

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado
Profissional**

Dissertação de Mestrado

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE ESPESSAMENTO EM PASTA
EM UM DEEP CONE**

Autor: Douglas Soares Moreira.

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão.

Belo Horizonte
2023

Douglas Soares Moreira

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE ESPESSAMENTO EM PASTA
EM UM DEEP CONE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão.

Belo Horizonte
2023

Moreira, Douglas Soares.

M838s

Simulação e otimização do circuito de espessamento em pasta em um Deep Cone [recurso eletrônico] / Douglas Soares Moreira. - 2023.

1 recurso online (111 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: George Eduardo Sales Valadão.

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

Bibliografia: f. 106-111.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Viscosidade - Teses. 4. Viscosidade - Fluidos - Teses. 5. Fluidos -
Teses. 6. Sedimentação (Geologia) - Teses. 7. Manganês - Teses.
8. Mineração - Teses. I. Valadão, George Eduardo Sales.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 622(043)



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO DOUGLAS SOARES MOREIRA

Realizou-se, no dia 14 de julho de 2023, às 10:00 horas, Google Meet, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Simulação e Otimização do Circuito de Espessamento em Pasta em um Deep Cone*, apresentada por DOUGLAS SOARES MOREIRA, número de registro 2021661428, graduado no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). George Eduardo Sales Valadão - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Galéry (UFMG), Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 14 de julho de 2023.

Documento assinado digitalmente
gov.br GEORGE EDUARDO SALES VALADÃO
Data: 18/07/2023 10:21:44-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof(a). George Eduardo Sales Valadão (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br ROBERTO GALÉRY
Data: 18/07/2023 08:45:52-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof(a). Roberto Galéry (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 18/07/2023 06:07:30-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)

A meus pais e familiares por toda a compreensão durante o tempo necessário e dedicado para elaboração deste trabalho. Aos meus pais pelo exemplo de vida e incentivo no percurso profissional e acadêmico.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me auxiliar durante toda a jornada enfrentando desafios e nunca desistindo do meu foco. Agradeço a meus pais por sempre me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos com determinação e nunca desistir facilmente daquilo que almejo. Aos amigos realizados durante toda a minha trajetória e por entenderem cada momento distinto que eu me deparava. Ao meu orientador pela sabedoria e orientação de qual caminho traçar para alcançar meu objetivo. Aos amigos criados durante a bolsa de pesquisa no ITV pelo apoio em cada dia corrido e cada tarefa a ser entregue. Ao ITV e ao Professor PhD. Vidal Torres, pela oportunidade de integrar a equipe de pesquisa, desenvolvendo projeto na grande área (Mine to Crusher). Principalmente as pessoas que me apoiaram diretamente no projeto do ITV, PhD Janine Figueiredo e Dr. Suelen Rocha. A todos que me incentivaram de alguma forma durante o desenvolvimento e finalização do meu mestrado.

Resumo

O desenvolvimento desta dissertação visou analisar a simulação e otimização de um espessador do tipo Deep Cone com o intuito de obter ao final uma análise apreciativa do equipamento de produção de pasta mineral, trabalhando diretamente com o rejeito de minério de manganês. Através desta abordagem, foi possível averiguar por meio de dados suficientes para realização deste trabalho, os resultados operacionais a partir de duas modelagens distintas, sendo estas executadas para o VOF (volume de fluido) para simulação e o modelo Euleriano para a otimização do sistema de fluido. A princípio, foram considerados principalmente como dados de entrada, a concentração de sólidos do meio, bem como as propriedades características do sistema, obtendo de forma analítica resultados de simulação e otimização para a pressão, velocidade de sedimentação, viscosidade e energia, observando nestes o comportamento do fluido em cada etapa do sistema operacional. Para tanto, foram consideradas as etapas trabalhadas no sistema como inicial, trabalhando com a polpa, a etapa final trabalhando com a pasta e uma etapa intermediária lidando com a mistura entre os fluxos no sistema, verificando deste modo, a transformação de um fluido em outro conforme condições do sistema. Ao final da avaliação, observa-se uma melhora significativa dos resultados através de técnicas de tentativa e erro através obtendo os melhores resultados para a porcentagem de sólidos e viscosidade trabalhadas em questão, demonstrando de forma mais coesa as diretrizes a serem tomadas para as condições ótimas para os regimes de fluxos, para a distribuição de energia, e para a quantidade de parâmetros necessários nesta análise. Através destes resultados, verifica-se que um aumento significativo da viscosidade de 0.83 para 0.93, apresenta dentro dos parâmetros do Deep Cone, uma redução significativa da necessidade de iterações entre os grãos do meio, passando de 200 para 50, o número de iterações, verificando graficamente também, uma melhor disposição dos fluxos de fluidos dentro do equipamento. É válida a ressalva de que para a execução deste trabalho, apesar de serem avaliados poucos parâmetros, é perceptível a complexidade da série de ferramentas para que a análise seja possibilitada, avaliando os padrões necessários.

Palavras-Chave: Fluido, Pasta, Polpa, Sedimentação, Viscosidade.

Abstract

The development of this dissertation aimed to analyze the simulation and optimization of a Deep Cone thickener in order to obtain, at the end, an appreciative analysis of the mineral paste production equipment, working directly with the manganese ore waste. Through this approach, it was possible to verify, through sufficient data to carry out this work, the operational results from two different models, which were executed for the VOF (fluid volume) for simulation and the Eulerian model for the optimization of the fluid. At first, the concentration of solids in the medium, as well as the characteristic properties of the system, were considered mainly as input data, analytically obtaining simulation and optimization results for pressure, sedimentation velocity, viscosity and energy, observing in these the behavior of the fluid at each stage of the operating system. For that, the stages worked in the system were considered as initial, working with the pulp, the final stage working with the paste and an intermediate stage dealing with the mixture between the flows in the system, verifying in this way, the transformation of one fluid into another according to system conditions. At the end of the evaluation, a significant improvement in the results is observed through trial and error techniques through obtaining the best results for the percentage of solids and viscosity worked in question, demonstrating in a more cohesive way the guidelines to be taken for the optimal conditions for the flow regimes, for the energy distribution, and for the number of parameters needed in this analysis. Through these results, it appears that a significant increase in viscosity from 0.83 to 0.93, within the parameters of the Deep Cone, presents a significant reduction in the need for iterations between the grains in the middle, changing from 200 to 50, the number of iterations, also verifying graphically, a better disposition of the flows of fluids inside the equipment. It is worth mentioning that for the execution of this work, although few parameters are evaluated, the complexity of the series of tools is perceptible so that the analysis is possible, evaluating the necessary standards.

Keywords: Fluid, Paste, Pulp, Sedimentation, Viscosity.

Lista de Figuras

Figura 1: Custo da operação unitária para desaguamento em função do tamanho das partículas presentes na polpa (Adaptado de Metso Minerals, 2010).	18
Figura 2: Variação do torque em detrimento das medidas de segurança na operação de espessadores (Chaves apud Metso Minerals, 2004).	26
Figura 3: Gráfico de fluxo de pasta mineral em virtude do equipamento a ser utilizado para o adensamento.	28
Figura 4: Descarga em um deep cone à esquerda da pasta mineral e à direita através da disposição superficial (Vietti e Dunn, 2002).	37
Figura 5: Imagem com destaque nas etapas decorridas de um teste de proveta com seu correspondente gráfico destacando a velocidade de sedimentação em detrimento do tempo (Luz, A. B.; 2010).	38
Figura 6: Perfil e zonas de espessamento encontradas no espessador, sendo visível em três dimensões e graficamente (Olcay, 2012).	40
Figura 7: Curva de sedimentação típica (Guimarães, 2010).	40
Figura 8: Representação esquemática do teste de abatimento de cone (Clayton; 2003).	42
Figura 9: representação esquemática do teste de calha com indicação do ângulo de contato (Osório, 2005).	44
Figura 10: Consistência da mistura para a disposição de rejeitos correspondentes (Osório, 2005).	45
Figura 11: Sistema de produção de pasta (espessamento, bombeamento e descarga) para disposição superficial (Baker e Hughes, 2001).	47
Figura 12: O conceito de co-disposição da pasta e rejeito grosso (Vietti e Dunn, 2002).	48
Figura 13: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terrenos (Hernandez et al., 2005).	50
Figura 14: Modelo de simulação para a tomada de decisão (Ceciliano apud Andrade, 2012).	52
Figura 15: Modelagem do processo a partir da otimização (Ceciliano apud Andrade, 2012).	53
Figura 16: Representação esquemática das variáveis abordadas em uma simulação(Vashi & Bienstock, 1995).	54
Figura 17: Modelo de Simulação-Otimização proposto por Ceciliano (2007).	55
Figura 18: Visão geral das resoluções baseadas na densidade	67
Figura 19: Fluxograma de Resumo das atividades executadas no software,	76
Figura 20: Estrutura do modelo gerado da geometria do Espessador tipo Deep Cone.	78
Figura 21: Geometria do Espessador tipo Deep Cone Criado no AnsysFluent.	79
Figura 22: Visualização frontal de acordo com as direções XY para o espessador, através do Slice.	80
Figura 23: Parâmetros definidos para a geração da malha.	81
Figura 24: Malha gerada após análise dos parâmetros dentro da pasta Mesh.	82
Figura 25: Parâmetros iniciais ao realizar a solução da simulação pelo modelamento.	83
Figura 26: Modelos a serem trabalhados conforme metodologia abordada.	85
Figura 27: Plataforma para definição da agregação de partículas pelo PBM.	86
Figura 28: Definição das forças atuantes entre as fases do espessador, levando em conta sua estrutura.	87
Figura 29: Definição das fases onde o PBM deve ser aplicado. De onde, para onde.	87
Figura 30: Métodos a serem aplicados na simulação.	89
Figura 31: Inicialização da simulação com alteração da temperatura padrão de 300k para a conformidade laboratorial.	90

Figura 32: Seleção do cálculo de Steps conforme as atividades e animações a serem analisadas.	91
Figura 33: Parâmetros lidos nos resultados conforme a geração de tempo.	91
Figura 34: Gráficos de iterações por parâmetro avaliado no volume de Fluídos onde A) Análise Final, B) Análise até constância dos resultados.	93
Figura 35: Gráfico de Magnitude da velocidade.	94
Figura 36: Histograma de magnitude de velocidade.	95
Figura 37: Gráfico da pressão estática para a mistura.	96
Figura 38: Gráfico da Viscosidade na presença de turbulência.	97
Figura 39: Gráfico da Viscosidade na presença de turbulência, comportamento fluido.	97
Figura 40: Gráficos de iterações por parâmetro avaliado no volume de Fluídos onde A) Análise Final, B) Análise até constância dos resultados.	98
Figura 41: Gráfico da Viscosidade na presença de turbulência.	99
Figura 42: Histograma do Efeito da Viscosidade.	100
Figura 43: Gráfico da velocidade de sedimentação com relação a gravidade no eixo Y.	101
Figura 44: Gráfico da pressão estática em função da mistura.	101

Lista de Tabelas

Tabela 1: Testes necessários à caracterização de um material visando o preenchimento com pasta. (Adaptado de Brackebusch, 2000).	36
Tabela 2: Parâmetros ótimos obtidos através da dissertação desenvolvida por Olcay (2008).	74
Tabela 3: Dados obtidos através de manuais de espessadores tipo Deep Cone, e calculados conforme a metodologia de Coe Clevenger.	74

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Separação sólido-líquido.....	16
3.2. Espessamento.....	21
3.3. Fatores que Afetam o Espessamento	20
3.3.1. Tamanho e Forma da Partícula.....	22
3.3.2.Sedimentação em Meio Fluído.....	24
3.4. Pasta mineral.....	23
3.5. Agregação de partículas.....	29
3.5.1. Floculação	29
3.5.2. Coagulação	31
3.6. Reologia.....	31
3.7. Espessador de pasta	34
3.8. Técnicas de análise	36
3.8.1. Teste de proveta	37
3.8.2. Teste de abatimento (slump)	41
3.8.3. Teste de calha (flume).....	43
3.9. Disposição de rejeitos	46
3.9.1. Disposição de rejeito em lavra à céu aberto.....	48
3.9.2 Disposição de rejeitos em lavra subterrânea.....	50
3.10. Modelagem	52
3.10.1. Equações de massa e momento (euleriano-euleriano “k-e”).....	56
3.10.2. Balanço populacional (PB).....	56
3.10.3. Dinâmica de fluídos (CFD).....	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
6. CONCLUSÕES	102
7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	103
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	105

1. INTRODUÇÃO

Em 2014, a mineração foi um dos setores econômicos que mais se desenvolveram influenciando com intensidade o surgimento de novos avanços tecnológicos, através de uma boa viabilidade diante das abordagens ambientais e produtivas. Conforme IBRAM (2019), as influências dos avanços tecnológicos tendem a cada ano abordar novas perspectivas de mercado, principalmente ao equilibrar a minimização dos impactos ambientais e dos custos operacionais. Tais eventos incentivaram empresas, através do fenômeno conhecido como indústria 4.0 por meio da mitigação de barragens e futuramente – se possível – o reaproveitamento do material considerado rejeito.

Ao observar o comportamento da mineração na sociedade através de parâmetros estatísticos, torna-se possível mensurar a representação dos eventos de extração mineral em função do PIB (produto interno bruto), conforme grande diversidade bibliográfica. Um exemplo categórico e representativo dos valores estatísticos, é encontrado em IBRAM (2019), o qual através da apuração dos dados econômicos nacionais, demonstra que a taxa do PIB em função da mineração corresponde a 5%, correspondente monetariamente ao valor de U\$ 40 bilhões. Diante deste valor gerado pela mineração e visando para além disso, otimizar parâmetros e segurança dos projetos a serem dimensionados, torna-se de fato imperativo, o interesse bivalente (público e privado) industrial, em torno do melhor dimensionamento e viabilidade dos processos minerais, por meio de avanços tecnológicos e pesquisas no setor.

A diversidade tecnológica no campo mineral, ao deparar-se através de uma perspectiva da qual necessita-se de um maior desenvolvimento do projeto mineiro, são encontrados em demasia desafios, os quais requerem uma análise mais criteriosa, acerca dos parâmetros mensurados, desenvolvidos e analisados. Estes parâmetros, são conhecidos industrialmente como KPI's (Key Performance Indicator), ou ainda, chaves indicativas de performance do desenvolvimento do projeto. Estes KPI's, por muitas vezes, ao serem desenvolvidos, procuram otimizar e viabilizar todo um processo em condições que gerem baixos custos aos procedimentos, além de avanços tecnológicos ao sanar alguma dificuldade padrão. Além disso, como toda a operação de mineração se enquadra em um grande dinamismo operacional é esperado que haja a cada avanço implementado maior segurança e soluções criativas e praticáveis.

Um meio de avaliação destes parâmetros, podem ser averiguadas em metodologias distintas conhecidas como Mine to Crusher ou ainda Mine to Mill, metodologias das quais podem ser aplicadas no desenvolvimento de todo o setor mineral. Além de metodologias como as citadas para adequação e aprimoramento dos projetos, têm-se encontrado no Brasil o aumento do interesse em perspectivas dos fatores de segurança na indústria mineral. Este interesse em segurança, têm apresentado significância cada vez maior principalmente após o surgimento de acidentes de grande repercussão midiática, como o rompimento de barragens nos últimos anos.

Com base nesta grande repercussão negativa, os critérios de segurança, tem se tornado cada vez mais exigentes, buscando limitar ou extinguir possíveis danos através de organizações governamentais, das quais pretendem inserir ao início dos projetos desenvolvidos, a segurança dos trabalhadores e recuperação de áreas degradadas. Para tanto, o principal método para melhorar a fiscalização de projetos minerais, encontram-se na apuração do projeto, diante do seguimento das leis criadas e um sistema de regras mais rigorosas da própria empresa (Amorim, 2007).

Um dos grandes desafios encontrados na mineração é inerente ao descarte habilidoso do rejeito mineral, sendo por anos desenvolvidos uma diversidade de técnicas para que o problema ocasional seja sanado. Atualmente, o “rejeito mineral” apresenta inúmeras formas de descarte, no entanto tem surgido cada vez mais pesquisas com foco no seu reaproveitamento. Além disso, tais formas de reaproveitamento, muitas vezes encontram barreiras quanto ao custo de produção, processamento e transporte do mesmo. Por meio disto, técnicas paliativas são criadas, enquanto novas técnicas de reaproveitamento não podem ser consideradas para aplicação.

Ao abordar pesquisas paliativas para adoção e destinação adequada do rejeito mineral, os principais estudos encontrados buscam de forma demasiada minimizar os custos dos procedimentos, adotando principalmente substituição de reagentes afim de se minimizar os custos provenientes do processo. Um exemplo de aplicação é encontrado na construção civil através da aplicação do rejeito de minério de ferro, para a produção de tijolos ecológicos. No entanto, este método ainda não apresenta valores consistentes para aplicação, sendo que o maior ponto a ser ultrapassado é a barreira econômica, visando deste modo uma comercialização mais lucrativa para o material gerado. Outras metodologias alternativas para a disposição de rejeitos,

buscando uma maior segurança no processamento do minério e do estéril, tem sido desenvolvido considerando materiais de baixa umidade ou ainda em pasta mineral.

A Austrália é conhecida como um dos países polos da mineração, apresentando grandes desenvolvimentos de pesquisas, para remanejamento do material não utilizado, após o processamento. Através de pesquisas desenvolvidas naquele país, acredita-se que para que a aplicação das técnicas de pasta ocorra com eficiência, faz-se necessário o conhecimento acerca dos parâmetros de produção possibilitando uma maior aderência na produtividade em projeção.

O atual estudo busca simular e otimizar os espessadores do tipo Deep Cone, como fator preponderante para a criação de pastas minerais. Apesar de tal recurso não ser amplamente utilizado no Brasil – principalmente por fatores climáticos e de custos operacionais – existe na atualidade o desenvolvimento de pesquisas acerca desta demanda, principalmente na Austrália. Ao decorrer dos últimos anos, técnicas foram desenvolvidas buscando sanar um grande desafio, perceptível através desta metodologia. Uma válida observação encontra-se, por exemplo, no dimensionamento do espessador, pois ao tratar de espessadores do tipo produtores de pasta mineral, geralmente são utilizados espessadores suspensos, os quais são relativamente caros na implantação.

Ao deparar-se com as técnicas de produção de pasta mineral, uma forma de conduzir a abordagem estudada, é através da utilização de parâmetros operacionais, em técnicas computacionais, buscando um melhor padrão e desenvolvimento para tal sistema. Conforme Vale apud Queiroz (2014), uma forma de trabalhar com dados mais coesos, encontra-se na aplicação de sistemas operacionais através da modelagem matemática, buscando simular e otimizar o modelo a partir de uma situação padrão. Através do modelo torna-se possível retratar a correlação dos dados por um balanço populacional amostral. Uma técnica bastante abordada atualmente em busca de valores mais representativos e assertivos envolvem metodologias de aplicação por meio de inteligência artificial aplicada em técnicas de “Machine Learning”, apresentando maior controle das variáveis globais e de produtividade.

Para que as técnicas computacionais sejam efetivas, deve-se primeiramente realizar o tratamento dos dados, buscando extinguir a possibilidade de erros representando um procedimento mais realista. Sendo possível assim contribuir diretamente através de expertises de simulação e otimização no processo com possibilidade de maiores investigações da disposição dos rejeitos. Para tanto, o equipamento simulado e otimizado é o Deep Cone, com

aplicação de valores ótimos encontrados na literatura como em Olcay (2012). Para que a contribuição com o setor mineral apresente uma boa arguição, nesta dissertação será encontrada uma base bibliográfica abordando o desenvolvimento da pesquisa através de estudos mais recentes e análises do rejeito do minério de manganês.

Além disso, através da especificação de um modelo ótimo, torna-se possível durante um processo controlar os parâmetros desejados como a porcentagem de sólidos, a densidade ótima para criação da pasta e a necessidade de flocculantes visando uma agregação da polpa ideal para possibilidade de surgimento da pasta mineral. Após a simulação de um modelo ótimo é possível obter uma otimização do mesmo, buscando um modelo mais padronizado, adotando as medidas e vertentes necessárias.

É válida a observação de que a aplicação da pasta mineral em um empreendimento mineiro, minimiza custos de projeto principalmente ao reutilizar a água presente na polpa, proveniente de outras fases da usina. Sendo assim, torna-se evidente a importância de um estudo mais aprofundado perante um sistema de separação sólido-líquido. Além disso, durante a pesquisa bibliográfica desenvolvida pela abordagem dos rejeitos minerais, em grande parte, foram encontradas técnicas de aplicação no Brasil para os métodos de lavra do tipo subterrânea, mais especificadamente pelo método de “backfill”. Esta técnica, é utilizada principalmente para o preenchimento, onde os custos para este tipo de lavra, são mais baixos, em comparação a outros métodos de lavra subterrânea.

2. OBJETIVO

O objetivo dessa dissertação encontra-se em otimizar e simular o espessamento de pasta através de testes de simulação e das variáveis operacionais ótimas, reproduzidas pelo software AnsysFluent. Diante de tal software, os modelos utilizados são enquadrados principalmente no método de Euler, aplicando nesta metodologia o modelo de balanço populacional (PB), buscando a floculação e agregação das partículas, aliado ao modelo da dinâmica computacional do fluido (CFD). A pesquisa relacionada buscará principalmente a análise do transporte e da deposição do rejeito espessado em pasta apresentando uma alta porcentagem de sólidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Separação sólido-líquido

O cenário criado a partir da necessidade de obtenção de material com menor percentual de impurezas tem se tornado cada vez mais frequente, sendo considerado um fator preponderante o desenvolvimento de pesquisas operacionais, buscando viabilizar os projetos mineiros através de avanços tecnológicos. As tecnologias criadas em perspectiva da otimização e qualidade da extração do material produzem resultados de forma majoritariamente positivos, por meio da qualidade do material, através de técnicas como a cominuição, a concentração e a separação sólido-líquido. Dentre as operações mais utilizadas na usina de beneficiamento as operações de separação sólido-líquido, tem apresentado grande repercussão na indústria mineral. Esta repercussão é enquadrada principalmente, tendo em vista, a recuperação de água no sistema de beneficiamento, bem como a disposição de rejeitos.

É válido ressaltar que, dentre as atividades de separação sólido-líquido, o espessador é um equipamento muito utilizado, no setor, sendo possível através deste tanto a recuperação de água, quanto a preparação dos rejeitos e concentrados para as etapas subsequentes.

O aumento contínuo da complexidade de separação entre o mineral e suas impurezas agregadas, até mesmo na formatação e remanejo do rejeito mineral, tem gerado grandes investimentos de capitais mediante o surgimento de novos equipamentos. Estes equipamentos desenvolvidos são considerados através dos avanços realizados, mais ágeis e performáticos, principalmente ao considerar fatores preponderantes como a granulometria e a quantidade de partículas mistas existentes. Diante disso, segundo LUZ et al. (2010), torna-se útil a avaliação das necessidades específicas do processo e as características de uma alimentação bem estruturada em conformidade com os KPI's para uma melhor manutenção do sistema. Fato este explicado, através do desenvolvimento de parâmetros ótimos, visando melhor funcionamento do equipamento, bem como, aplicando as melhores propriedades para que se tenha resultados otimizados em perspectiva dos custos e produtividade do sistema.

De acordo com Silverblatt & Easton (2002), para que a operação sólido-líquido seja aderente ao mecanismo desenvolvido, torna-se necessário previamente a análise das

características da polpa e da concentração de sólidos a serem transformadas em pasta. Através de uma minuciosa observação, é determinado que polpas mais diluídas requerem mais etapas de processamento mineral. No entanto, ao apresentar uma maior concentração de sólidos, principalmente com granulometrias maiores, a necessidade de várias etapas torna-se menor, realizando deste modo uma operação de mais baixo custo. Apesar disto, muitos rejeitos encontrados, encontram como obstáculo a granulometria, necessitando de técnicas cada vez mais avançadas para operacionalizar de forma eficaz a formação da pasta. Uma etapa importante neste quesito é a agregação do material (coagulação e/ou floculação) facilitando assim a sedimentação e formação da pasta.

Para garantir a eficácia operacional, certas demandas devem ser supridas com resultados coerentes a serem apresentados através dos objetivos da separação e seus efeitos na eficiência do processo; como o tipo da operação (contínua ou batelada); a vazão da alimentação, da concentração de sólidos, da distribuição granulométrica e densidade dos sólidos e a necessidade de um pré-tratamento da polpa (coagulação/floculação).

Além dos parâmetros operacionais do beneficiamento, há também a necessidade de se observar os custos operacionais do projeto, permitindo assim melhor detalhamento do tratamento mineral e quais formas podem ser utilizadas para minimizá-los. Através da Figura 1 (Metso, 2010) é possível observar claramente a correlação entre os custos operacionais, o tamanho das partículas e a porcentagem de sólidos necessária para o design do processo.

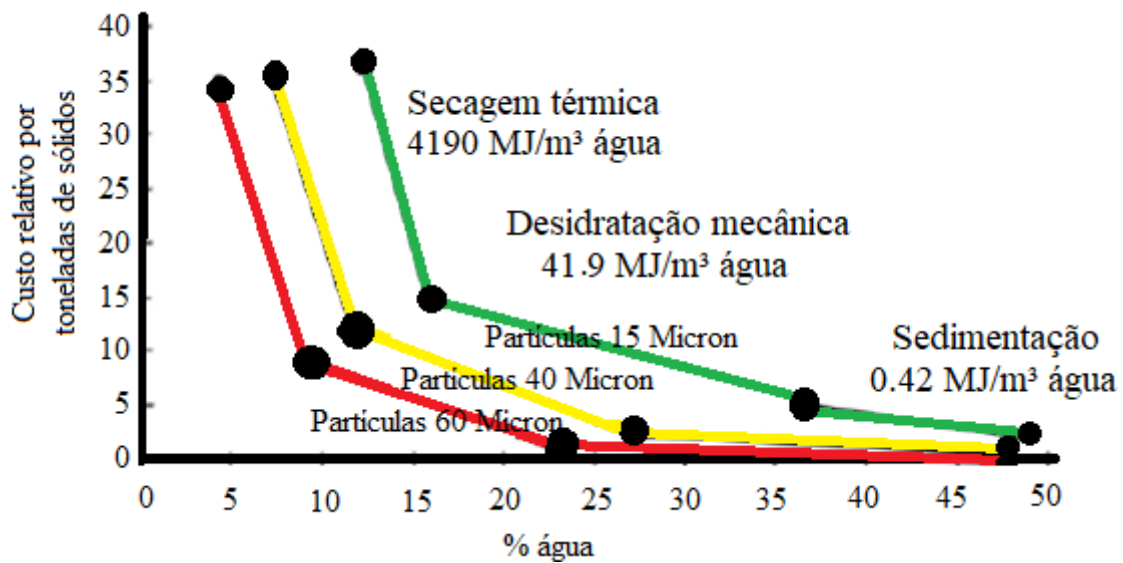


Figura 1: Custo da operação unitária para desaguamento em função do tamanho das partículas presentes na polpa (Adaptado de Metso Minerals, 2010).

Conforme abordado por Silverblatt & Easton (2002), para que haja uma separação sólido líquido de forma eficiente certos fatores devem ser cumpridos, sendo que, dentre estes fatores encontram-se:

- I. Capacidade Requerida: Parâmetro aplicado e avaliado em processos com baixa capacidade de alimentação e produção. Em operações nas quais existem a possibilidade de atender capacidades maiores, opta-se geralmente, pelo espessamento. Além disso, o condicionamento do método, é vinculativo aos custos operacionais. Diante disso, os espessadores são os mais procurados, devido ao seu baixo custo operacional e menor demanda de manutenção, ainda que necessite de grandes áreas.
- II. Distribuição de Tamanhos e Forma das Partículas: é um dos principais fatores correspondentes a eficiência e custo dos processos de separação sólido-líquido. Têm-se como exemplo regular, uma polpa de minérios contendo uma grande quantidade de partículas finas/ultrafinas com destino final ao beneficiamento, frisando principalmente à medida da área superficial. No caso de suspensões com partículas menores que 10 μm , especialmente na fração argila (<2 μm), o processo de separação sólido-líquido é muito afetado pelo efeito da dispersão das partículas, causado pelo movimento browniano característico dos coloides, dificultando assim a sedimentação das partículas.
- III. Aglomeração das Partículas (coagulação e/ou floculação): este parâmetro afeta a melhoria da eficiência das operações, convencionalmente descritas pelos mecanismos de coagulação e floculação.
- IV. Concentração de Sólidos na Polpa: esse fator antecede as etapas de desaguamento. Desse modo, as suspensões diluídas necessitarão de concentração prévia, geralmente em espessadores, antes de serem submetidas ao desaguamento final. No entanto, é válido ressaltar que polpas mais diluídas permitem a floculação mais eficiente, com flocos de mais fácil sedimentação e desaguamento.

- V. Geometria dos Equipamentos de Separação: conforme a geometria e as dimensões do tanque há uma grande influência no processo de sedimentação. A existência de obstáculos no trajeto da partícula em uma separação, promove a redução da taxa de sedimentação. No entanto, se a concentração de sólidos for muito alta, há necessidade de que o tanque tenha altura suficiente para que o processo de sedimentação aconteça livremente.

3.2. Espessamento

O espessamento é uma prática recorrente apresentando como um dos seus objetivos, a retirada de água para recirculação em outras etapas do processo. Em conformidade com Chaves (2004), os espessadores são importantes no desaguamento mineral, principalmente quando existe a necessidade de se estocar ou destinar o material a processos posteriores como a metalurgia. Além disso, o processo como um todo baseia-se na sedimentação através de artifícios mecânicos dos fluídos em que a partícula sólida em suspensão estará sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento. É válida a observação de que através da correlação entre as diferentes densidades de suspensão do processo, são apresentadas características no sistema de baixo custo e simplicidade operacional.

Para que a simplicidade operacional no espessamento ocorra, uma série de fatores devem ser seguidas criteriosamente. Dentre tais fatores, conforme Chaves (2004) e Luz et al. (2010), encontram-se a manutenção das concentrações das polpas adequando-as aos processos subsequentes, o espessamento de rejeitos com alta concentração de sólidos, a recuperação da água para reciclo industrial e a recuperação de sólidos em operações de lixiviação. Através destes parâmetros gerais, torna-se possível observar o funcionamento geométrico do espessador, sendo possível apurar de forma mais anatômica as características gerais do equipamento, bem como, observar em qual setor, deve-se ater o aprimoramento da vertente operacional.

Outra classificação de importância análoga desenvolvida por Chaves (2004) para os espessadores, é referente as fases e produtos gerados e classificados dentro do espessador, fases estas conhecidas principalmente por zonas, como a zona de clarificação e a zona de sedimentação, zonas estas responsáveis pelos produtos conhecidos produtos espessados (sedimentados) e clarificados (em suspensão, retirados pela calha de transbordo). Tais produtos são amplamente utilizados na mineração em situações distintas, sendo que para o minério,

proveniente da concentração, realiza-se o desaguamento mineral, com relação ao produto dos rejeitos, esta etapa pode ser utilizada tanto para o desaguamento, ao tratar de processos posteriores como secagem para pilha de rejeitos, quanto para uma adaptação do espessador visando a criação da pasta mineral.

