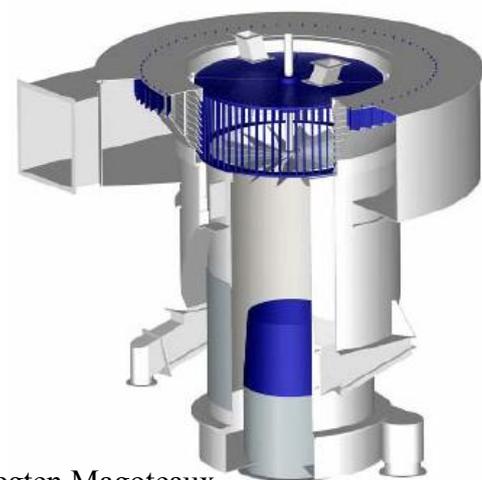
Cyclopol

(b)



HEYD Christian Pfeiffer

(c)



XP4 - Slegten Magoteaux

(d)

Figura 2 – Exemplos de separadores: (a) primeira geração, (b) segunda geração, (c) terceira geração e (d) quarta geração.

As principais características de cada tipo de separador encontram-se resumidas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Principais características dos separadores dinâmicos.

<b>Características</b>	<b>1ª Geração</b>	<b>2ª Geração</b>	<b>3ª Geração</b>	<b>4ª Geração</b>
Relação partículas/ar	Grande.	Média.	Pequena.	Pequena.
Ventilação	Interna.	Externa.	Externa.	Interna e Externa.
Alimentação	Sobre o prato distribuidor.	Sobre o prato distribuidor.	Sobre rotor de gaiola.	Sobre rotor de gaiola.
Zona de Separação	Região entre o prato distribuidor e as pás.	Apesar da recuperação de finos, a grande separação continua via pás seletoras.	Ao redor do rotor de gaiola.	Ao redor do rotor de gaiola.
Área de Separação	Muito pequena.	Pequena.	Grande.	Grande.
Separação de finos da corrente de gases	Dentro do próprio separador, e posteriormente em filtros.	Ciclones.	Ciclones e/ou filtros.	No interior do separador usando ventilador interno.
Eficiência Separação	Baixa. (50 - 60%)	Intermediária. (60 - 75%).	Alta. (80 – 90%)	Alta (90 - 95%)
By-pass	20 - 40%	10 - 20%	5 - 10%	< 3%
Carga Específica (t/hm <sup>2</sup> )	1,5 - 3,6	8 - 11	10 - 12 (rotor)	10 - 15 (rotor)
Custo Implantação	USD \$2.030.000	USD \$1.050.000	USD \$1.000.000	USD \$870.000

O funcionamento dos separadores dinâmicos é afetado principalmente:

- Pelo ajuste do separador e condições técnicas, por exemplo, e velocidade do distribuidor, o número e posição das paletas seletoras, a entrada de ar falso, etc.
- Pela alimentação do separador, por exemplo, a quantidade alimentada, a granulometria, o conteúdo de umidade, a densidade, etc.
- Pelas propriedades do ar de separação como temperatura, densidade, viscosidade, conteúdo de umidade, etc.

#### 4.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO

Existem várias maneiras de avaliar o funcionamento de um separador, entre as quais se destacam:

- Fluência: relação entre a massa total de material grosso (ou fino) e a massa alimentada;
- Recuperação ou eficácia: distribuição granulométrica acumulativa que inclui o material alimentado, grosso e fino;
- Curva de classificação ou curva Tromp: curva que mostra como cada tamanho de partícula alimentada se distribui entre os fluxos de finos e grossos. Seus parâmetros característicos são o diâmetro de corte, a rigurosidade de separação e o *by pass*.

#### 4.2 CARGA CIRCULANTE E EFICIÊNCIA

A nomenclatura utilizada no balanço de massa encontra-se indicada na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Símbolos do balanço de massas no separador dinâmico.

Descrição	Vazão Mássica (t/h)	Granulometria (% passante)
Alimentação do moinho	M	-
Alimentação do separador	A	a
Fração fina (produto)	F	f
Fração Grossa (retorno)	R	r

Um circuito de moagem é dito circuito fechado se o material grosso proveniente da saída do moinho é recirculado a este após uma etapa de classificação. A *carga circulante*,  $u$ , neste caso, se define como a razão entre a massa alimentada ao separador e a massa da fração fina (Equação 1(a) e Equação 1(b)):

$$u = \frac{A}{F} \quad \text{Medição de vazão} \quad \text{Equação 1(a)}$$

$$u = \frac{(f-r)}{(a-r)} \quad \text{Balanço de massa e análise granulométrica} \quad \text{Equação 1(b)}$$

A Equação 1(a) pode ser aplicada para casos em que as vazão de alimentação e finos do separador são mensuradas. Caso contrário, utiliza-se da Equação 1(b) e de resultados de análise granulométrica dos fluxos de alimentação, grossos e finos.

O valor real da carga circulante depende de vários fatores tais como tipo de moinho, eficiência de moagem, granulometria do produto, etc.

A eficiência do separador,  $\eta$ , está relacionada com a distribuição granulométrica, uma vez que se define como a recuperação de um tamanho específico (de 0 a  $x \mu\text{m}$ ) dentro do fluxo de material fino – Equação 2:

$$\eta(x) = \frac{f}{u \cdot a} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 2}$$

### 4.3 CURVA TROMP

A curva Tromp expressa a probabilidade de uma partícula, de um dado tamanho, alimentada ao separador retornar ao moinho. Portanto, a melhor separação é indicada por maiores probabilidades para o material grosso e menores probabilidades para o material fino.

A curva Tromp é uma ferramenta efetiva para avaliação de desempenho dos separadores dinâmicos. A curva é obtida da análise granulométrica de amostras do fluxo de grossos, finos e alimentação aplicada a Equação 3 a seguir.

$$\text{tr} = \frac{R \cdot \Delta r}{A \cdot \Delta a} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 3 (a)}$$

$$\text{tr} = \frac{\Delta r}{\Delta a} \cdot \left(1 - \frac{1}{u}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 3 (b)}$$

A Equação 3(a) fornece o valor da função Tromp a partir de valores de vazão e granulometria da alimentação e retorno. Alternativamente, a Equação 3(b) pode ser empregada para o caso de apenas resultados de granulometria estarem disponíveis. Exemplos de curva Tromp para uma separação ideal e real são apresentados na Figura 3.

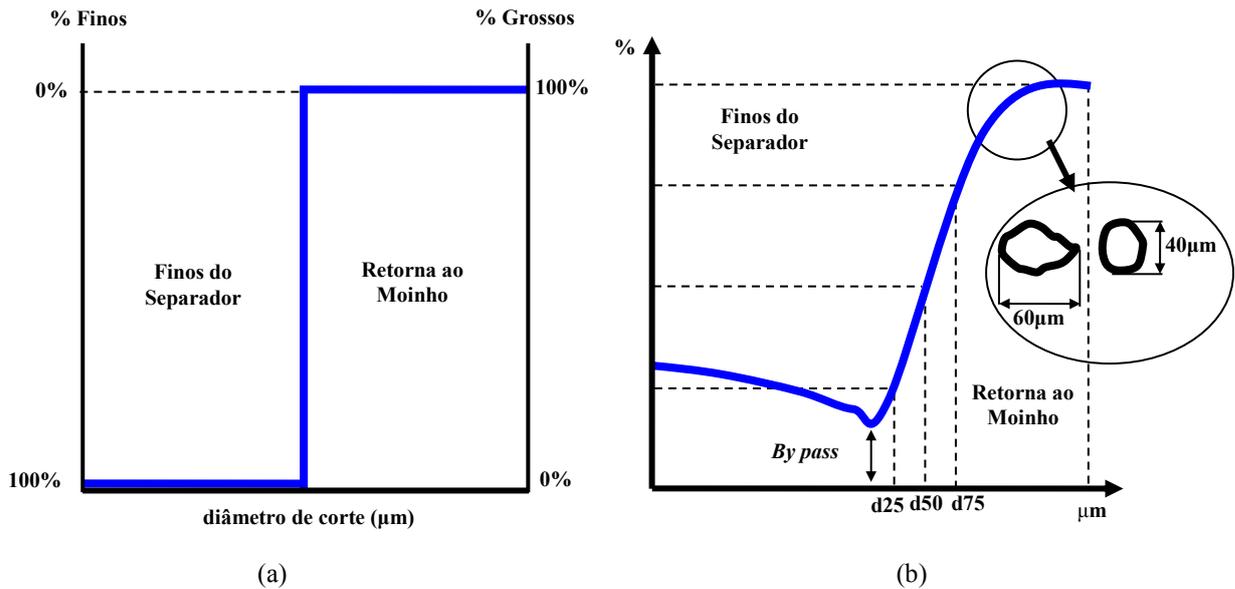


Figura 3 – Curva Tromp: (a) separação ideal e (b) separação real.

Na separação ideal as partículas são separadas completamente em finas, abaixo do diâmetro de corte, e grossas, acima do diâmetro de corte, como se todas fossem esferas perfeitas. A Figura 3(b) demonstra como as imperfeições das partículas deformam a curva Tromp.

O diâmetro de corte, representado por  $d_{50}$ , corresponde ao diâmetro de partícula de alimentação com 50% de passante que vai para o fluxo de grossos. Na verdade, a probabilidade de que partículas desse diâmetro sigam para o fluxo de finos ou de grossos é a mesma, pois há um equilíbrio entre as forças que atuam sobre as partículas desta granulometria.

A rigorosidade de separação,  $s$ , é definida como a razão entre  $d_{75}$  e  $d_{25}$ , diâmetros de 75% e 25% de passante respectivamente. Em uma separação ideal  $s$  é igual a 1.

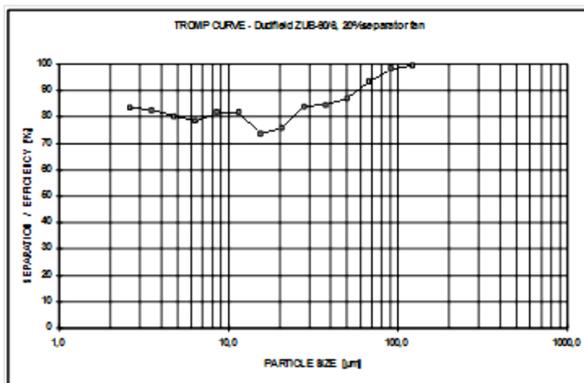
Teoricamente, a curva de Tromp é assintótica para as abscissas cujos valores de ordenadas são iguais a zero e a unidade. Na prática, o ponto em que a assíntota assume o menor valor ocorre para ordenadas maiores que zero (Figura 3(b)). Isto ocorre porque uma fração de cada tamanho de partículas passa pelo separador sem sofrer classificação alguma, ou seja, parte da alimentação vai para o fluxo de grossos independente do tamanho das partículas. Essa fração que não sofre classificação é denominada *by pass*,  $a'$ . A experiência mostra que o *by pass* varia com a taxa de alimentação do separador e consequentemente é difícil encontrar uma única curva Tromp que descreve representativamente um classificador.

