



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE MODIFICAÇÃO DE UM CHUTE DE VIRADOR DE VAGÕES

IGOR FELICIANO DA SILVA GALVÃO

**TUCURUÍ
2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE MODIFICAÇÃO DE UM CHUTE DE VIRADOR DE VAGÕES

IGOR FELICIANO DA SILVA GALVÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:
Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana

**TUCURUÍ
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE MODIFICAÇÃO DE UM CHUTE DE VIRADOR DE VAGÕES

IGOR FELICIANO DA SILVA GALVÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Interno: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Externo: Eng. Danilo Silva Santos
NDAE/CAMTUC/UFPA

Membro Interno: Prof. Me. Maycon Magalhães Castro
FEM/CAMTUC/UFPA

Conceito _____

Tucuruí, 14 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e ânimo nos momentos difíceis e felizes.

Agradeço aos meus pais Maria do Céu e Roge Galvão, ao meu irmão, Ítalo Roger e a minha avó Maria Rodrigues. Juntos sempre conseguimos superar qualquer coisa e sem vocês, nada disso seria possível. Amo vocês.

A Universidade Federal do Pará e a todos os colaboradores do Campus de Tucuruí, pela oportunidade de ter me graduado em Engenharia Mecânica.

A cidade de Tucuruí, levarei essa cidade em meu coração independente da cidade que irei daqui pra frente.

Ao professor André Luiz Amarante Mesquita pela orientação e pelos conselhos durante o meu tempo de graduação como bolsista.

Aos professores da faculdade de engenharia mecânica, Danilo Santos, Jessé Padilha, Bruno Wallace, Ezequiel Belo, Walter Santos, Artur Cunha, Davi Sales, Douglas Garcia e Fernando Nunes pelos ensinamentos sobre a engenharia e a vida.

Aos Engenheiros Arthur Fontana e Alex Lopes pela força e apoio durante o desenvolvimento desse trabalho, espero poder encontrar mais vezes pela vida.

Um agradecimento especial para minha querida amiga Alice que me ajudou bastante nesse período.

“Se um homem fala ou age com o pensamento puro, a felicidade o acompanha como uma sombra que jamais o deixa”.

(Buda)

PROJETO DE MODIFICAÇÃO DE UM CHUTE DE VIRADOR DE VAGÕES

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada do escoamento granular em um transportador de sapatas de um virador de vagões, utilizando o Método de Elementos Discretos (DEM). Foram investigados quatro tipos de materiais: finos concentrados de minério de ferro da mina de Serra Sul (FCSS), sinter feed de minério de ferro da mina de Carajás (SFCK), manganês com concentração de 14% (MF14) e pellet feed de minério de ferro da mina de Carajás (PFCJ). O objetivo principal foi avaliar o grau de entupimento do chute do virador de vagão na região da grelha e buscar soluções para melhorar o escoamento. Os resultados revelaram que o manganês e o pellet feed foram os materiais que apresentaram os maiores problemas de entupimento. Como medida corretiva, foram realizadas modificações no equipamento, incluindo alterações no chute de transferência do virador de vagões e na grelha. Este trabalho destaca a metodologia utilizada para a análise do escoamento nesse equipamento e os critérios adotados no projeto das modificações. Os resultados obtidos fornecem insights valiosos para o entendimento do comportamento granular durante o processo de escoamento e contribuem para a otimização do desempenho do sistema de transporte de materiais granulares.

Palavras-chave: *escoamento granular, virador de vagões, modificação do equipamento.*

ABSTRACT

This work presents a detailed analysis of granular flow in a wagon tippler shoe conveyor using the Discrete Element Method (DEM). Four types of materials were investigated: concentrated fine iron ore from the Serra Sul mine (FCSS), iron ore sinter feed from the Carajás mine (SFCK), 14% manganese concentrate (MF14), and iron ore pellet feed from the Carajás mine (PFCJ). The main objective was to evaluate the degree of blockage in the wagon tippler chute in the grid region and seek solutions to improve the flow. The results revealed that manganese and pellet feed were the materials that presented the greatest blockage problems. As a corrective measure, modifications were made to the equipment, including changes to the wagon tippler transfer chute and the grid. This paper highlights the methodology used for the flow analysis in this equipment and the criteria adopted in the design of the modifications. The obtained results provide valuable insights into the granular behavior during the flow process and contribute to the optimization of the performance of the granular material transport system.