Ao analisar a funcionalidade industrial dos espessadores, é observado que do ponto de vista operacional, tais equipamentos necessitam operar em regime contínuo, sendo constituídos principalmente por concreto armado, encarecendo a construção e a manutenção do mesmo. No entanto, existem certas ressalvas ao equipamento, que possuem relevância para serem desatacadas, como os que podem ser construídos por outros materiais, como o aço, sendo construídos principalmente para espessadores suspensos, com características específicas. Conforme recomendação encontrada nos manuais da Metso (2010), para a finalidade de espessar certos produtos, os equipamentos em aço apresentam diâmetros menores, devido ao elevado custo de construção. Em contrapartida, estes não necessitam de grandes áreas para serem alocados.

Além disso, ao avaliar as operações internas do espessador, a sedimentação em função principalmente da descontinuidade do processo em escala piloto apresenta evidências de como maximizar a produtividade e a eficiência. Esta descontinuidade pode ser aferida com o deslocamento das partículas no sistema em referência ao tempo, sendo possível delimitar as principais zonas do sistema. Apesar do sistema representado em laboratório, ser realizado em bateladas, é possível obter valores aderentes ao projeto, mas estes devem ser habilidosamente adaptados, versando os melhores resultados e parâmetros disponíveis para cada caso.

3.3. Fatores que afetam o espessamento

Dentre os fatores que impactam diretamente o espessamento encontram-se: o tamanho e forma da partícula, a porcentagem de sólidos da polpa, as características da superfície mineral e a viscosidade do fluido. No entanto, tem-se em destaque principalmente o tamanho e forma da partícula, propriedades que influenciarão significativamente nas condições de aplicação de reagentes no espessamento.

3.3.1. Tamanho e forma da partícula

De acordo com LUZ et al (2010), ao considerar um sistema com partículas de mesma densidade em uma operação de espessamento, torna-se possível analisar a velocidade de sedimentação das partículas pelo seu tamanho.

Segundo Luz apud Zajic (2010), certas partículas de dimensões específicas, demandam de maior conhecimento da aplicabilidade no processo, o qual em um regime turbulento, existe prejuízo na disposição e interação das mesmas. Dentre as fases que apresentam problemas análogos a estes, encontram-se as partículas coloidais, possuindo velocidade de sedimentação extremamente lenta. Dada a baixa velocidade de sedimentação, a aplicação de agentes agregadores no sistema torna-se fundamental, sendo que partículas de granulometrias muito finas sem o auxílio de agregação apresentam dificuldades em serem sedimentadas.

Ao realizar o tratamento dos rejeitos minerais, a presença de minerais muito finos exige a máxima recuperação de partículas no processo, sendo que à medida que o tamanho da partícula diminui, aumenta-se a complexidade do processo. Além disso, quando existem partículas de granulometrias muito finas as forças da natureza física tornam-se desprezíveis, enquanto as forças de superfície crescem e começam a determinar o comportamento dos sistemas coloidais que são caracterizados pela estabilidade, estrutura e reologia das partículas.

Ao deparar-se com a dificuldade de sedimentação dos grãos em um sistema, certos artifícios devem ser considerados, para que as partículas presentes possuam granulometria maiores, facilitando deste modo as propriedades de sedimentação. Para tanto, ao adsorver reagentes em uma superfície coloidal, uma fração significativa de partículas presentes no meio são agregadas, próximo à interface sólido-líquido. Sendo assim, para que a agregação e a sedimentação ocorram, esta interface de contato deve ser decorrente dos fenômenos de interfaces, atuando principalmente em fenômenos como o da formação da DCE (dupla camada elétrica) e da adsorção. Diante disto, torna-se importante um estudo mais aprofundado acerca da relação das partículas muito finas em contraponto a viabilidade do processo através da ciência dos coloides e da química da superfície mineral.

3.3.2. Sedimentação em meio fluído

Conforme Guimarães (2010) e Luz et al (2010), as partículas em suspensão tendem a serem sedimentadas de diferentes formas, sendo necessário averiguar principalmente as propriedades físico-química das mesmas. A interação do fluído com a partícula é resultado de três forças atuantes, dentre elas as forças de empuxo, gravitacional e de resistência. Para que a sedimentação se mantenha de forma conclusiva, segundo Santos apud Oliveira, Luz e Lacerda (2019), dependera principalmente da desaceleração das partículas, através da avaliação da turbulência do fluído pela Equação 1 de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho_s \cdot d \cdot v}{\eta} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde d é o diâmetro da partícula (m), v é a velocidade de sedimentação (m/S), ρ_s é a massa específica do sólido (kg/m^3), η é a viscosidade dinâmica do fluído (Pa.s). É válido lembrar que para que o fluído em pasta seja investigado, o ideal é que o fluxo de massa se encontre em um regime/circuito menos turbulento, sendo considerado por França & Massarani (2018), $Re < 0,2$ um escoamento laminar, $0,2 > Re > 500$, escoamento médio e $Re > 500$ o escoamento turbulento.

Outro parâmetro observado por Luz et al (2010), é o critério de viscosidade do fluído, sendo de extrema relevância ao tratar de um sistema laminar, impactado pelas forças de resistência do fluído, interpretada conforme a Equação 2.

$$v = \frac{d^2 \cdot a \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \eta} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde v é a velocidade de sedimentação (m/s), d é o diâmetro da partícula (m), a é a aceleração da gravidade (m/s^2), ρ_s é a massa específica do sólido (kg/m^3), ρ_f é a massa específica do fluido (kg/m^3), η é a viscosidade dinâmica (Pa.s). No entanto, é válido a ressalva de que em regimes turbulentos, geralmente são utilizadas a Lei de Newton, conforme a Equação [3].

$$V = \left(\frac{(3,03.d.a.(\rho_s - \rho_f))}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 3})$$

3.4. Pasta mineral

Atualmente, as técnicas de exploração e beneficiamento mineral requerem uma abordagem mais tecnológica indagadas a partir de resultados cada vez mais avançados, através de uma maior gestão e qualidade da geração e disposição dos resíduos gerados. Para tanto, o embasamento dos estudos, são ricamente expressados em perspectiva dos parâmetros operacionais, dos quais é buscado maximizar a produtividade e consequentemente minimizar os custos gerados. Uma forma mais ecológica e assertiva desta abordagem visando o remanejamento do rejeito gerado, encontra-se em técnicas desenvolvidas para realizar a disposição do material, por meio de pastas minerais. Estas pastas mantêm em foco principalmente o fator de segurança, sendo considerada como uma forma alternativa às barragens de rejeitos tradicionais.

De acordo com Luz *et. al.* (2010), através de estudos situacionais, é observado que apesar da mineração ser um dos pontos fortes da economia nacional, os teores encontrados destes recursos são cada vez menores. Diante disto, torna-se necessário um maior investimento através de avanços tecnológicos, principalmente acerca de um maior desenvolvimento de técnicas de beneficiamento para que a produtividade da operação se mantenha aderente ao planejado. Ademais, em conformidade com Chaves (2004), o tratamento de minérios à medida em que avança em novidades tecnológicas, lida cada vez mais com partículas menores, buscando através desta interface materiais que apresentem menores taxas de impurezas.

Como os rejeitos minerais apresentam granulometrias progressivamente mais finas favorecendo a disposição via barragens (o que tem sido desconsiderado pelos impactos ambientais e sociais ocasionados através de rompimentos) são encorajadas técnicas de investigação mais eficientes para o processo. Além disso, a disposição de rejeitos em barragens tem sido cada vez mais desencorajada, surgindo atualmente técnicas que em contrapartida das barragens, viabilizam a disposição do material de forma menos fluída possível, proporcionando assim uma maior segurança do transporte e descarte do material.

Entre essas técnicas, o espessamento adensado e os processos de agregação de partículas são inovações do setor mineral mais utilizadas para a produção de pastas minerais obtendo desta forma um rejeito com um menor grau de umidade o qual favorece as disposições de forma mais eficiente.

Segundo Neto et. al. (2015), devido à menor quantidade de água, as pastas apresentam inúmeras vantagens ambientais e tecnológicas, considerando previamente as características preponderantes das propriedades reológicas. Os autores observaram que, através do agravamento dos impactos ambientais e da escassez dos recursos hídricos, diversas alternativas para que ocorra a disposição a seco ou com mínima umidade do rejeito têm se mostrado mais vantajosas.

Conforme França et. al. (2018), ao definir a pasta mineral, caracteriza-se este fluído como uma suspensão homogênea, com elevada concentração de sólidos (geralmente acima de 60% em massa) e sem segregação de fases. Além disso, a pasta gerada através de espessadores apresenta propriedades semelhantes à um fluído não-newtoniano, necessitando de uma tensão de cisalhamento maior à medida que a concentração de sólidos aumenta. Visando a formação da pasta por meio do espessamento, o equipamento mais utilizado afim da produção da pasta em grande escala é o “Deep Cone”, utilizando para a formação da pasta, principalmente a ação da gravidade e viscosidade predominante no circuito.

Conforme Theriault e colaboradores (2001), a pasta mineral pode ser caracterizada como um sistema de partículas finas que apresenta um fluído homogêneo, no qual não ocorre a segregação granulométrica das partículas e que se disposta de forma suave em superfícies estáveis, não apresenta drenagem significativa de água. Além disso, conforme Araujo et. al. (2003) e Theriault et. al. (2001) as pastas minerais estão correlacionadas aos sistemas coloidais

intrinsecamente através de aspectos homogêneos, com ocorrência na segregação granulométrica das partículas sobre superfícies estáveis.

Outra abordagem característica acerca da pasta mineral, é descrita por Johnson (2005), o qual a descreve como um material adensado e homogêneo, com distribuição granulométrica e mineralógica, apresentando baixa perda de água durante o processo e segregação de partículas quase nula. Deste modo, torna-se possível a formação da pasta mineral através de atributos como baixa velocidade de sedimentação dos sólidos e de transporte em tubulações com baixas velocidades. O material proposto, ao final do espessamento é denominado como “pastefill” apresentando de forma a viabilizar a permanência dentro das tubulações durante longos períodos caso não haja ligantes em sua composição. Além disso, a consistência do processo é indagada através de medidas, das quais são dispostas com intuito de analisar a altura de abatimento pelo teste de abatimento ou “slump”.

De acordo com Cacciuttolo & Holgado (2016), há um averbamento de que os processos destinados a obtenção do rejeito em pasta são classificados através da produção, do transporte e do armazenamento do material circulante. É observado por ambos que fatores como a tensão de escoamento e a concentração de sólidos dentro de uma faixa suficientemente alta são amplamente necessários visto que interferem na qualidade do material. Outro fator de importância análoga é o nível do leito em que o material ocupará no espessador sendo considerado passível de otimização e controle do equipamento minimizando assim possíveis danos no acionamento do equipamento.

A utilização da pasta mineral apresenta inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental e da elaboração de novas tecnologias. Dentre tais vantagens, segundo Portes (2013), enquadra-se o dinamismo do processo como: uma maior redução de armazenamento de água, na redução da área de planta necessária para disposição dos rejeitos, em melhores condições de recuperação no fechamento de mina, na possibilidade de uso como material de fundação (como material de empilhamento advindos da filtração) e apresentando as melhores características de permeabilidade e estabilidade.

Segundo Chaves (2004), entre as variáveis a serem observadas para o sucesso da do espessamento do rejeito em pasta encontram-se a granulometria, a vazão e a porcentagem de sólidos da alimentação; a vazão e a porcentagem de sólidos do “*underflow*”; a dosagem e

diluição do floculante, o ponto principal de adição do floculante; o pH da polpa; a porcentagem de sólidos no “*overflow*” e a densidade na zona crítica ou em suas vizinhanças.

Dentre as características principais da pasta mineral a serem investigadas, segundo Araújo (2012), para que ocorra um bom planejamento da pasta mineral, destacam-se a tensão de escoamento da pasta; a altura de abatimento; o ângulo de repouso; a viscosidade, dentre outros. A aplicação desta tecnologia no Brasil nas indústrias mineiras é relativamente nova, com mais pesquisas e aplicações destinadas na Austrália e Nova Zelândia. A Figura 2, por exemplo, representa significativamente a disposição e desenvolvimento da pasta em relação ao fluxo mineral em conformidade com o equipamento.

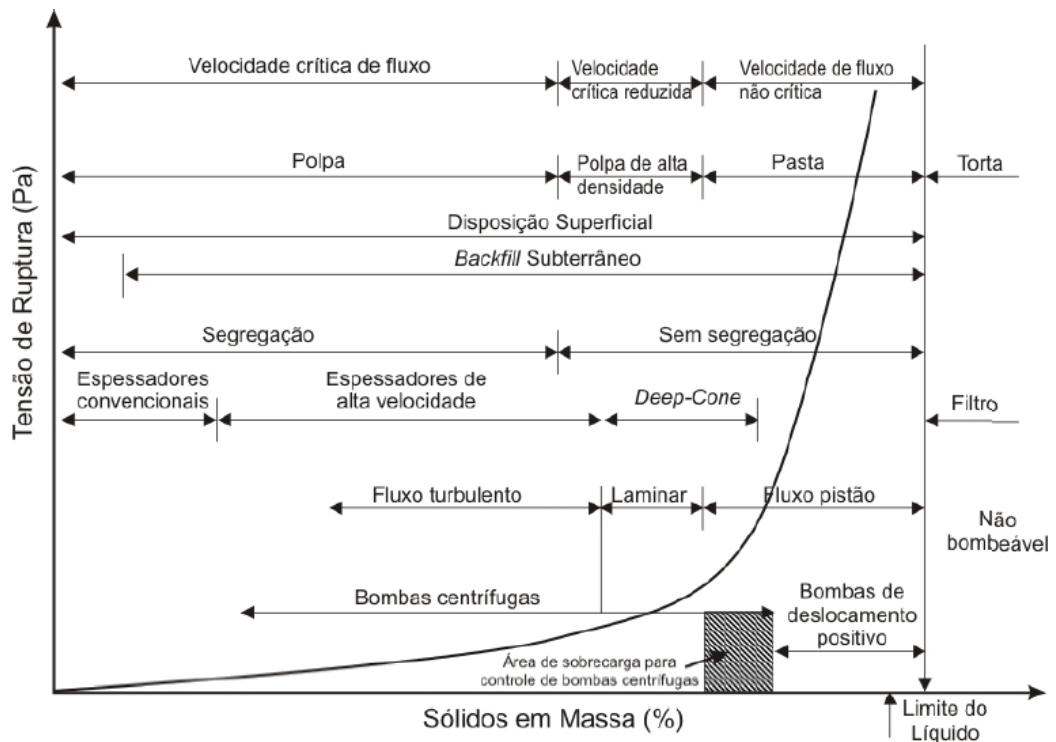


Figura 2: Gráfico de fluxo de pasta mineral em virtude do equipamento a ser utilizado para o adensamento.

A partir do gráfico da Figura 2, é possível observar quais são as necessidades dos fatores como a tensão de ruptura em função da porcentagem de sólidos, influenciando diretamente na formação da pasta mineral. Através deste gráfico, é possível observar, que para que a pasta seja formada, são necessárias uma taxa de tensão de ruptura dos sólidos de intermediária a baixa,

para a criação da pasta mineral, sendo que quanto maior a aplicação desta tensão no sistema, maior será a dificuldade de os grãos formarem flocos e sedimentarem por si só. Como neste sistema, a presença de rejeitos é quantitativamente de baixa concentração de sólidos, são necessários, aplicar uma série de parâmetros, para que a sedimentação ocorra de fato, como no caso de reagentes para reação no âmbito de agregação e floculação dos grãos, tornando deste modo, viável, a sedimentação no fluido. Para que tal observação possa ser analisada, são investigados ensaios laboratoriais de Yield Stress, buscando avaliar o quesito das tensões atuantes nos grãos, sendo influenciado deste modo na sedimentação final dos grãos.

A conformação da Figura 2 demonstrando a necessidade das porcentagens de sólidos e do tipo de equipamento para desenvolvimento da pasta mineral, pode ser observada fisicamente na Figura 3. Nesta Figura há a representatividade em aspecto visual da disseminação da pasta mineral criada proveniente da descarga do underflow de um espessador de cone (“deep cone”), disseminados sobre uma superfície impermeável, em uma operação de lavra a céu aberto conforme Vietti & Dunn (2002).

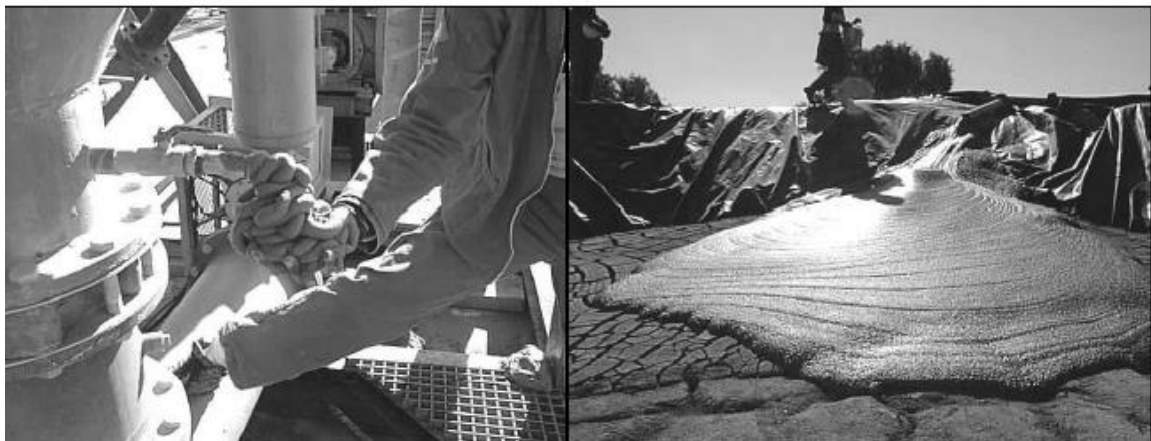


Figura 3: Descarga em um deep cone à esquerda da pasta mineral e à direita através da disposição superficial (Vietti e Dunn, 2002).

Conforme estabelecido por Johnson et al. (2005), para se obter a consistência ideal da pasta mineral, algumas diretrizes devem ser atendidas quanto ao material a ser trabalhado. Estas diretrizes, podem ser obtidas através da adição/retirada de líquidos do sistema, buscando desta forma viabilizar a criação da pasta mineral, por meio de um desaguamento ou adição de líquidos

ao sistema previamente dimensionado. Além disso segundo Hernández (2005), para que se possa ocorrer a criação da pasta mineral em ponto de dispersão sobre a superfície impermeável, geralmente os líquidos adensados são ajustados através de algum ligante, como o cimento, sendo o mais conhecido para este fim, o cimento “Portland”. Entretanto, algumas alternativas mais econômicas são recomendadas a fim de minimizar os custos operacionais, dentre elas são utilizadas a cinza volante, a meta caulim, a cal, entre outras. Dentre as características das pastas minerais as principais são a viscosidade, a tensão de cisalhamento e escoamento, a altura de abatimento, o ângulo de repouso, as resistências à compressão, cisalhamento e a permeabilidade.

3.5. Agregação de partículas

Segundo LUZ et al. *apud* Lyklema & Attia (2010) a sedimentação de uma partícula coloidal, tornaria inviável o espessamento, no entanto, para que esta sedimentação se torne possível são necessárias ações como a agregação das partículas. Este sistema tende a facilitar o processo durante a etapa de separação sólido-líquido, minimizando assim a quantidade de partículas finas no meio. Para tanto, três formas de agregação são possíveis nesta situação, sendo elas a coagulação, a floculação e a aglomeração. No entanto, ao realizar atividades convenientemente assessoradas pelo espessamento, os mecanismos mais utilizados são os dois primeiros.

Ao observar as principais funções a serem desempenhadas tanto pela coagulação quanto pela floculação, é percebido que em um sistema de espessamento a ocorrência da coagulação através das ligações intermoleculares entre a superfície da partícula e os reagentes integrantes do sistema são configurados através das forças superficiais de natureza atrativa das partículas, superando as repulsivas. Com relação a floculação, esta é considerada resultante da ação de um polímero de elevado peso molecular adsorvido simultaneamente sobre a superfície das partículas formando desse modo os flocos através de ligações intermoleculares.

3.5.1. Floculação

Conforme Luz, et al (2010), a floculação ocorre pela ação de um polímero, quando solúvel em água, promovendo a ação de agregação das partículas finas em flocos. Estes polímeros podem ser classificados observando a origem, a carga elétrica e o peso molecular. Além disso, são caracterizados como naturais, sintéticos; neutros, aniônicos/catiônicos e de baixo, médio ou elevado peso molecular. Dada a complexidade da operação de floculação certos fatores devem ser investigados visando a melhor efetividade do processo como: a escolha apropriada do floculante; a forma de aplicação; o ambiente químico; o sistema hidrodinâmico; o estado da molécula e o tamanho das partículas.

De acordo com Luz, et al (2010), a floculação ocorre conforme dois mecanismos distintos de reação sendo eles configurados por “pontes” ou por “reversão localizada de carga”. Para que se possa definir qual metodologia deverá ser abordado, deve-se ater a configuração que a superfície do mineral apresenta, sendo necessário aplicar a melhor adaptação conforme a resultante do processo.

Além disso, Luz et al. 2010, consideram que para que a floculação ocorra necessita-se ater principalmente do uso das técnicas para a concentração de finos, havendo uma adsorção seletiva do floculante. Deste modo, ocorre a agregação entre partículas de uma mesma espécie, enquanto as demais espécies permanecem dispersas, aumentando assim, a seletividade do processo.

Para tanto, visando a abordagem dos sistemas em discussão, na fase de floculação por pontes são utilizados polímeros não-iônicos ou polieletrólito, além disso, a superfície mineral possuirá carga de mesmo sinal, prevalecendo os mecanismos desta abordagem. No entanto, quando a molécula do floculante corresponde a reversão localizada de carga, a superfície possuirá carga de sinais opostos, ocorrendo a floculação por reversão localizada de carga ou ainda pela neutralização das cargas.

A floculação por reversão localizada de carga origina-se a partir do polímero com peso molecular médio ou baixo, considerando uma alta densidade de carga, interagindo com uma superfície de baixa densidade de carga oposta (Yan et al., 2004). Já a floculação por

neutralização de cargas tem origem quando a molécula do polímero de baixa densidade de carga, é suficiente apenas para neutralizar a carga oposta da superfície mineral, reduzindo a repulsão eletrostática entre as partículas.

3.5.2. Coagulação

A coagulação das partículas minerais conforme Luz, A. B. et al (2010), ocorre através de suspensões aquosas, sendo considerado que tais partículas em suspensão adquiram carga elétrica superficial como resultado das interações entre as espécies iônicas e entre as partículas e as moléculas de água. A ocorrência da coagulação gera consequências ao sistema considerando o excesso de cargas elétricas através da aproximação de íons e contra íons dando origem a uma DCE (dupla camada elétrica) na interface sólido-líquido.

No entanto, conforme Baltar (2010), para que haja de forma efetiva a coagulação, mantem-se a neutralidade elétrica das partículas, averiguando principalmente a quantidade de contra íons atraídos para a proximidade da partícula, devendo ser exatamente o mesmo excesso de carga elétrica da superfície do sólido. Atenta-se também para a presença de íons com mesmo sinal na superfície do mineral (co-íons).

A estabilidade dos sistemas coloidais é tratada pela teoria DLVO (Deryagin, Landau, Verwey e Overbeek). Esta teoria baseia-se principalmente nas variações de energia obtida quando as partículas se aproximam umas das outras. Neste caso as únicas interações consideradas nas superfícies das partículas são as interações de van der Waals e eletrostáticas caracterizadas principalmente por atuar através das forças atrativas e repulsivas.

Segundo Baltar (2010), a fim de se estabelecer as características de agregação foi definido que a agregação ocorre quando a energia potencial das forças atrativas encontradas é maior do que as repulsivas. Sendo possível obter a coagulação através da redução, ou até mesmo eliminação, da barreira energética repulsiva. Alguns fatores práticos permitem minimizar a barreira energética, sendo eles:

- A alteração da carga elétrica superficial da partícula, gerado pela ação de íons determinantes de potencial (idp). Em sistemas com minerais em que as espécies H^+ e OH^- são determinantes de potencial, a coagulação pode ser obtida por meio do controle do pH.
- A promoção da adsorção específica de íons, sendo que a presença, na camada de Stern, de íons adsorvidos influencia diretamente na minimização do potencial zeta, caso haja carga elétrica oposta à da superfície.
- Provocar a compressão da DCE, através da adição de eletrólitos, geralmente inorgânicos multivalentes. Os mais utilizados são os cátions hidrolisáveis, como Al^{3+} e Fe^{3+} . Ainda que alguns polímeros sintéticos com baixo peso molecular (2×10^4 a 1×10^5), geralmente catiônicos, são citados como coagulantes. A rigor, a ação desses reagentes, apesar de estar relacionada a uma neutralização da carga elétrica da superfície mineral, representa um mecanismo de floculação por reversão localizada de carga.

3.6. Reologia

De acordo com Jordan & Grotzinger (2016), o Brasil encontra-se em um continente antigo, cujos minerais presentes são de natureza sedimentar, em grande parte. Fato este decorrente da influência do intemperismo, o qual caracteriza muitas jazidas com considerável concentração de sólidos de granulometrias muito finas que ao serem mineradas, poderiam apresentar partículas denominadas lamas, argilominerais ou outros caracterizados pelo tamanho como finos, ultrafinos e coloides.

Conforme Luz et al (2010), o estudo da reologia tem fundamental importância para o entendimento do comportamento das partículas numa polpa, razão pela qual há o interesse sobre os efeitos da viscosidade no fluido dinâmico das polpas.

Diante de tal interesse, ao tratar as polpas minerais destinadas ao espessamento, o seu fluido deve ser observado de acordo com seu comportamento reológico podendo este ser um fluido newtoniano, quando a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento, ou não-newtoniano, quando ela for dependente. Com relação a viscosidade do meio, no primeiro caso, a viscosidade medida em qualquer local do circuito será sempre a mesma, desde que não tenha sido adicionado algum reagente. No entanto, no segundo caso, a viscosidade estará sendo modificada constantemente dependendo do grau de agitação da polpa.

Segundo Chaves (2004), a influência da reologia não tem uma boa compreensão por parte dos operadores em usinas de beneficiamento, sendo que a mesma é raramente considerada como uma variável em projetos, análises e otimização. Essa dificuldade em entender como as características reológicas operam em uma usina ocorre principalmente pelo fato das suspensões apresentarem variáveis muito instáveis o que acaba dificultando o processo tornando assim inviável a execução pela tecnologia da época. No entanto, esta configuração de acordo com os avanços tecnológicos obtidos na atualidade, tornou-se possível, investigando principalmente a falta de normatizações para a realização das medidas de viscosidade.

Através de instrumentos de medição das propriedades das partículas, outras variáveis foram creditadas como significativas para a viscosidade da polpa as quais também não eram consideradas e visto a granulométrica das partículas devem ser analisadas como a distribuição do tamanho das partículas, o ambiente químico e a temperatura das polpas. No trabalho desenvolvido por Klein (2002), são apresentadas certas definições das quais relacionam principalmente a reologia das suspensões minerais como a ciência que estuda a deformação do fluxo da matéria, sendo uma das propriedades ou características reológicas importantes a tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento.

3.7. Espessador de pasta

Brackebusch (2000) afirma que o rejeito gerado através de técnicas de processamento mineral, geralmente é realocado para disposição em grandes barragens de rejeitos no formato de polpa diluída, o qual devido fatores ambientais não é mais viável. Dentre as dificuldades encontram-se, a manutenção do transporte via minerodutos e a sedimentação do próprio material nas barragens de rejeitos, considerando o grande número de partículas coloidais, tornando a oportunidade de estudos envolvendo pasta mineral possível perante alternativas de investigação diante do surgimento de novas tecnologias. Estas novas tecnologias buscam principalmente viabilizar o processo perante o desenvolvimento de maiores eficiências no processo, através da disponibilidade de maior segurança e menor custo operacional. O desenvolvimento das propriedades das pastas minerais, foram desenvolvidos principalmente,

buscando maiores investigações acerca de problemas provenientes em rejeitos, de partículas muito finas. Um dos principais equipamentos utilizados para este fim é o “Deep Cone”.

No Brasil, a indústria pioneira em realizar o espessamento em pasta, pensando nos requisitos ecológicos é a indústria de bauxita, a qual procura produzir o alumínio com destreza e o seu subproduto, o qual deslocam o rejeito como resíduo de forma ambientalmente compatível (Hernández, 2007). Estas empresas estão localizadas ao norte do país, em meio a floresta Amazônica, tornando deste modo ainda mais criterioso, a forma de remanejamento do material explorado e não utilizado como fins comerciais por estas empresas.

Além disto, dentre estes empreendimentos, para que se possa assegurar as condições adequadas do transporte da pasta mineral até o local de disposição é preciso que haja uma porcentagem mínima de partículas de granulometria fina, para que se torne possível o transporte do material. Para que esta porcentagem seja coerente com o projeto são utilizados reagentes juntamente com a polpa a ser encaminhada para o espessador, visando uma maior agregação das partículas do sistema. Normalmente se utiliza 25% em massa de material com tamanho inferior a $20\mu\text{m}$ (Brzienski, 2000). Considerando esta especificidade para a produção da pasta mineral, as quais enquadram-se na orientação e criação da mesma, dispõe-se de certas análises a serem processadas, como os presentes na Tabela 1.

Tabela 1: Testes necessários à caracterização de um material visando o preenchimento com pasta. (Adaptado de Brackebusch, 2000).

Escala de Laboratório	Escala Piloto/Industrial
Distribuição Granulométrica de Partículas	
Densidade	
Mineralogia	Espessamento
Geometria das Partículas	
Curvas de Compactação e Geometria Ótima	
Limites Líquidos e Plásticos	
Porosidade	
Permeabilidade	“Slump” x Requerimento Energético
Abrasividade	
Fluidez em Depósitos	
“Slump” x Conteúdo de água	
Testes de Espessamento	
Observação Visual	Provas de Bombeamento em Escala Industrial
Provas de Fluido em Colunas de Tubulação	
Resistência Mecânica	

3.8. Técnicas de análise

As operações executadas pelos espessadores demandam de certas propriedades diferenciadoras, das quais podem-se determinar padrões possibilitando a maximização da produtividade do processamento e minimização custos operacionais. Diante disto, visando sanar as necessidades operacionais, são determinadas as principais propriedades diferenciadoras deste, através das necessidades existentes pelo fluxo de sólidos a ser inserido no equipamento, a tensão de cisalhamento, entre outras características. Além disso, se faz necessário também, para que o desenvolvimento experimental ocorra de forma satisfatória, um estudo mais aprofundado acerca das técnicas de análises.

Dentre estas técnicas executadas em laboratório torna-se possível realizar a otimização dos equipamentos mediante especificidades do material. As três técnicas mais conhecidas e que são utilizadas para esta averiguação ocorrem através dos testes de proveta, de calha e de

abatimento. Sendo que de acordo com Olcay (2012), as principais avaliações para avaliar as características das pastas mineras mediante caracterização reológica são a viscosidade analisada pela viscosimetria, a consistência analisada pelo teste de abatimento, a fluidez verificada pelo teste de calha e a tensão de escoamento analisada segundo o yield stress.