Para alguns modelos de separadores mecânicos, o *by pass* pode exceder 50%, de forma que os conceitos de  $d_{50}$  e  $s$  definidos anteriormente tornam-se inválidos. Nestes casos, é

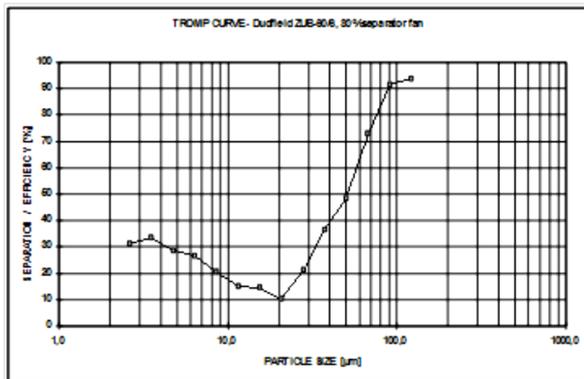
comum utilizar equações que incorporam o efeito do *by pass*, permitem definir  $d_{50}$  e  $s^*$ , e construir a Equação 4 :

$$tr^* = \frac{(tr-a)}{(100-a)} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 4}$$

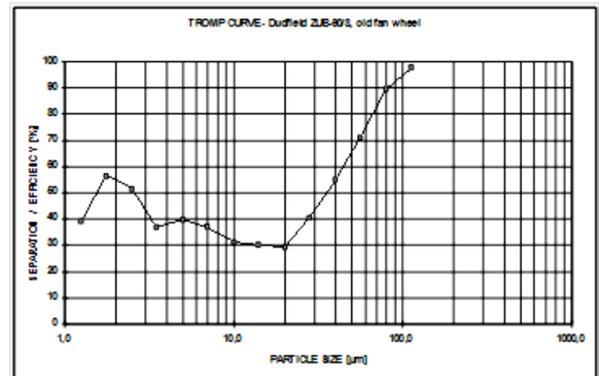
A quantidade de ar de separação influencia fortemente o funcionamento do separador. Esta influência é demonstrada na Figura 4 através da redução do *by pass* de 72% para 10% com o aumento da vazão do ar de separação de 70.000 para 250.000 m<sup>3</sup>/h.



(a)



(c)



(b)

Figura 4 – Curva Tromp: (a) 70.000 m<sup>3</sup>/h , (b) 215.000 m<sup>3</sup>/h e (c) 250.000 m<sup>3</sup>/h.

A curva Tromp pode revelar informações importantes a respeito da operação dos separadores de acordo com a Figura 5. O topo da curva pode indicar problemas no selo dinâmico que faz com que o produto fino seja contaminado com partículas grossas. É possível também verificar a ocorrência de aglomeração dos finos que ocasiona o arraste de partículas finas para o fluxo de grossos. A aglomeração de finos pode ser causada por altas temperaturas, carga estática ou não utilização de aditivos químicos.

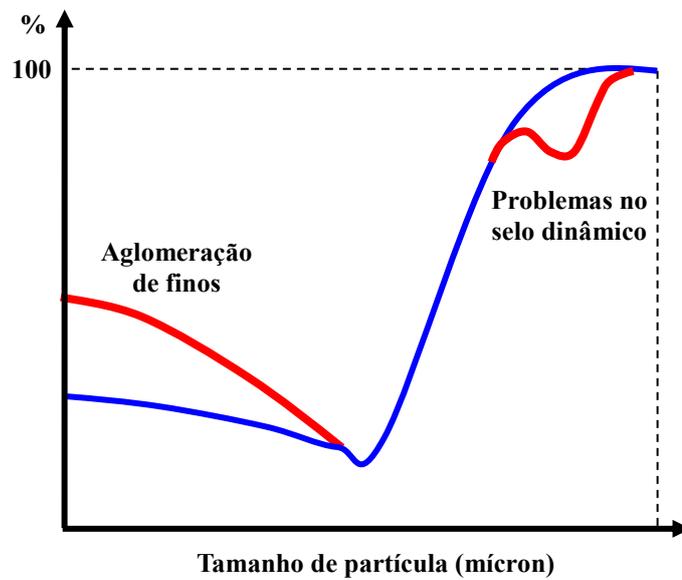


Figura 5 – Informações adicionais da curva Tromp.

---

## 5 MOAGEM, SEPARAÇÃO E CFD

A moagem e a separação são funções distintas que ocorrem em um circuito de moagem. Porém a influência que cada uma delas exerce sobre a outra é tamanha que não se pode tratá-las de forma totalmente independente.

Originalmente, a moagem era realizada sem um separador ou em circuito aberto. Hoje, devido à necessidade de produtos cada vez mais finos e de reduzir o consumo energético, praticamente todos os circuitos de moagem nas plantas de cimento são realizadas a seco e com separador ou em circuito fechado.

Os termos classificação e separação são usados na indústria cimenteira como o processo de agrupar partículas segundo características físicas comuns, de forma que cada grupo possa ser processado de uma maneira diferente no sistema. Usualmente no processo de fabricação de cimento tenta-se classificar o material de acordo com o tamanho de cada partícula, o que geralmente é expresso como diâmetro efetivo em micron. Resumidamente, busca-se separar as partículas menores das maiores, para que se possa tornar a moer somente as partículas grossas sem sobre moer as partículas menores. Todo material grosso que, porventura, permaneça no produto prejudica sua qualidade, e todo material fino que é rejeitado será moído novamente. Isto representa um desperdício de energia e também afeta a qualidade do produto pela criação de superfinos.

No processo de fabricação de cimento, a moagem de farinha é a etapa de cominuição da matéria-prima, que se efetua entre os processos de britagem e clínquerização, e deve atender aos seguintes requisitos:

- Produzir uma farinha cuja granulometria seja adequada à produção de um clínquer com a qualidade requerida;
- Obter uma farinha de composição química apropriada mediante alimentação de componentes em proporção certa;
- Misturar os componentes;
- Secar a matéria-prima para possibilitar uma boa manipulação da farinha.

A granulometria da farinha depende dos requisitos do processo de clínquerização e normalmente se encontra na faixa de 10-20% de retido em 90 $\mu$ m. Mais importante que os resíduos em 90 $\mu$ m são os de 200 $\mu$ m porque esta é a fração que contém partículas de quartzo de difícil queimabilidade. O objetivo é reduzir os resíduos de 200 $\mu$ m a menos de 0,5%

---

---

mantendo os mesmo resíduos de 90 $\mu$ m, o que só é possível mediante uma adequada operação do separador.

Os benefícios de um bom separador na moagem de farinha são:

- A obtenção de uma distribuição granulométrica mais estreita (maior uniformidade em tamanho) associada a retidos mais baixos em 200 $\mu$ m. Ao melhorar a queimabilidade da farinha, isso proporciona um clínquer de maior reatividade e menor consumo térmico;
- Alternativamente, é possível trabalhar com retidos mais altos em 90 $\mu$ m mantendo o retido de 200 $\mu$ m. Neste caso, enquanto a queimabilidade permanece inalterada, uma produção mais alta e menor consumo elétrico podem ser alcançados;
- A eficiência de moagem aumenta significativamente com a redução de recirculação de finos.

Uma configuração bastante comum em fábricas de cimentos, e que será a estudada nesse trabalho, é aquela em que o moinho de farinha é constituído por dois compartimentos, sendo a matéria prima admitida no primeiro compartimento, conhecido como câmara de secagem. O material previamente seco segue para um segundo compartimento, para realização da moagem. Após a moagem na câmara a farinha é transferida, por elevadores de canecas, para separadores dinâmicos. A principal função do separador é remover todo o material que ainda não foi reduzido ao tamanho desejado de produto, sem remover nenhum material já no tamanho adequado. A fração fina da farinha é transportada por fluidores e bombas para o silo, onde é garantida a sua completa homogeneização através de um processo de aeração. A fração grosseira do separador retorna para o moinho para ser moída novamente até atingir a granulometria desejada.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O objeto de estudo do presente trabalho é um separador dinâmico de primeira geração, marca FLSmidth, tipo CV, modelo 66. O mesmo encontra-se instalado no circuito de moagem de farinha de uma fábrica de cimento cujo foco está na redução do consumo elétrico e do retido em 90  $\mu$ m da farinha. Conforme discutido no item anterior, para que se obtenha o máximo desempenho de um circuito de moagem, em termos de consumo elétrico e granulometria do produto, é indispensável garantir um bom desempenho do separador.

Após mais de 30 anos de operação, nos quais a especificação do produto final foi alterada para melhor atender as novas condições impostas ao processo produtivo, o separador

---

passou por várias alterações geométricas. Alguns fatores, como a escassez de resultados de literatura referente à otimização desse equipamento e a necessidade de adaptação rápida sem grandes investimentos, fizeram com que essas alterações no design original do separador fossem conduzidas como testes baseados em metodologia tentativa-erro e na experiência prática de profissionais da fábrica.

Nenhum histórico pôde ser precisamente resgatado, de forma que se pudesse determinar o design original do separador, identificando quais são e que funções deveriam exercer cada um de seus componentes internos.

Dadas as condições operacionais severas (grandes concentração de pó extremamente fino) e a indisponibilidade de equipamentos portáteis de medição que proporcionassem a verificação de velocidades, pressão e granulometria no interior do equipamento, a utilização de CFD foi a opção escolhida para resolução do problema.

A mecânica dos fluidos computacional, popularmente conhecido como CFD, refere-se à modelagem matemática e solução de equações que governam o comportamento dos fluidos. Estas equações, conhecidas como equações de Navier-Stokes, são tão complexas que nem mesmo os maiores matemáticos do mundo obtiveram sua solução analítica.

Apenas com o advento do computador digital moderno, nos anos 70, foram desenvolvidas técnicas de solução numérica para estas equações. As primeiras aplicações ocorreram na indústria aeroespacial, mas com o passar do tempo sua utilização se espalhou progressivamente por todo o espectro industrial.

Antes do CFD, a indústria cimenteira, como muitas outras, tinha que contar com a modelagem física para avaliar e melhorar o desempenho de equipamentos como ciclones, calcinadores, fornos rotativos, queimadores, etc. A modelagem física proporciona bons resultados, mas possui limitações como simulação de única fase ou de problemas isotérmicos.

Atualmente, a indústria cimenteira está claramente preocupada com outros fatores como o arraste de partículas, as variações de temperatura, e o efeito do escoamento na combustão. Como CFD permite a resolução das equações que descrevem o comportamento dos fluidos a partir dos fundamentos básicos de física e química, estas considerações não apresentam nenhuma dificuldade. Esta técnica pode ser aplicada a qualquer processo fornecendo resultados muito diferentes daqueles da modelagem física. (AKHTAR, 2006).

De uma forma bastante resumida, pode-se dizer que utilizar a técnica CFD consiste em dividir a área do escoamento em um grande número de células ou volumes de controle chamados de malha ou grade, reescrever as equações de Navier-Stokes e demais equações parciais que descrevem o escoamento em cada uma destas células e então resolvê-las

---

numericamente. A solução rende uma figura do escoamento correspondente ao nível de resolução da malha, cuja interpretação exige que se tenha conhecimento não apenas do processo simulado, mas principalmente dos fundamentos da mecânica dos fluidos. (HAMIL,1996).

---

---

## 6 CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

A simulação do separador pode ser resumida em três etapas principais:

- pré-processamento: envolve a definição do domínio de cálculo a partir da geometria estudada, sua discretização em uma malha e a escolha das condições de contorno a serem aplicadas;
- cálculo: resolução numérica das equações diferenciais que descrevem os fenômenos estudados;
- pós-processamento: visualização e análise dos resultados de cálculo.

A seguir, neste capítulo, são explicitados os parâmetros principais da etapa de pré-processamento.

### 6.1 O SEPARADOR TIPO CV

A Figura 6 mostra o desenho esquemático do separador com seus componentes principais.

O material que sai do moinho é introduzido na parte superior do separador através de válvulas e cai sobre o prato distribuidor, do qual são lançadas para dentro da corrente de ar que é posta em circulação pelo rotor do ventilador, tal como indicado no esquema da Figura 7. Da câmara de separação, Figura 6 (b), o material fino é levado pela corrente de ar, passando pelo rotor do ventilador, sendo separado do ar na parte superior do separador que constitui a parte cilíndrica de um ciclone. O material fino é segregado entre o cone interno e o cone externo.

O material grosso que não é arrastado pela corrente de ar, é lançado contra o invólucro cilíndrico da câmara de separação, da qual sai pelo cone interior.

A corrente de ar que circula constantemente passa imediatamente antes da câmara de separação, pelas gelosias que, mediante um dispositivo de ajuste, podem ser giradas em várias direções.