Keywords: *granular flow, wagon tippler, equipment modification.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Virador de Vagões.....	21
Figura 2 – Estrutura de um chute de transferência.....	22
Figura 3 – Esquema de caixas de pedra, dentro de um chute.....	23
Figura 4 – Esquema real de chapas de desgaste.....	24
Figura 5 – Bota na parte inferior de um chute.....	24
Figura 6 – Porta de inspeção na parte superior de um chute (capota).....	25
Figura 7 – Guias laterais – a) Desenho e b) vista real das guias laterais.....	25
Figura 8 – Ilustração esquemática das forças agindo em uma partícula i a partir do contato com a partícula j e do não contato com a partícula k (aqui uma força de coesão devido à ponte líquida).....	27
Figura 9 - Esquema do ciclo do DEM.....	28
Figura 10 – Composição de um elemento de solo não saturado.....	30
Figura 11 – Material coesivo com falso ângulo de repouso.....	31
Figura 12 – Ângulo de repouso medido numericamente (DEM).....	31
Figura 13 – Representação dos contatos entre duas partículas esféricas de raios R1 e R2.....	33
Figura 14 : Impacto oblíquo de uma partícula.....	35
Figura 15 – Estrutura lógica do BFA.....	37
Figura 16 - Interface principal <i>Bulk Flow Analyst</i> TM	38
Figura 17 – <i>Aba Project</i>	38
Figura 18 – Material: Minério de Ferro.....	39
Figura 19 – Geometria de um chute reconhecida pelo BFA.....	40
Figura 20 – Superfícies internas do chute.....	40
Figura 21 – Caixa de alimentação (<i>InjectionBox</i>).....	41
Figura 22 – Correria transportadora de descarga (<i>BoundaryWTraction</i>).....	41
Figura 23 – Cilindro motriz ou tambor motriz (<i>Cylind</i>).....	42
Figura 24 – Correia transportadora de recebimento (Correia Receptora).....	42
Figura 26 – Guia <i>Simulations</i>	42
Figura 27 – Guia <i>Run Manager</i>	43
Figura 28 – Modelo do aparato experimental caixa de fluxo Big Box Flow.....	44
Figura 29 – Altura de material utilizado na caixa de armazenamento.....	45
Figura 30 – Total de ensaios realizados para o material FCSS.....	46
Figura 31 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	46

Figura 32 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	47
Figura 33 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	47
Figura 34 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	47
Figura 35 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	48
Figura 36 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	48
Figura 37 – Total de ensaios realizados para o material SFCK.....	49
Figura 38 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	49
Figura 39 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	50
Figura 40 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	50
Figura 41 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	51
Figura 42 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	51
Figura 43 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	51
Figura 44 – Total de ensaios realizados para o material PFCJ.....	52
Figura 45 – Comparação dos resultados – 9,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	52
Figura 46 – Comparação dos resultados – 9,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	53
Figura 47 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	53
Figura 48 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	53

Figura 49 – Comparação dos resultados – 14% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	54
Figura 50– Comparação dos resultados – 14% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	54
Figura 51 – Total de ensaios realizados para o material MF14.....	55
Figura 52 – Comparação dos resultados – 13% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	55
Figura 53 – Comparação dos resultados – 13% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	56
Figura 54 – Comparação dos resultados – 17,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	56
Figura 55 – Comparação dos resultados – 17,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	56
figura 56 – Comparação dos resultados – 22% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	57
figura 57 – Comparação dos resultados – 22% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.....	57
Figura 58 - Teste de atrito em célula de cisalhamento.....	61
Figura 59 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 7%, defletora de 90°.....	69
Figura 60 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 7%, defletora de 15°.....	69
Figura 61 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 8,5%, defletora de 90°.....	70
Figura 62 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 8,5%, defletora de 15°.....	71
Figura 63 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 11%, defletora de 90°.....	72
Figura 64 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 11%, defletora de 15°.....	72
Figura 65 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 7%, defletora de 90°.....	73