Ao avaliar os processos de espessamento definindo a escolha mais acertada do equipamento a ser utilizado, algumas características de processos devem ser avaliadas através de testes laboratoriais. Estes testes são utilizados para se definir as características da pasta. Dentre estes testes, é observado principalmente que a capacidade de um equipamento de espessamento é diretamente proporcional à sua área e a função da taxa de sedimentação dos sólidos em suspensão. Além disso, a relação entre altura e diâmetro de espessamento é avaliada quando o volume do tanque proporciona tempo de sedimentação necessário, considerando fatores como eficiência operacional e projeto mecânico.

O recurso que apresenta grande finalidade ao ser empregado aos espessadores de forma geral, segundo Chaves apud Metso Minerals (2004), são os rakes (raspadores). Estes dispositivos, são de grande importância principalmente visando que os sólidos destinados a outras etapas não fiquem retidos no equipamento. Estes rakes apresentam como principal característica o torque, não sendo muito recomendado em espessadores produtores de pastas. Ao inserir os dados característicos do material a ser espessado e manuseado pelos rakes, observa-se um aumento do torque presente representando em consequência o aumento da carga de sólidos no underflow. A Figura 4, ilustra graficamente a variação do torque em detrimento das medidas de segurança representadas pelo sistema de monitoramento automático dos espessadores.

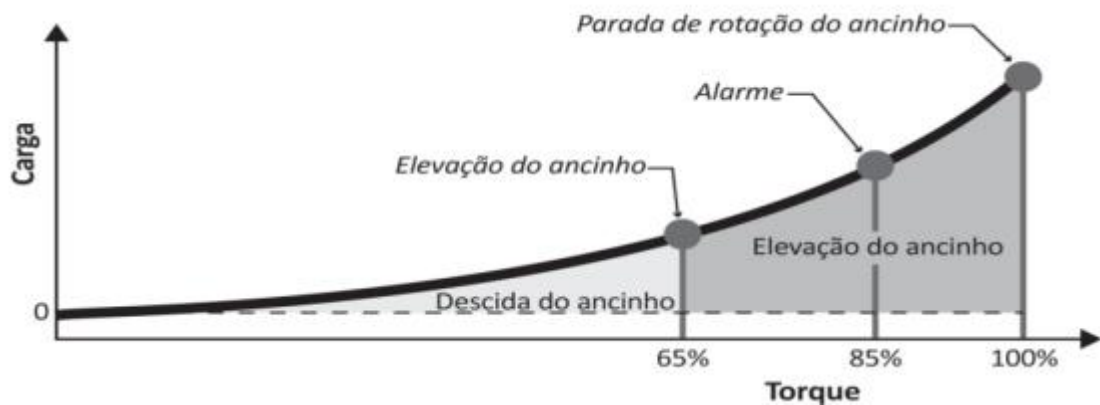


Figura 4: Variação do torque em detrimento das medidas de segurança na operação de espessadores (Chaves apud Metso Minerals, 2004).

3.8.1. Teste de proveta

O teste de proveta é um teste simples de ser executado e analisado, diante da perspectiva macroscópica. Diante deste experimento torna-se possível avaliar o tempo de sedimentação do material, observando principalmente o comportamento das partículas em cada etapa da sedimentação. É importante salientar que através deste teste, consegue-se distinguir a olho nu as zonas de sedimentação do material, as quais são diferenciadas até o final da sedimentação, demonstrando assim o funcionamento do espessador.

Além disso, durante a realização deste teste é avaliado a reação das partículas ao adicionar ao sistema reagentes (floculante/coagulante), observando principalmente a relação da formação de zonas e a relação da deposição do material em função do tempo. Através desta análise é feita a constatação da influência do sistema sem interferência na precipitação do material com os tempos de suspensão e sedimentação do material.

A fim de uma análise mais coerente conforme a realidade, torna-se possível observar o referencial dos dados macroscopicamente através de gráficos. Uma determinação que ocorre através deste teste é a definição do melhor reagente para tratamento do material trabalhado, minimizando e até mesmo tornando ínfimo a quantidade de material sobrenadante, além da análise do comportamento das partículas no fluído.

Um exemplo, de como é possível observar a sedimentação é mostrado através da Figura 5, descrita por Luz (2010), em decorrência da sedimentação em função do tempo. Nesta figura, é possível verificar que a partir de um certo tempo, dependente do material a ser analisado, visualizar as quatro fases do espessamento. Com passar do tempo, as partículas vão sedimentando até o final, onde há somente a presença do material sedimentado, podendo ocorrer na ausência/imperícia dos reagentes na etapa final, a presença de sobrenadantes.

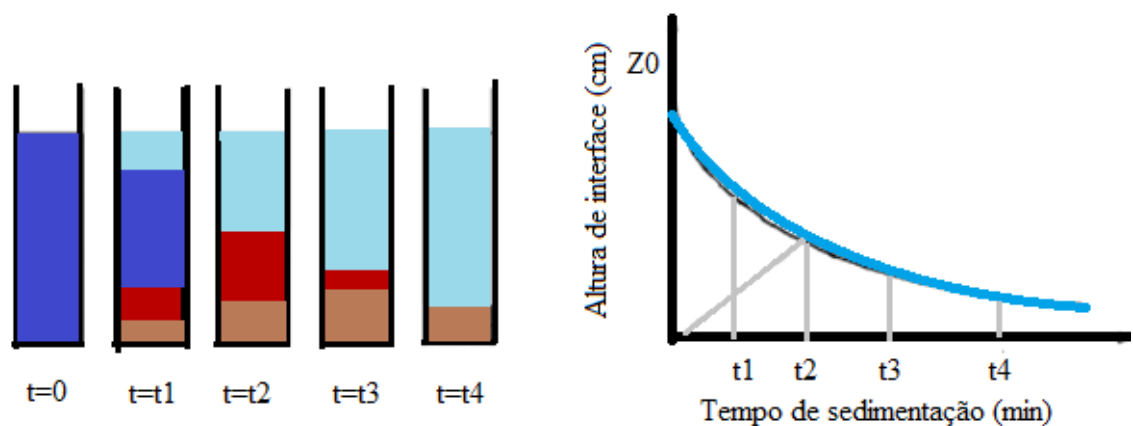


Figura 5: Imagem com destaque nas etapas decorridas de um teste de proveta com seu correspondente gráfico destacando a velocidade de sedimentação em detrimento do tempo (Luz, A. B.; 2010).

Durante a execução do teste de sedimentação em proveta, inicialmente é observado somente uma mistura heterogênea de polpa que ao decorrer do tempo e aplicações de reagentes, regiões são formadas. Através deste, são claramente observadas as regiões na Figura 5, representando as etapas presentes em um espessador, sendo elas: a região de líquido clarificado, a de sedimentação livre e a de compactação.

Dentre as regiões formadas durante um espessamento, de acordo com Luz et al (2010), observa-se que na região de sedimentação livre, as partículas sólidas sedimentam sem que haja interação entre elas; a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos são constantes. Em relação a região de compactação, as partículas sólidas interagem entre si; apresentando uma variação da concentração de sólidos ao longo dessa região, devido à desaceleração das partículas. No entanto, é válido ressaltar que testes para espessadores via laboratório, são realizados em bateladas, necessitando de maior precisão ao aplicá-los posteriormente em uma escala piloto simulando um regime contínuo do fluxo da polpa.

Ademais, ao realizar este teste pelo método de Coe Clevenger conforme Chaves (2013) em um espessador contínuo, a densidade da polpa aumentará consideravelmente com o aumento da profundidade até o limiar de obtenção do valor crítico limitado pela vazão diante da concentração crítica do sistema. Para tanto, cada teste realizado, disponibilizará, valores referentes a área unitária do espessador, conforme equação 4.

$$q_s = \frac{v_{so}}{\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_u}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde, q_s é o fluxo de sólidos a ser sedimentado (kg/m^2), a V_{so} é a velocidade inicial de sedimentação no teste (m/s), C_0 é a concentração volumétrica de sólidos inicial (kg/m^3) e C_u é a concentração volumétrica de sólidos final no UF (kg/m^3). Além disso, ao resolver tal equação, também é possível determinar a área unitária necessária para o espessador sendo o resultado o inverso de q_s . A fim de se obter a razão de espessamento, pode-se realizar o mesmo através da equação 5 apresentando o resultado do mesmo em $\text{kg/m}^2/\text{s}$.

$$RE = 1,33x \frac{\% \text{sólidos A} - \% \text{sólidos UF}}{\text{vel de sedimentação} \times \text{densidade da polpa}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Tal modelo pode ser observado esquematicamente através da Figura 6, validando a observação através das zonas especificadas do espessador e a disposição das fases conforme a sua concentração. (Olcay, 2012).

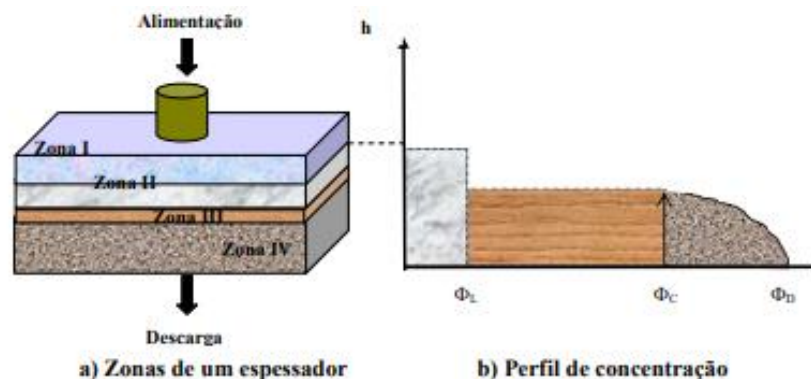


Figura 6: Perfil e zonas de espessamento encontradas no espessador, sendo visível em três dimensões e graficamente (Olcay, 2012).

Outro método de realizar esta análise é pela metodologia de Kynch ou Talmage e Fitch, os quais de acordo com Chaves (2013) baseiam-se através do método anterior para avaliação da velocidade de sedimentação. Além disso, é possível admitir a co dependência entre a razão de espessamento e diluição da polpa, conforme apresentado na Figura 7. Ao observar os resultados presentes neste gráfico, encontra-se entre as zonas de deposição um ponto crítico P_c , considerado o ponto de abordagem das melhores propriedades do espessamento.

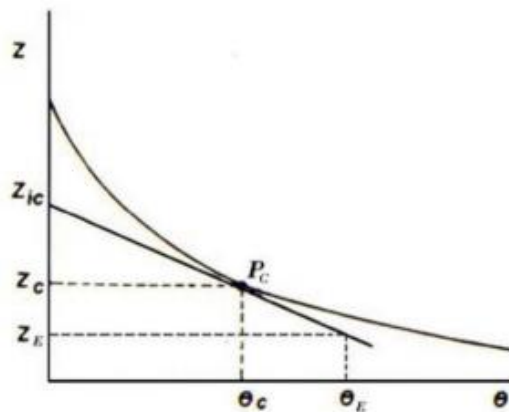


Figura 7: Curva de sedimentação típica (Guimarães, 2010).

Através da Figura 7, é possível observar também o tempo necessário para que se alcance o ponto de compressão, θ_c . Para chegar a tal resultado, segundo o próprio método, deve-se identificar o ponto crítico na curva e traçar uma reta tangente a mesma, em seguida localizar o tempo necessário para se atingir o ponto crítico, obter a altura de interface diante a concentração de sólidos esperada no UF, sendo correspondente tal altura a equação 6.

$$Z_e = \frac{C_o Z_o}{C_u} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde, C_o é a concentração inicial de sólidos na alimentação (kg/m^3); Z_o é a altura inicial da interface (m) e C_u é a concentração de sólidos final no UF (kg/m^3).

Ao final, em posse da altura da interface, obter-se-á seu respectivo tempo fazendo a seguinte inferência: Se a concentração do UF for menor que a concentração da camada crítica, θ_e é o valor da ordenada da interseção da linha horizontal traçada, caso contrário, o valor será o mesmo da ordenada na tangente da curva do ponto crítico. Ao final é possível obter o cálculo

da razão de espessamento conforme equação 7. Sendo possível através desta, segundo Santos (2018), obter a vazão mássica da área de espessamento. Para tanto, basta multiplicar a razão de espessamento pela taxa de alimentação do espessador, visando resultados com unidades de medidas em kg/s.

$$RE = \frac{\theta_e}{CoZo} \quad (\text{Eq. 7})$$

3.8.2. Teste de abatimento (Slump)

O teste de abatimento também conhecido como teste de Slump, é determinado principalmente pelas mensurações advindas da estabilidade da pasta mineral, sendo aplicado em escala de bancada com possibilidades de replicações de seus resultados em escala piloto. Através da prática laboral desempenhada por este teste, é possível medir características da pasta mineral como as medidas de plasticidade e a consistência ideal a ser desempenhada pela pasta.

Para que a análise do desempenho operacional deste teste ocorra, necessita-se abordar a execução do projeto com uma pasta previamente criada com a dição de todos os reagentes necessários para o sistema, através de testes anteriores, como o de proveta. Neste teste, os parâmetros avaliados são verificados em relação ao tempo de execução, verificando o tempo necessário para que a pasta desenvolvida apresente a consistência adequada, para aplicação em escala piloto.

Ao final do teste, o cone é retirado e faz-se a diferença da altura original do cone e a altura final. Através desta variação, mais conhecida como altura de abatimento, é possível averiguar a dependência do sistema na tensão de escoamento e na densidade do material. De acordo com Hernández (2005), o teste tem sido utilizado principalmente, visando a mensuração da consistência dos fluídos inelásticos, incluindo o comportamento das suspensões dos rejeitos minerais.

Através da Figura 8, observa-se de maneira clara, a execução do teste, sendo que conforme Clayton (2003), é perceptível a diferença do material com efeito de cimentação, e o comportamento do material após a retirada do cone.

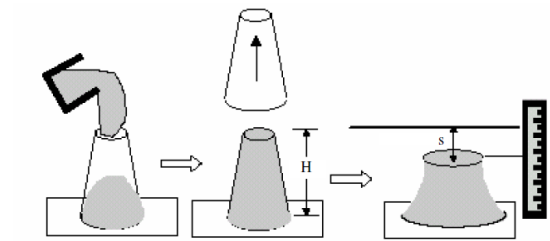


Figura 8: Representação esquemática do teste de abatimento de cone (Clayton; 2003).

Ao observar a Figura 8, é possível perceber, o comportamento da pasta mineral com o passar do tempo, ao realizar a disposição do rejeito. Avaliando, por conseguinte, uma maior efetividade do processo, de acordo com os produtos utilizados.

Além disso, visando maximizar a disposição de rejeitos e minimizar o custo com uso de cimento, é pressuposto um material ligante após espessamento conforme a aderência do material referente ao processo. Embora o processo de cimentação possa ser o mais caro, esta questão pode ser sanada ao adequar o tipo de cimento a ser estabelecido, priorizando principalmente a qualidade dos resultados. Estes materiais conhecidos como “Pastefill”, normalmente necessitam de uma faixa alta de adensamento, para que sua pasta esteja aderente na faixa de concentração de sólidos de 70 a 90% em massa do material, sendo necessário neste teste realizar as análises em rigor com as concentrações devido a consistência da pasta. (Clayton et al. (2003) e Olcay (2012)). Os principais rejeitos submetidos a tal processo, são rejeitos de minério de ferro, bauxita e fosfato.

3.8.3. Teste de calha (Flume)

Outra técnica para avaliação do espessamento da pasta em decorrência de seu comportamento é o teste de calha, o qual, é dependente da forma em que ocorre a disposição e a angulação a ser aplicada a pasta. Este teste, permite realizar uma avaliação preliminar do ângulo de repouso considerando a disposição do material. Torna-se possível assim, otimizar o sistema com o intuito de utilizar uma menor quantidade de reagentes, para a formação da pasta (como os agentes de cimentação). Sofrá et al. (2002), define através da Equação 8, o principal módulo de cálculo para determinação do ângulo ótimo para disposição da pasta, como observado através da Figura 9.

$$\theta_R = \arctan \left\{ \frac{H_1 - H_2}{L} \right\} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde, os principais termos avaliados na equação são o ângulo de repouso θ_R , o comprimento em que a pasta percorreu como L , e as diferenças finais e iniciais das alturas ao dispor a pasta sendo estas H_1 e H_2 , respectivamente.

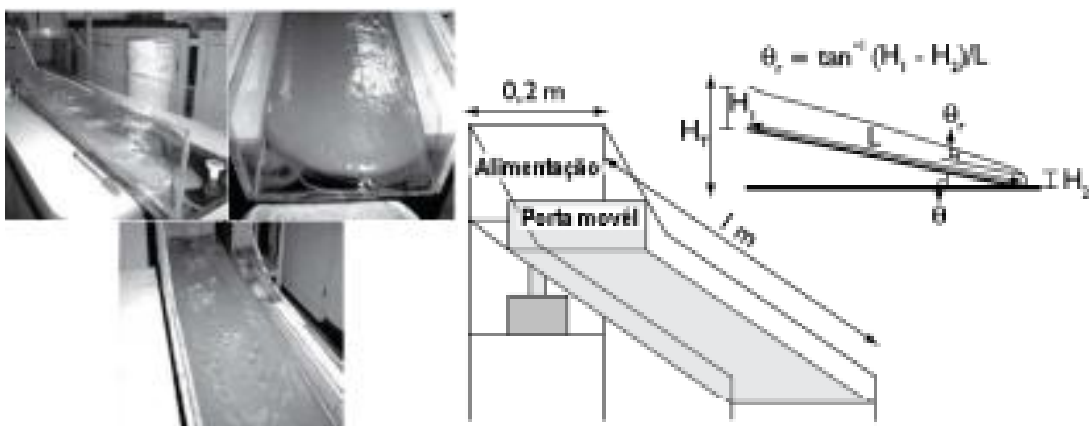


Figura 9: representação esquemática do teste de calha com indicação do ângulo de contato (Hernández, 2005).

Conforme Laudriault (2002), através de uma visão operacional e esquemática de como é disposta a pasta através do teste de calha - como apresentado na Figura 10 – é possível observar a forma em que a pasta é ambientada e operacionalizada. É possível através da figura também, observar uma comparação de operacionalidade entre as características principais da pasta a serem aplicadas, conforme o ângulo de repouso a ser aplicado respeitando as características desenvolvidas para a pasta mineral. Além disso, é possível avaliar também na análise, a variação do ângulo da calha e o tipo de desaguamento em que o material será submetido.

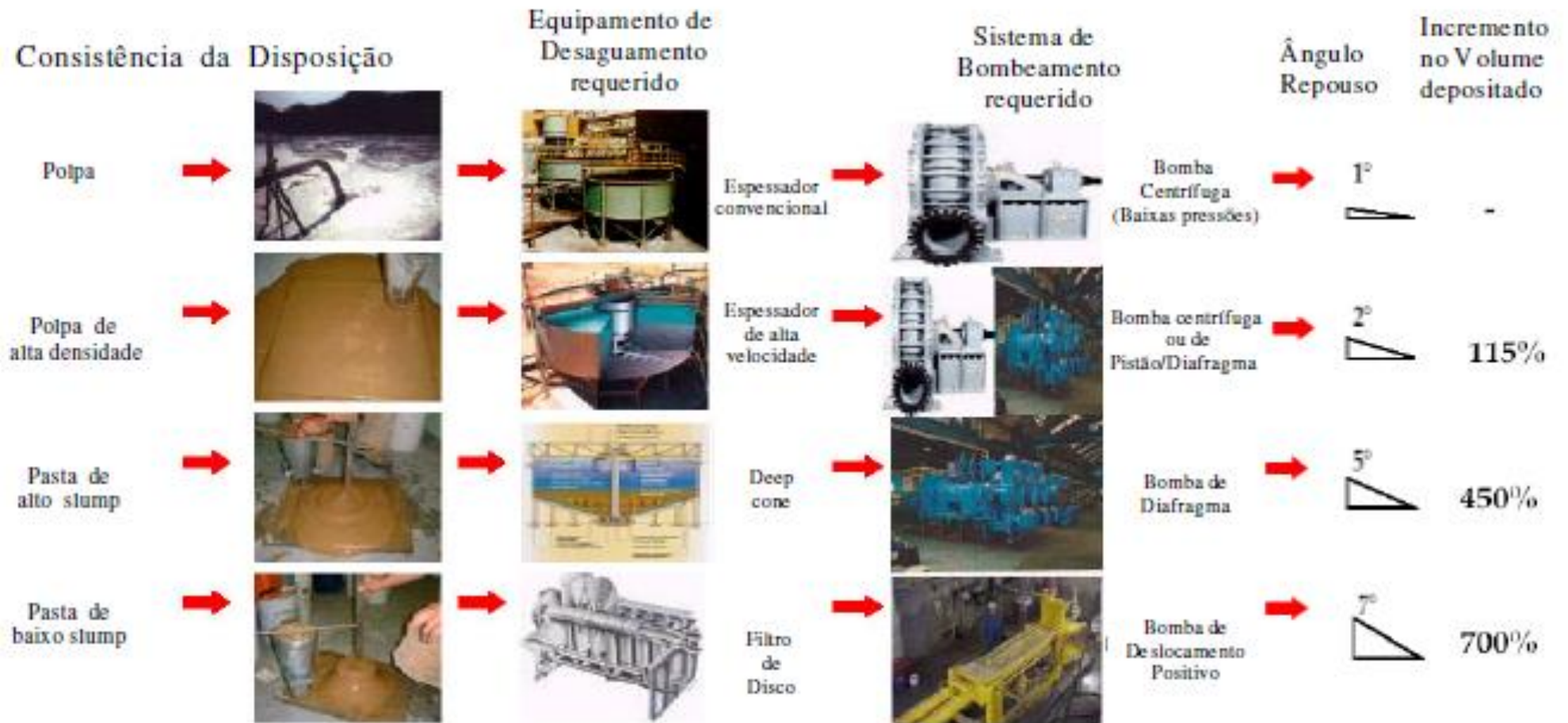


Figura 10: Consistência da mistura para a disposição de rejeitos correspondentes (Hernández, 2005).

3.9. Disposição de rejeitos

Atualmente tanto os órgãos governamentais, quanto indústrias minerais têm se atentado para o modo em que o rejeito tem sido disposto, principalmente pelos requisitos ambientais, os quais devem ser sanados e esclarecidos durante o decorrer do empreendimento. O rejeito em si, pode ser submetido a inúmeras perspectivas de transformações para comercialização, ou outro tipo de uso, no entanto, para que isto ocorra, as técnicas apresentadas têm de ser desenvolvidas e viabilizadas, tornando de certo modo estas operações rentáveis, pagamento ao menos o seu processo.

Uma técnica que ganhou grande notoriedade no Brasil, foram as elaborações de tijolos, através do rejeito do minério de ferro (tijolos cerâmicos) como visto por Severo (2019). No entanto estas técnicas, não pagam ainda a operacionalização demandando mais pesquisas sobre o aspecto, para que futuramente o mesmo possa ser empregado. Como este processo atualmente não seja considerado economicamente viável industrialmente, então devem ser aplicadas técnicas avançadas para disposição deste material.

Diante de técnicas a serem desenvolvidas buscando a viabilidade para os processos, tem-se a disposição do material em pasta, a qual é pouco aplicada no Brasil, tendo estudos a este aspecto a poucos anos, sendo mais desenvolvidos em países como a Austrália. Através desta perspectiva, esta monografia busca enfatizar majoritariamente o processo de criação da pasta mineral, em perspectiva de estudos, mais apurados futuramente, ser possível minimizar os custos do processo baseando na otimização do Deep Cone.

A produção da pasta pode ser alocada tanto em mina subterrânea, quanto em mina a céu aberto, no entanto, no Brasil, a mesma é mais conhecida em processos de preenchimento de minas subterrâneas, conhecido como “backfill” como relatado no relatório de Karas (2009), onde o mesmo descreve os cuidados de se aplicar esta técnica.

A Figura 11 representa a disposição do rejeito em pasta, produzido em um “Deep Cone”, acompanhando a produção da pasta, sendo possível observar a fase final da disposição através da torre de disposição, a qual armazena o material para posterior direcionamento. Além disso, ao observar de forma análoga a Figura 12, percebe-se de

forma mais clara, como o sistema ocorre efetivamente, no qual correlaciona-se a co-disposição do material. No entanto, é válido ressaltar que este processo é realizado apenas para granulometrias mais grosseiras. Em efeito de partículas mais finas, haveria etapas anteriores para adição dos agentes coagulantes e/ou floculantes visando a formação de partículas mais grosseiras no processo, facilitando assim a sedimentação e possível efeito de cimentação. Porém, em um sistema de disposição de pasta, existe uma taxa de mistura de material fino e grosso, em uma porcentagem máxima de 25% deste material com presença de finos, conforme o esquema apresentado por Baker & Hughes (2001) e Vietti & Dunn (2002).

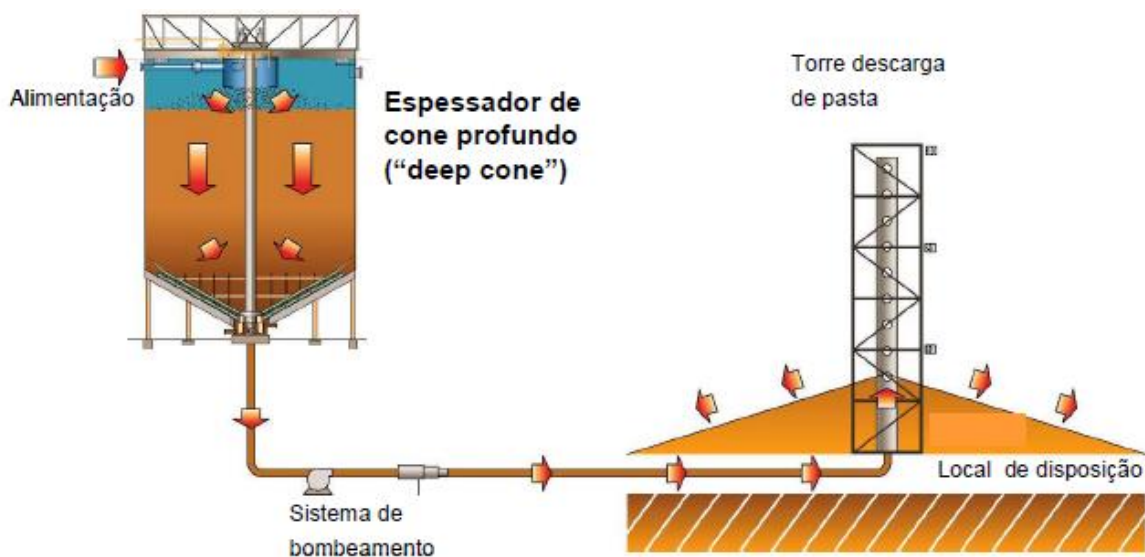


Figura 11: Sistema de produção de pasta (espessamento, bombeamento e descarga) para disposição superficial (Baker e Hughes, 2001).

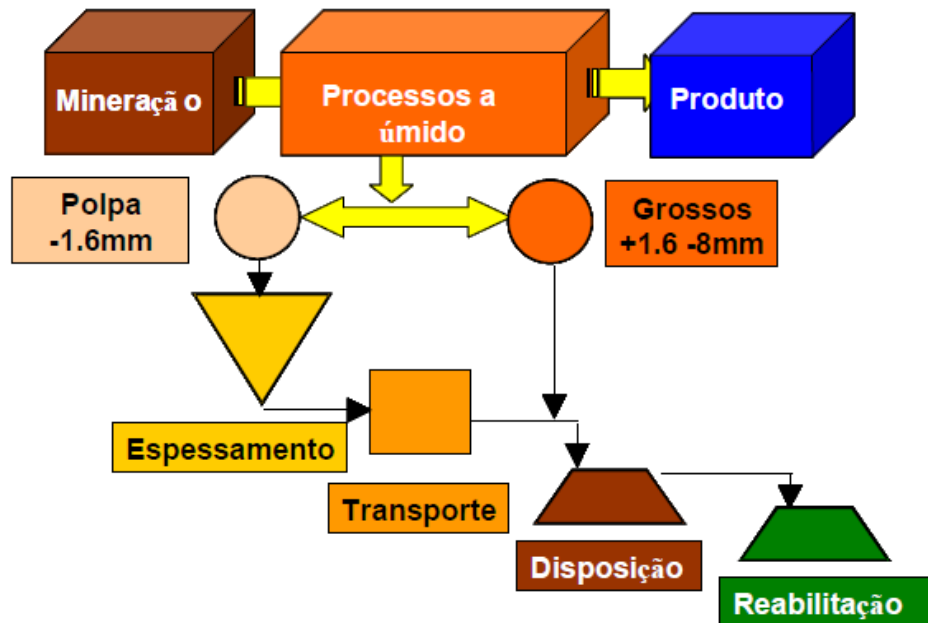


Figura 12: O conceito de co-disposição da pasta e rejeito grosso (Vietti e Dunn, 2002).

3.9.1. Disposição de rejeito em lavra à céu aberto

Segundo Brackebusch (2000), o preenchimento com pasta através de um fluido bombeável não newtoniano é composto por rejeitos de mina, reagentes e cimento, tendo em vista uma maior aderência da pasta na superfície impermeável. Durante o processo de preparação da pasta mineral existe a necessidade de eliminação de água do sistema utilizando métodos convencionais de espessamento ou mesmo filtragem.

A consistência desejada da pasta para disposição é semelhante ao concreto de “slump”, ou seja, de consistência média. Diante disto, o material passa a ser submetido a operação de transporte após o tratamento necessário no espessador, via minerodutos com o auxílio de bombas de deslocamento positivo, percorrendo grandes distâncias horizontais de 1km ou mais. Para que o método seja viável, é aconselhável que a mistura do cimento ocorra próximo ao final da tubulação, evitando deste modo perda de materiais e ineficiência diante do deslocamento.

Ao depositar o rejeito através desta funcionalidade, o mesmo apresentará como vantagem a redução de água do material, a economia da mão de obra e de materiais, a

redução no tamanho das bacias de rejeitos e a redução das perdas de material pela drenagem de mina (Araújo, 2004). Após a ocorrência de acidentes ocasionados por rupturas de barragens, o embasamento de projetos como este aumentaram. Além disso, através de incentivos governamentais tanto fiscais quanto econômicos, foram desenvolvidas novas abordagens enfatizando as características do empreendimento e de forma análoga as tecnologias para minimização dos problemas gerados (Gomes et al., 2003).

Ao avaliar as características da pasta, como as propriedades plásticas de Bingham, estas demonstram que as pastas minerais formam um ângulo de repouso que é característico quando são descarregadas em uma superfície plana ou inclinada, dependendo principalmente da forma em que a pasta será disposta. Tais propriedades podem ser avaliadas preliminarmente ao realizar o teste laboratorial de calha.

Através da bibliografia disponível por Brackebusch (2000), o ângulo de formação da superfície está diretamente relacionado com a consistência da pasta, compreendido entre 5 e 30% de inclinação. Para tanto, ao investigar os parâmetros necessários, foi constatado que o ângulo de formação da superfície apresenta como vantagens menores áreas e estruturas mais simples para a retenção da pasta.

Hernandez et al. (2005), ilustram na Figura 13 os possíveis ângulos de repouso e estruturas de retenção necessários para aplicação de uma pasta mineral em comparação com uma polpa de alta densidade, a qual geralmente é distribuída em barragens, necessitando de um tempo de cura maior que o processo da criação da pasta.