---

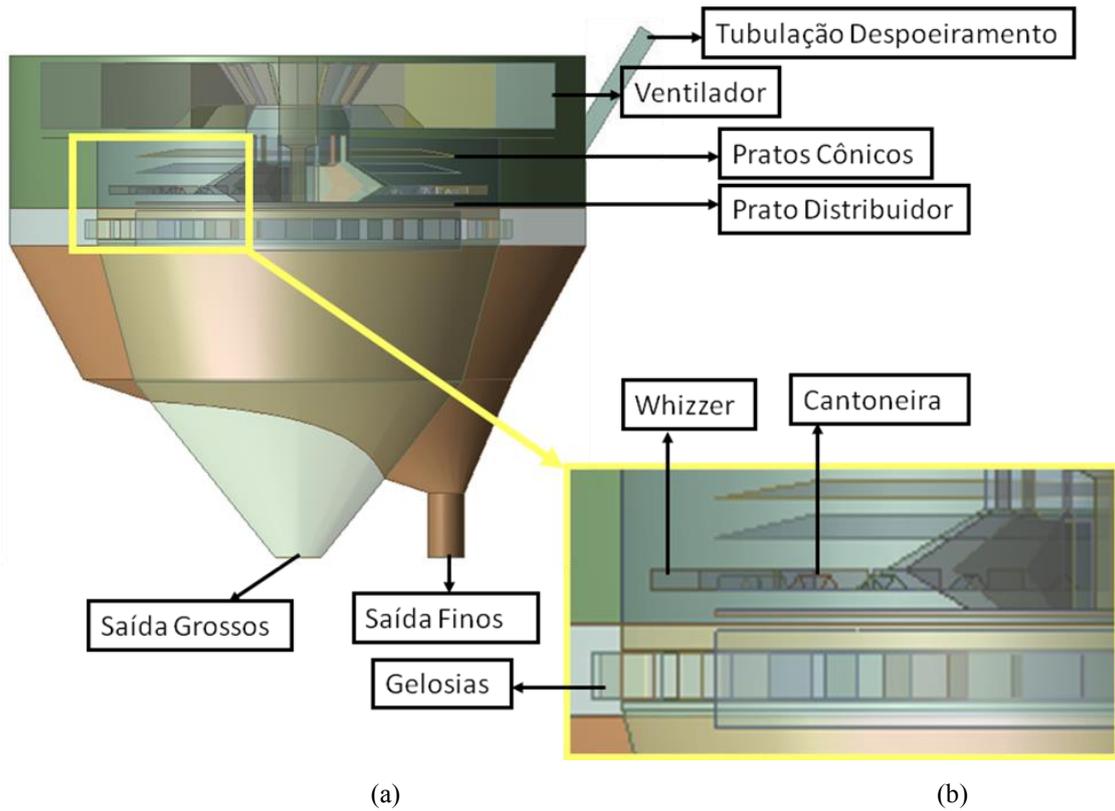


Figura 6 – Separador FLSmith tipo CV: (a) separador e (b) detalhe câmara de separação.

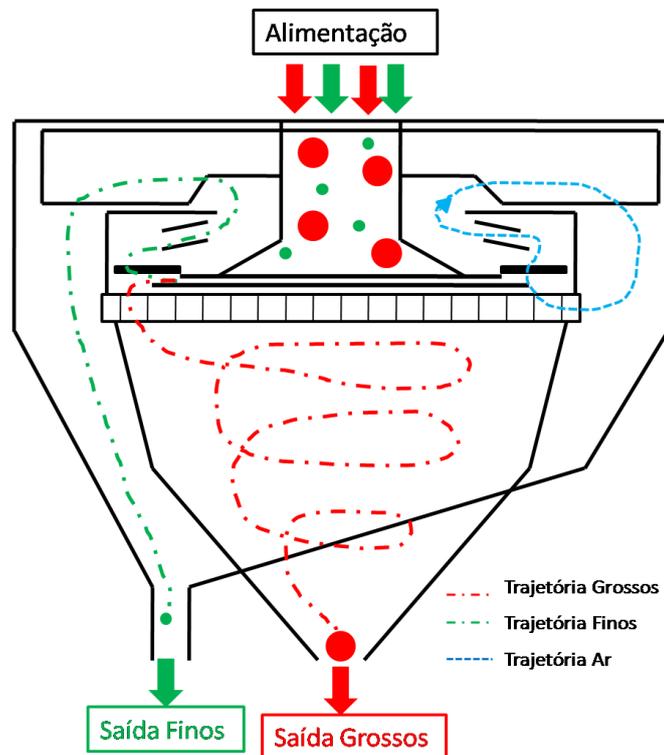


Figura 7 – Separador FLSmith tipo CV: desenho esquemático das trajetórias esperadas.

## 6.2 GEOMETRIA

A etapa inicial de todo trabalho de CFD consiste na definição do domínio de cálculo, ou seja, define-se a geometria na qual pretende se aplicar a resolução numérica das equações que descrevem os fenômenos a serem investigados.

No caso de equipamentos industriais, cujas dimensões principais são muito maiores que as dimensões de componentes internos, é aconselhável que alguns detalhes estruturais da geometria sejam omitidos. A Figura 8 permite comparar o layout do separador dinâmico (a) com a geometria simplificada (b), na qual parafusos e hastes de sustentação foram omitidos.

Todos os resultados de simulações do presente trabalho foram obtidos da utilização do pacote ANSYS em sua respectiva interface *Workbench*. O software e a licença temporária do pacote ANSYS foram cedidos gratuitamente pela empresa *Engineering Simulation and Scientific Software – ESSS*.

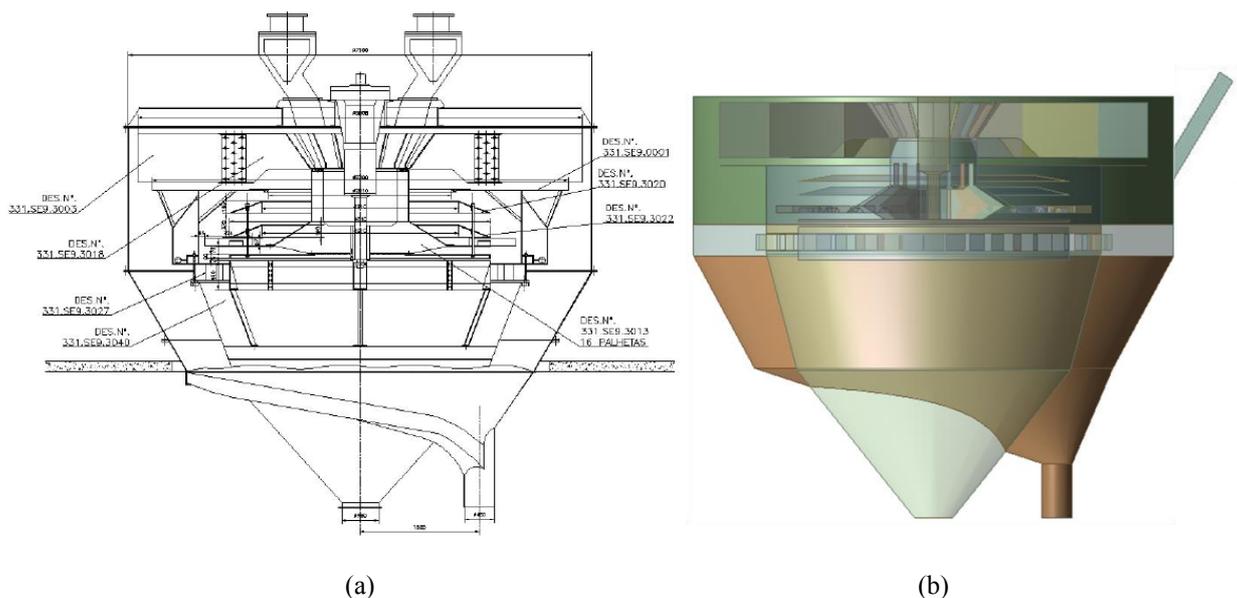
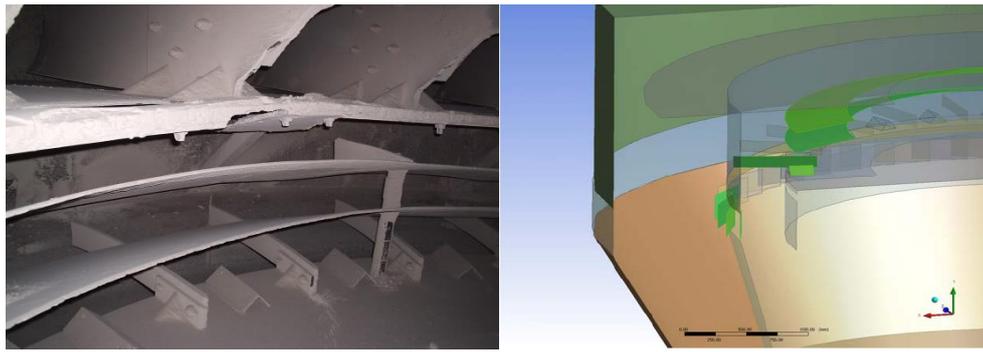
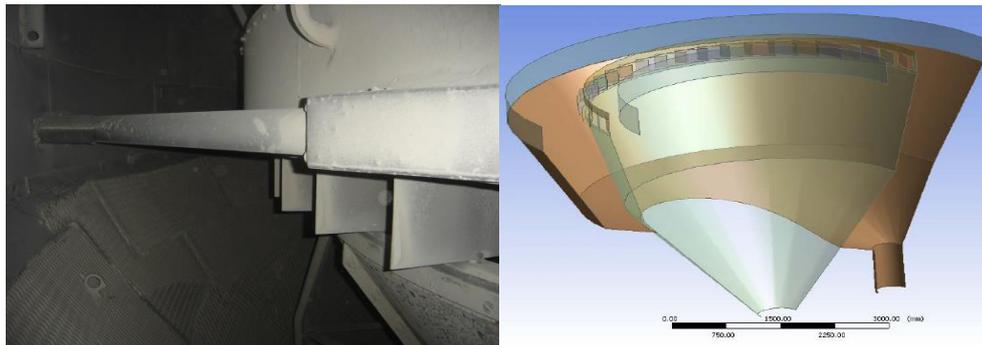


Figura 8 – Domínio de cálculo: (a) layout do separador dinâmico e (b) geometria simplificada para simulação.

Para a construção da geometria, foi utilizado o software ANSYS DESIGN MODELER. Sua interface permite que a geometria seja construída em partes, o que é de grande utilidade nas etapas posteriores de pré e pós-processamento. As Figuras 9 e 10 ilustram regiões da geometria de maior interesse para o estudo em questão: (a) zona de separação (*whizzers*, cantoneiras e pratos cônicos); (b) gelosias; (c) ventilador e (d) prato distribuidor.

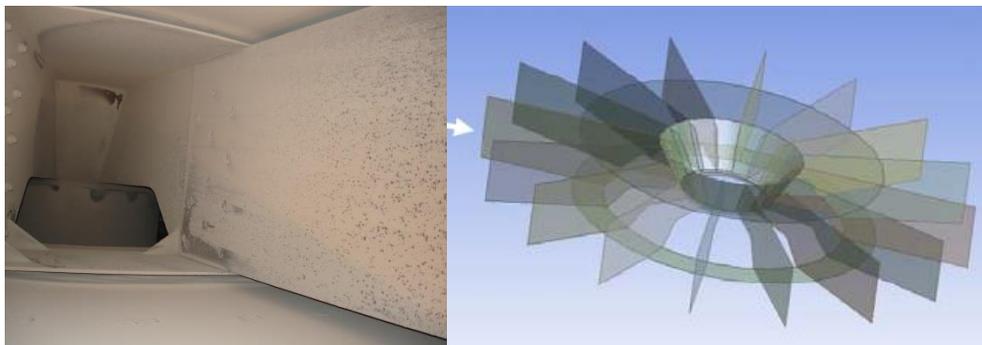


(a)

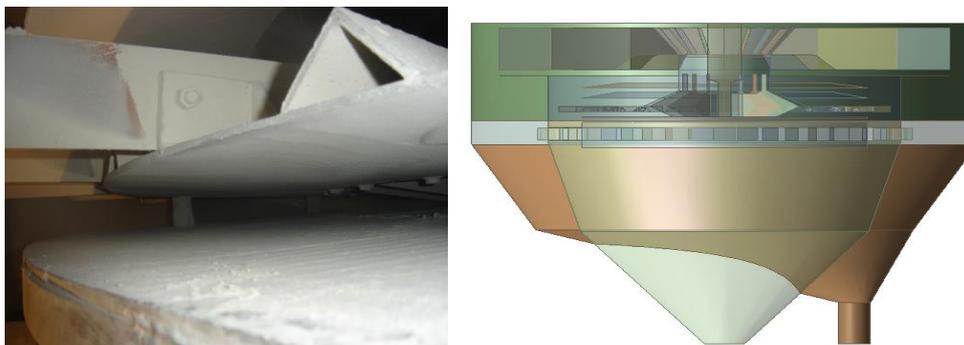


(b)

Figura 9 – Detalhes da geometria: (a) zona de separação e (b) gelosias.