Figura 66 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 7%, defletora de 15°	74
Tabela 12 – Parâmetros de calibração para o material SFCK a umidade 7%	74
Figura 67 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 8,5%, defletora de 90°	75
Figura 68 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 8,5%, defletora de 15°	75
Figura 69 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 11%, defletora de 90°	76
Figura 70 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 11%, defletora de 15°	77
Figura 71 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 9%, defletora de 90°	78
Figura 72 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 9%, defletora de 15°	78
Figura 73 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 11%, defletora de 90°	79
Figura 74 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 11%, defletora de 15°	80
Figura 75 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 14%, defletora de 90°	81
Figura 76 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 14%, defletora de 15°	81
Figura 77 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 13%, defletora de 90°	82
Figura 78 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 13%, defletora de 15°	83
Figura 79 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 17,5%, defletora de 90°	84
Figura 80 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 17,5%, defletora de 15°	84
Figura 81 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 22%, defletora de 90°	85

Figura 82 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 22%, defletora de 15°	86
Figura 83. Chute do VV-311K-03 para a TR-311K-05 – Vista geral.	88
Figura 84. Correia TR-311K-05 – Detalhe grelha e bancada plana.	88
Figura 85. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03.	90
Figura 86. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento	90
Figura 87. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03.	91
Figura 88. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03	91
Figura 89. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03.	92
Figura 90. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05	92
Figura 91. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05	93
Figura 92. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05	93
Figura 93. Material presente na simulação.	94
Figura 94. Desalinhamento da correia transportadora da lança.	94
Figura 95. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03	95
Figura 96. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento	96
Figura 97. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03.	96
Figura 98. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03	97
Figura 99. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03.	97
Figura 100. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05	98
Figura 101. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05	98
Figura 102. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05	99
Figura 103. Material presente na simulação	99
Figura 104. Desalinhamento da correia transportadora da lança.	100
Figura 105. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03	101
Figura 106. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento	101
Figura 107. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03.	102
Figura 108. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03	102
Figura 109. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03.	103
Figura 110. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05	103
Figura 111. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05	104
Figura 112. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05	104
Figura 113. Material presente na simulação.	105

Figura 114. Desalinhamento da correia transportadora da lança.....	105
Figura 115. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03.....	106
Figura 116. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento.....	107
Figura 117. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03.....	107
Figura 118. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03.....	108
Figura 119. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03.....	108
Figura 120. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05.....	109
Figura 121. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05.....	109
Figura 122. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05.....	110
Figura 123. Material presente na simulação.....	110
Figura 124. Desalinhamento da correia transportadora da lança.....	111
Figura 125. Evolução do número de partículas na simulação ao longo do tempo.....	111
Figura 126. Modificação proposta para a grelha.....	113
Figura 127. Detalhe da modificação da grelha e bancada.....	113
Figura 128. Vista geral do escoamento do material no chute do alimentador.....	114
Figura 129. Vista lateral do escoamento do material no chute do alimentador.....	114
Figura 130. Vista frontal do escoamento do material na bancada.....	115
Figura 131. Esforços Normais no chute do alimentador do VV-03.....	115
Figura 132. Esforços Cisalhantes no chute do alimentador do VV-03.....	116
Figura 133. Esforços normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05.....	116
Figura 134. Esforços cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05.....	117
Figura 135. Tensões Normais (a) e cisalhante (b) na correia receptora do TR 311K-05.....	117
Figura 136. Material presente na simulação.....	118
Figura 137. Desalinhamento da correia ao longo da simulação.....	118
Figura 138. Vista geral escoamento material no chute do alimentador do VV-03.....	119
Figura 139. Vista frontal escoamento material na grelha e bancadas do chute.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FLUIDPAR – Laboratório de fluidodinâmica e particulados.

UFPA – Universidade Federal do Para.

ABIFER - Associação Brasileira da Indústria Ferroviária

CAMTUC – Campus de Tucuruí.

DEM - Discrete Element Method (Método dos Elementos Discretos).

NBR – Norma brasileira regulamentadora.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BFA - Bulk Flow Analyst.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – Densidade.

g – Aceleração da gravidade.

D – Diâmetro da partícula.

ρ_b – Densidade aparente do material granular.

J_i - Momento de inércia da partícula

ϕ – ângulo de repouso.

w – Umidade.