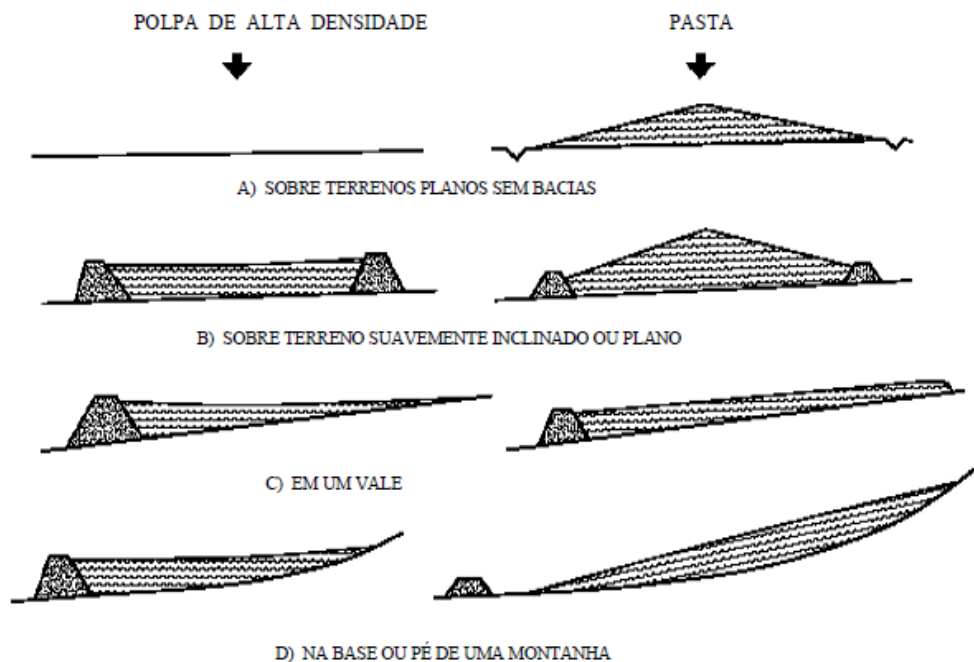


Figura 13: Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, em vários tipos de terrenos (Hernandez et al., 2005).

3.9.2 Disposição de rejeitos em lavra subterrânea

Segundo Johnson et al. (2005), atualmente além de ser amplamente aceito, é comum a utilização do método de preenchimento de uma mina subterrânea conhecido como “backfill”, apresentando uma boa reprodutividade na indústria mineral. Geralmente, esta metodologia é aplicada para subprodutos da mineração de carvão.

Ao relacionar tal reprodução de sistemas com o objetivo de deslocamento do rejeito por meio de pasta mineral, de acordo com Hernández (2005), este rejeito pode ser utilizado como preenchimento (“backfill”) na lavra subterrânea de duas formas distintas, sendo elas o formato “pastefill” e o “rockfill”. A diferença encontrada em ambos, está relacionada na disseminação de qual material, seria destinado para o preenchimento do local. O formato “pastefill” utiliza o rejeito proveniente do processamento mineral, no entanto, o formato “rockfill”, pode utilizar além do material advindo do processamento, a rocha estéril, tornando o processo desta forma, mais barato e com possibilidade de um resultado mais rápido, ao ser aplicado. Diante de maiores esclarecimentos, a pasta mineral

neste caso, integraria ao sistema “rockfill” como cimento em meio as rochas de granulometrias muito grosseiras, apresentando assim também, um preenchimento com maior aproveitamento do meio.

Em concordância com o disposto, Brackebusch (2000), utilizava analogamente um sistema de preenchimento hidráulico em uma mina subterrânea, apresentando como resultados, uma melhora significativa aos suportes do solo e teto da mina e de certa forma minimizando os custos operacionais ao passar a utilizar o “backfill”. Assim sendo, o sistema “backfill” apresenta como vantagens em comparação ao preenchimento hidráulico convencional, maiores resistências com menores adições de reagentes, maior versatilidade quanto a distribuição de tamanhos de partícula, maior densidade no “pastefill” dada sua porosidade mais reduzida. Além disso, apresenta ainda, maiores resistências confinadas, menores problemas gerados pela presença de lamas, o tempo de ciclo de lavra reduzido e as velocidades de fluxo são reduzidas devido a um menor número de paradas.

A única desvantagem deste processo como um todo é o alto custo de investimento inicial, o qual apresenta um custo maior que o utilizado para preenchimento hidráulico convencional e similar ao preenchimento com rocha (Brackebusch, 2000). Diante disto, torna-se importante a procura de novas inovações tecnológicas, com o objetivo de minimizar os custos de investimento e de operação.

Segundo Olcay apud Jung (2012), dentre os exemplos utilizados em mina subterrânea, encontram-se pelo sistema “backfill”, a mina subterrânea de Ag-Pb-Zn da BHP-Cannington, sendo pioneira nesta aplicação, desde 1997. Neste sistema o rejeito apresenta 60% de sólidos com um P80 entre 80 e 100 μm . Outras minas de particularidades similares são as minas de Getchell e Merkle, no entanto, em ambas, a aplicação do rejeito é diferente. As diferenças são encontradas na aplicação do método para se obter a pasta mineral. Na mina da BHP, a pasta é obtida através da pressão em vácuo, já na mina de Getchell são utilizados aditivos redutores de água para a produção da pasta permitindo o alcance maior de valores da resistência a compressão. Com relação a Merkle, utiliza-se também um aditivo ligante, no entanto, este aditivo, busca tratar a amostra in-situ do material já disposto.

3.10. Modelagem

De acordo com Ceciliano (2012), as principais indústrias que vêm se destacando através da excelência logística, tem modelado problemas, utilizando intensamente técnicas de pesquisa operacional como a simulação e a otimização. Através de tais operacionalidades é possível reduzir os custos operacionais e aumentar a competitividade, procurando através da modelagem descrever um sistema real a partir das restrições demandadas. Além disso, segundo Ceciliano apud Rodrigues (2012), para que um modelo lógico se torne um modelo operacional, algumas ações devem ser atendidas como a coleta dos dados amostrais, a modelagem estatística, a verificação e a validação do projeto. Conforme Ceciliano apud Pegden, Shannon & Sadowski (2012), este processo, tenta conduzir os experimentos com o propósito de entender o comportamento e avaliar as estratégias operacionais.

Dentre as estratégias operacionais, segundo Goldbarg (2000), uma das técnicas mais utilizadas na atualidade está diretamente relacionada a aplicação da modelagem pelo método “Simplex”, que através da formulação algorítmica, possibilita a solução de problemas complexos provenientes da otimização. Um exemplo deste tipo de processo, pode ser observado nas Figuras 14 e 15, sendo que na primeira existe a representação do esquema de simulação, o qual demanda mais etapas até a formulação do problema e o segundo corresponde a uma solução mais direta da situação desenvolvida.

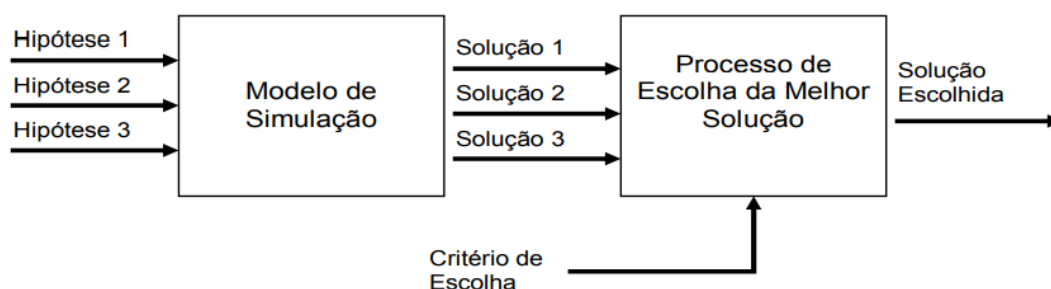


Figura 14: Modelo de simulação para a tomada de decisão (Ceciliano apud Andrade, 2012).

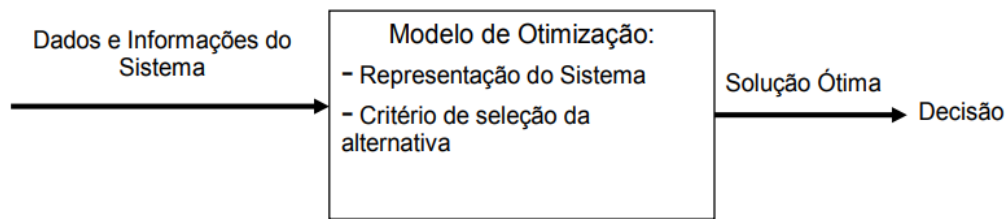


Figura 15: Modelagem do processo a partir da otimização (Ceciliano apud Andrade, 2012).

Dentre os modelos a serem analisados, certas verificações devem ser cuidadosamente manuseadas, evitando deste modo erros operacionais, dos quais envolvem a dinâmica e acuracidade do operador. De acordo com Azadivar (1999), estas verificações devem ser submetidas através de procedimentos que por meio de investigações trarão soluções de problemas com objetivos, únicos, múltiplos e não-paramétricos. Através da avaliação dos eventos submetidos a pesquisa, primeiramente observando os objetivos únicos, as análises podem ser pressupostas mediante ao gradiente baseado pelo método de busca, métodos estocásticos de aproximação, métodos de superfície de resposta, otimização de caminhos por amostragem e métodos heurísticos de busca. No entanto, na elaboração deste trabalho, o método de interesse é o método de heurística de busca, direcionado através de uma busca complexa por variáveis de decisão mediante restrições determinísticas ou estocásticas, evidenciando a possibilidade de ser elencado a outros modelos de simulação.

Com relação aos problemas de abordagem multiobjetivos, a simulação-otimização apresenta uma variedade de complexidades relacionados principalmente aos critérios abordados, conforme Teleb & Azadivar (1994). Tendo como importante análise, a aproximação multicritério ao avaliar justamente as respostas das funções estocásticas obtidas no desenvolvimento da análise, sendo considerável um modo alternativo de comparação dos vértices das respostas, observados através do algoritmo selecionado para aplicação do software.

Dentre os modelos para realização da simulação e otimização conforme as padronizações necessárias, são destacados três métodos principais de acordo com Ceciliano (2007), dentre eles o método de Vashi & Bienstock, o método de Vamanan e o método de Morito. Segundo Vashi & Bienstock (1995), dentre os inúmeros fatores que podem ser controlados, buscando uma melhor simulação-otimização, depara-se com o

tempo, que é destacado como um critério específico com possibilidade de ser mensurado e estatisticamente avaliado. Este parâmetro controlável, pode ser verificado através da Figura 16, como uma condição controlável, independente do sistema, tornando o modelo simulado mais aderente a proposta e seus resultados qualificados perante as variáveis investigadas.

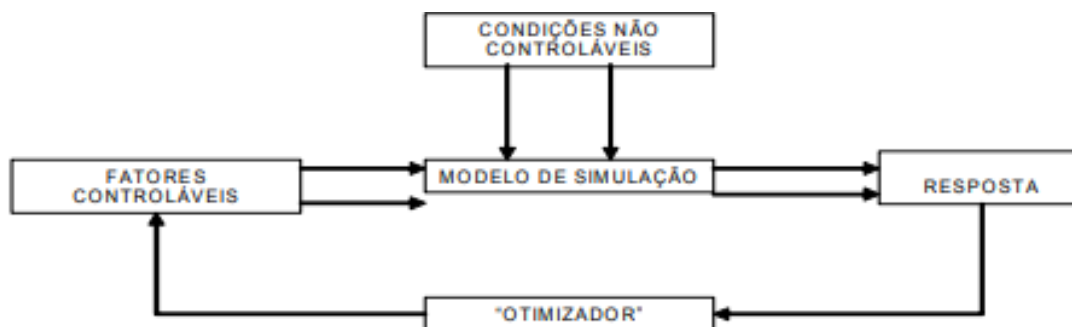


Figura 16: Representação esquemática das variáveis abordadas em uma simulação (Vashi & Bienstock, 1995).

Outros dois métodos muito conhecidos para simulação e otimização são os métodos de Vamanan e de Morito. Em ambos os métodos, busca-se aplicações de integração de mais de um programa, para alinhar os resultantes, tendo como representatividade, a análise sistemática. Para tanto, Vamanan (2002), em seu programa, buscou suprir as necessidades específicas ao entregar duas aplicações, dentre elas a programação linear com o software arena, que utiliza em sua simulação o SIMAN, o qual, escreve o próprio código durante a execução do programa. Já Morito (1999), busca além da simulação, realizar uma otimização através do Arena, avaliando os critérios de desempenhos necessários da amostra.

Ao avaliar, pelo menos 5 modelos, Ceciliano (2007), chegou a um fluxograma ideal determinando a estabilidade do projeto, sendo possível simular os dados necessários através do Arena, conforme Figura 17. Diante disto, é possível observar como estruturar um projeto partindo primeiramente do modelo de simulação, para só então, aplicar o modelo de otimização, e não o contrário. Além disso, é válido ressaltar que tal modelo pode vir a ser utilizado em outros softwares como no caso o AnsysFluent, com o objetivo de se obter o melhor modo de simulação e otimização os resultados projetados.

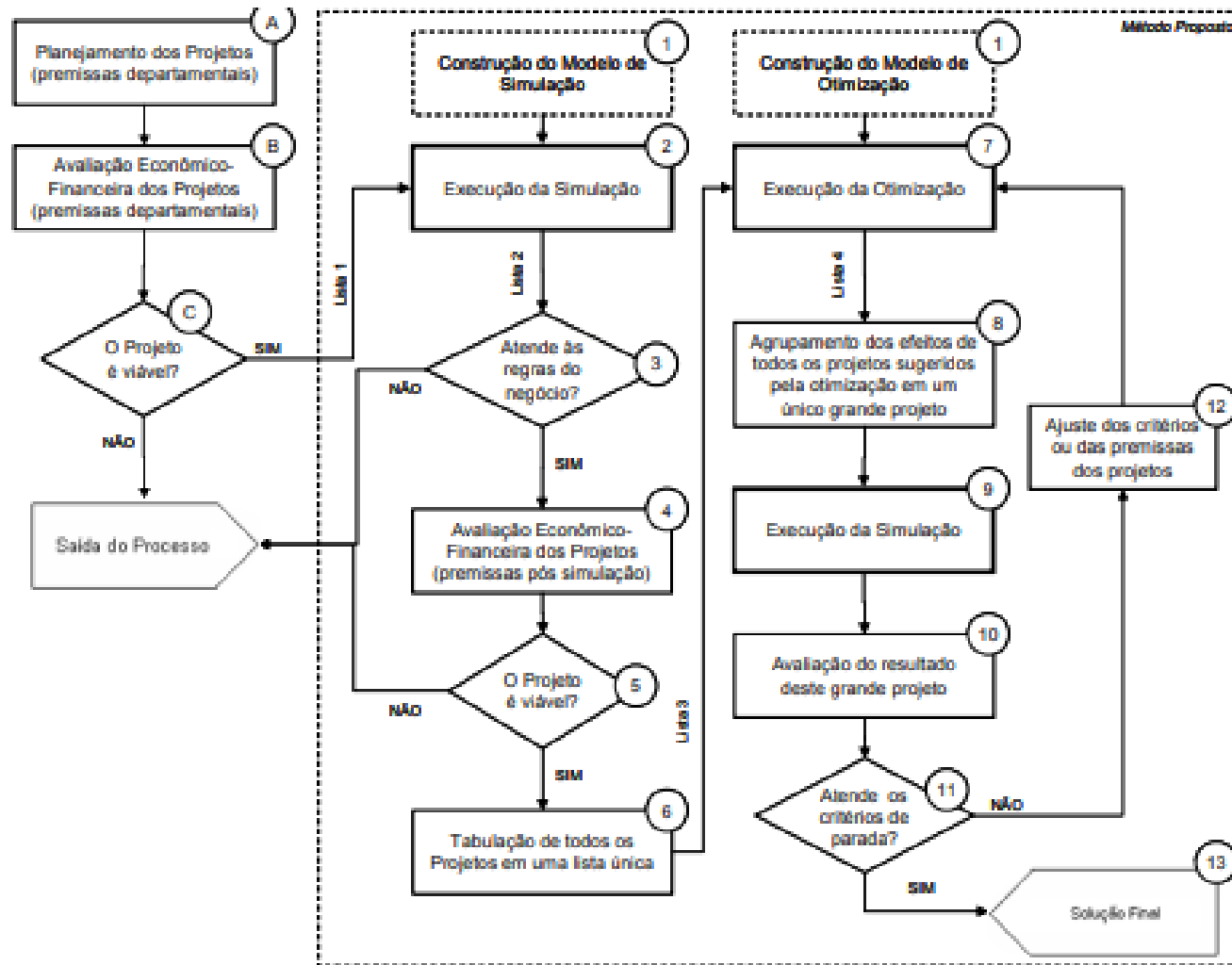


Figura 17: Modelo de Simulação-Otimização proposto por Ceciliano (2007).

3.10.1. Equações de massa e momento (euleriano-euleriano “k-e”)

O sistema de modelagem é bastante utilizado, visando através desta abordagem otimizar um projeto, o qual encontra-se com certa ociosidade, não atingindo a sua máxima produtividade e por consequência apresentando perdas em eficiência e em parâmetros operacionais. Uma abordagem muito utilizada são as deduções de simulações por meio de equacionamentos buscando uma maior previsibilidade do modelo, estas equações são desempenhadas principalmente pelo método de massa e momento, sendo discutidas no trabalho realizado por Goharrizi e Sharivar (2013), através de investigações dos parâmetros operacionais por meio de simulações e formulações matemáticas.

Dentre os parâmetros investigados por Goharrizi e Shahrivar (2013), encontram-se a probabilidade de descrição da quebra ou formação dos flocos durante o processo de floculação, antecedendo o processo de espessamento. O foco ao utilizar a modelagem neste respectivo trabalho foi disposto para que se possa principalmente maximizar o tamanho das partículas, facilitando a probabilidade de sedimentação das mesmas no espessador.

Além disso, o modelo consegue investigar os parâmetros operacionais do espessador. No entanto, os estudos realizados por diversos pesquisadores, eram diretamente relacionados à espessadores de lamas e rejeitos convencionais, o que permite um estudo análogo para pastas minerais aplicando está modelagem e adequando os parâmetros para o “deep cone”. Este método é aplicado diretamente a sistemas multifásicos como no caso da análise do tipo CFD.

3.10.2. Balanço populacional (PB)

Fedorova et al (2022), realizou uma análise pelo método do balanço populacional de plantas industriais visando principalmente aplicações online. Segundo a abordagem descrita pelo mesmo, ao realizar a análise de uma operação, buscando evitar erros

críticos ao desempenhar o trabalho, as investigações inerentes as pesquisas devem ser realizadas com cautela, sendo que, um exemplo clássico no qual ocorrem muitas incoerências devido a quantidade de parâmetros a serem investigados, são referentes ao espessamento de lamelas vermelhas. Neste processo, a automação e detalhamento das atividades, apresentam uma grande complexidade, devido principalmente a multi-conectividade dos parâmetros e do grande número de variáveis de saída. Deste modo, torna-se necessário para devida adequação do modelo, um sistema de modelagem mais moderno, sendo necessário levar em consideração certos efeitos como a floculação. Para que a abordagem PB fosse considerada, de acordo com Fedorova apud Smoluchowski e Hounlow & Spicer (2022), deve-se embasar a análise através do modelo de equilíbrio populacional, trazendo de certa forma consigo versões mais avançadas e atualizadas como apresentadas através da Equação 9.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-1} \beta_{ij} N_j - N_i \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{ij} N_j + \sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_{ij} S_j N_j - S_i N_i \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde N_i é o número do tamanho de partículas i na bomba, β_{ij} a probabilidade das partículas do tamanho i e j se juntarem e formarem flocos, S_i a probabilidade do decaimento da partícula e o $\Gamma_{i,j}$ a função de distribuição do decaimento das partículas.

De acordo com Gheshlaghi et al (2021), o balanço populacional é muito utilizado para descrever a agregação e dispersão das partículas. A abordagem utilizada na metodologia de modelagem para tal investigação é uma abordagem Euleriano-Euleriano, a qual é executada através do modelo de turbulência padrão descrevendo o escoamento da pasta sob condições estacionárias. De acordo com Gutenguer (2020), ao avaliar a abordagem mediante o modelo de escoamento, foram apurados os efeitos da velocidade e da altura no desempenho das lâminas do ancinho. Para tanto, buscando uma padronização dos fatores, Gutenguer (2020), realizou experimentos em cinco espessadores distintos, em escala piloto, verificando através dos testes simulados a possibilidade de haver através da pesquisa, resultados consideravelmente positivos

indicando melhoras operacionais, considerando principalmente a coleta dos rejeitos provenientes do concentrador mineral.

Além disso, é possível observar que o balanço populacional descreve matematicamente a cinética do crescimento e desagregação do agregado. Muitos autores apresentaram a aplicabilidade do PB para a floculação delimitando as condições operacionais. Para tanto, Gheshlaghi et al. (2020) apresentam resultados através de sua perspectiva acerca dos reagentes utilizados no desenvolvimento de seu projeto, aplicando corantes em seus testes, em um produto de pequena escala para que de forma visual pudesse observar o desenvolver do processo. Diante disto, foi possível estudar as velocidades no espessador juntamente com a adição de reagentes. Através do projeto foram relacionados pelos parâmetros operacionais com a abordagem Euleriano-Euleriano o modelo de fluxo de lama do espessador, considerando as melhores fases de interação por um modelo Lagrangiano, sendo utilizado em situações distintas em que os volumes das fases sólidas eram altos, dada a sua viabilidade.

Ademais, conforme Wang (2021), o equilíbrio populacional também pode ser utilizado utilizando como critério a correlação, avaliando as mudanças da distribuição do tamanho das partículas em relação ao tempo. Slwch (2021), seguindo a mesma lógica de modelagem da cinética de floculação, considerou através de três possíveis mecanismos a colisão das partículas, sendo elas a sedimentação diferencial, o movimento browniano e o cisalhamento do fluido.

De acordo com Federova et al (2022), o PB é bastante utilizado visando modelar a agregação, coagulação e floculação das partículas, como é o esperado ao final da validação. Tal complexidade, encontra-se principalmente nos mecanismos de colisões das partículas, relacionados a sedimentação diferencial e ao movimento browniano. Além disso, outras características apresentam certas influências dos resultados demandados como a taxa de dissipação da turbulência, a taxa de cisalhamento, a viscosidade da pasta, a concentração dos sólidos e a cinética de floculação (tipo de floculante, local de adição e dosagem).

Para tanto, segundo Federova et al (2022), o primeiro passo, anterior a criação do PB, é a criação da malha através do gerador de malhas do software (Ansys Meshing). Para tal criação é necessário o auxílio dos métodos de Sweep, Multizone e Inflation, sendo

que tais elementos são baseados predominantemente em hexaedros. Dentre os resultados presentes para tal mecanismo, são necessários como dados de entrada as taxas de fluxo de alimentação e floculante, a distribuição de tamanho de partícula da pasta de alimentação, a dosagem de floculante, o diâmetro interno da linha de alimentação e a viscosidade e densidade do licor.

3.10.3. Dinâmica de fluídos (CFD)

A modelagem pode ser representada por um outro sistema, que investiga principalmente a influência da dinâmica dos fluídos no espessamento. Para que o sistema ocorra de forma satisfatória o mesmo é mensurado através de um software desenvolvido principalmente com este intuito. Todo o processamento do espessamento pode ser desenvolvido no aplicativo CFD do software Ansys Fluent. De acordo com Gheshlaghi et al (2021) as equações de massa e momento buscando avaliar o máximo desempenho, são desenvolvidas através do pacote comercial Ansys Fluent 12.0 em um pacote suporte conhecido como CFD. Já o kernel numérico do pacote baseia-se em elementos (EBFVM) para tratar malhas não estruturadas generalizadas em coordenadas cartesianas. Visando viabilizar tal processo, o algoritmo SIMPLEC é o mais aconselhável, principalmente avaliando a relação de velocidade e pressão. Além disso, as condições de contorno na entrada e saída inferior do modelo devem ser consideradas para a taxa de fluxo de massa. Através desta perspectiva, consegue-se determinar o efeito da taxa de fluxo da alimentação, o efeito da porcentagem de sólidos de entrada e a distribuição do tempo de residência.

A dinâmica de fluídos, além de caracterizar o fluído a ser investigado pelo modelo do algoritmo Simplec, consegue também determinar as propriedades diferenciadoras. Wang et al (2021), utilizam um modelo de análise de dois fluídos, o TFM, o qual emprega as interações líquido-partícula e partícula-partícula. Através deste, Wang dispõe de variáveis possíveis para analisar pela dinâmica do fluído a velocidade cinética do espessador, atrelando características como o fluxo para o desaguamento da polpa mineral adensada.

Diante do trabalho a ser executado, para a operacionalização desta modelagem, devem ser determinadas características importantes do problema como a definição dos objetivos de modelagem, a criação da geometria e da malha do modelo, a configuração do solucionador e dos modelos físicos, o cálculo e monitoração da solução, o exame e salvamento dos resultados e a consideração de revisões nos parâmetros do modelo se necessário. Para que a simulação de fato ocorra, é necessário passar também por um segundo passo, conforme o manual do software, existe a necessidade de um modelador geométrico e um gerador de malha.

Para que tal modelo de simulação seja realizado com sucesso tais fatores devem ser seguidos

- Examinar a qualidade da malha;
- Analisar a malha e suas unidades;
- Empregar os modelos físicos apropriados;
- Definir o fator de sub relaxamento de energia entre 0,95 e 1;
- Usar gradientes baseados em nós com malhas tetraédricas não estruturadas.
- Monitorar a convergência com o histórico de resíduos;
- Executar a simulação CFD usando discretização de segunda ordem;
- Monitorar os calores variáveis da solução;
- Verificar a satisfação das propriedades;
- Verificar a dependência da malha
- Verificar ao final se a solução faz sentido.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A principal ideia do modelamento e controle preditivo encontra-se em fazer o controle dos espessadores de pasta através da adição de floculantes e coagulantes, pretendendo deste modo quantificar o fluxo de fluído (polpa), mantendo sua constância e otimizando os dados em um sistema computacional. Através desta proposta, torna-se possível uma melhor quantificação dos dados, através da dinâmica dos fluídos. Diante disto, a simulação e otimização provenientes da execução desta pesquisa são aderentes a utilização do “Ansys Fluent 19.0” versão atualizada (estudante), possibilitando através de uma versão atualizada, sanar problemas recorrentes de versões anteriores.

Para tanto, far-se-á necessário a utilização e desenvolvimento do balanço populacional para melhor classificação dos reagentes com a intenção de obter resultados com qualidade superior dos produtos a serem empregados ao espessador, obtendo ao final do processo, uma polpa mais espessa, apresentando facilidade na circulação do bombeamento positivo da pasta.

O processo desempenhado, foi auxiliado por artifícios computacionais, disponibilizando uma maior flexibilização dos recursos e maior discernimento de como manusear os produtos previamente caracterizados, para obtenção e aplicação eficiente dos dados. Para tanto, estes dados, foram coletados via catálogos de equipamentos e trabalhos anteriores a este como os disponibilizados por Olcay (2012) e pelo manual dos equipamentos de Deep Cone pela WesTech.

O Software suporte para modelamento é o Ansys Fluent Student 19.0, o qual através dos parâmetros utilizados, busca simular os dados para uma operação padrão. Para tanto, é válido observar as especificações do equipamento, sendo que este é considerado um software de última geração para modelagens de fluxos de fluídos, principalmente para análise de reações químicas e geometrias complexas.

Para realização deste trabalho, foram utilizados dados laboratoriais desenvolvida por Olcay (2008) e Olcay (2012), o qual através de sua pesquisa, obteve dados ótimos e resoluções a serem investigadas da reologia mineral. O minério utilizado em questão foi o rejeito do minério de manganês da Vale fertilizantes. Durante a execução do trabalho, toda a simulação e otimização, foi cuidadosamente investigada, buscando definir os

melhores parâmetros encontrados pelo autor, dos quais tornariam um processo de espessamento em pasta viável e empregando parâmetros para otimizar o sistema.

Neste trabalho buscou-se primeiramente realizar uma simulação por balanço populacional, visando principalmente a floculação. Para análise das demais variáveis, quanto ao fluxo de partículas investigado, foram utilizados complementarmente o método do tipo CFD, investigando principalmente a dinâmica do fluido em discussão.

4.1. Escoamentos multifásicos

O escoamento multifásico traz consigo uma avaliação mais tecnológica, analisando principalmente duas fases distintas de um mesmo fluido. Tem-se como exemplo as ocorrências de interfaces múltiplas entre o gás-líquido ou ainda líquido-líquido, os fluxos gás sólido e os fluxos sólido-líquido. Este último é de grande importância para investigação do trabalho, sendo que através dele consegue-se analisar a natureza dos fluxos, principalmente ao analisar os reagentes floculantes a serem inseridos buscando uma partícula maior e mais adequada a sedimentação.

Ao trabalhar na abordagem do modelo multifásico deve-se escolher atentamente os parâmetros que mais se adequam a seção a ser trabalhada, que no caso é a abordagem Euler-Euler, o qual trabalha com diferentes fases de forma contínua, observando principalmente o conceito de fração de volume entre fases. Tais frações são consideradas na continuidade do tempo e espaço igual a 1, sendo aderida principalmente a conservação para cada fase derivada.

Dentre as diretrizes selecionadas para tal análise, o modelo mais aderente para ser analisado foi o modelo de mistura. Este modelo, é projetado por duas ou mais fases, sendo que através deste, torna-se possível realizar as adaptações da equação de momento de mistura além de mensurar as velocidades relativas de cada fase. Através deste, é possível analisar o fluxo de sedimentação e de misturas que incluem fluxos carregados de partículas com baixo carregamento. Além disso, pode ser utilizado para modelar escoamentos multifásicos homogêneos sem a necessidade das velocidades.

De acordo com Crowe et al (1998), alguns parâmetros que auxiliam na identificação do modelo multifásico é o carregamento particulado e o número de Stokes. É válido ressaltar que o carregamento particulado apresenta muito impacto nas interações decorrentes da fase. Além disso, a carga particulada é definida pela razão entre a densidade de massa da fase dispersa (d) pela fase transportada (c) como observado na Equação 10.

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde β é o carregamento particulado, ρ é a densidade do material e α como a fração de volume na fase. Afim, de ser determinar o efeito da partícula carregada, determina-se a razão da densidade do material observada na equação 11 onde, deve-se considerar maior que 1000 para fluxos sólido-gás, cerca de 1 para fluxos sólido-líquido e menor que 0,001 para fluxos de líquido-gás.

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde γ é representada como a razão de densidade do material. Através dos parâmetros observados, estima-se a distância média entre as partículas como observado na Equação 12. Sendo que informações sobre estes parâmetros são importantes pois a partir destes torna-se possível determinar o melhor tratamento para a fase dispersa.

$$\frac{L}{d_d} = \left(\frac{\pi}{6} \frac{1+k}{k} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$k = \frac{\beta}{\gamma} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde K uma constante correspondente pelo carregamento do material particulado e a razão das densidades aplicadas ao sistema e $\frac{L}{d_d}$ representa o comprimento característico pelo espaço entre partículas.