(c)



(d)

Figura 10 – Detalhes da geometria: (c) ventilador e (d) prato distribuidor.

Conforme demonstrado na Figura 11, as dimensões das câmaras do separador são consideravelmente maiores, 1000 vezes, do que a espessura das placas internas que compõem as gelosias, as pás do ventilador e os pratos cônicos e que são da ordem de 15mm. Desta forma, assumiu-se que estas placas podem ser consideradas como superfícies sem espessura para fins de simplificação da malha computacional.

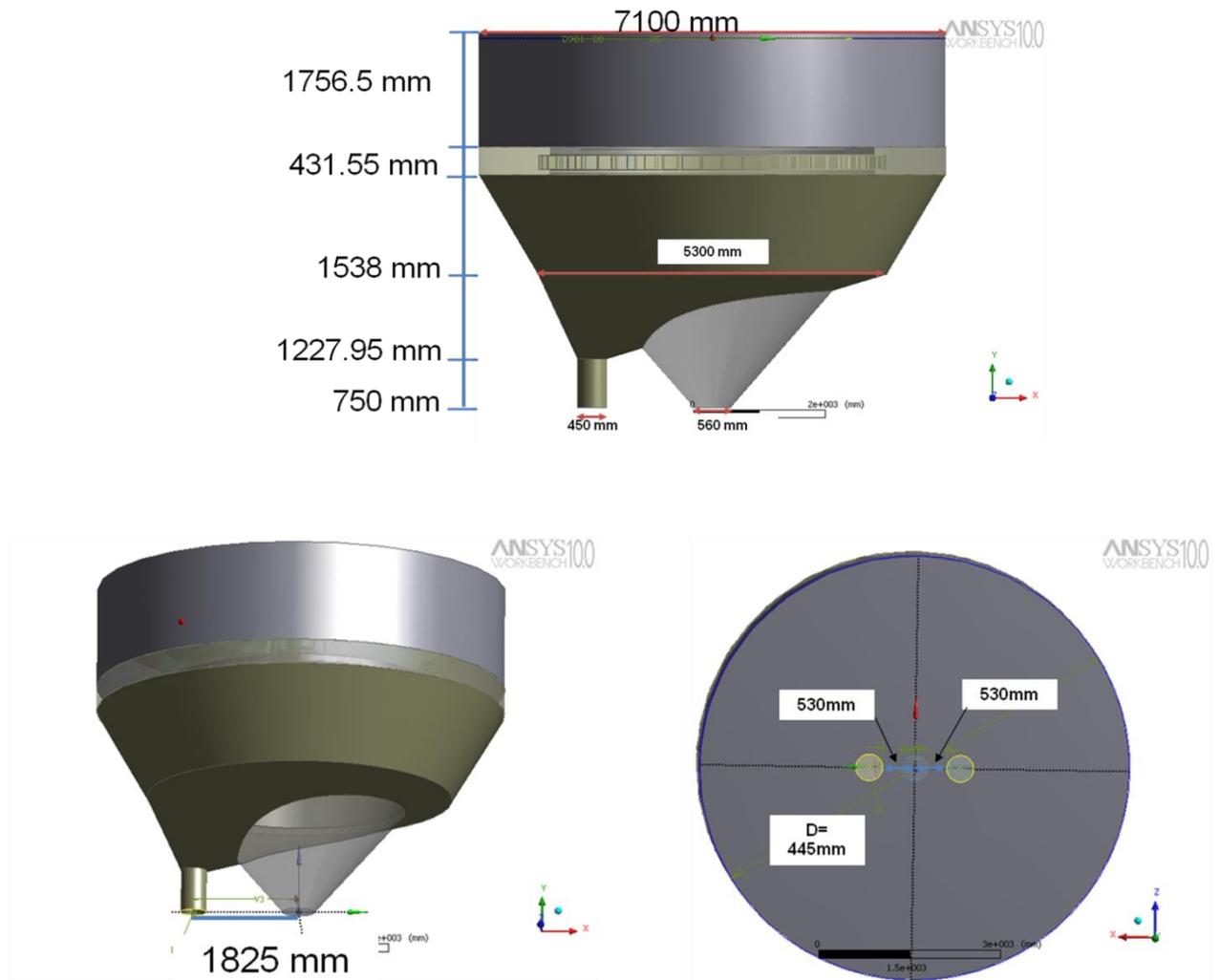


Figura 11 – Dimensões principais da geometria.

### 6.3 MALHA

Devido à complexidade da geometria, optou-se pela utilização do software ANSYS ICEM CFD para a construção de uma malha computacional que combina elementos tetraédricos e prismáticos. Em geral, dois fatores são primordiais para garantir uma malha de boa qualidade: adotar uma transição suave de elementos menores para maiores com um razão crescimento de aproximadamente 20% de aumento de volume; e inserir um mínimo de dois a três elementos na menor distância de uma determinada direção (CFX Training, 2006).

Desta forma, iniciou-se pela malha superficial ilustrada na Figura 12. Observa-se que algumas regiões possuem maior concentração de elementos do que outras devido às diferentes ordens de dimensões entre os componentes da geometria. Enquanto a distância entre as paletas do rotor e a parede da câmara externa é de 500mm, o diâmetro dessa câmara é de 7100mm. Tal diferença acaba por dificultar a redução do tamanho final da malha, que fica em torno de dois milhões de nós.

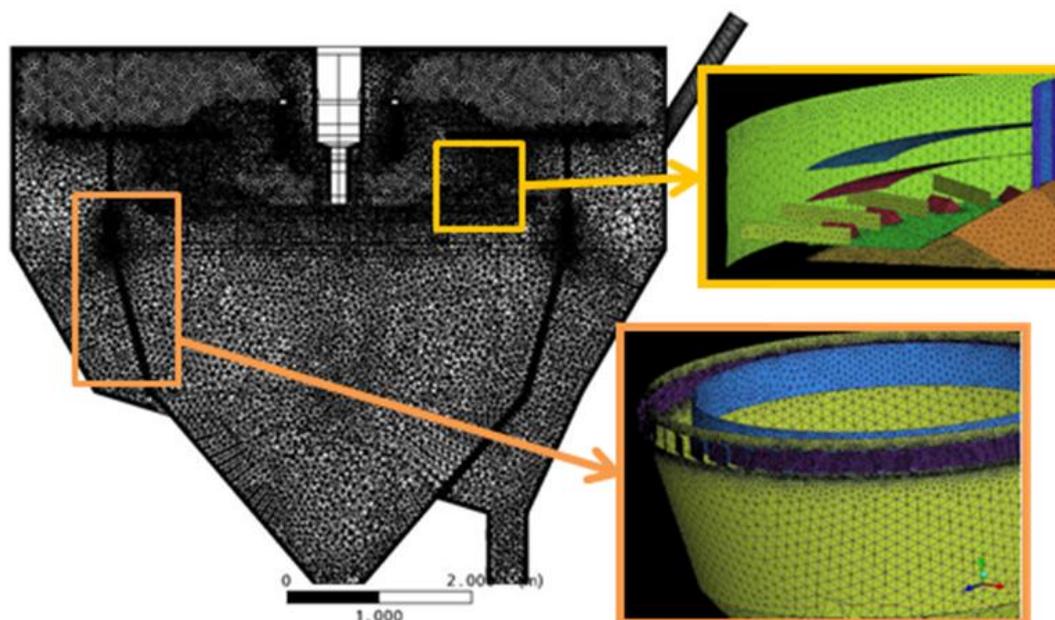


Figura 12 – Malha superficial para separador dinâmico.

O pacote ANSYS oferece duas possibilidades para simulações envolvendo partes móveis: malha móvel e malha estática. Malhas móveis são aplicadas a domínios deformáveis como pistões de motores, deslocamento de míssil de um avião, bomba de diafragma e etc. Esse tipo de malha é reajustada a cada passo da simulação requerendo grande esforço computacional.

Para modelagem do separador, foi utilizada malha estática especificando-se volumes como partes que se deslocam. Assim, o domínio de cálculo foi dividido em: domínio rotativo e domínio estático. A Figura 13 ilustra a divisão do domínio de cálculo indicando em amarelo o domínio rotativo, em laranja a superfície da interface entre domínios e em vermelho o domínio estático.

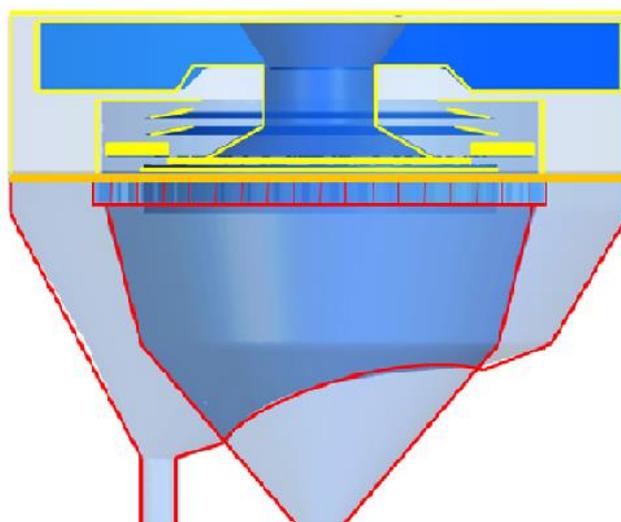


Figura 13 – Divisão do domínio de cálculo: em amarelo o domínio rotativo, em laranja a superfície da interface entre domínios e em vermelho o domínio estático.

Três malhas foram geradas com 2.2, 2.3 e 2.7 milhões de nós. Para as duas primeiras malhas não foi possível atingir a convergência desejada, mesmo após sete dias de simulação. Dado o custo computacional e as limitações de tempo inerentes às soluções de problemas industriais, a malha de 2.7 milhões de nós foi escolhida para o prosseguimento do trabalho por convergir em uma semana e fornecer resultados fisicamente coerentes para o problema.

#### 6.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

O software ANSYS CFX foi empregado para realização da simulação, adotando-se as seguintes premissas:

- regime permanente;
- escoamento monofásico (fluido: ar);
- condição isotérmica (298K);
- escoamento incompressível (densidade:  $1.185\text{kg/m}^3$ );
- regime turbulento.

---

Embora o escoamento no interior do separador seja multifásico, devido à complexidade de sua geometria a simplificação de escoamento monofásico foi adotada nesse trabalho. A malha gerada envolve grande número de elementos exigindo grande esforço computacional até mesmo para resolução do modelo homogêneo. Desta forma a inclusão de partículas na etapa inicial é inviável do ponto de vista do custo computacional. Nesses casos, é prática comum começar pela obtenção de resultados para simulação monofásica e em simulações subsequentes usar os mesmos para inicializar os cálculos de simulações multifásicas. Dados os objetivos do estudo em questão, resultados monofásicos são suficientes para revelar detalhes, sobre o que se passa no interior do equipamento, que não podem ser observados diretamente durante sua operação.

Os escoamentos nos equipamentos utilizados na indústria cimenteira são, em sua maioria, caracterizados por altos números de Reynolds devido associação das escalas de velocidade e geometrias empregadas. O separador simulado não foge a regra. O modelo de duas equações de transporte k- $\epsilon$  foi utilizado para a modelagem da turbulência.

O modelo k- $\epsilon$  correlaciona os termos de flutuação de velocidade com uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k, e uma para a taxa de dissipação turbulenta,  $\epsilon$ . O modelo é conhecido como o padrão para aplicações industriais por oferecer uma boa relação entre esforço numérico e precisão. Trata-se de um modelo generalista e robusto capaz de fornecer informações sobre comportamento médio do escoamento, mas não recomendável para aplicações nas quais uma análise mais detalhada da turbulência se faz necessária.

No software ANSYS CFX, funções de parede são associadas ao modelo de turbulência para melhorar sua robustez e precisão. No presente trabalho foi utilizada a função *scalable wall*.

As condições de contorno utilizadas (Tabelas 3, 4 e 5,) representam as condições reais de operação do separador. As saídas de grossos e de finos são consideradas paredes porque na prática estão fechadas para saída de ar. Há uma vedação nessas saídas do separador, de forma que a saída dos sólidos que se acumulam nessa parte é controlada por válvulas rotativas.

Para saída da tubulação lateral foi prescrita a pressão de 500Pa negativos. Esta tubulação está conectada a um exaustor cuja função é garantir que o separador opere a pressão negativa evitando vazamento de particulados para o ambiente fabril.

Nas entradas do separador utilizou-se a condição de pressão relativa de 0Pa com o objetivo de simular o fluxo de ar gerado pelo movimento do ventilador.

Foi adotado um resíduo médio dos sistemas lineares (RMS, *Root Mean Square*) menor do que  $10^{-5}$  como critério de convergência. Embora seja um valor alto para aplicações

---

acadêmicas é um valor aceitável para aplicações industriais. O passo de tempo da solução foi ajustado para o inverso da velocidade angular, como recomendado para simulações rotativas.

Tabela 3 - Condições de contorno no domínio rotativo.

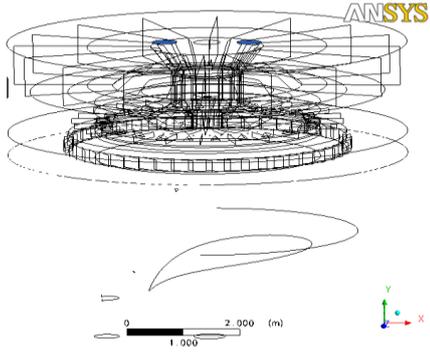
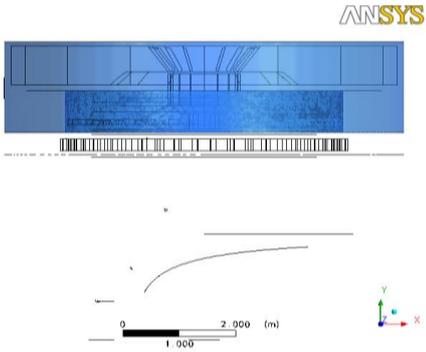
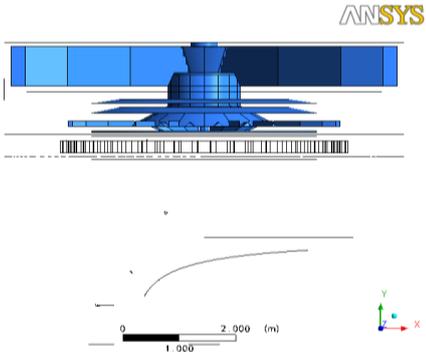
Local	Condições de Contorno – Domínio Rotativo
 <p>Entradas</p>	<p>Tipo: entrada  Movimento: estático  Regime de escoamento: subsônico  Momento e Massa: pressão estática  Pressão relativa: 0Pa  Direção escoamento: gradiente zero</p>
 <p>Paredes e tampa das câmaras</p>	<p>Tipo: parede sem rugosidade  Movimento: rotação  Velocidade da parede: contra rotação  Influência no escoamento: condição de não deslizamento.</p>
 <p>Partes móveis</p>	<p>Tipo: parede sem rugosidade  Movimento: rotação  Velocidade da parede: 164,4rpm  Sentido: anti-horário  Influência no escoamento: condição de não deslizamento.</p>

Tabela 4 - Condições de contorno no domínio estático.

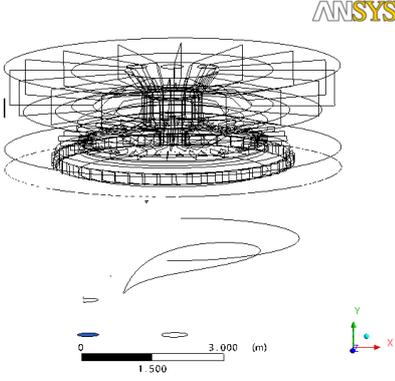
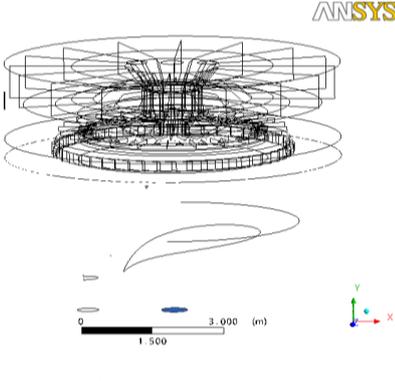
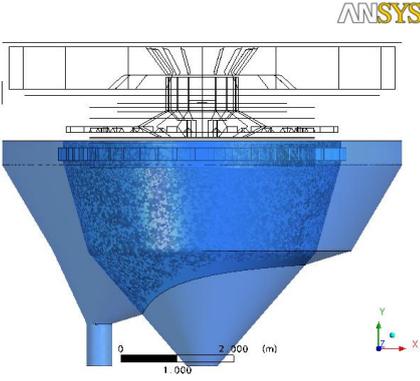
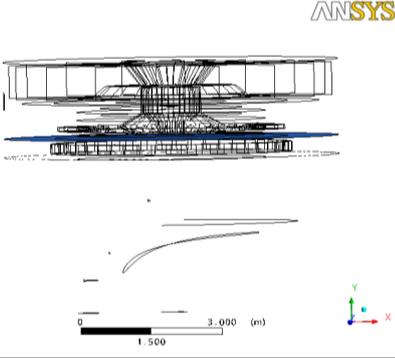
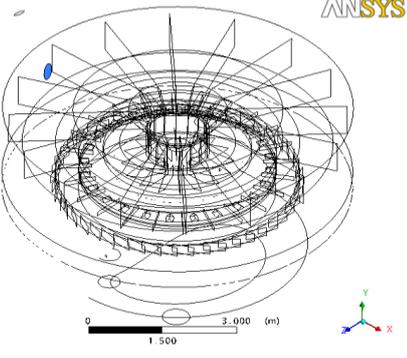
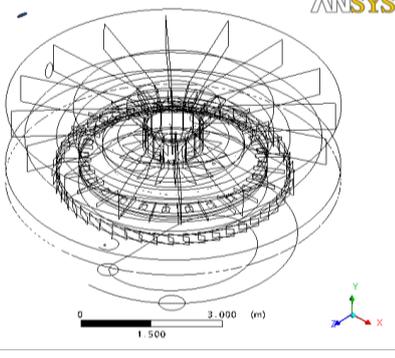
Local	Condições de contorno – Domínio Estático
 <p data-bbox="405 819 587 853">Saída de finos</p>	<p data-bbox="774 510 1145 544">Tipo: parede sem rugosidade</p> <p data-bbox="774 566 1038 600">Movimento: estático</p> <p data-bbox="774 622 1331 707">Influência no escoamento: condição de não deslizamento.</p>
 <p data-bbox="389 1308 608 1341">Saída de grossos</p>	<p data-bbox="774 1014 1145 1048">Tipo: parede sem rugosidade</p> <p data-bbox="774 1070 1038 1104">Movimento: estático</p> <p data-bbox="774 1126 1331 1211">Influência no escoamento: condição de não deslizamento.</p>
 <p data-bbox="363 1823 632 1856">Paredes das câmaras</p>	<p data-bbox="774 1514 1145 1547">Tipo: parede sem rugosidade</p> <p data-bbox="774 1570 1038 1603">Movimento: estático</p> <p data-bbox="774 1626 1331 1711">Influência no escoamento: condição de não deslizamento.</p>

Tabela 5 - Condições de contorno nas interfaces e tubulação lateral.

Local	Condições de Contorno
 <p>Interface entre domínios rotativo-estático</p>	<p>Tipo: interface fluido-fluido  Modelo: <i>General Connection</i>  Mudança/Mistura: <i>Frozen Rotor</i>  Método de Conexão Malha: GGI</p>
 <p>Interface entre domínios rotativo-tubo lateral</p>	<p>Tipo: interface fluido-fluido  Modelo: <i>General Connection</i>  Mudança/Mistura: <i>Frozen Rotor</i>  Método de Conexão Malha: GGI</p>
 <p>Saída tubo lateral</p>	<p>Tipo: saída  Movimento: estático  Momento e Massa: pressão estática média na superfície  Pressão relativa: -500Pa</p>

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência, são apresentados resultados de simulação para a configuração inicial do separador com sua respectiva análise. Em função desses resultados, o design do separador foi modificado: retiraram-se os *whizzers* e as cantoneiras.

Como nenhuma medida experimental direta foi possível de ser realizada no interior do equipamento, utilizou-se da curva Tromp como critério para avaliar o efeito da retirada desses componentes no desempenho do equipamento.

### 7.1 FUNÇÕES E IMPORTÂNCIA DOS COMPONENTES INTERNOS

Conforme descrito na seção 5.1, é interesse do presente trabalho analisar os efeitos dos componentes internos do separador no desempenho do mesmo e determinar quais desses devem ser mantidos e/ou modificados de forma a otimizar este desempenho.

A Figura 14 apresenta a localização de 3 planos, nos quais foram explorados os principais resultados de simulação. Esses planos foram selecionados levando-se em conta as regiões de maior interesse, ou seja, aquelas em que há uma expectativa da separação das partículas efetivamente ocorrer.

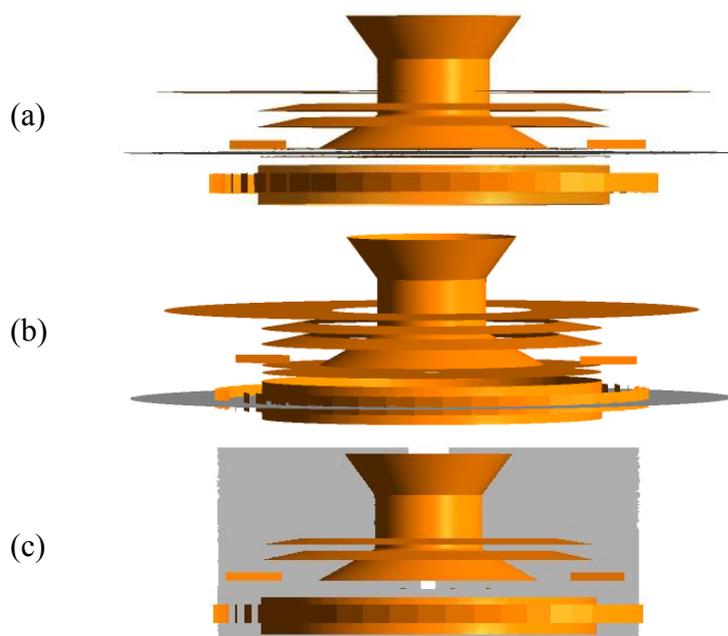


Figura 14 – Planos de análise: (a) Plano prato: plano XZ equidistante as duas faces do prato distribuidor; (b) plano gelosia; plano XZ localizado a meia altura das gelosias e (c) Plano zona de separação: plano XY ( $z = 0$ ) passa pelo centro do separador.

### 7.1.1 O Ventilador

A função do ventilador interno é clara: promover a movimentação do ar succionando-o da câmara interna para câmara externa. Exclusivamente, para esse componente a análise dos resultados não visa avaliar sua função, mas, sim avaliar a coerência da simulação.

A Figura 15 mostra o campo de pressão no plano prato (a).

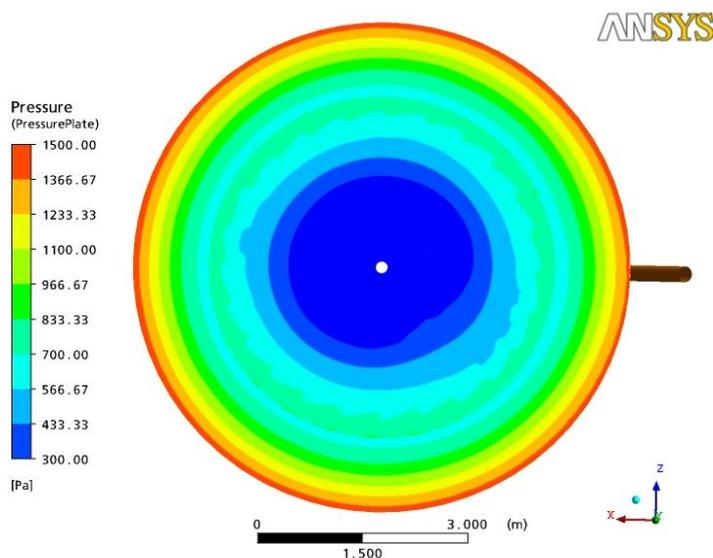


Figura 15 – Campo de pressão no plano prato.