Ao avaliar a carga da partícula, os seus graus de interação entre as fases podem ser subdivididos em três classes distintas, dependendo do tipo de carga a ser aderido. Com relação a cargas muito baixas, o acoplamento entre as fases geralmente é unidirecional, sendo influenciado por exemplo pelo arraste do fluido, sendo o modelo de mistura o mais recomendado. No entanto, quando o carregamento é intermediário, torna-se possível analisar as partículas por acoplamento bidirecional. Com relação a carregamento alto, existe acoplamento entre duas vias mais pressão e tensão de viscosidade entre as partículas, sendo tratado devidamente somente pelo modelo Euleriano.

Para que a seleção do melhor modelo para aplicação seja executada, uma forma de selecionar o melhor padrão é decorrente do modelo de Stokes (St), sendo que este é considerado uma variável de resposta da partícula em virtude do tempo de resposta do sistema, como observado na Equação 14.

$$St = \frac{T_d}{t_s} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde, T_d pode ser desenvolvido como a relação entre a densidade (ρ) e a viscosidade (μ) trabalhada na Equação 15 e o t_s como o comprimento característico de pesquisa dividido pela velocidade característica sob investigação, como na Equação 16.

$$T_d = \frac{\rho d^2}{18 \mu_c} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$t_s = \frac{L_s}{V_s} \quad (\text{Eq. 16})$$

Ao se tratar de um modelo multifásico, o tempo de segunda ordem é adaptado para todas as equações de transporte, podendo ser averiguada na Equação 17.

$$\frac{\partial(\alpha\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\vec{V}\phi) = \nabla \cdot \bar{\tau} + S_\phi \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde ϕ é uma mistura ou uma variável de fase, α é a fração de volume da fase, ρ é a densidade da fase da mistura, \vec{V} é a mistura ou velocidade da fase, S_ϕ é o termo de difusão, $\bar{\tau}$ é o termo fonte. A equação de transporte, pode ser discretizada como observado na Equação 18.

$$A_p\phi_p = \sum A_n b\phi_n b + S_\phi \quad (\text{Eq. 18})$$

O modelo multifásico Euleriano permite a modelagem de qualquer fase. Este modelo é utilizado em limitados números de fases secundárias pelos requisitos de memória do comportamento de convergência. No entanto é válido ressaltar que este modelo não distingue entre os fluxos multifásicos, fluído-fluído e fluído- sólido. Ao avaliar o modelo Euleriano, a primeira característica a ser avaliada conforme Bowen (1976) e Anderson & Jackson (1967), é o volume do fluxo, o qual pode ser interpretado pela abordagem adotada na teoria de mistura onde o volume da fase é definido pela Equação 19, devendo levar em consideração as Equações 20 e 21 como forma de simplificar a expressão. Onde ρ é a densidade na fase q, α_q como a fração de volume da fase, V_q o volume da fase q.

$$V_q = \int_v \alpha_q dV \quad (\text{Eq. 19})$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (\text{Eq. 20})$$

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (\text{Eq. 21})$$

Com o intuito de analisar os termos a partir da continuidade do fluxo analisado, é possível obter a fração volumétrica para cada fase como observado na equação 22. Dada a continuidade equacional, o resultado desta fração soma um, permitindo deste modo o cálculo da fração primária do fluido.

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (\text{Eq. 22})$$

Onde ρ_{rq} é a densidade de referência da fase, t é parte da derivada em referência ao tempo de manuseio, α_q como a fração de volume da fase, \vec{v}_q como a velocidade da fase, \dot{m}_{pq} como a transferência de massa da fase p para q e \dot{m}_{qp} como a transferência de massa da fase q para p .

No entanto, a fórmula anterior aplicada é utilizada para análise líquido-líquido, e para que a eficácia do processo seja mantida, esta deve ser alterada, mediante integração para análise do fluido com sólido. O software Ansys Fluent, possui uma gama de equacionamentos para tratar esta possibilidade, dentre as quais são abordadas nos trabalhos de Alder&Wainwright (1960), Chapman&Cowling (1990), Ding&Gidaspow (1990), Gidaspow et al. (1992), Lebowitz (1964), Lun et al. (1984), Ogawa et al. (1980), Syamlal et al. (1993)]. Tais autores realizaram o trabalho visando analisar um modelo granular descrevendo um fluxo de mistura sólido-líquido. A conservação do momento para as fases sólidas é representada na Equação 23.

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla_{ps} + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{i=1}^N (K_{is}(\vec{v}_i \vec{v}_s) + (\dot{m}_{is} \vec{v}_{is} - \dot{m}_{si} \vec{v}_{si}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s})) \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde p_s é a pressão dos sólidos, $K_{ls} = K_{sl}$ é o coeficiente de troca de momento entre ls a fase fluida para sólida e sl a fase sólida para a fluida, N é o número total de fases, \vec{F}_S , $\vec{F}_{lift,s}$, $\vec{F}_{vm,s}$, são referentes a sequencialmente, a força externa ao corpo, a força de elevação, e a força de massa virtual entre as fases.

Para que o esquema de modelamento seja efetivado e solucionado, leva-se em conta um solucionador baseado em densidade, o qual resolve as equações de continuidade, momento, energia e transporte de espécies simultâneas. Diante disto, a partir da Figura 18, pode-se ver em um fluxograma a forma esquemática de trabalho, utilizando tal parâmetro como quesito decisório.

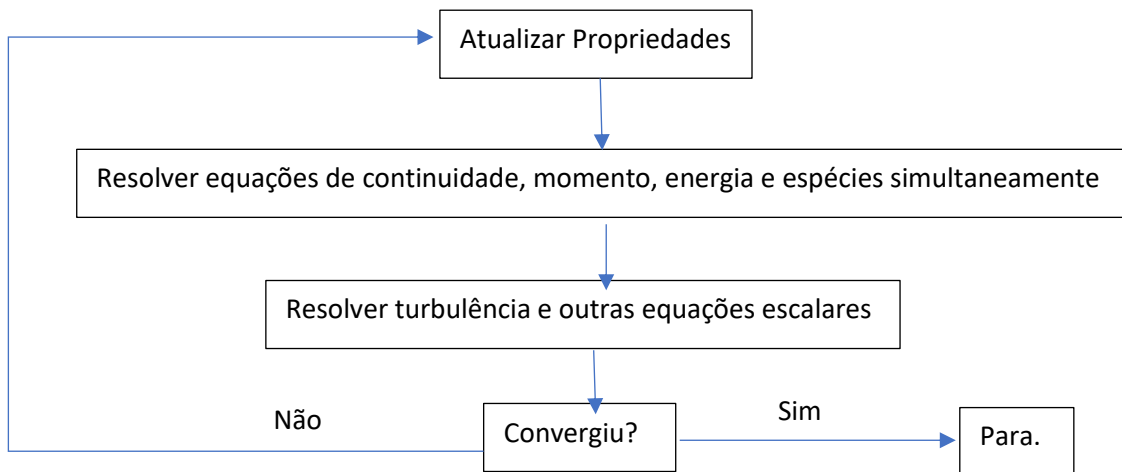


Figura 18: Visão geral das resoluções baseadas na densidade

Para que ocorra uma análise ideal, torna-se necessário o entendimento de como será proporcionada a expertise. Para tanto, diante do software, as variáveis serão discretizadas para análise CFD diante da análise de um volume de controle, o qual converterá uma equação geral de transporte escalar em uma equação algébrica. Através da lei de conservação das massas, integra-se o volume de controle, sendo neste caso considerado a equação de conservação instável para o transporte de uma quantidade escalar Φ . Tal integração pode ser verificada através da Equação 24.

$$\int_V \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} dV + \oint \rho\varphi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla\varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde, ρ é a densidade, \vec{v} é o vetor velocidade (no caso em 2D), \vec{A} é o vetor da área de superfície, Γ_φ é o coeficiente de difusão. $\nabla\varphi$ é o gradiente de φ , e S_φ é a fonte de φ por unidade de volume. Através da discretização do equacionamento anterior, é possível obter a Equação 25, onde, obtém-se uma fórmula geral envolvendo o número de faces da célula, o fluxo de massa entre outras variáveis.

$$\frac{\partial\rho\varphi}{\partial t} V + \sum_f^{Nfaces} \rho_f \vec{v}_f \varphi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{Nfaces} \Gamma_\varphi \nabla\varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde, $Nfaces$ é o número de faces envolvendo a célula, φ_f é o valor de φ convecção através da face f , $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ é o fluxo de massa através da face, \vec{A}_f é a área da face em 2D, $\nabla\varphi_f$ é o gradiente e V é o volume celular.

Ao solucionar os parâmetros uma série de observações devem ser aderidas. Primeiramente, soluciona-se os valores de um sistema linear trabalhando com as variáveis discretizadas como observado anteriormente. Diante disto, como o número de vizinhos para cada partícula depende da topologia da malha, deve-se trabalhar cautelosamente com a malha trabalhando pelo solver do sistema linear usando um solucionador de equações lineares implícitas (Gauss-Seidel) em conjunto com o método de multigride algébrico (AMG).

No entanto, anteriormente a análise do método multigride, torna-se importante entender mais sobre o número de mach, o qual corresponde a razão entre a velocidade de deslocamento do objeto em meio fluído e a velocidade das ondas sonoras do meio. O mesmo é definido por muitos autores como uma medida adimensional de velocidade.

Em posse dos dados anteriores, e do número mach, torna-se possível administrar as equações governantes para um fluido, mesmo este material apresentando um componente único, pode ser expresso como apresentado pela Equação 26. Através desta equação, existe a possibilidade de analisar o volume de controle arbitrário do fluido representado como V , em função da área diferencial da superfície como dA .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV \quad (\text{Eq. 26})$$

Além disso, os vetores W , F e G , podem ser definidos p conforme o esquema previamente proposto pela Equações 27 e 28, onde o vetor H possui termos de origem, como forças e fontes de energia. Estas equações são determinadas por Navier-Stokes, das quais apresentam como um critério intrínseco os números de Mach. Estes números devem ser baixos, para as equações administradas, principalmente devido a disparidade entre a velocidade do fluido e a velocidade acústica.

$$E = H - \frac{p}{\rho} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + \rho \hat{i} \\ \rho v v + \rho \hat{j} \\ \rho v w + \rho \hat{k} \\ \rho v E + \rho v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_i + q \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 28})$$

Onde, ρ , v , E e p são a densidade, a velocidade, a energia total por unidade de massa e a pressão do fluido, respectivamente. τ é o tensor de tensão viscosa e q é o fluxo de calor. A energia total E está relacionada com a entalpia total H como observado na equação 30, no qual o H é representado pela equação 28.

$$H = h + \frac{|v|^2}{2} \quad (\text{Eq. 28})$$

Com o intuito de se obter a relação das variáveis em virtude do tempo, necessita-se trabalhar a malha em um pré-condicionamento, no qual o tempo modifica o termo derivado, multiplicando a equação 27 por uma matriz condicionada. Outra perspectiva que deve ser levada em consideração são as interações dos fluxos convectivos, onde foi escolhido como método, o melhor presente na plataforma, de acordo com Roe (1986). Segundo este, esta abordagem oferece um equacionamento que reconhece o vetor fluxo contendo informações relevantes que se propagam no domínio com a velocidade e direção de acordo com os autovalores do sistema.

Para tanto, o melhor esquema para análise dos fluxos convectivos foi realizado pelo esquema AUSM+ (advection upstream splitting method), o qual procura calcular um número de Mach de interface de célula com base nas velocidades características das células vizinhas. Dentre as propriedades desejáveis, este esquema fornece uma resolução exata de descontinuidades de contato e choque, preserva a positividade das grandezas escalares e é livre de oscilações em choques estacionários e em movimento.

4.2. Balanço populacional

Outro fator que foi trabalhado nesta dissertação é a análise do fluido acerca do balanço populacional observando principalmente como fase secundária a distribuição de tamanho, sendo possível assim avaliar o conjunto de transporte em um sistema multifásico. Através do balanço populacional, é possível observar a aderência de diversos processos evolutivos, os quais podem ser combinados em diferentes fenômenos de nucleação, crescimento, dispersão, dissolução, agregação e quebra produzindo a dispersão. Através do software utilizado, existe a possibilidade de trabalho em três métodos distintos de equilíbrio populacional, dentre eles o equilíbrio populacional discretizado, o método padrão de momentos e o método de quadratura de momentos.

Para tanto, através da equação 29, pode-se observar o número total de partículas em um sistema, a partir de uma análise de volume infinitesimal. Sendo que está averiguação pode ser analisada quanto a densidade numérica média no espaço físico diante da equação 30, obtendo, por conseguinte, a fração volumétrica total de todas as partículas pela equação 31.

$$\int_{\Omega_\varphi} \int_{\Omega_z} n dV_{\vec{x}} dV_\varphi \quad (\text{Eq. 29})$$

$$N(\vec{x}, t) = \int_{\Omega_\varphi} n dV_\varphi \quad (\text{Eq. 30})$$

$$\alpha(\vec{x}, t) = \int_{\Omega_\varphi} n V(\varphi) dV_\varphi \quad (\text{Eq. 31})$$

Onde V_φ é o volume de uma partícula no estado φ .

Para que as equações de continuidade demonstrem confiabilidade ao ser operadas, as mesmas, devem abordar de forma coerente os padrões definidos pelo balanço populacional. Para tanto, a continuidade da operação deve ser observada, quanto a agregação e desagregação das partículas, podendo ser demonstrado esquematicamente em através de funções matemáticas, demonstrando em que ponto da equação, inicia-se a agregação, os termos para que ocorra a quebra e até onde este parâmetro será influenciado. Para que esta investigação, torna-se mais apresentável, o termo principal das equações de balanço populacional, podem ser observadas através das Equações 29, 30 e 31. No entanto, demonstrando cautela na observação do desenvolvimento das equações, formulando um sistema completo, destinado as reações do espessador, torna-se evidente o funcionamento das equações, através das Equações 32 e 33, das quais são demarcadas, organizando de forma visual, clara e sucinta, o que cada parte do equacionamento é correspondente ao utilizar o PB, na organização da simulação.

$$\frac{\partial}{\partial t} [n(V, t)] + \nabla \cdot [\bar{u}n(V, t)] + \nabla_V \cdot [G_V n(V, t)] = \frac{1}{2} \int_0^V a(V - V', V') n(V - V', t) n(V', t) dV' - \int_0^\infty a(V, V') n(V, t) n(V', t) dV' + \int_{\Omega_V} p g(V') \beta(V|V') n(V', t) dV' - g(V) n(V, t) \quad (\text{Eq. 32})$$

Termo de Crescimento

Início Equação de Agregação

Equação Função de Quebra

Início da Quebra

Término da Quebra

$$n(V, t = 0) = n_V; n(V = 0, t) G_V = \dot{n}_0 \quad (\text{Eq. 33})$$

Uma das grandes dificuldades encontrada em um balanço populacional é relativo a equação de quebra, onde se torna necessário, um desenvolvimento de artifícios, para trabalhar a inversão deste parâmetro, visando avaliar em um sistema de formação de pasta mineral, a agregação e floculação das partículas. Através da equação 32, existem duas possibilidades para se obter a pasta mineral, sendo necessário no tratamento mineral, avaliar primeiramente se ao trabalhar com esta fórmula, existe alguma possibilidade de no meio de um fluido com certa turbulência, o termo de aumento do crescimento dos grãos, seja proporcionalmente maior, do que os valores presentes na função de quebra apresentadas na mesma equação. Havendo ainda também a possibilidade, da inversão deste termo equacional, buscando avaliar somente a agregação das partículas no sistema. No entanto, a primeira relação, é a mais factível com as ocorrências num circuito operacional, sendo necessário, trabalhar no espessador um fluxo de fluido em que sua turbulência, não vá interferir negativamente na formação dos grãos, dificultando a sedimentação dos grãos. Este equacionamento, é possível verificar a partir, do primeiro setor encontrado no espessador, onde ocorre esta agregação dos grãos, inserindo estes grãos em um segundo momento dentro do próprio espessador, com menor probabilidade de quebra de seus grãos.

Para consolidar o esperado, o método de agregação depende exclusivamente da nucleação das partículas expressado como $a(V, V')$. Este núcleo de agregação apresenta como unidade m^3/s , onde o produto é definido em duas quantidades, sendo o primeiro a frequência de colisões entre partículas e o segundo como a eficiência de agregação dos mesmos. A taxa de agregação das partículas é dada pela equação 34. Já a taxa de desagregação é dada pela equação 35, sendo necessário o menor possível deste, visando um sistema mais eficiente.

$$B_{ag} = \frac{1}{2} \int_0^V a(V - V', V') n(V - V') n(V') dV' \quad (\text{Eq. 34})$$

$$D_{ag} = \int_0^\infty a(V, V') n(V) n(V') dV' \quad (\text{Eq. 35})$$

Diante do pressuposto, existe uma série de Kernels de agregação a partir da qual podem ser trabalhados os modelos, dentre eles o constante, o modelo Luo, o modelo molecular livre, o modelo turbulento e o modelo definido pelo usuário, sendo necessário a escolha do melhor Kernel visando uma agregação mais forte, tendo em vista a necessidade de flocos mais estáveis para sedimentação efetiva e formação da pasta.

Além disto, existem dois métodos de modelamentos dos quais são encontrados, os modelos utilizados pelo método discreto e pelo método QMOM, sendo que este último é uma versão mais atualizada e supre as necessidades que o outro método não apresenta. Portanto, é indicado a utilização deste. Este método, mostra que o método requer um número relativamente pequeno de equações escalares para rastrear os momentos da população com menor taxa de erros.

Este método utiliza como método numérico a Equação 36, onde $f(L)$ é um polinômio de ordem N , sendo que quanto mais próximo $f(L)$ estiver do polinômio mais próximo será o resultado.

$$\int_0^{\infty} f(L)n(L)dL \approx \sum_{i=1}^N f(L_i)w_i \quad (\text{Eq. 36})$$

4.3. Dados utilizados na aplicação do modelo

Para que a simulação se tornasse possível, foram previamente analisados valores obtidos na bibliografia, sendo consideradas fórmulas-padrão para demais cálculos realizados, obtendo as especificações do espessador. Estes dados podem ser verificados nas Tabelas de 2 e 3, onde são indicados os parâmetros ótimos para obtenção da pasta mineral. Estes valores serão utilizados para a realização da simulação do espessamento em pasta, e posteriormente a isso, será disponibilizada uma otimização de todo o sistema, demonstrando desta forma, um modelo simulado e otimizado (melhorado), para a disposição do rejeito do minério de manganês em pasta.

Tabela 2: Parâmetros ótimos obtidos através da dissertação desenvolvida por Olcay (2008).

dm	2.61	g/cm ³				
Vs	0.8313	cm/s				
Turbidez	11.6	NTU				
T	23.4	graus				
pH	8.7					
floculante catiônico Bufloc 5158 c3						
Tempo de operação	180	min				
Dosagem	80	g/t				
pás	5	RPM				
Calha	%s	71 %	Altura 1	4.8	cm	
	inclinação	6 %	Altura 2	0.9	cm	
	largura	63.7	cm	Ângulo de repouso	3.5	graus
Viscosidade	Vw	30	rpm			
	%s	70	%			
	Viscosidade	2000	cp	entre	20	60
Yield Stress	%s	70	%			
	Yield Stress	200	pa			
	R ²	0.99	y=9*(10 ⁻⁵)*e ^(0,2074x)			

Tabela 3: Dados obtidos através de manuais de espessadores tipo Deep Cone, e calculados conforme a metodologia de Coe Clevenger.

Dados Industriais	Vp	2345.785	m ³ /h	Vp	197.8981	Coe Clevenger		
	ds	2.61	g/cm ³	ds	2.61	Área unitária	0.116173	m ² /t/h
	dp	1.065741	g/cm ³	dp	1.779262	Área	34.85178	m ²
	da	1	g/cm ³	da	1	Diâmetro	6.661423	m
	%sa	10	%	%suf	71	Diâmetro e altura 1:1		
	mp	2500	t/h	ms	250	H	6.661423	
	ms	250	t/h	ma	102.1127			
	ma	2250	t/h	mp	352.1127			
	Da	9		Dp	0.408451			
	Vs	95.78544	m ³ /h	Vs	95.78544			

4.4. Abordagem para aplicação do software

Para que a aplicação do software fosse bem-sucedida, foi necessário estabelecer os critérios a serem seguidos previamente, visando sanar as necessidades e parâmetros a serem trabalhados. Para tanto, foram previamente estabelecidos o algoritmo a ser utilizado para a simulação e otimização do software e qual metodologia a ser abordada para obter a aplicação. Foi estabelecido que para realizar a simulação, o método estabelecido era utilizar o volume de fluídos, apresentando desta forma em destaque o comportamento da polpa e pasta durante seu fluxo.

Após isso, foi estabelecido os parâmetros necessários para investigação, sendo possível alterar neste termo, a temperatura, viscosidade e pressão. Ao realizar a otimização, optou-se por realizar um modelo mais sofisticado, abrangendo mais variáveis de investigação, que seria o método Euleriano, sendo possível atuar através deste, na perspectiva do balanço populacional, controlando a agregação das partículas, a viscosidade, temperatura, velocidade de sedimentação e pressão. A abordagem desempenhada pode ser verificada na Figura 19, representando a análise de uma forma geral.

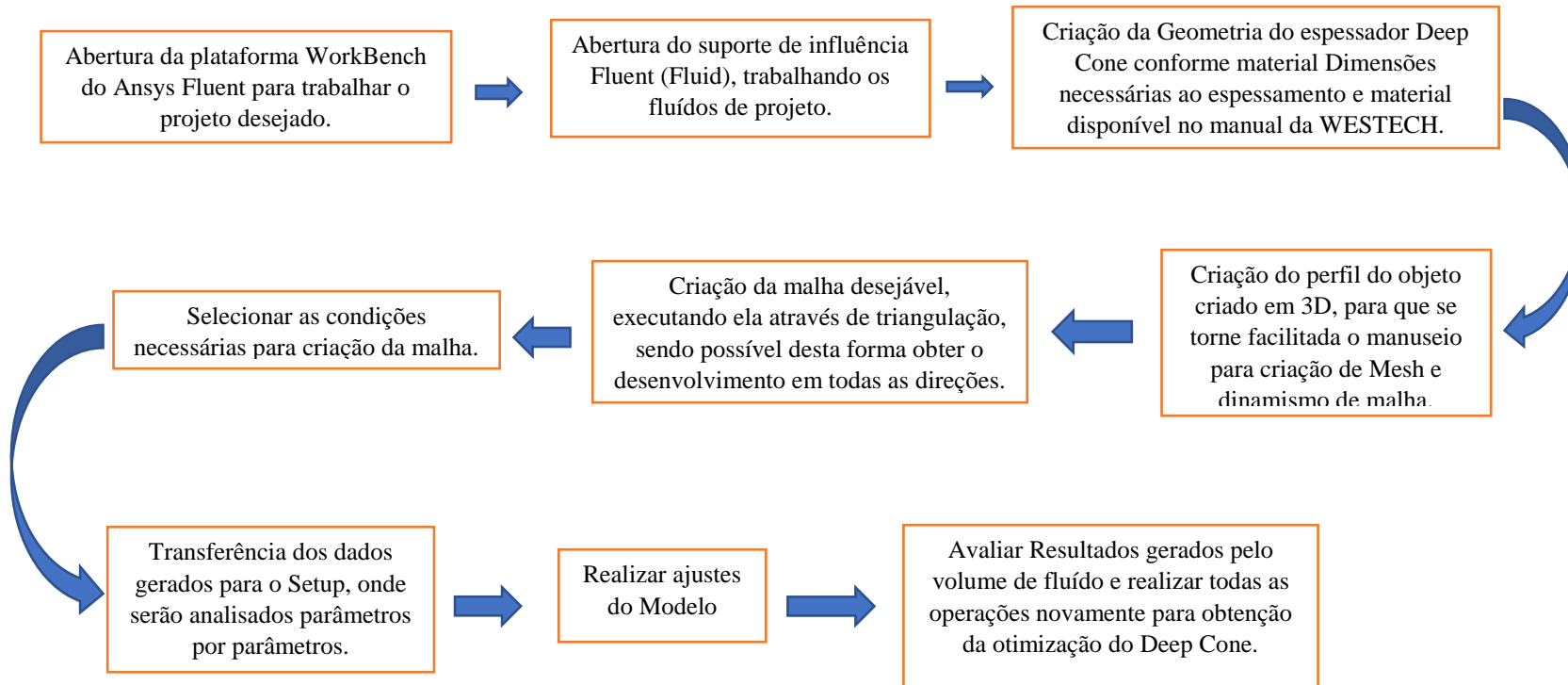


Figura 19: Fluxograma de Resumo das atividades executadas no software.

4.4.1. Desenvolvimento do fluxograma

Durante o fluo de trabalho, a primeira parte é como dito no fluxograma da Figura 20, é realizar a formatação e formação da geometria da malha a ser desenvolvida. Para tanto, se escolhe um plano, onde será plotada a configuração de pesquisa do espessador, definindo suas dimensões. O plano de melhor desenvolvimento a ser dimensionado é o plano XY. Para tal, foram seguidas algumas observações do Catálogo do equipamento, onde o Deep Cone apresenta um diâmetro igual à altura, como referência 1:1.

Para que fosse possível observar a formação exata do espessador, o mesmo é submetido a revolução de plano, obtendo deste modo na configuração o objeto em formação tridimensional. No entanto, como existem três áreas distintas para se trabalhar no espessador, foram necessários realizar três revoluções, para obter os ajustes ideais para o equipamento. A primeira revolução realizada indica a geometria externa do equipamento, a segunda indicando a disposição do fluxo de polpa-pasta e a terceira indicando a área de início de formação da pasta até a base final referente ao fluxo de saída. Para que se torne mais eficaz a desenvoltura do software, estas áreas foram definidas como Fluxo de massa de entrada (Polpa) e Fluxo de massa de saída (Pasta).

Ao final da delimitação da superfície, através da geometria catalogada do equipamento, torna-se viável analisar o modelo de forma tridimensionalmente, sendo possível deste modo, observar as falhas presentes e melhorar, por conseguinte o modelo. No entanto, como é desejado observar o comportamento do fluído aderente ao sistema, encontra-se na praticidade do modelo, poder observar a formatação final do mesmo, bidimensionalmente. Para tanto, algumas ferramentas devem ser acionadas, dentre elas, utiliza-se o “Boolean”, o qual permite observar o funcionamento do fluído em cada etapa do sistema, em cada área do espessador. Após o uso desta ferramenta, para que se possa observar o funcionamento dos mecanismos, de forma mais eficaz, ativa-se o utensilio denominado “Slice”, ferramenta a qual permite observar o trabalho executado em fatias ou ainda em duas dimensões. Estas ferramentas, podem ser observadas nas Figuras 20, 21 e 22, sendo que na Figura 20, observa-se as ferramentas necessárias para a formatação da geometria do modelo, através da Figura 21, ao modelo formado tridimensionalmente,

sendo base de suporte para prosseguir com o desenvolvimento e a Figura 22, representando o conversão do modelo tridimensional em duas dimensões.

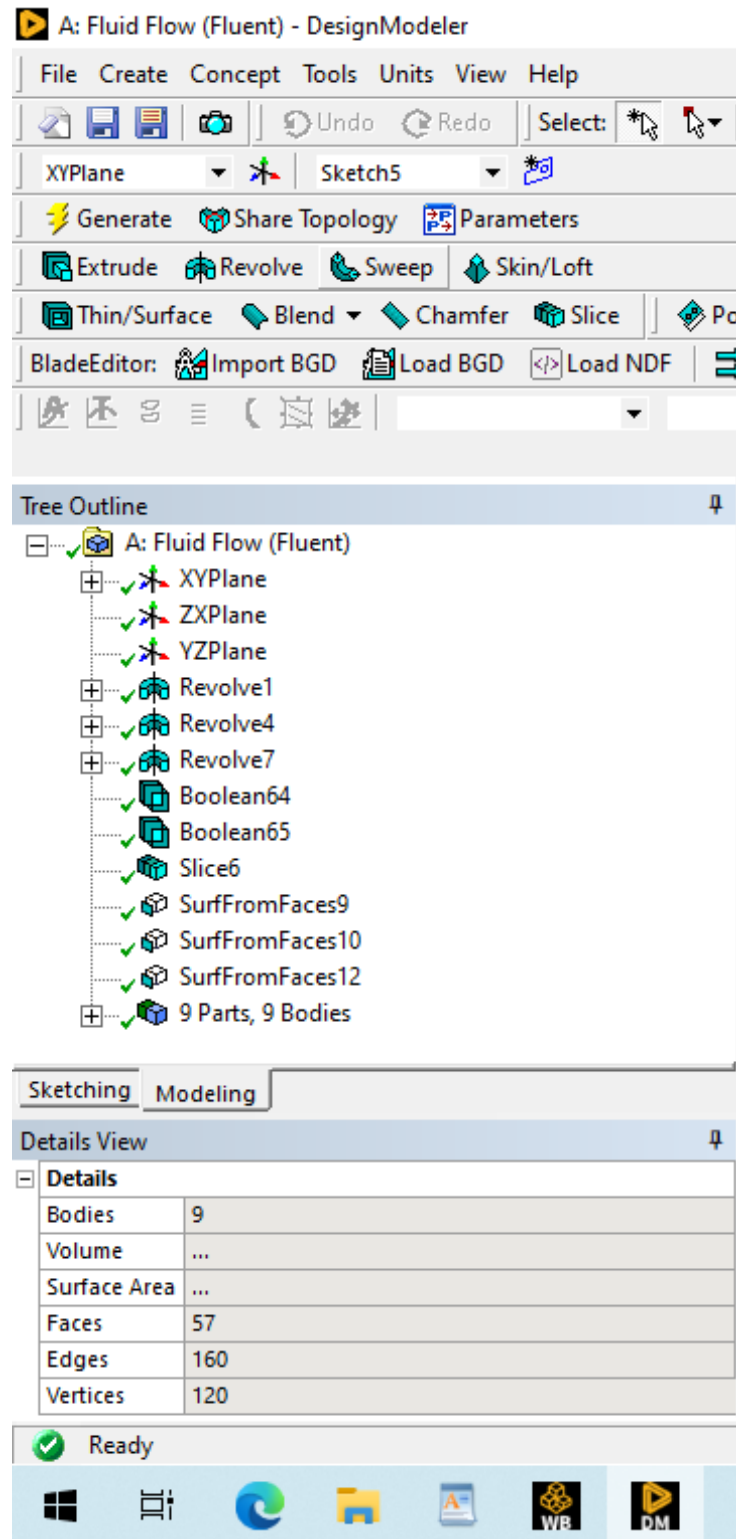


Figura 20: Estrutura do modelo gerado da geometria do Espessador tipo Deep Cone.