Menores valores de pressão, de 300 a 700Pa são visualizados no centro, câmara interna, enquanto os valores maiores, de 800 a 1500Pa são vistos nas extremidades, câmara externa. Os resultados de pressão corroboram o sentido do escoamento como o esperado: mostram que o ventilador succiona o ar da câmara interna para câmara externa, causando o abaixamento da pressão na primeira.

Na Figura 16, são fornecidos os valores da média circunferencial da velocidade em função do raio. Observa-se que a velocidade atinge seu valor máximo, 55m/s, nas proximidades de 3,4m. Essa é a região localizada entre as extremidades das pás do ventilador e a carcaça da câmara externa. A pequena distância de 120mm entre o ventilador e a parede da câmara externa explica o fato.

O excesso de sólidos em relação ao ar de separação causa instabilidade operacional e decresce a eficiência dos separadores dinâmicos. De fato, para cada separador há uma relação ar/material ótima. O recomendável, geralmente, é que a razão sólidos/ar seja menor que 2.2 a 2.5kg/m<sup>3</sup> na alimentação do separador e que a razão para finos seja menor que 0.7kg/m<sup>3</sup>

(CHATTERJEE, 2004). Para separadores de primeira geração, que possuem ventilador interno e acoplado ao mesmo eixo do prato distribuidor, essa relação é de difícil mensuração.

Por muitas vezes, a hipótese de que a causa do desempenho insatisfatório do separador seria a quantidade insuficiente de ar de separação foi levantada, sem que se pudesse confirmá-la via medida direta da vazão. O máximo que pôde ser feito nesse sentido foi aumentar as pás do ventilador, uma vez que aumentar sua rotação implicaria em alto investimento para repotenciamento do motor. Ainda sim, nenhuma melhora havia sido alcançada após essa modificação e não se tinha conhecimento prévio se, de fato, tal ação seria suficiente para resolver o problema.

Utilizando os resultados de simulação, foi possível estimar uma vazão de 17,42kg/s de ar. Considerando as condições operacionais de 90kg/s de alimentação de sólidos e carga circulante de aproximadamente 3,5, obtém-se uma razão sólidos/ar de 5,3kg/m<sup>3</sup> na alimentação e de 1,5kg/m<sup>3</sup> para finos. Esses valores, se comparados à referência dada na literatura (2.2 a 2.5kg/m<sup>3</sup> na alimentação e razão de finos menor que 0.7kg/m<sup>3</sup>), sugerem que a vazão ideal para esse separador seria no mínimo o dobro da vazão atual.

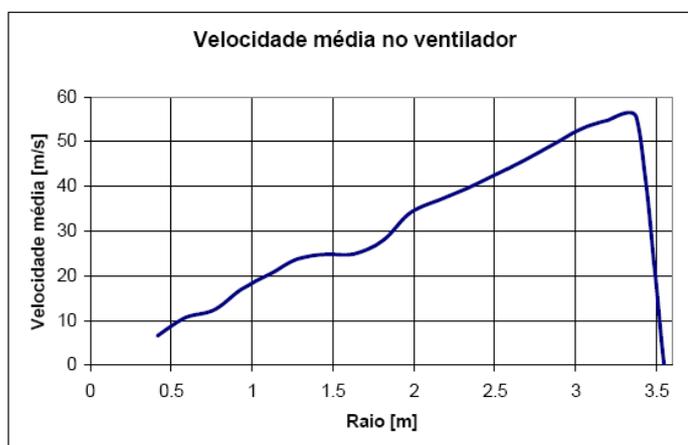


Figura 16 – Gráfico velocidade média circunferencial em função da distância radial na região do ventilador (plano  $y = -0.6m$ ).

Nenhuma medida foi tomada a respeito durante a realização desse trabalho pelos seguintes motivos:

- as pás do ventilador já haviam sido aumentadas ao máximo possível sem causar danos estruturais ao equipamento;
- aumentar a rotação requer a troca do motor de acionamento por outro de maior potência e não havia recursos financeiros disponíveis imediatamente; e

- outra modificação, de custo bem inferior, foi identificada como chance de melhorar o desempenho do separador: a retirada dos *whizzers* e cantoneiras, discutida a seguir.

### 7.1.2 As Gelosias

Em princípio, o separador funciona de tal forma que, no caso de receber uma quantidade constante de alimentação com composição granulométrica constante, girar as gelosias significa alterar a granulometria do produto tornando-o mais fino. Assim uma posição mais tangencial das gelosias, (giro do volante no sentido anti-horário – Figura 17) fornece um produto final mais grosso, uma vez que o giro das gelosias altera tanto a quantidade de ar como o sentido da corrente de ar na câmara de separação. Girando a gelosias altera-se a relação entre material fino e grosso (FLSmith, 1972).



Figura 17 – Volante externo e eixo para giro das gelosias.

Quando um moinho opera em circuito fechado, o material grosso que retorna exerce influência na moagem, tornando inconstante a alimentação do separador. Pois, a posição das gelosias afeta diretamente a granulometria e a quantidade de material. Neste caso, a granulometria do produto fino é regulada unicamente por alteração da alimentação do moinho. Uma maior vazão alimentada ao moinho fornece produto mais grosso e diminuindo-se a vazão alimentada ao moinho obtém um produto mais fino. Portanto, a gelosia serve exclusivamente para regular a quantidade de retorno. Desta forma, para uma mesma taxa de produção do moinho, abrir as gelosias (ou movê-las de forma a aumentar o ângulo das mesmas relativo à parede da câmara interna) corresponde a diminuir a quantidade de retorno e fechar a gelosia corresponde a aumentar a vazão em massa do retorno. De um modo geral,

deve-se evitar usar as gelosias em ângulos inferiores a 30°, dado que o efeito obtido pelo giro das gelosias no campo de 0 a 30° é muito pequeno.

Uma vez restabelecido o equilíbrio do sistema, após uma alteração da alimentação ou uma alteração das gelosias (muitas vezes, após algumas horas de funcionamento), a quantidade de finos será igual à vazão em massa alimentada ao moinho, visto que a moagem se realiza apenas no moinho. (FLSmith, 1972).

De acordo com os conceitos descritos no manual do fabricante e após testes operacionais, observou-se que 20% de abertura era o valor que possibilitava maior estabilidade do separador. É importante salientar, para fins de melhor esclarecimento, que a indicação de 100% de abertura junto ao volante de giro representa a posição radial para as gelosias, em 90° com a parede da câmara interna.

Os resultados de perfis de velocidades na região das gelosias (Figura 18) confirmam a coerência dos resultados de simulação se analisados a luz das informações contidas no manual de operação do separador, descritas anteriormente.

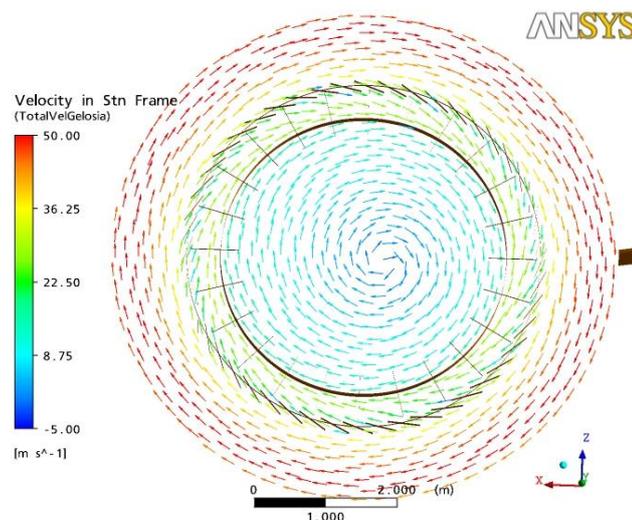


Figura 18 – Vetores Velocidade no Plano Gelosia.

Observa-se que as gelosias exercem o papel de redirecionamento do fluxo de ar pelo aumento da inclinação dos vetores velocidade quando o ar passa, através das gelosias, da câmara externa para a câmara interna.

Ao redirecionar o fluxo, as gelosias causam uma perda de carga de aproximadamente 300Pa, para a posição simulada, conforme Figura 19. Isso confirma a informação do fabricante de que a posição das gelosias pode ser usada para controlar a vazão de ar que circula no interior do equipamento. Uma vez que o ventilador é uma máquina volumétrica

projetada para vencer determinada perda de carga, mover a gelosia aumentando a perda de carga significa diminuir a quantidade de ar a entrar na câmara interna. Conseqüentemente, a massa de sólidos na saída dos grossos aumentará, aumentando assim o retorno para o moinho e a carga circulante no sistema. A chave para boa utilização desse recurso está em alterar a posição da gelosia em função da alimentação do moinho, de forma a manter a carga circulante adequada. De fato, é comum ver em fábricas de cimento separadores que operam com controle automático da posição das gelosias em função da vazão alimentada ao moinho.

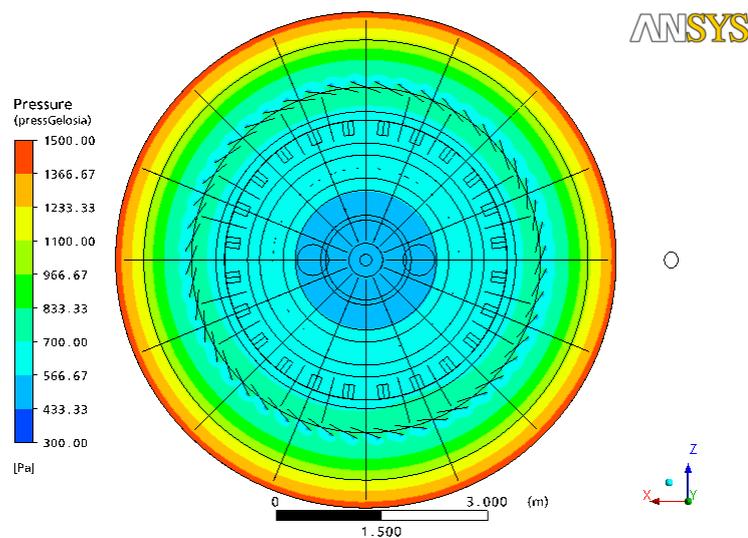


Figura 19 – Campo de pressão no plano prato.

### 7.1.3 Os Pratos Cônicos

Se o circuito de moagem não funciona de um modo estável, de forma que seja necessário alterar constantemente a posição das gelosias ou a alimentação do moinho para regular a quantidade de retorno, a causa reside no fato de que a quantidade de material alimentado ao separador é muito grande para a quantidade de ar de separação. A FLSmith tem duas recomendações para esses casos: aumentar essa quantidade de ar aumentando a rotação do ventilador ou alterar o número dos pratos cônicos (FLSmith, 1972).

Estes pratos têm a finalidade de distribuir o ar na câmara de separação e possibilitar uma melhor separação dos grãos mais grossos. Por outro lado, uma redução no número de pratos cônicos pode reduzir a perda de carga e a potência consumida. O número de pratos cônicos ideal para o separador em questão foi outro fator que não foi possível determinar por tentativa-erro. A simples comparação da operação do separador com e sem pratos cônicos forneceu resultados inconclusivos, segundo relato de profissionais da fábrica.

Novamente, optou-se pela análise dos resultados de simulação para avaliar se dois era mesmo o número recomendável de pratos cônicos para o separador estudado. As Figuras 20 e 21 indicam que a presença dos pratos cônicos oferece como benefícios: organizar o fluxo em direção à região de sucção do ventilador e atuarem como obstáculos à passagem de partículas grossas, por efeitos inerciais ao promover um redirecionamento brusco do escoamento das mesmas.

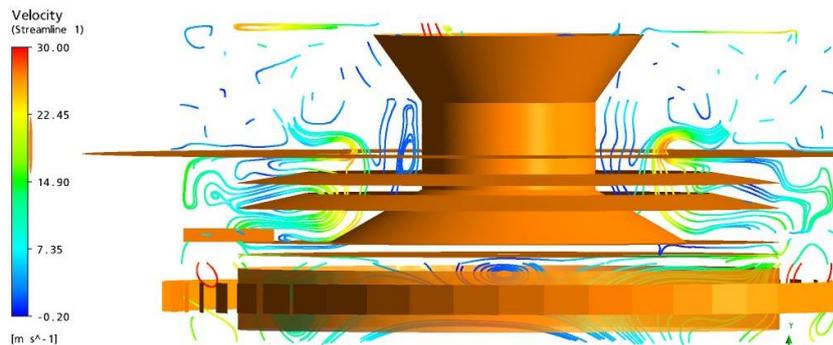


Figura 20 – Linhas de fluxo no plano zona de separação.

As linhas de fluxo da Figura 20 mostram como os pratos cônicos reorganizam e redistribuem o escoamento que seguia em direção a zona de sucção do ventilador. Ao reorganizar o escoamento, os pratos cônicos invertem a direção (vide vetores Figura 21), antes ascendente, de parte do ar de separação. Assim servem de obstáculo à passagem de partículas grossas que têm seu percurso alterado seja pelo choque contra os pratos cônicos, seja pela mudança abrupta na direção da velocidade do fluido que as arrasta.

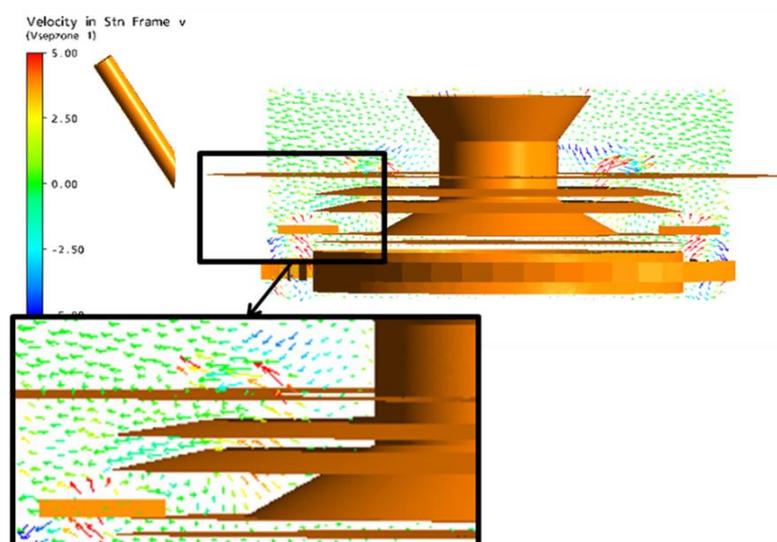


Figura 21 – Componente vertical da velocidade no plano zona de separação.

Dada a falta de espaço físico no interior do equipamento e as limitações do ventilador quanto à perda de carga, optou-se por não aumentar o número de pratos cônicos. Apesar dos benefícios que os mesmos proporcionam conforme discutido anteriormente.

#### 7.1.4 Os Whizzers

A Figura 22 ilustra em detalhe o efeito esperado dos *whizzers* na região da parede da câmara de separação, segundo literatura. Considerados como um obstáculo no caminho das partículas, o aumento do número de *whizzers* é recomendado para obtenção de um produto final mais fino.

É importante ressaltar que, embora a literatura exclua separadores tipo CV ao recomendar o aumento do número de *whizzers*, a exemplo da Figura 22, diversos testes foram conduzidos no sentido de aumentar o número e o comprimento dos *whizzers*. Apesar de não se atingir resultados satisfatórios com tais testes, insistiu-se na ideia por muito tempo por acreditar que o número ótimo de *whizzers* ainda não tinha sido alcançado, e, por isso os resultados esperados não apareciam. O fato é que a potência requerida pelo motor era limitante para o aumento do número de *whizzers* e, após constantes paradas do equipamento por desarme, os *whizzers* adicionais eram retirados antes que se pudessem ter resultados conclusivos.

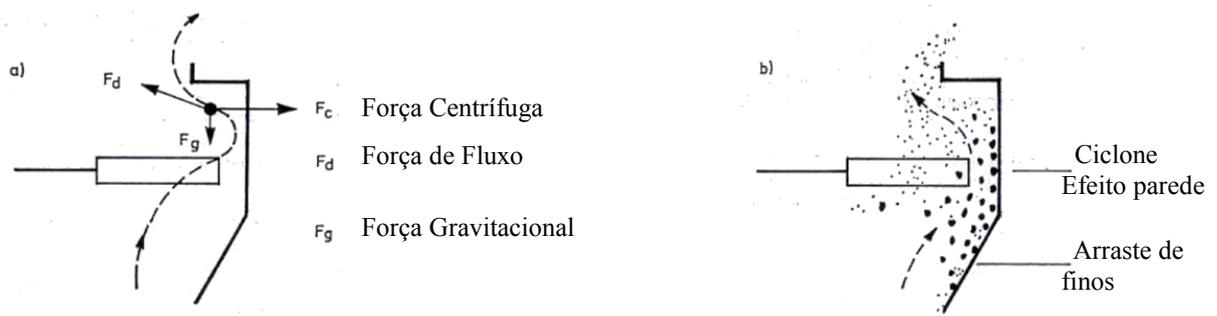


Figura 22 – *Whizzers* como obstáculo a passagem de partículas. (Fonte: Duda, 1985)

Se voltarmos nossa atenção para valores da componente vertical da velocidade no plano zona de separação (Figura 23) observa-se um aspecto interessante: nas proximidades da parede da câmara interna, os *whizzers* promovem uma velocidade descendente no sentido da câmara de grossos e, logo, o efeito de parede pode ser mesmo observado; entretanto, em compensação, na região do prato distribuidor destacam-se os valores de velocidades ascendentes.

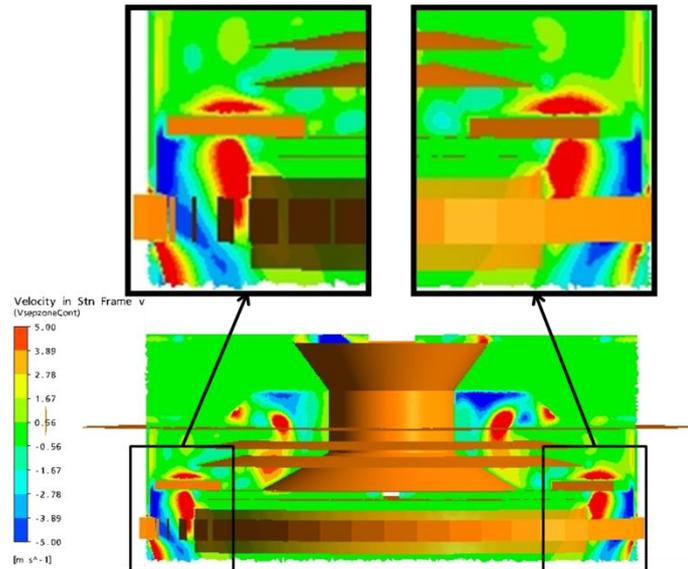


Figura 23 – Módulo da componente vertical da velocidade no plano zona de separação.

Um dos resultados mais reveladores da simulação, e o que efetivamente contribuiu para a solução do problema, foi mostrar que, na realidade, os *whizzers* não estavam atuando como obstáculo para partículas grossas.

A Figura 24 mostra o módulo da velocidade no plano “zona de separação”, dando-se ênfase a região dos *whizzers*. Observa-se que essa é uma das regiões em que se encontram os valores mais altos da velocidade do ar. De acordo com o balanço de forças apresentado na Figura 22, maiores velocidades nessa região tendem a ocasionar a predominância da força de fluxo sobre as demais, fazendo com que as partículas sejam arrastadas para câmara de finos.

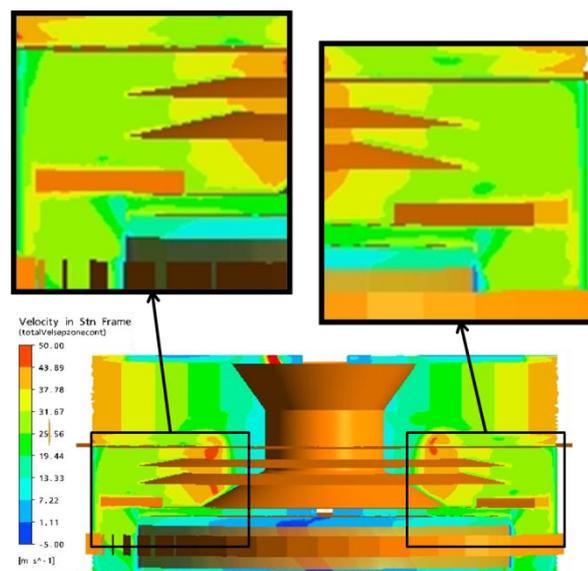


Figura 24 – Módulo da velocidade no plano zona de separação.

Analisando, na Figura 25, os valores de velocidade no plano imediatamente acima dos *whizzers* (plano XZ,  $y = -1.4\text{m}$ ) verifica-se que a velocidade resultante é ascendente na região próxima a saída do prato (a) e possui valores de aproximadamente 30 m/s (b).

Foram esses resultados de simulação que possibilitaram uma nova forma de enxergar os efeitos dos *whizzers*: ao invés de atuar como obstáculo para passagem de partículas, os mesmos promoviam a ascensão das partículas, em direção a câmara externa, tão logo elas deixavam o prato distribuidor. Ao arrastar as partículas ascendentemente na direção vertical, os *whizzers* anulavam os efeitos das forças centrífugas (que fariam as partículas se chocarem contra a parede da câmara interna) e das forças gravitacionais (que fariam as partículas se moverem na direção vertical descendente).

Iniciou-se, a partir disso, uma comparação entre o separador estudado e outros separadores, nos quais os *whizzers* tinham um efeito comprovadamente benéfico. Duas constatações interessantes surgiram dessas comparações: 1) nos outros separadores os *whizzers* não se encontravam presos ao prato distribuidor, mas, geralmente a certa altura desses; e 2) foi encontrado um separador chamado CV FR (*First Review*), que entrou em operação 10 anos após o *start-up* do separador CV modelo 66 estudado, e o mesmo não possuía *whizzers*.

Prosseguiu-se com a retirada dos *whizzers* e das cantoneiras, que serviam apenas de suporte para fixação dos *whizzers*.