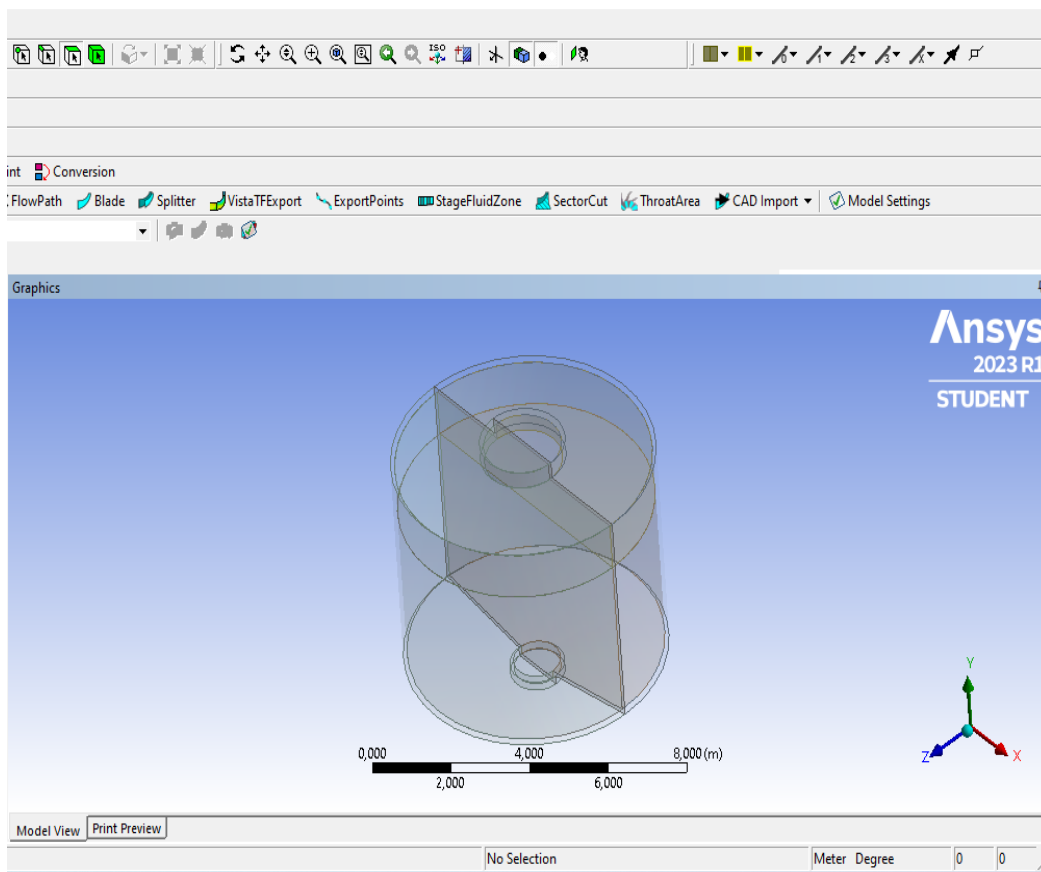


Figura 21: Geometria do Espessador tipo Deep Cone Criado no AnsysFluent.

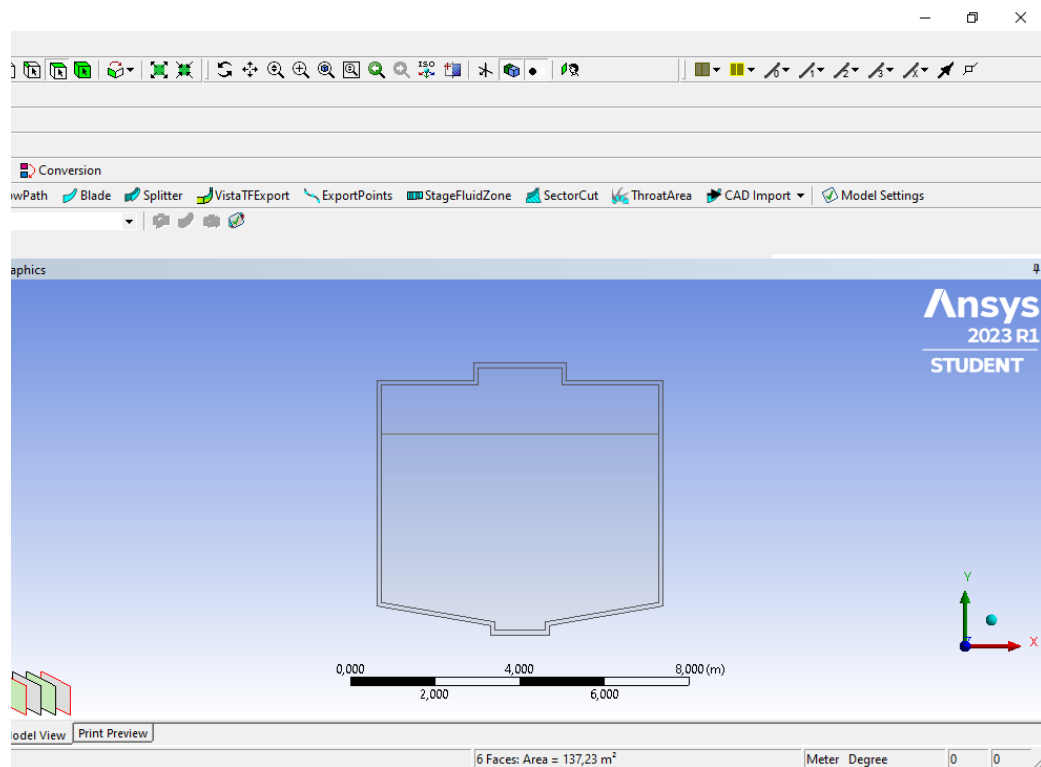


Figura 22: Visualização frontal de acordo com as direções XY para o espessador, através do Slice.

Ao finalizar a determinação da geometria, se começa a realizar através do modelo formado a configuração da malha, denominada como Mesh. Anteriormente a este trabalho, os parâmetros iniciais devem ser descritos para a formação da malha. Como se trabalha com fluídos, deve ser selecionada como preferência física o CFD, pois este modelo, busca observar as condições dinâmicas do fluído, mesmo que o sistema seja multivárico. Conforme definição de modelo, deve-se atentar ao tamanho das partículas, como uma análise de melhor representatividade, foi definido trabalhar com um modelo de tamanho de partículas Swebrec e não Rosin-Rammler.

Definido tais parâmetros, deve-se selecionar as faces a serem desenvolvidas, sendo considerado neste âmbito, 3 faces de configuração, sendo elas a estrutura do equipamento, a fase de polpa e a fase de pasta. Após definição das faces, deve-se atentar ao seguinte detalhe, o software utilizado é um modelo de estudante, demonstrando certas limitações, como por exemplo formação de grandes malhas. Então, o tamanho considerado que seja enquadrado como bom, para uma análise determinística é de 12000 nós/elementos. Por tanto, verifica-se que a decisão de analisar em 2D ao invés de 3D, torna a investigação mais minuciosa, com malhas maiores. O menor e melhor nó encontrado para aplicar em toda a região é de 0,0987 metros.

Ao final, já definidas as malhas é possível nomear cada região, sendo nomeados como estrutura, fluxo de massa de entrada, fluxo de massa de saída, região de polpa, região de pasta, velocidade de sedimentação de entrada. A estrutura a ser seguida pode ser observada a partir da Figura 23, e a malha gerada através da Figura 24.

The image shows the software interface with the 'Mesh' context menu open. The menu includes options like 'Duplicate', 'Cut', 'Delete', 'Copy', 'Find', 'Paste', 'Tree', 'Generate Mesh', 'Named Selection', 'Coordinate System', 'Comment', 'Images', 'Section P', and 'Annotati'. Below the menu is the 'Outline' panel showing a tree structure of the project: Project > Model (A3) > Geometry Imports, Geometry, Materials, Coordinate Systems, Connections, Mesh, and Named Selections.

Below the outline is the 'Details of "Mesh"' panel, which contains the following settings:

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	9,87e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Quality	
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4475
<input type="checkbox"/> Elements	8024
Show Detailed Statistics	No

Ready

Figura 23: Parâmetros definidos para a geração da malha.

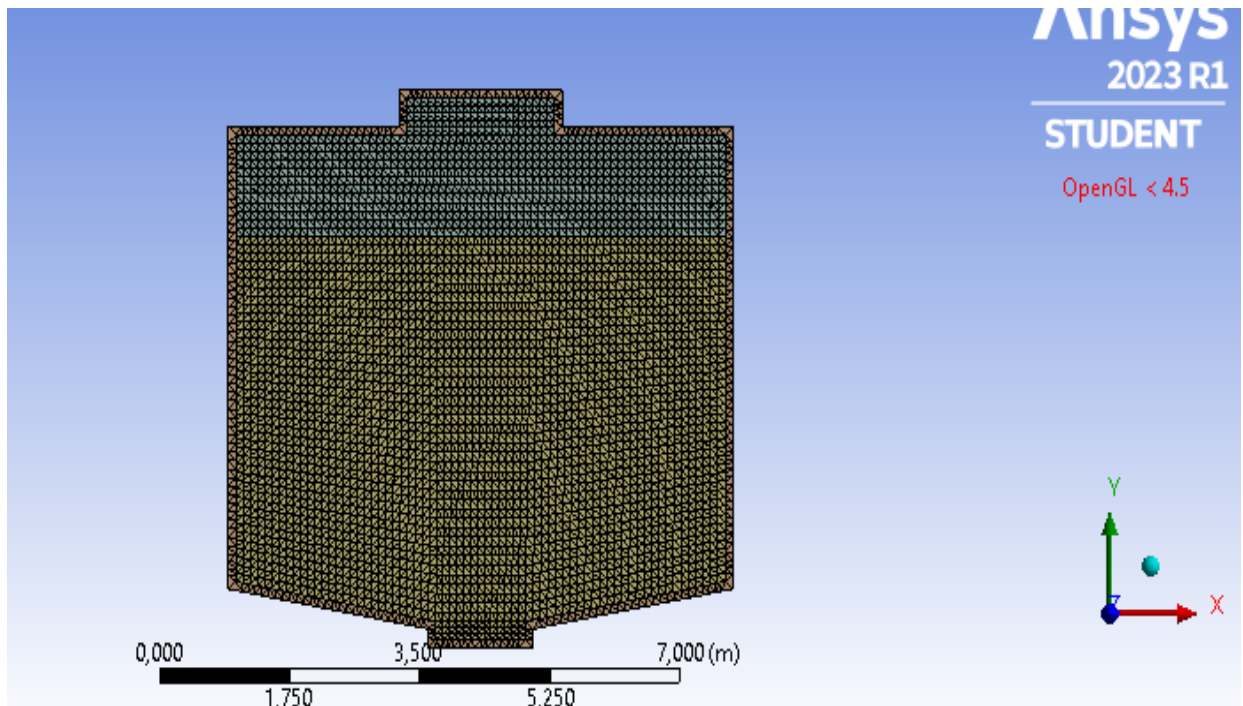


Figura 24: Malha gerada após análise dos parâmetros dentro da pasta Mesh.

Após geração da malha, adentra-se a plataforma de soluções e resultados do software, nesta plataforma, são definidos os parâmetros necessários para leitura do algoritmo. O primeiro passo, em conformidade com a Figura 25, é realizar a seleção inicial dos dados de projeto, alinhamento dos parâmetros como o modelo de fluxo. Ao desenvolver a pesquisa, o fluxo mais aderente ao campo de pesquisa é um fluxo transiente o caso foi decidido por um fluxo transiente, no qual é possível observar a influência do deslocamento do fluido no equipamento com relação ao tempo de trabalho executado. Através deste regime de trabalho, é possível observar por exemplo, a sedimentação das partículas no espessador até a formação da pasta, sendo considerado o pior cenário possível, para que se possa a partir deste fato, utilizar ferramentas e observar os eventuais problemas em demanda, solucionando-os. Apesar de existir uma fase estacionária do fluido, diante do tamanho do espessador, é possível verificar o comportamento do fluido conforme as pressões desempenhadas no sistema em decorrência da altura do espessador e do fluxo de partículas, a agregação das partículas entre outros fatores. Além disso, deve-se deixar claro ao software que o desempenho do sistema ocorre devido aos efeitos gravitacionais, sendo necessário selecionar a caixa de diálogo indicando a gravidade, em função da direção de sedimentação, considerando $-9,81 \text{ m/s}^2$ na direção Y.

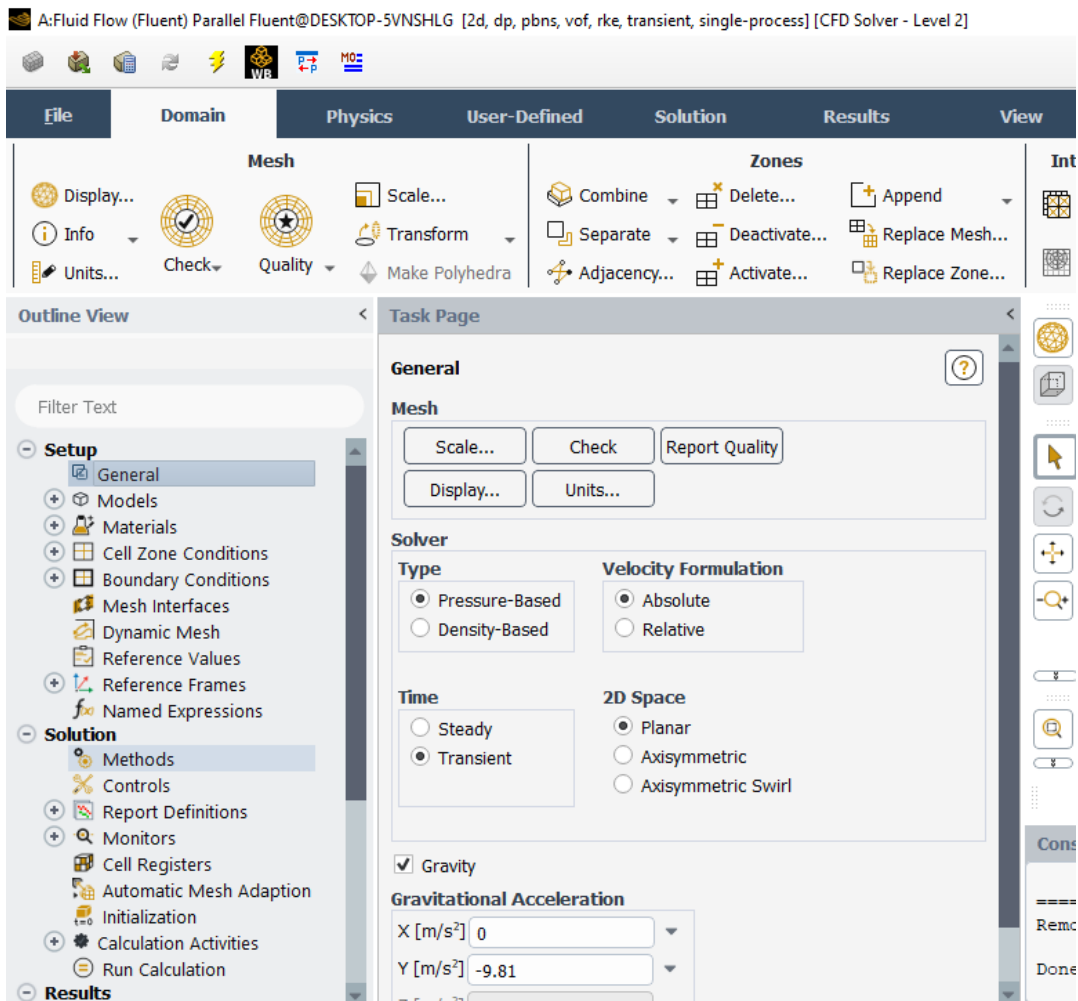


Figura 25: Parâmetros iniciais ao realizar a solução da simulação pelo modelamento.

Ao definir os parâmetros iniciais de simulação, deve-se atentar aos tipos de modelos a serem selecionados, delimitando situações mais aderentes e específicas de acordo com o espessador trabalhado. Dentre os parâmetros apresentados, o primeiro fator a ser mensurado condiz com a ativação do cálculo de energia, no caso energia potencial e cinética (mediante a sedimentação das partículas) e o modelo de viscosidade, sendo considerado pela bibliografia consultada o melhor tipo atendido pela abordagem Euleriano-Euleriano, podendo ser analisado o comportamento mediante o contato das partículas com a superfície do equipamento e entre as partículas. Após esta definição, deve-se selecionar o material a ser trabalhado. O Software já apresenta a delimitação de um fluido e um sólido, considerado alumínio e ar, parâmetros dos quais devem ser ajustados, conforme materiais trabalhados no espessador.

Ao ajustar tais parâmetros, se delimita como sólido o aço, referente a parede do

equipamento, e os fluxos, polpa e pasta. Estes parâmetros devem ser definidos para cada setor do equipamento, caracterizando-os em função dos efeitos e atividades relacionadas, definindo-os como internos, externos, de fluxo, de parede, entre outros.

Por fim, define-se o último modelo a ser calibrado, no caso pelo método multifásico, sendo consideradas duas fases de um mesmo fluido no equipamento, como observado na Figura 26. No entanto, deve-se atentar a calibração do modelo de fases, pois posteriormente, ao realizar uma otimização, este modelo multifásico não será considerado somente como uma análise do volume de fluidos (VOF), mas sim como um modelo complementar Euleriano em suporte de multiflúidos e categorizado conforme o balanço populacional, sendo possível realizar a floculação/agregação das partículas na fase polpa. Características trabalhadas deste modelo em critério do balanço populacional podem ser observadas nas Figuras 27, 28 e 29.

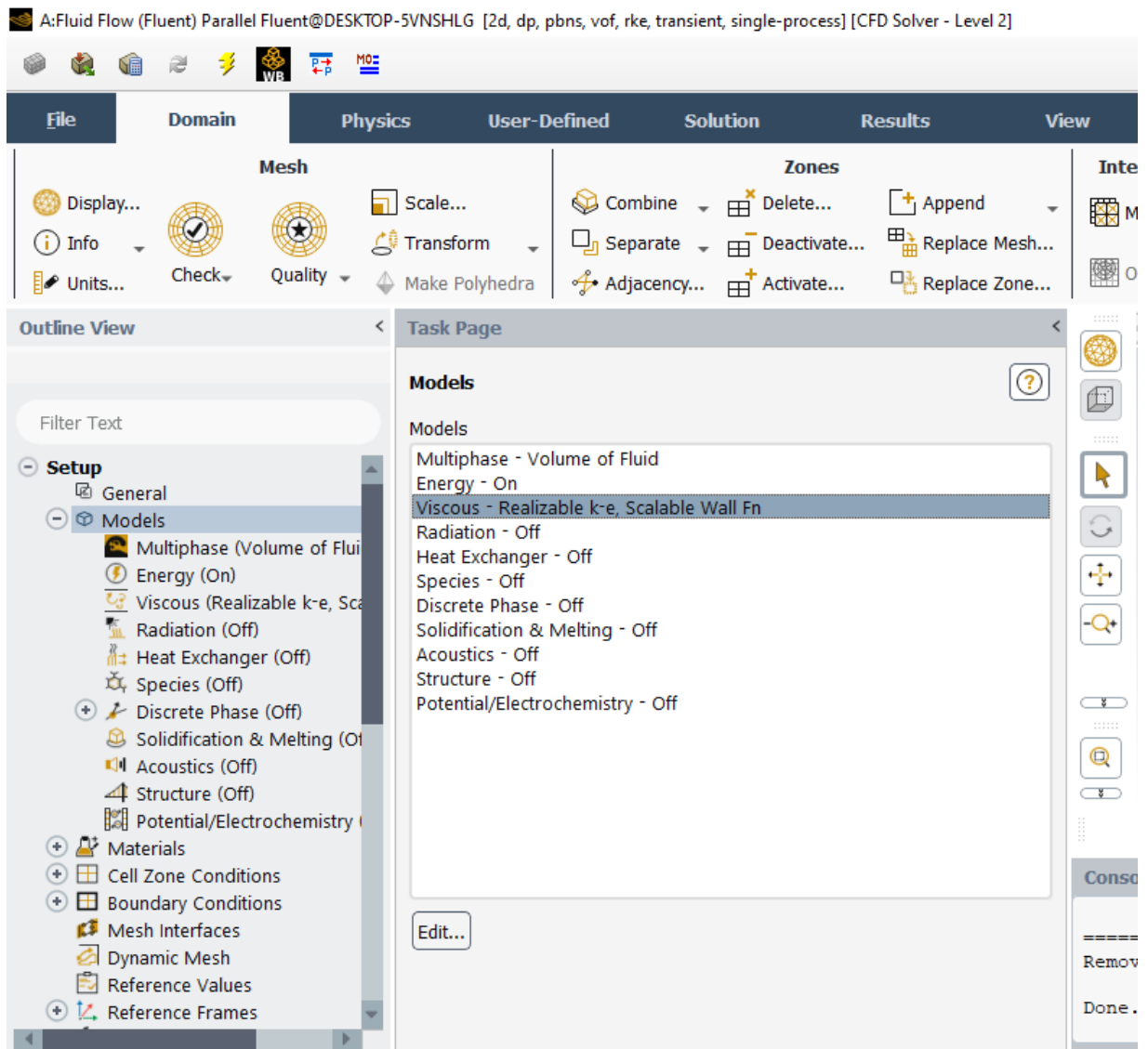


Figura 26: Modelos a serem trabalhados conforme metodologia abordada.

The screenshot displays the 'Population Balance Model' configuration window for the 'polpa' phase. The interface is divided into several sections:

- Method:** Radio buttons for 'Off', 'Discrete', 'Inhomogeneous Discrete', 'Standard Moment', 'Quadrature Moment' (selected), and 'DQMOM'.
- Parameters:** A 'Moments' dropdown set to '6', a 'Kv' input field with '0.5235988', 'Max Size [m]' set to '1', and 'Min Size [m]' set to '0.0001'. A 'Size Calculator...' button is also present.
- Phase:** A dropdown menu showing 'polpa'.
- Phenomena:** Checkboxes for 'Phenomena' (checked) and 'Include Expansion' (unchecked).
- Aggregation Kernel:** A checked checkbox, a 'Rate' dropdown set to 'liao-aggregation-model' with a value of '0' and units '[m³/s]', and an 'Edit...' button. An 'Aggregation Factor' input field is set to '1'.
- Breakage Kernel:** A checked checkbox, a 'Frequency' dropdown set to 'luo-model' with a value of '0' and units '[s⁻¹]', a 'PDF' dropdown set to 'parabolic' with a value of '0' and units '[m⁻³]', and an 'Edit...' button. A 'Breakage Factor' input field is set to '-1'.

Figura 27: Plataforma para definição da agregação de partículas pelo PBM.

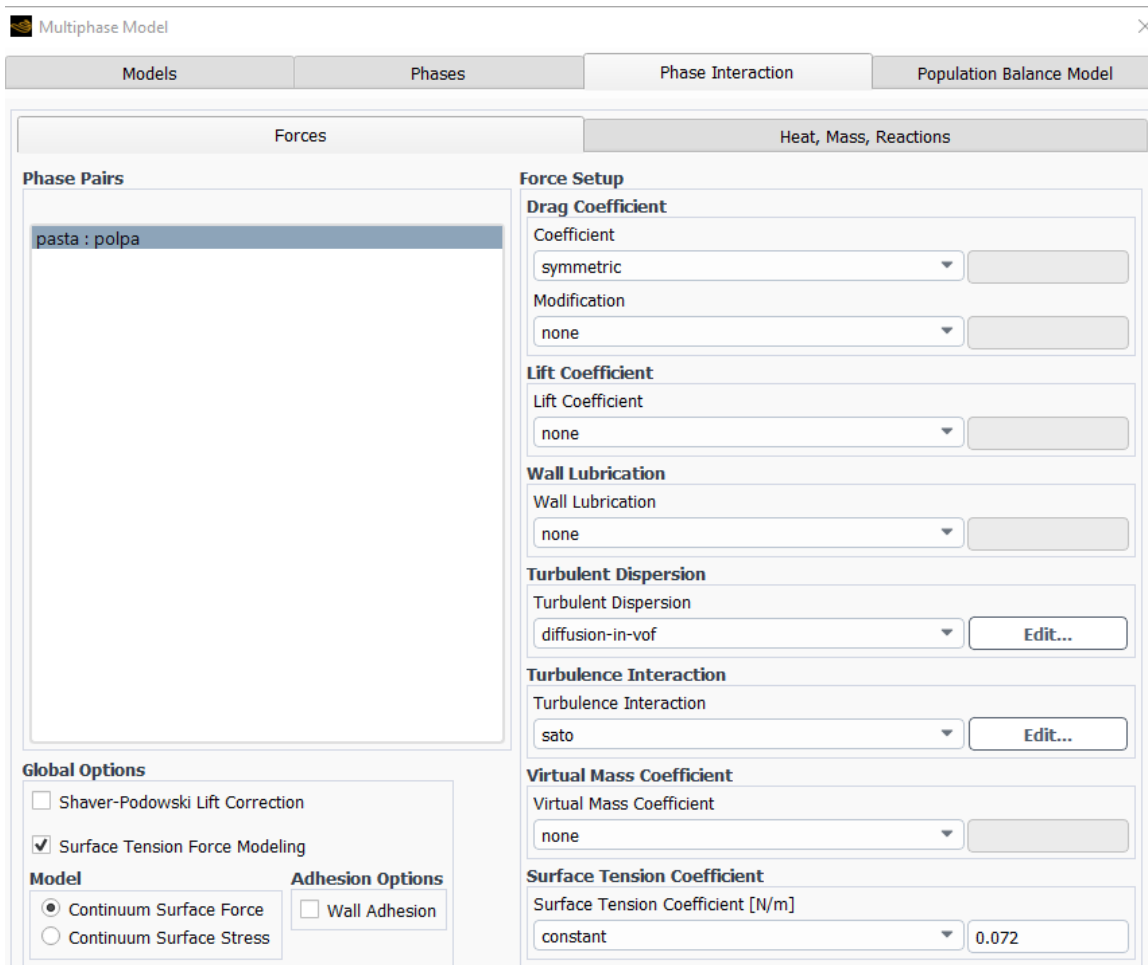


Figura 28: Definição das forças atuantes entre as fases do espessador, levando em conta sua estrutura.

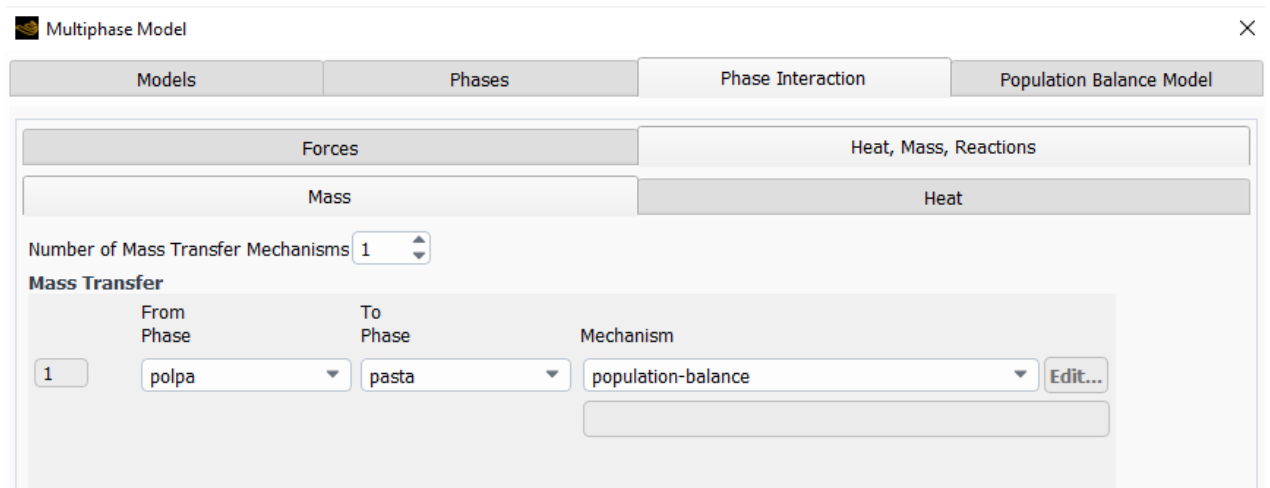


Figura 29: Definição das fases onde o PBM deve ser aplicado. De onde, para onde.

Após definição dos modelos, passa-se a definir os métodos a serem utilizados para realização da simulação e da otimização. Em ambas as modelagens, foram utilizados o algoritmo SIMPLE/SIMPLEC, onde o cálculo e as ferramentas apresentadas, contêm maior precisão na formatação dos resultados. Além disso, alguns parâmetros definidos na Figura 30, são muito importantes, para a análise desta investigação, dentre eles a ordem dos fatores, o gradiente espacial, a pressão a ser aplicada, a fração de volume e a turbulência do fluído no espessador.

Dentre tais parâmetros, a discretização espacial enquadra-se no modelo Green-Gauss utilizado para o cálculo pela proximidade das células. A pressão a ser selecionada, deve apresentar-se como “Presto”, para que a análise da mesma ocorra de imediato juntamente com os demais parâmetros. A fração de volume deve ser considerada em compressão, contando com as forças atuantes para a sedimentação das partículas, formando a pasta. É válido a observação de que a velocidade de sedimentação calculada é utilizada como parâmetro de otimização, não sendo possível anexá-la às partes no modelo de fluído, somente no modelo Euleriano.

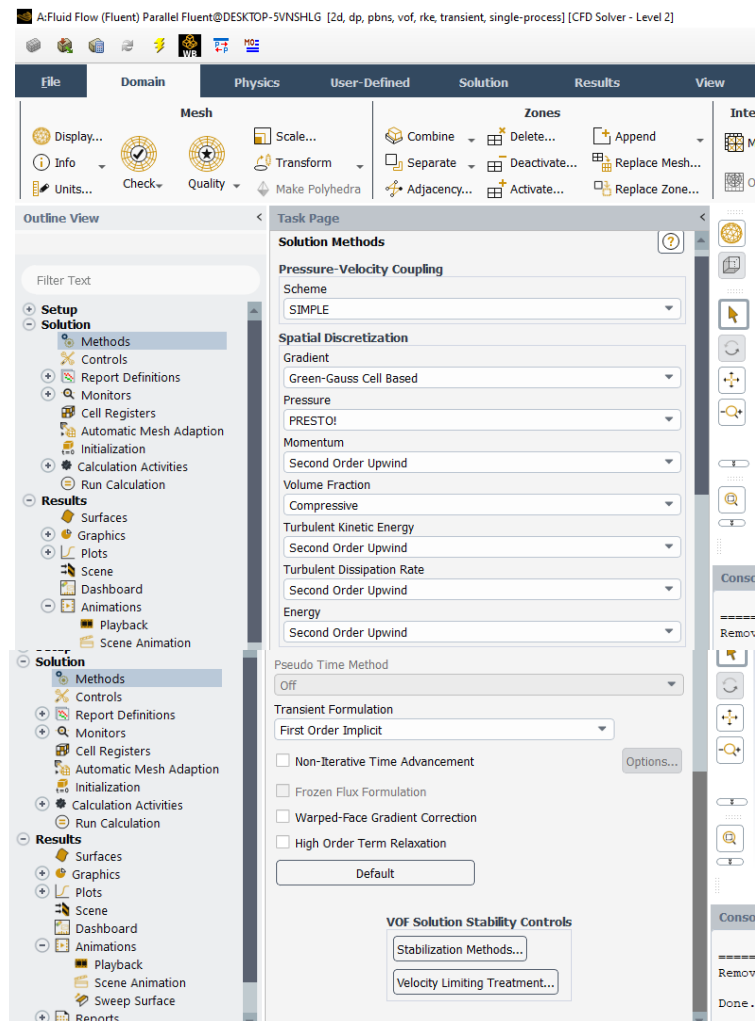


Figura 30: Métodos a serem aplicados na simulação.

Ao fim da definição dos métodos, pode-se realizar a inicialização da leitura do programa pré-definido, sendo possível alterar parâmetros como temperatura, pressão e viscosidade de cada fase. Nesta fase como apresentado na Figura 31, a temperatura foi alterada para 296,55 K, correspondente a temperatura das condições do espessador de laboratório retratado por Olcay (2008).

Após inicialização do programa, seleciona-se as animações que se desejam observar ao final da da simulação, no entanto podem existir fatores não lidos pela falta de dados. Mediante estes fatores, dos quais existem a possibilidade de não serem lidos, opta-se por trabalhar com os dados disponíveis. Ao selecionar estas animações, deve-se estimar o número de steps a serem utilizados, para verificação das iterações em conformidade com o tempo. O software sugere que para análise de grandes equipamentos um fator acima de 10 é aplicável. O que mais se enquadrrou para análise na realização dos testes de

30, como observado na Figura 32.

Após inicialização, passa-se para a etapa de leitura de todos os dados pré-determinados. Para que esta leitura se apresente o número máximo de variáveis possíveis, até a delimitação de um padrão, apresentando com consistência os resultados, foi observado que uma delimitação entre 20 e 50 Steps seria necessário para leitura de todos os dados, como observado na Figura 33. Ao final do projeto, serão gerados gráficos possibilitando a visualização do trabalho abordado e o comportamento do fluido em cada etapa do equipamento, tornando possível em trabalhos continuados a minimização de custos destes equipamentos, através dos dados fornecidos.

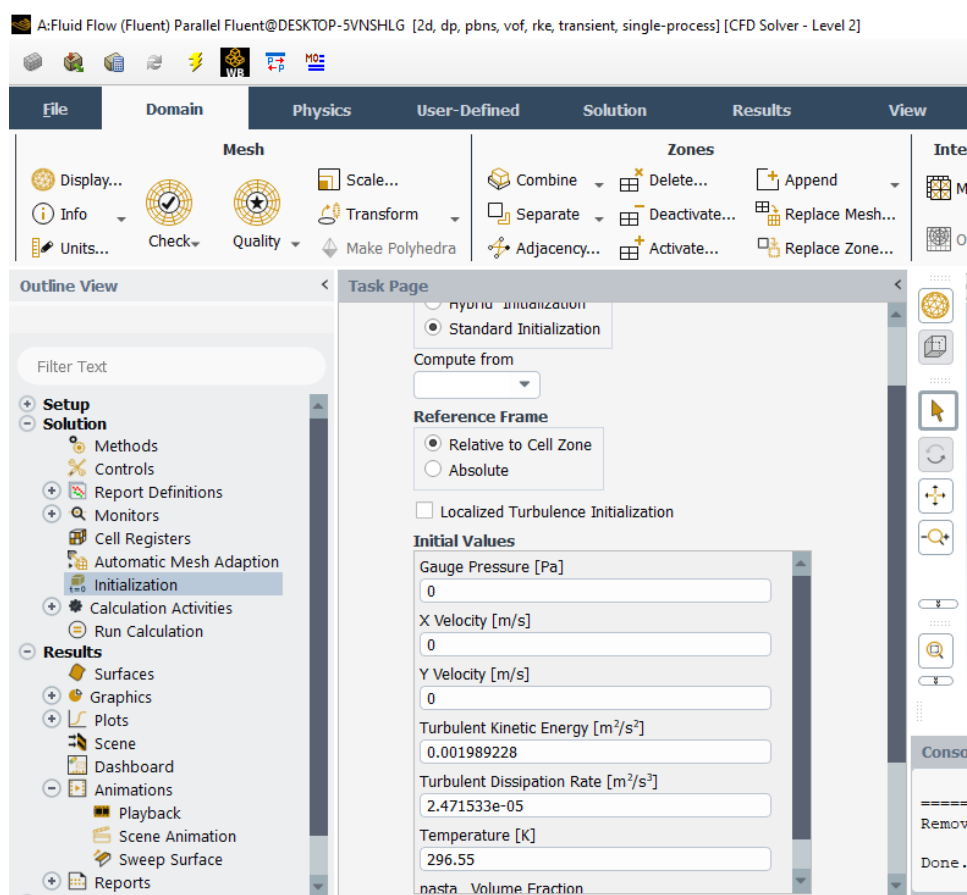


Figura 31: Inicialização da simulação com alteração da temperatura padrão de 300k para a conformidade laboratorial.

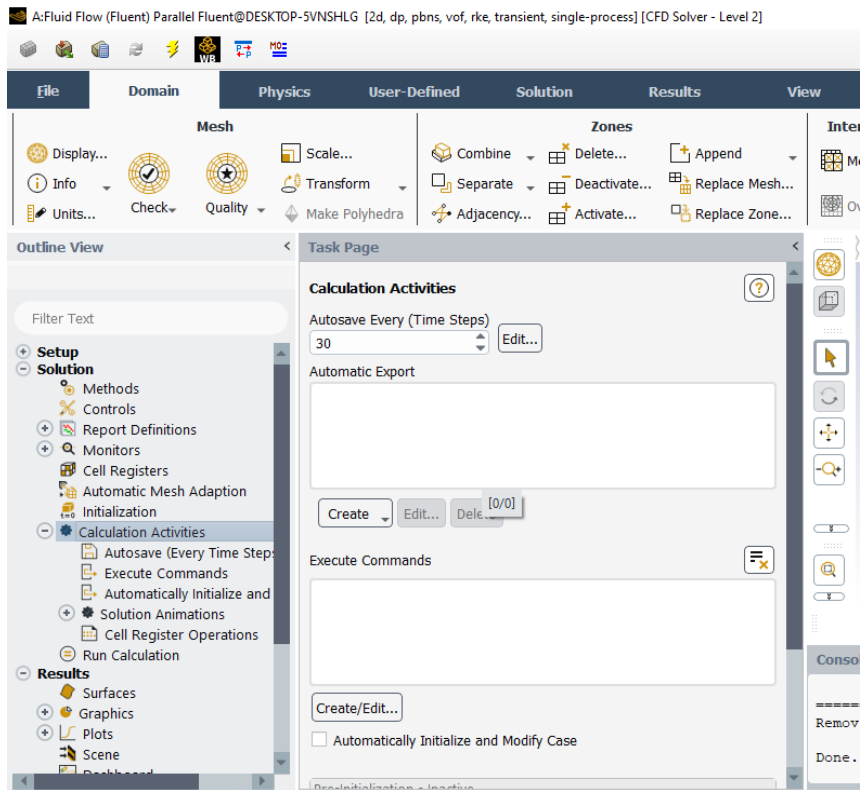


Figura 32: Seleção do cálculo de steps conforme as atividades e animações a serem analisadas.

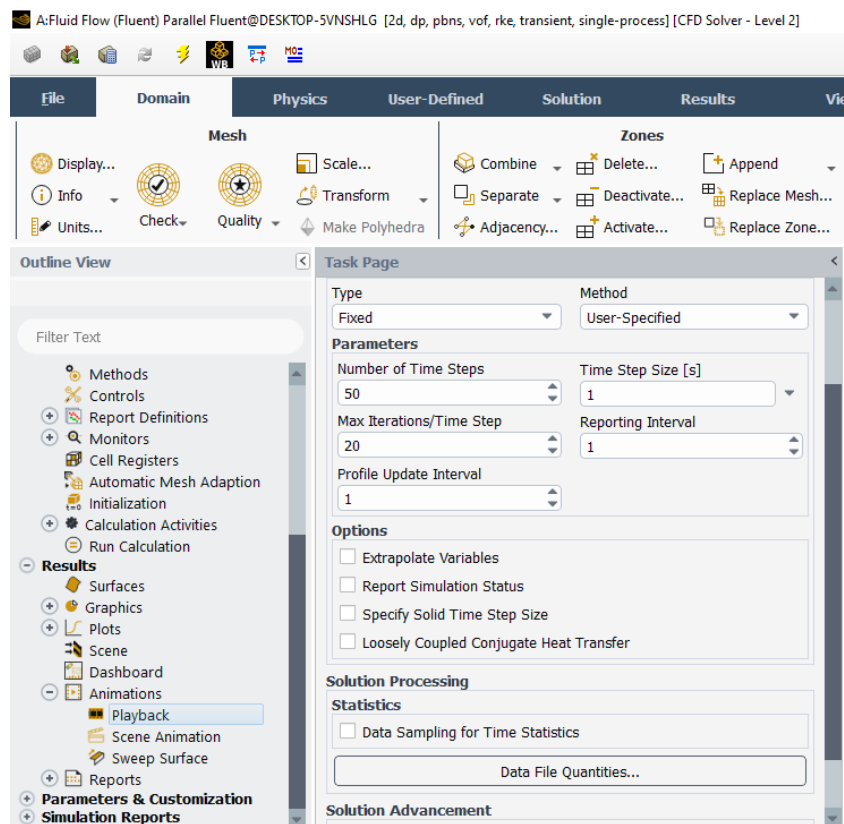


Figura 33: Parâmetros lidos nos resultados conforme a geração de tempo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

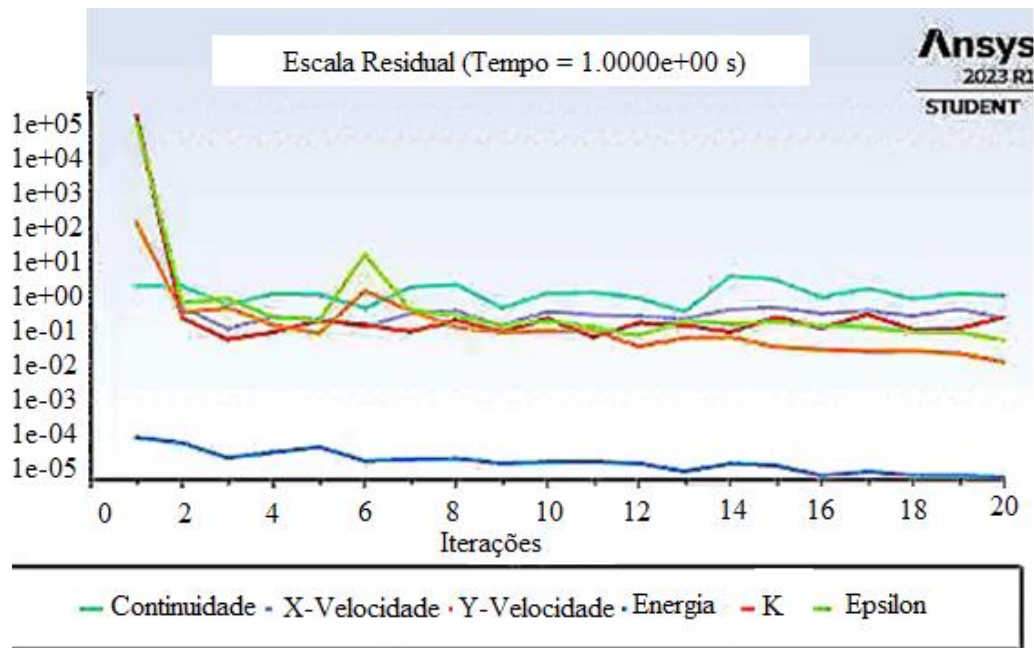
Durante a investigação desenvolvida no Ansys Fluent, houve resultados interessantes de serem avaliados, inclusive no quesito dinâmica de fluído, sendo de maior compreensão, a visualização dos vídeos dos modelos, o que não é possível através da escrita, mas é apresentado estes resultados com maior precisão nos critérios avaliados.

É válido ressaltar que os dados obtidos são apresentados inicialmente para granulometrias muito finas de polpa, das amostras do rejeito de minério de manganês em granulometria considerada tipo lama. Sendo assim, existe a necessidade da floculação, para que deste modo, a garantia de sedimentação seja mantida, minimizando, por conseguinte a chance de presença de materiais sobrenadantes.

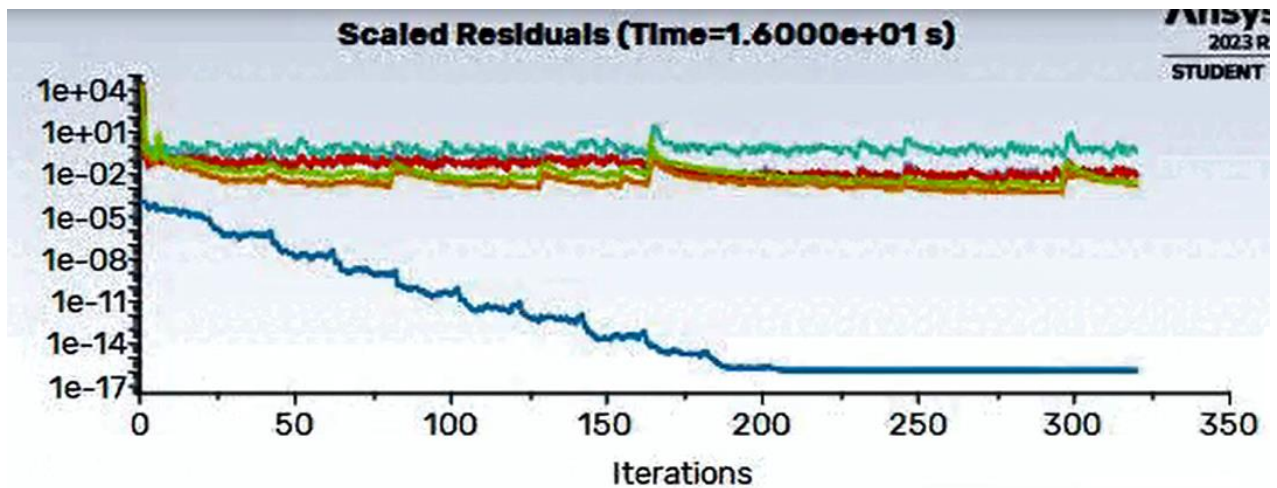
Além disso, conforme visto na metodologia, os parâmetros foram analisados mediante simulação no Ansys Fluent de acordo com o pacote SIMPLE, no método de volume de fluídos. E para visualizar melhora nos parâmetros, este modelo foi submetido através do mesmo pacote em uma metodologia de variáveis presentes no modelo Euleriano, buscando avaliar as características do fluído com o auxílio de parâmetros do balanço populacional no volume de fluído como a agregação e inversão do Kernel de quebra das partículas.

5.1. Volume de fluído

Ao obter os resultados finais, foi observado em um gráfico residual, a quantidade de iterações em consideração ao tempo de atividade do espessador. Nota-se ao decorrer da execução dos procedimentos, a necessidade de ao menos 200 iterações para que os resultados se tornem constantes, como observado no gráfico da Figura 34. É possível entender através da análise gráfica que quanto menor o tempo utilizado em determinado parâmetro, maior será a necessidade de iterações para validação de tal variável projetada no circuito. Este fenômeno pode ser observado para todas as variáveis em análises, exceto para a energia nas fases iniciais, sendo demandado para que haja efeito sobre a mesma, um grande número de iterações e um tempo relativamente alto.



A)



B)

Figura 34: Gráficos de iterações por parâmetro avaliado no volume de Flúidos onde A) Análise Final, B) Análise até constância dos resultados.

Ao observar o gráfico gerado pela Figura 35 para a magnitude de velocidade, é possível observar que à medida que as partículas vão se sedimentando, a velocidade de sedimentação aumenta, sendo esta apresentada através de valores mais altos e cores mais quentes, próxima a saída do fluxo de massa, com características de pasta mineral. Além disso, este fator pode ser influenciado também de certa forma com a agregação que as partículas obtiveram no início do circuito, sendo um parâmetro passível de calibração, caso não atenda as expectativas trabalhadas.

Além disso, pode ser observado que em muitas partes do sistema a velocidade de sedimentação diminui, este fator é condizente com o evento, sendo considerado principalmente um fluxo de fluido, onde certos parâmetros podem influenciar, na sedimentação como a turbulência do fluido, a qual deve ser controlada, o movimento dos rakes ou algo similar, diminuindo a velocidade de sedimentação, bem como aumentando a permanência do fluido no espessador. Através do histograma os fatores observados na figura são confirmados, onde neste gráfico é possível observar a diminuição da velocidade conforme as especificações de tempo. Através do histograma da Figura 36, é possível observar também, que no início do processo, existe uma alta taxa de velocidade de sedimentação dos grãos, onde a velocidade máxima atingida é de cerca de 70 m/s, com relação ao tempo, ao as partículas serem floculadas e agregadas, estes grãos vão sedimentando dentro do equipamento e diminuindo assim a velocidade de sedimentação, transformando um fluido de característica mais fluída para uma característica mais espessa.

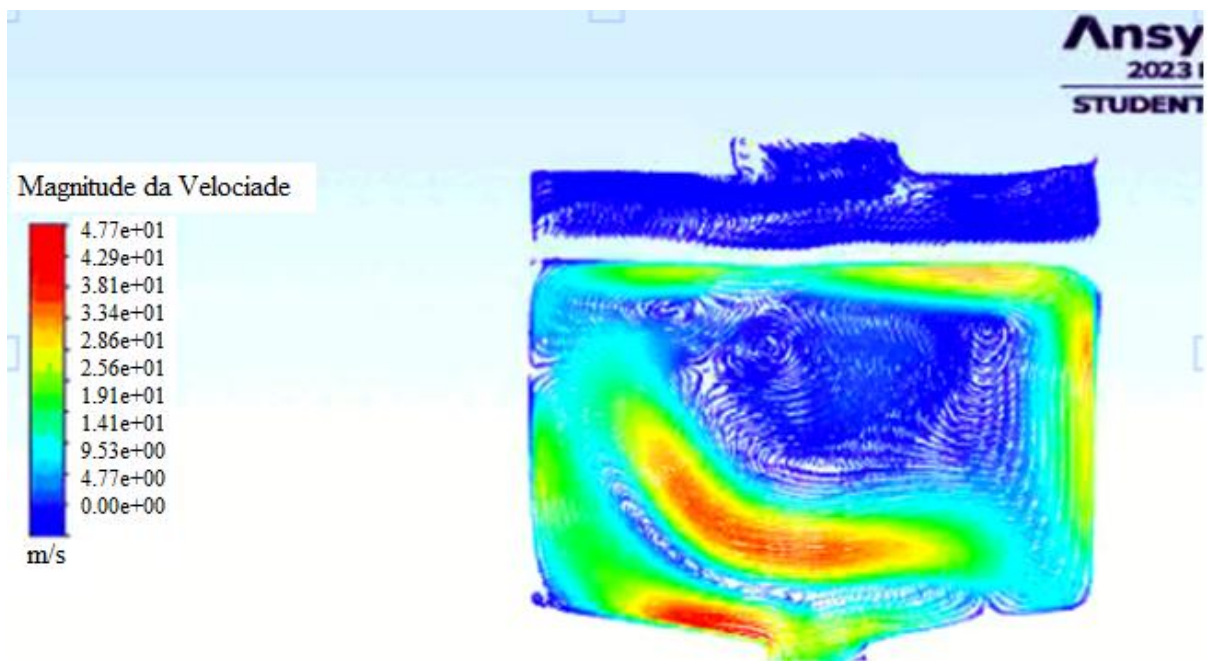


Figura 35: Gráfico de Magnitude da velocidade.

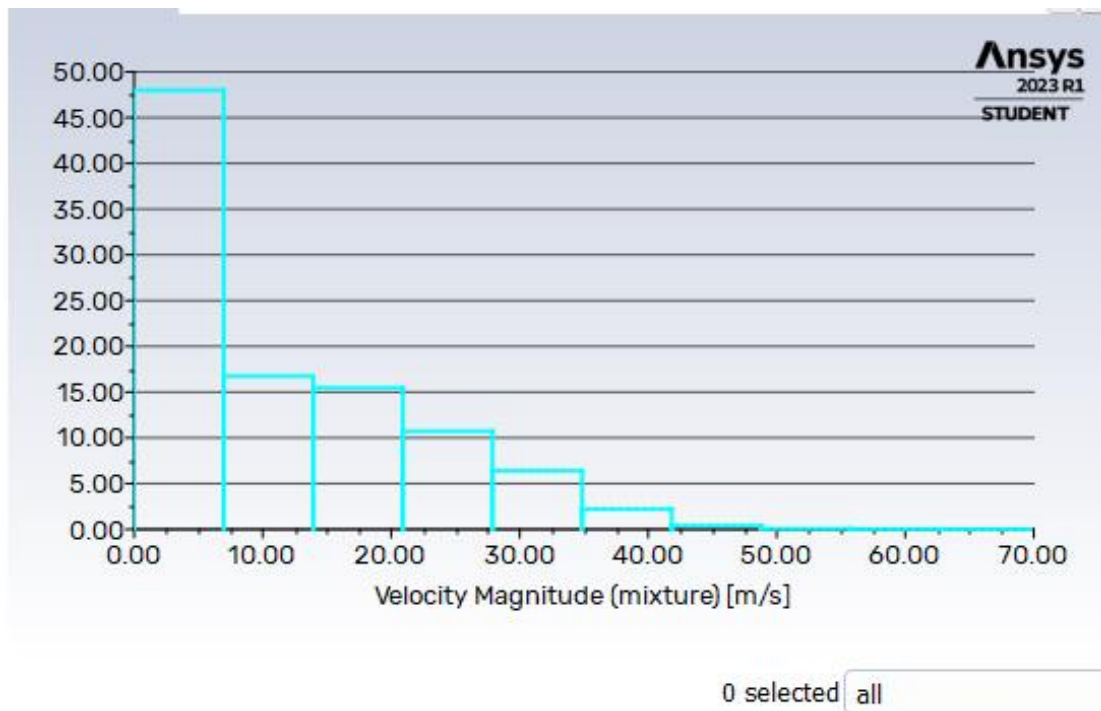


Figura 36: Histograma de magnitude de velocidade.

Conforme observado através da Figura 37, ao executar a simulação para um planejamento de pressão estática, o sistema em si, executa uma alta taxa de pressão nas partículas a serem sedimentadas, auxiliando deste modo na formação da pasta. No entanto, ao executar um sistema de fluxo de massa, como observado na figura, existe uma alta taxa de pressão negativa em determinados pontos do espessador. Esta taxa de pressão negativa ocorre, devido a interação do meio externo com o meio interno do espessador, indicando um fluxo negativo. Além disso, como as partículas encontradas no início do sistema são muito finas, a recorrência deste fator é possibilitada, sendo evitada através de ajustes e da agregação das partículas, no início (primeira zona) do espessador, tornando deste modo a sedimentação das partículas mais eficientes, demandadas principalmente pelas energias cinética (das partículas) e potencial (do espessador).

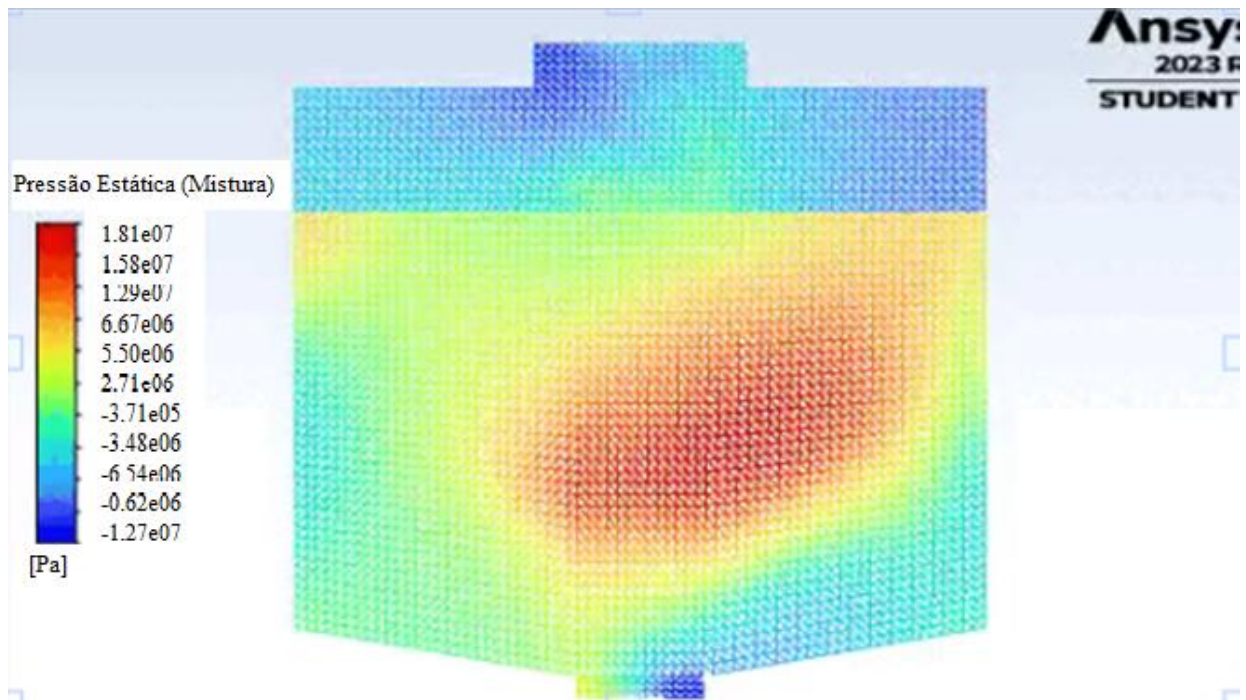


Figura 37: Gráfico da pressão estática para a mistura.

Conforme a avaliação do volume de fluido em consideração a viscosidade atuante no eixo turbulento é possível verificar uma influência negativa nos parâmetros decorrentes justamente pelo regime em que é aplicado o sistema. No entanto, é possível verificar que a viscosidade, volta a aumentar ao sair o fluxo de pasta na parte inferior do espessador. Este parâmetro podendo ser observados nas Figuras 38 e 39. Vale ressaltar que tal avaliação é para viscosidade no ambiente turbulento, região onde existe uma mistura de fluidos, zona correspondente a transformação do fluido de polpa em pasta.

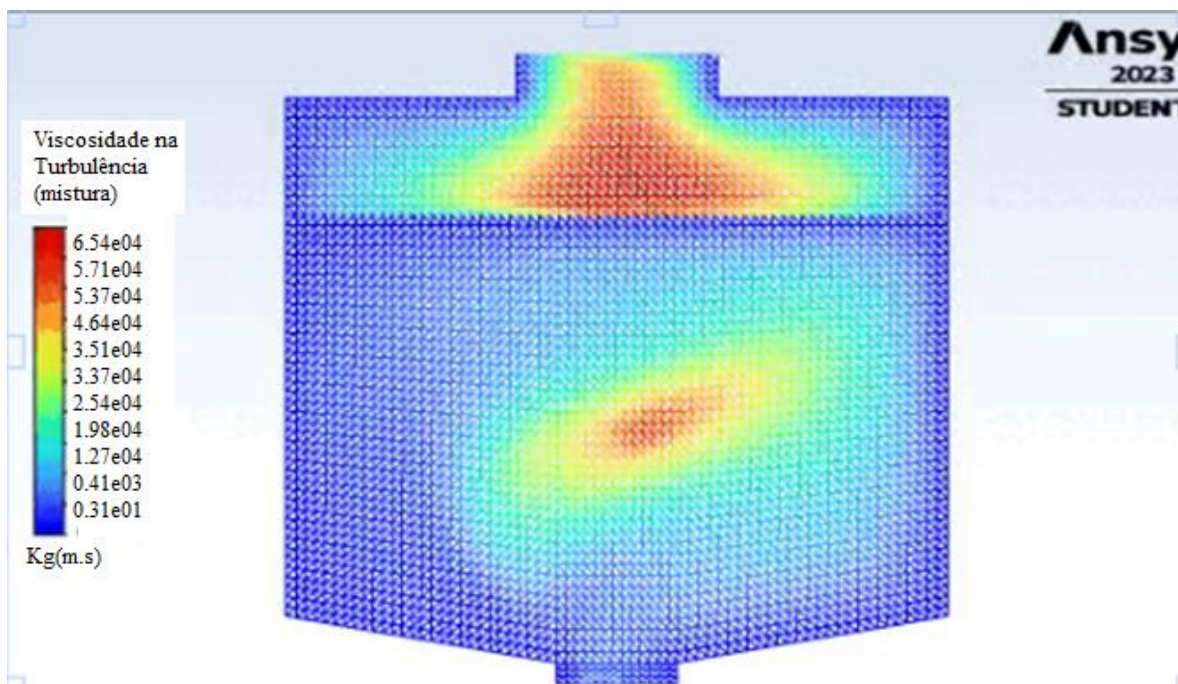


Figura 38: Gráfico da viscosidade na presença de turbulência.