---

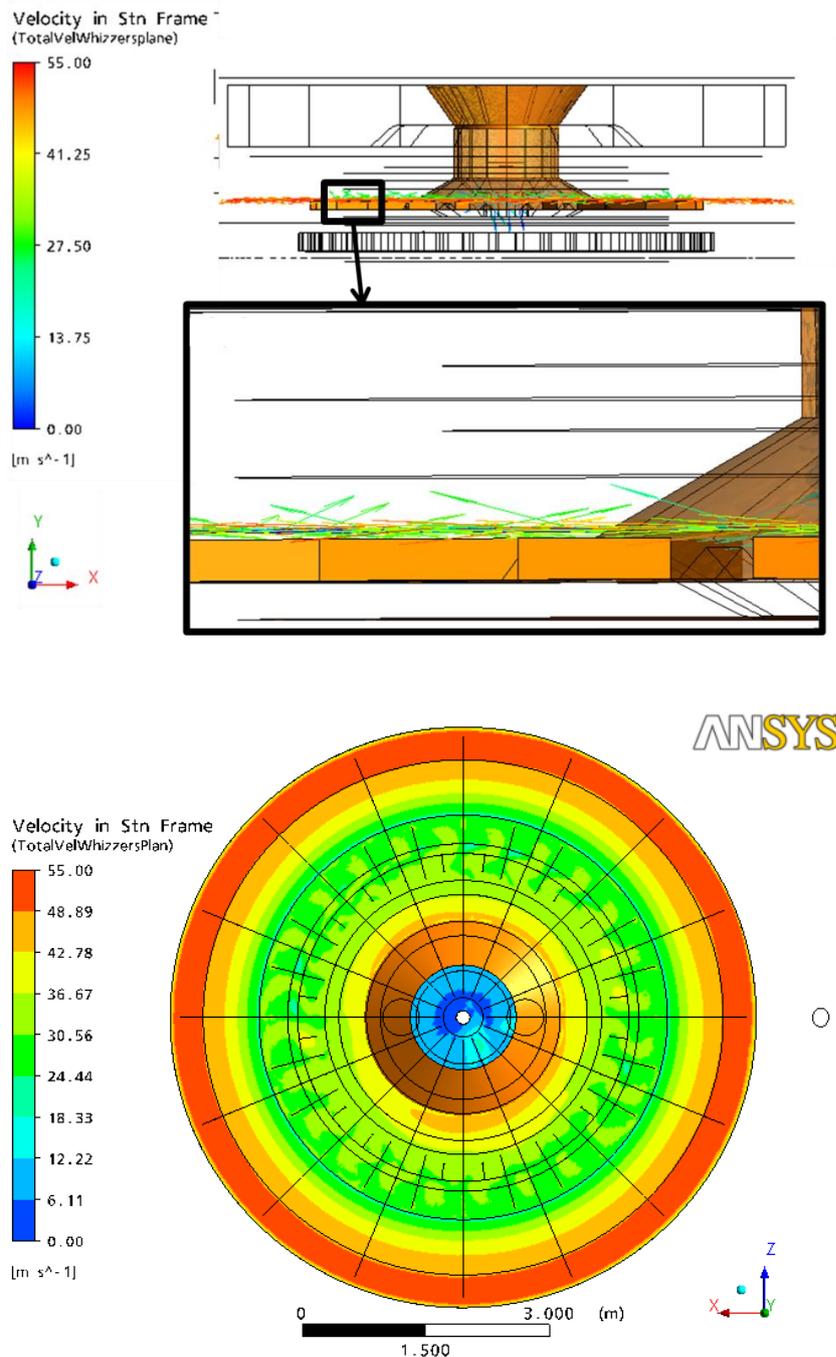


Figura 25 – Velocidade Resultante no plano XZ,  $y=-1.4\text{m}$ : (a) vetores vista Z+ e (b) módulo vista Y+.

Conforme demonstrado na Figura 26, a retirada dos *whizzers* provocou uma ligeira melhora na eficiência do separador ocasionando a redução de 20% de *by-pass*. Essa redução do *by-pass* permite uma redução de R\$ 0.30/tonelada produzida em função da redução do consumo elétrico específico. Ainda assim, o *by-pass* de 30% encontra-se no limite superior aceitável para um separador de primeira geração.

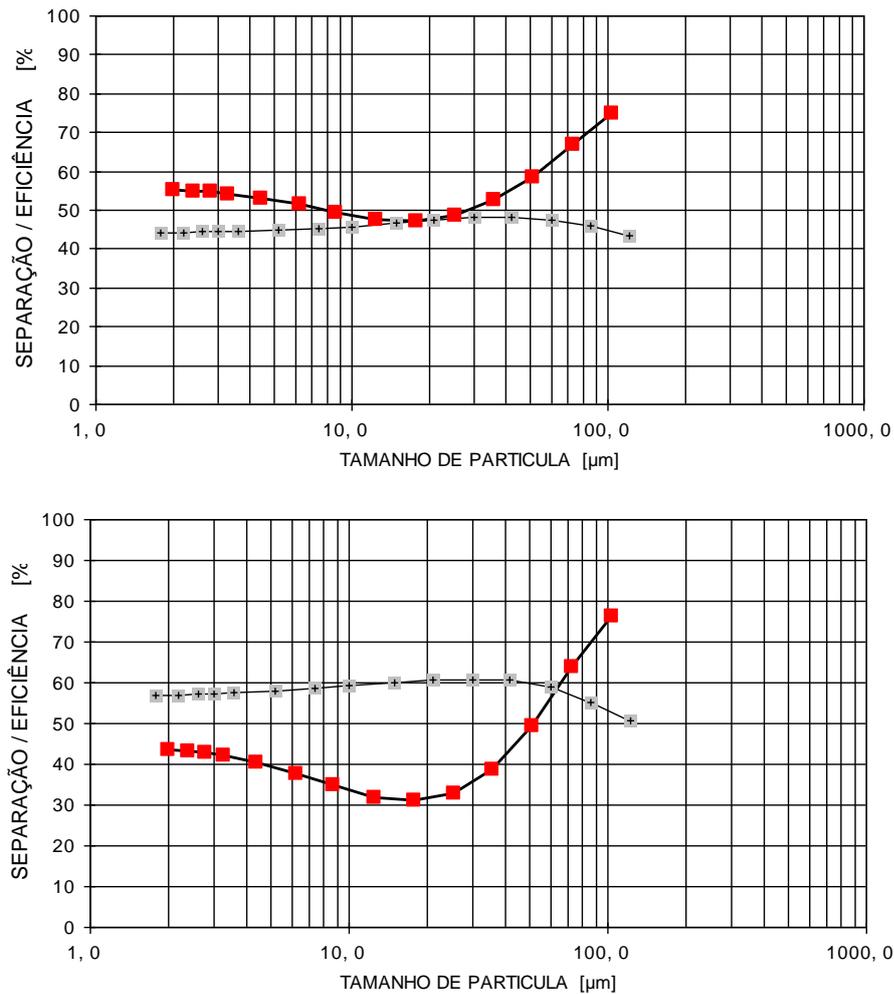


Figura 26 – Resultados de curva Tromp (a) antes e (b) após a retirada dos *whizzers*.

Por análise visual da curva Tromp, observa-se que em (b) há um aumento da inclinação em relação a (a), o que indica um aumento suave na seletividade do separador. Isso confirma que o efeito de parede causado pelos *whizzers* não predominava sobre o efeito de arraste das velocidades ascendentes nas proximidades do prato distribuidor.

Contudo, o resultado mais relevante foi a estabilização operacional do circuito possibilitando redução no desvio padrão do retido em 90µm com consequentes ganhos de reatividade do clínquer. Desta forma, uma inversão de mais de USD\$ 1.000.000 na troca do separador de primeira geração por um de geração superior foi evitada.

---

## 8 CONCLUSÕES

O grande desafio da simulação numérica de separadores dinâmicos concentra-se na complexidade de sua geometria, por possuir várias partes móveis, e na ausência de dados experimentais, principalmente relativos ao escoamento interno. Devido a tal complexidade da geometria estrutural, significativo esforço computacional é requerido desde a geração da malha até o pós-processamento dos resultados, principalmente dado à quantidade de elementos envolvidos.

Quanto ao escoamento, conclui-se que uma análise preliminar, com modelagem monofásica, se faz necessária antes da inclusão de partículas sólidas no domínio de cálculo. Dos resultados de simulação monofásica, apresentados no capítulo 7, denota-se que os objetivos do presente trabalho foram alcançados em sua plenitude.

A utilização de CFD elucidou questões sobre o comportamento fluidodinâmico interno do separador, desvendando os efeitos de seus componentes internos:

- ventilador: exerce a função de succionar o ar da câmara interna para câmara externa e encontra-se subdimensionado para as vazões de sólidos alimentadas ao separador;
- gelosias: controlam a quantidade de ar que entra na câmara interna e conseqüentemente a vazão de sólidos que retorna ao moinho;
- pratos cônicos: organizam o fluxo em direção à região de sucção do ventilador e atuam como obstáculos à passagem de partículas grossas;
- *whizzers*: quando instalados nas extremidades do prato distribuidor, causam arraste de partículas para a câmara externa, assim que as mesmas deixam o prato, diminuindo a eficiência de separação.

A simulação numérica do escoamento interno do separador indicou que retirada dos *whizzers* como uma proposta alteração geométrica, de baixo custo, proporcionaria ganhos de eficiência de separação das frações de sólidos. Uma vez implementada experimentalmente a retirada dos *whizzers*, as metas de redução do consumo elétrico específico e melhor controle da granulometria do produto foram atingidas. Entretanto a seletividade e o by pass do separador podem ainda ser otimizados.

O presente trabalho, em vista do exposto, demonstra a aplicabilidade do uso de CFD no estudo e otimização de funcionamento de um separador dinâmico de primeira geração.

---

Aliado à comparações experimentais e melhorias nos parâmetros de entrada, pode-se aproximar ainda mais os resultados de simulação às condições reais de operação.

---

## 9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho constitui um exemplo de aplicação de CFD na resolução de problemas da indústria de cimento. Embora seja crescente a utilização da mecânica dos fluidos computacional para esse tipo de aplicação, muita coisa ainda pode ser estudada e implementada.

No que concerne aos separadores dinâmicos, o foco dessa utilização tem sido dado ao projeto de novos equipamentos. Considerando o alto investimento para substituição de um separador por outro de geração superior, é extremamente recomendável que se analisem as possibilidades de uma otimização do equipamento existente na fábrica antes de efetivamente substituí-lo.

Para otimização de separadores de primeira geração, tipo CV, recomenda-se que em trabalhos futuros:

- em simulações monofásicas, sejam avaliados os efeitos de alteração de parâmetros como incremento da rotação do ventilador, ou geométricos como reposicionamento dos whizzers e inserção de outros componentes internos que possam atuar como obstáculo a passagem de partículas para câmara externa;
  - prosseguir com simulações em regime multifásico buscando confirmar as trajetórias esperadas para as partículas, avaliar tempo de residência, distâncias percorridas, identificar caminhos preferenciais e trajetórias não usuais;
  - investigar o efeito do ângulo de abertura das gelosias nas trajetórias das partículas de forma a compreender como esse fator influencia a vazão de sólidos que retorna ao moinho. Utilizar esse resultado para melhorar o tempo de resposta dos sistemas de controle automático das gelosias em função da taxa de produção do moinho;
  - utilizar a simetria do escoamento para simplificar a geometria, reduzindo o esforço computacional pela redução da malha e possibilitando a inclusão de maior número de trajetórias representativas na simulação multifásica.
-

---

## REFERÊNCIAS

U. S. Geological Survey, 2008, **Mineral commodity summaries 2008: U.S. Geological Survey**, 195 p.

AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUKIE, P.T. **Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling**. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. – New York, New York 1984.

ARAUJO, A.C. **Desafios do Processamento Mineral no Século XXI**. Seminários Pós-Graduação em Engenharia Química. Escola de Engenharia. Maio, 2007. Belo Horizonte.

MASTORAKOS E., MASSIAS A., TSAKIROGLOU C.D., GOUSSIS D.A., BURGANOS V.N., PAYATAKES A.C. **CFD predictions for cement kilns including Flame modelling, heat transfer and clinker chemistry**. Applied Mathematical Modelling 23 (1999) 55±76

CHATTERJEE, A. K. **Materials Preparation and Raw Milling**. Innovation in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association. Canadá, 2004.

JINYU JIAO A, YING ZHENG A, GUOGANG SUNB, JUN WANG. **Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone**. Separation and Purification Technology 49 (2006) 157–166

JOHANSEN, S. T.; DE SILVA, S.R. **Some considerations regarding optimum flow fields for centrifugal air classification**. Int. J. Miner. Process. 44-45 (1996) 703-721

DECASPER, J. **Ingeniería de Molturación**. Manual de molinos para la industria de cemento. 2005.

ANSYS, **Training Manual**. Curso introdução ao pacote ANSYS Workbench. ESSS, São Paulo, 2006.

FLSmidth. **Manual de Operação Separador CV, modelo 66**. 1972

---

DUDA, WALTER H. **International Process Engineering in the Cement Industry**. Vol.1.3<sup>a</sup> ed. French & European Pubns,1985

FOX, R.; MCDONALD, A. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro:LTC, 2001. 504 p.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2<sup>a</sup> ed.,Rio de Janeiro: LTC, 2004. 453 p.

MALALASEKERA,W.; VERSTEEG, H.K. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Wiley, 1995. 257 p.

FERZIGER, JOEL H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3<sup>a</sup> ed., Springer, 2002. 364 p.

---