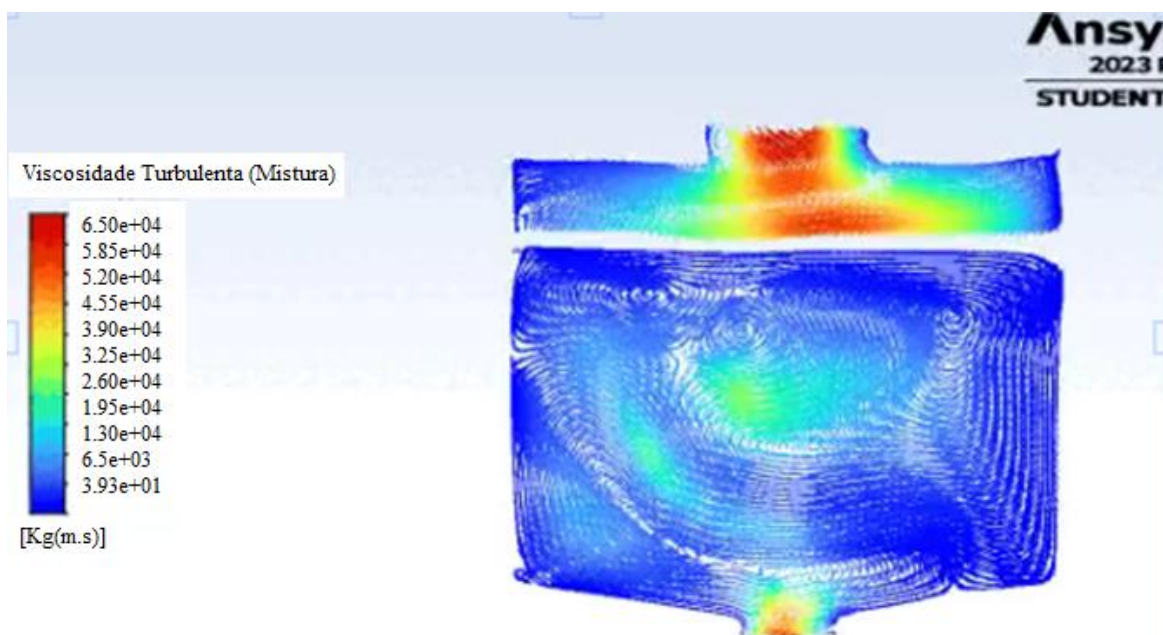
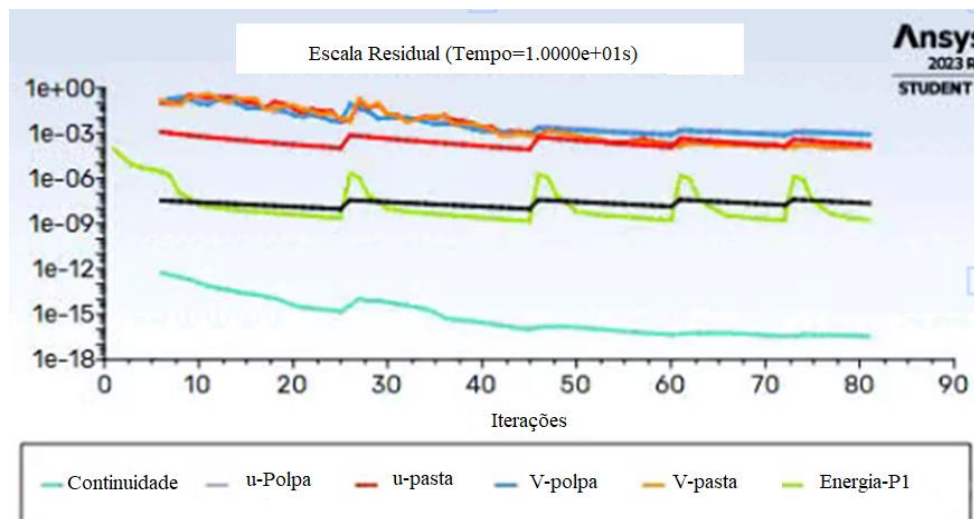


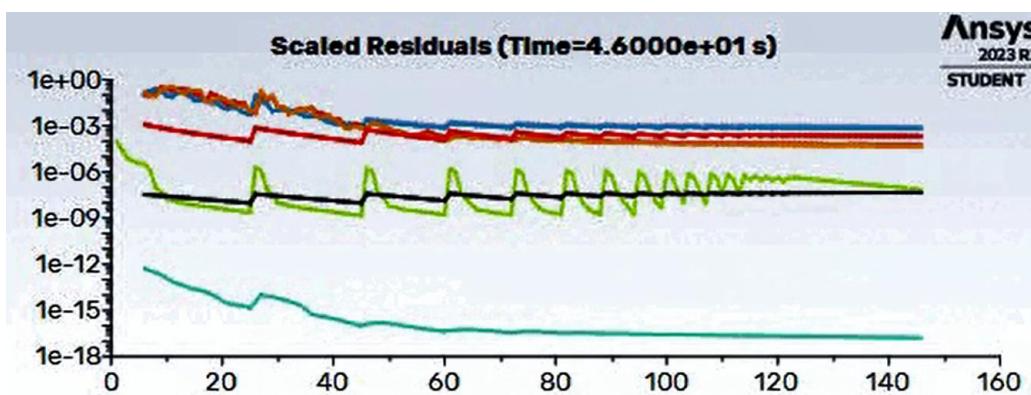
Figura 39: Gráfico da viscosidade na presença de turbulência, comportamento fluído.

5.2. Euleriano

Para a realização da otimização, buscou-se aumentar o valor da viscosidade de 0,8313 para 0,9215, o que apresentou melhores resultados. Ao realizar todo o sistema, buscando uma otimização da resposta obtida ao executar a simulação, foi possível observar uma grande melhora nos parâmetros abordados, principalmente no método de distribuição. Através dos gráficos presentes nas Figuras 40 A e B, observa-se que para visualizar o comportamento do sistema como um todo, são necessárias no máximo 50 iterações, sendo esta mudança de viscosidade representada por uma melhora do modelo desenvolvido. É possível observar também que todas as variáveis seguem o mesmo padrão, independente se com poucas ou muitas iterações, e mesmo com o tempo muito curto, a necessidade de muitas iterações é baixa.



A)



B)

Figura 40: Gráficos de iterações por parâmetro avaliado no volume de fluídos onde A) Análise Final, B) Análise até constância dos resultados.

Ao observar os resultados da otimização gerado para a viscosidade, houve uma melhora significativa na distribuição dos parâmetros. Mas é válida a ressalva de que, a otimização por este método permite indexar mais detalhes dos fluxos, como velocidade angular de rotação e velocidade de sedimentação inicial das partículas. Como é possível observar nas figuras, existe uma baixa propensão de sedimentação das partículas próximas as paredes. É claro também a observação da formação dos flocos na primeira fase do espessador.

Estas partículas floculadas aumentam sua viscosidade significativamente, apenas no final essa viscosidade diminui, isso por ênfase do fluxo turbulento e também interação entre partículas de viscosidades distintas. Estes detalhes podem ser observados na Figura 41. Além disso, através da Figura 42, torna-se possível observar o histograma desta função, demonstrando que os efeitos da viscosidade das partículas aumentam significativamente durante o ambiente do desenvolvimento do fluxo.

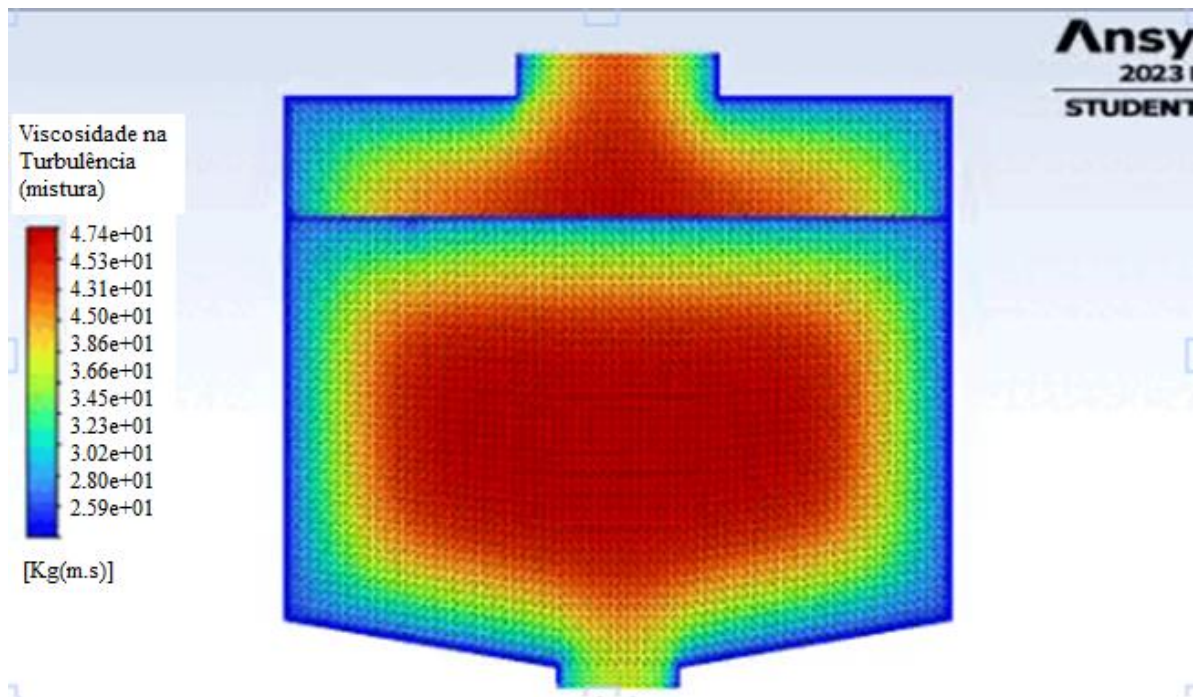


Figura 41: Gráfico da Viscosidade na presença de turbulência.

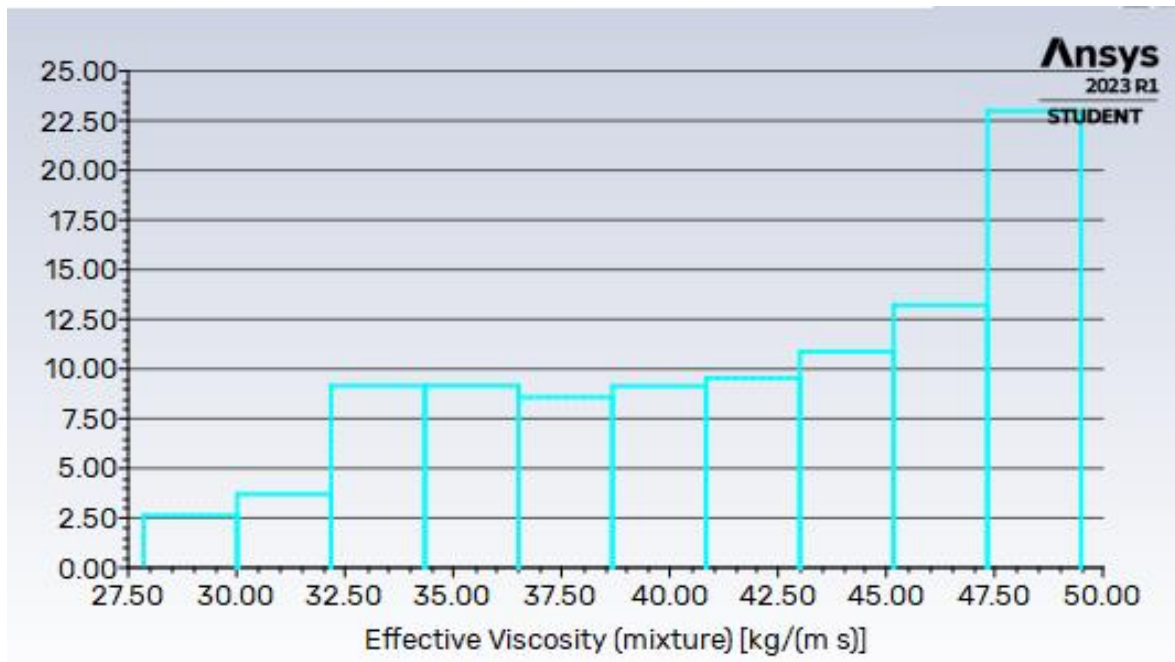


Figura 42: Histograma do Efeito da Viscosidade.

Conforme observado pelo gráfico da Figura 43, houve uma significativa melhora dos pontos abordados para a velocidade de sedimentação, sendo que no momento de transformação da polpa para pasta, esta velocidade cai, mas após esta etapa, volta a crescer. O mesmo podendo ser observado, através da Figura 44, sendo que neste gráfico, torna-se possível observar claramente, o fluxo de partículas definidos por eixo, com uma alta pressão executada ao final do espessador, auxiliando deste modo na sedimentação e transformação do fluido em pasta mineral.

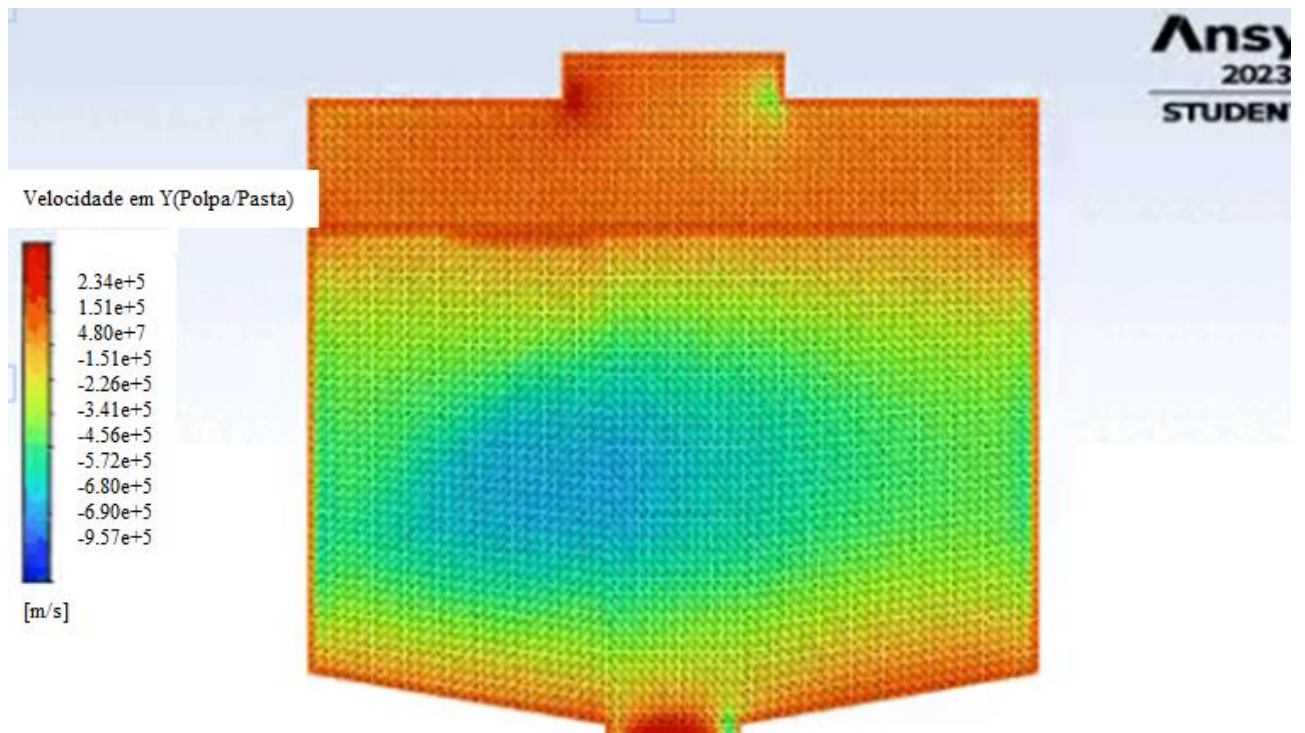


Figura 43: Gráfico da velocidade de sedimentação com relação a gravidade no eixo Y.

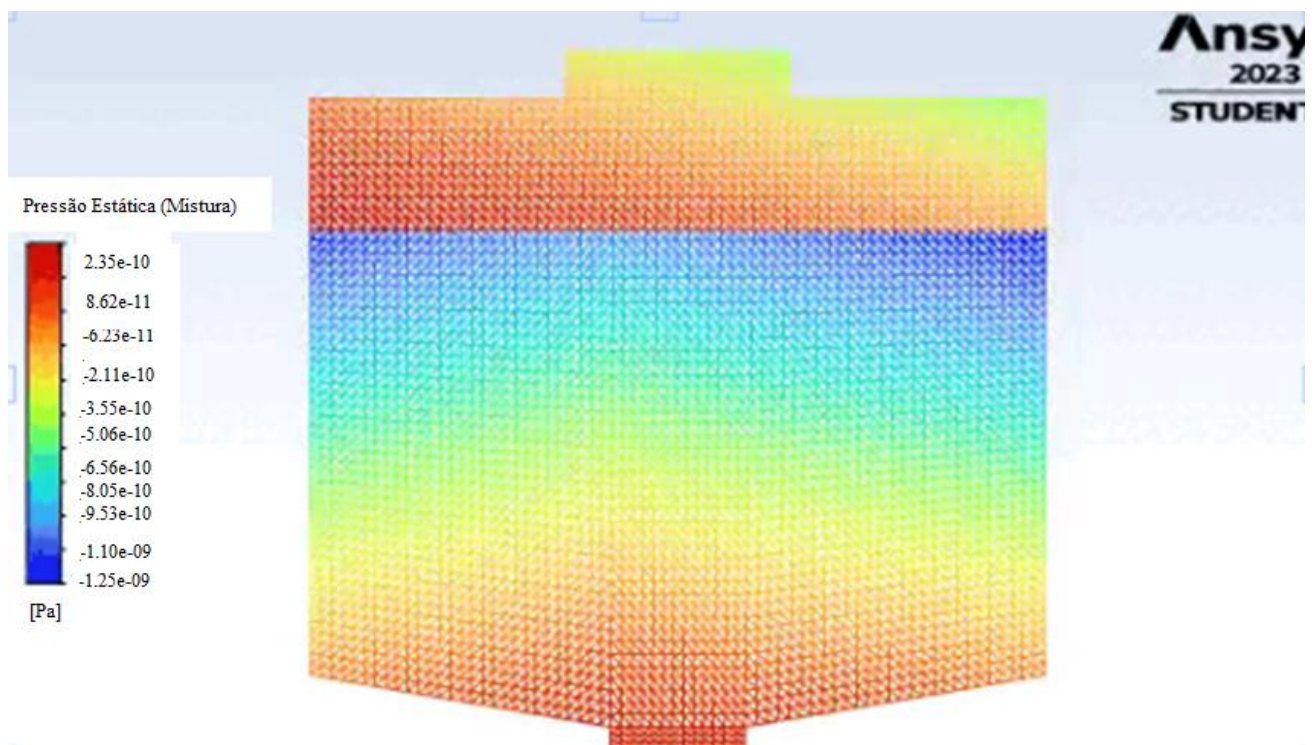


Figura 44: Gráfico da pressão estática em função da mistura.

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação buscou de forma sinérgica realizar a simulação e otimização de um espessador do tipo Deep Cone, para realização de pasta, com dados provenientes da literatura consultada, desenvolvida em testes laboratoriais, principalmente por Olcay, em sua dissertação e tese nos anos de 2008 e 2012. Esta literatura, forneceu embasamento para aplicação da simulação em um espessador de dimensões reais, avaliando seus resultados através de duas modelagens distintas, sendo elas o VOF para simulação e o modelo Euleriano para a abordagem de otimização. Através da utilização destes modelos, conseguiu-se obter resultados satisfatórios do efeito de cada parâmetro no sistema desenvolvido, sendo observado a pressão, a velocidade de sedimentação, viscosidade e energia, para conformação em sistema da polpa em pasta mineral. Ao final, observou-se uma melhora significativa dos resultados a partir de uma aplicação da viscosidade no circuito, de 0.83 para 0.92, demonstrando resultados interessantes dentro do sistema para uma mesma concentração de sólidos através dos regimes de fluxos, apresentando deste modo uma certa influência da variável em questão da função de distribuição de energia, e dos demais parâmetros, como a pressão do meio, a pressão externa do espessador e a velocidade de sedimentação. Foi obtido ao final principalmente, uma necessidade de quantidade de iterações quatro vezes menor ao otimizar o processo, passando de cerca de 200 iterações para apenas 50 iterações, deixando claro uma agregação com desempenho mais qualificado dos grãos, apresentando um resultado de sedimentação mais abrangente no circuito.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Este estudo é de extrema importância para a mineração, principalmente pela falta de investigações nesta linha de pesquisa. A pasta mineral tem repercutido nos últimos anos como uma alternativa para substituir a utilização de barragens de minérios, no entanto estudos como este, que buscam viabilizar o projeto são poucos, demonstrando assim a necessidade de mais estudos sobre o tema. Principalmente no quesito de minimização de custos e ainda, obtenção de parâmetros como os demonstrados neste trabalho, que geram influência no equipamento e podem ser melhorados. Além disso, um dos países com mais estudos acerca do estudado é a Austrália, deixando deste modo claro, a necessidade de comunicação entre as comunidades científicas, para obtenção de mais resultados sobre o tema. No mercado atualmente, existem inúmeros estudos de simulação e otimização para muitos tipos de espessadores, mas para espessadores do tipo pasta, como não é muito utilizado no Brasil, são poucos os estudos, indicado, desta forma, a necessidade de obter mais estudos em relação ao tema.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Novos estudos acerca de outros parâmetros envolvendo os espessadores de pasta.
- Pesquisas envolvendo análise multivariáveis para o sistema.
- Novos fluídos e/ou reagentes a serem mensurados e quantificados para este tipo de espessador.
- Análise geometalúrgica de todo o processo mineral, incluindo o espessador de pasta.
- Minimização de custos e maximização da produtividade em um circuito de beneficiamento de rejeitos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALDER B. J.; WAINWRIGHT, T. E. **Studies in Molecular Dynamics II: Behaviour of a Small Number of Elastic Spheres.** *J. Chem. Phys.*, 33:1439, 1960.

AMORIM, Ê. F. (2007). **Efeito do Processo de Deposição no Comportamento de** Brasília.

ANDERSON, T. B.; JACKSON, R. A. **Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds. I & EC Fundam.**, 6:527-534, 1967.

ANDRADE, P. C. **Tecnologia em Preparação de Pastas para Disposição de Rejeitos.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2017. 147p. (Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

ARAÚJO, A. P. P., LIMA, C. A. P. **Flotação de Rejeito de Minério de Zinco.** In: XX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, n 21, 2013, ouro preto, Anas do XXI SEIC, 2013.

ARAUJO, A. C., VALADÃO, G. E. S., HERNÁNDEZ, C. A. **Novas Alternativas para Disposição dos Rejeitos: É Possível se Quebrar Alguns Paradigmas?** In: XX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 2004, Florianópolis – Santa Catarina, Anais digitais, Junho de 2004, p. 169-176.

ARJMANDA. R.; MASSINAEI, M.; BEHNAMFARD, A. **Improving Flocculation and Dewatering Performance of Iron Tailings Thickeners.** Revista Journal of Water Process Engineering. Khaf, Iran. V. 31, Outubro de 2019, P. 1-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714418306603>>. Acessado em: 23 de Julho de 2021.

BALTAR, C. M. M. **Flotação.** Livro. 2010. Editora Universitária da UFPE. 537 p.

BAKER & HUGHES. Apresentação Técnica: **Deep Paste Thickener Systems for Tailings Disposal.** In: III INTERNATIONAL SEMINAR OF HIGH DENSITY AND PASTE TAILINGS 2001, Pilanesburg – South Africa, Apresentações digitais. Pilanesburg, May-2001.

BOWEN. R. M. **Theory of Mixtures.** In A. C. Eringen, editor, *Continuum Physics*, pages 1-127. Academic Press, New York, 1976.

BRACKEBUSCH, F. W. **Aspectos Básicos de los Sistemas de Relleno en Pasta.** In: PASTE TECHNOLOGY 2000 SEMINAR, April - 2000, Perth - Austrália, Apresentações digitais. Perth, April - 2000.

BRZEZINSKI, S. **Surface Disposal of Thickened Tailings.** In: PASTE TECHNOLOGY, 2000 SEMINAR, April - 2000, Perth - Austrália, Apresentações digitais. Perth, April -

2000.

CACCIUTTOLO, C.; HOLGADO, A. **Management of Paste Tailings in Chile: A Review of Practical Experiences and Environmental Acceptance.** In: PASTE 2016 – Proceedings of the 19th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. pp. 1–15. 2016.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva do minério de ferro.** Dissertação. Universidade de São Paulo. Engenharia de Sistemas Logísticos. 228 p. São Paulo. 2007.

CHAPMAN, S.; COWLING, T. G. **The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases.** Cambridge University Press, Cambridge, England, 3rd edition, 1990.

CHAVES, P.A. Espessamento. In: Chaves, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** 2 ed. São Paulo: Sigunus Editora, 2004. Volume 2, Capítulo 2, 49-116.

CHRYSS, A.; FOURIE, A. B.; MÖNCH, A.; ET. AL. **Towards an Integrated Approach to Tailings Management.** Revista The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, V. 112, n.11, Novembro de 2012, P. 965-969.

CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D. V. **Analysis of the Slump Test for onsite Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions.** *International Journal of Mineral Processing*, Melbourne – Australia, No. 70, Jun-2003, p. 3-21.

CROWE, C.; SOMMERFIELD, M.; TSUJI, Y. **Multiphase Flows With Droplets and Particles.** CRC Press. 1998.

DIAZ, P; SALAS, J. C.; CIPRIANO, A.; NÚÑEZ, F. **Random Forest Model Predictive Control for Paste Thickening.** Revista Minerals Engineering. Chile. V. 163, Março de 2021, P. 1-10.

DING, J.; GIDASPOW, D. **A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow.** *AIChE J.*, 36(4):523-538, 1990.

DREW, D. A.; LAHEY, R. T. **Particulate Two-Phase Flow.** Pages 509-566. Butterworth-Heinemann, Boston, 1993.

FALCUCCI, A. **A Influência de Floculantes Poliméricos na Formação de Pastas Mineraiis.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 96p. (Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. **Separação Sólido-Líquido.** In: LUZ, A. B., FRANÇA, S.C.A & BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios.** 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Capítulo 14, 597-647.

FEDOROVA, E.; PUPYSHEVA, E.; MORGUNOV, V. **Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach**. MDPI: Symmetry. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14112314>.

GHESHLAGHI, M. E.; GOHARRIZI, A. S.; SHAHRIVAR, A. A. **Simulation of a Semi-Industrial Pilot Plant Thickener Using CFD Approach**. Revista International Journal of Mining Science and Technology. Iran, V. 23, Ed. 1, Janeiro de 2013, P. 63-68.

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. **Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach**. In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, pages 75-82, 1992.

GOMES, R. C., RIBEIRO, L. M. F., ALBUQUERQUE FILHO, L. H., REZENDE, C. H. **Geotechnical Aspects of Enroded Sediments Relevant to Tailings Disposal Design**. ASCE Natural Hazards Review, Vol. 4 (2), p. 65 – 70, 2003.

HERNANDEZ, C.A.O., ARAUJO, A.C., VALADÃO, G.E.S., AMARANTE, S.C. **Pasting Characteristics of Hematite/Quartz System**. Mineral Engineering Vol 18, pp 935-939, 2005.

HERNANDEZ, C.A.O. **Caracterização de Pastas Mineraias**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 177p. (Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

HERNANDEZ, C.A.O. **Efeito da Adição de Reagentes Agregantes e de Ligantes sobre a Consistência em Pastas Mineraias**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 153p. (Tese de Doutorado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

IBRAM. **Informações da economia mineral brasileira 2015**. Portal do Instituto Brasileiro de Mineração, 2019. Disponível em: Acessado em 10 de janeiro de 2022.

JOHNSON, J. M., VIALPANDO, J., LEE, C. **Paste Tailings Management Alternative – Study Results for Molycorp’s Lanthanide Group Operations in Mountain Pass, California**. Mining Engineering, USA, February 2005, p. 51 - 56.

KARAS, R. L.; ZINGANO, A. **Relatório de atividades parcial**. Fundação Luiz Englert, Sindicato da indústria de extração de carvão do estado de Santa Catarina. 2009. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Projeto11-Backfill.pdf>. Acessado em: 20 de dezembro de 2022.

KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S.; MANDRE, N.R. **Characterization and Flocculation Studies of Fine Coal Tailings**. Revista The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, V. 114, n. 11, Novembro de 2014, P. 945-949.

LANGLOIS, J.; CIPRIANO, A. **Dynamic Modeling and Simulation of Tailing Thickener Units for the Development of Control Strategies**. Revista Minerals Engineering. Chile, V. 131, Janeiro de 2019, P. 131-139. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687518304771> >. Acessado em: 25 de Julho de 2021.

LARA, A. F. M. **Espessamento e Transporte de Pasta Mineral**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2011. 76p. (Dissertação, Especialização em Recursos Minerais).

LEBOWITZ, J. L. **Exact Solution of Generalized Percus-Yevick Equation for a Mixture of Hard Spheres**. *The Phy. Rev.*, 133(4A):A895-A899, 1964.

LUN; C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N. **Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field**. *J. Fluid Mech.*, 140:223-256, 1984.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios** 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

NETO, M. C. R. **Estudo de Pastas Mineraias a Partir do Espessamento de Lamas de Processamento Fosfático**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2016. 141p. (Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

OGAWA, S.; UMEMURA, A.; OSHIMA, N. **On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials**. *J. Appl. Math. Phys.*, 31:483, 1980.

OLCAY, R. H. B. **Desenvolvimento de Equipamento Produtor de Pasta Mineral para Aproveitamento dos Rejeitos das Lamas Calcárias e Diminuição do Impacto Ambiental**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 150p. (Tese de doutorado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

OLCAY, R. H. B. **Desenvolvimento de Equipamento Produtor de Pasta Mineral**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 169p. (Dissertação de Mestrado, Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais).

PORTES, A. M. C. **Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2013.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra**. 4ª edição. Tradução: MENEGAT, R. Porto Alegre, Bookman. 2006. 656 p.

RODRIGUES, A. B. **Riscos da Disposição de Rejeitos da Mineração e Técnicas Alternativas de Disposição**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, 2017. 38p. (Monografia, Mestrado em Engenharia de Minas).

RUAN, Z. E.; LI, C. P.; SHI, C. **Numerical Simulation of Flocculation and Settling Behavior of Whole-Tailings Particles in Deep-Cone Thickener**. *J. Cent. South Univ.* 23, 740–749. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3119-8>.

RUAN, Z.; WANG, Y.; WU, A.; YIN, S.; FEI JIN. "A Theoretical Model for the Rake Blockage Mitigation in Deep Cone Thickener: A Case Study of Lead-Zinc Mine in China", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 2130617, 7 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2130617>.

RUUSKA, J.; NIKULA, R. P.; RUHANEN, E.; KAUPPI, J.; KAUVOSAARI, S.; KOSONEN, M. **Data Analysis of a Paste Thickener**. Open Engineering, 2020. <https://doi.org/10.362-367.10.1515/eng-2020-0038>.

RUANAE, Z.; WUA, A.; BÜRGER, R.; BETANCOURT, F.; WANG, Y.; WANG, Y.; JIAO, H.; WANG, S. **Effect of Interparticle Interactions on the Yield Stress of Thickened Flocculated Copper Mineral Tailings Slurry**. Revista Powder Technology. China. V. 392. 2021. P. 278-285. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591021005921>>. Acessado em: 25 de Julho de 2021.

SCHWARZ, M. P. **Improving Zinc Processing Using Computational Fluid Dynamics Modelling – Successes and Opportunities**. Revista Minerals Engineering. Chile. V. 30. 2012. P. 12-18. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687512000398#!>>. Acessado em: 23 de Julho de 2021.

SEVERO, C. B. **Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos cerâmicos**. Monografia. CEFET-MG. Araxá –MG. 2019.

SILVERBLATT, C. E.; EASTON, J. H. (2002), Solid-Liquid Separation: **Characterization of Process Objectives and General Approach to Equipment Selection. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control**. Eds: Mular, A.L., Halbe, D.N. and Barratt, D.J., SME Inc., vol. 2, 1255-1261p.

Syamlal M.; Rogers, W.; O'Brien, T. J. **MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide**. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993. DOE/METC-9411004, NTIS/DE9400087.

TAN, C. K.; SETIAWAN, R.; BAO, J.; Bickert, G. **Studies on Parameter Estimation and Model Predictive Control of Paste Thickeners**. Revista Journal of Process Control. NSW, Austrália. V. 28, Abril 2015, P. 1-8. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152415000293> >. Acessado em: 24 de Julho de 2021.

THERIAULT, J. A.; FROSTIAK, J.; WELCH, D. **Surface Disposal of Paste Tailings at the Bulyanhulu Gold Mine**, Tanzania, 2001, p.1-8.

VALE, J. M. C. **Estratégia de Controle no Processamento de Minério de Ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2014. 46p. (Dissertação, Especialização em Recursos Minerais).

VIETTI, A.; DUNN, F. **The Thirsty Business of Diamond Mining**. In: **HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR**, Santiago - Chile, Apresentações digitais. Santiago, Apr-2002.

WANG, X.; CUI, B.; WEI, D.; SONG, Z.; HE, Y.; BAYLY, A. E. **CFD Simulation of Tailings Slurry Thickening in a Gravity Thickener**. Revista Powder Technology. China. V. 392, Novembro de 2021, P. 639-649. Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591021006318> >. Acessado em: 24 de Julho de 2021.

YAN, Y.D., GLOVER, S.M., JAMERSON, G.J., BIGGS, S. **The Flocculation Efficiency of Polydisperse Polymer Flocculants**. International Journal of Mineral Processing, 73, 161-175. 2004.