% - Por cento.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.2.	OBJETIVOS.....	19
1.2.1.	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1.	CADEIA DE PRODUÇÃO DO MINÉRIO.....	20
2.2.	VIRADORES DE VAGÃO.....	21
2.3.	CHUTES DE TRANSFERÊNCIA.....	21
2.3.1.	ESTRUTURA DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA.....	22
2.3.2.	CAIXA DE PEDRA.....	23
2.3.3.	CHAPAS DE DESGASTES.....	23
2.3.4.	BOTA.....	24
2.3.5.	PORTA DE INSPEÇÃO.....	25
2.3.6.	GUIAS.....	25
2.4.	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS (DEM).....	26
2.5.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS GRANULARES.....	29
2.5.1.	MASSA ESPECIFICA REAL E APARENTE.....	30
2.5.2.	ÂNGULO REPOUSO (β).....	30
2.5.3.	UMIDADE (W).....	32
2.5.4.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	32
2.6.	MODELOS DE HERTZ-MINDLIN COM COESÃO JKR.....	33
2.7.	COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO (DIRECT SHEER TEST).....	34
2.8.	COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO.....	35
3.	MATERIAIS E METODOS.....	37
3.1.	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DEM.....	37
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	43

3.2.1.	ENSAIO EM GRANDE CAIXA DE FLUXO.....	44
3.2.2.	ENSAIOS PARA FCSS	45
3.2.4.	ENSAIOS PARA PFCJ	52
3.2.5.	ENSAIOS PARA MF14.....	54
3.2.6.	VERIFICAÇÃO DA UMIDADE NOS ENSAIOS.....	57
3.3.	ENSAIOS DE ATRITO DE MATERIAL COM A PAREDE.....	61
3.3.1.	ENSAIO ATRITO PARA FCSS.....	62
3.3.2.	ENSAIO ATRITO PARA SFCK	63
3.3.3.	ENSAIO ATRITO PARA PFCJ	64
3.3.4.	ENSAIO ATRITO PARA MF14	66
3.4.	CALIBRAÇÃO DO MODELO NÚMÉRICO	67
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	87
4.2.	PREMISSAS DO PROJETO	87
4.2.1.	CHUTE DE TRANSFERÊNCIA.....	88
4.3.	RESULTADO DA SIMULAÇÃO.....	89
4.3.1.	MATERIAL ACUMULADO	111
4.4.	SUGESTÃO DE MELHORIA.....	112
4.4.1.	COMPARATIVO DO ESCOAMENTO ENTRE AS SOLUÇÕES.....	119
5.	CONCLUSÃO.....	120
5.1.	SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO.....	121
	REFERÊNCIAS.....	122
	ANEXO A – Vídeos das simulações	125
	ANEXO B – Desenho básico da modificação	126

1. INTRODUÇÃO

“A eficiência no transporte contínuo de minérios é um aspecto crucial para o funcionamento adequado das operações nas indústrias de mineração” (LEYVA; DENSSAUNE, 2007). No entanto, em equipamentos como o virador de vagão, o escoamento granular pode apresentar desafios significativos, resultando em problemas de entupimento e interrupções na produção. Nesse contexto, o presente estudo de caso visa investigar o comportamento do escoamento granular de minério de ferro e manganês em um virador de vagões, analisando o grau de entupimento no chute da e na região da grelha.

A problemática reside no fato de que o escoamento granular desses materiais não flui adequadamente, o que impacta negativamente a eficiência operacional. Assim, o objetivo principal desta pesquisa é identificar os principais fatores que afetam o escoamento granular nesse equipamento específico, a fim de propor soluções e modificações adequadas no virador de vagões.

Para atingir esses objetivos, será adotada a metodologia do estudo de caso, com ênfase na aplicação do Método dos Elementos Discretos (DEM). O DEM permite simular o comportamento granular em nível de partícula, fornecendo dados valiosos sobre as interações entre as partículas e as superfícies do equipamento. Dessa forma, será possível obter um entendimento mais aprofundado das causas do entupimento e desenvolver soluções adequadas para melhorar o escoamento granular.

Os resultados preliminares até o momento indicam um impacto positivo das modificações propostas. As alterações no chute de transferência e na grelha demonstram uma melhoria significativa no escoamento granular, reduzindo o grau de entupimento e possibilitando um transporte mais eficiente dos materiais.

Este estudo contribuirá para o avanço do conhecimento na área de escoamento granular em equipamentos de transporte de minérios, fornecendo *insights* valiosos sobre os fatores que influenciam o entupimento em um virador de vagões. Além disso, soluções e modificações propostas têm o potencial de otimizar o desempenho operacional, reduzindo os custos de manutenção e minimizando as interrupções na produção.

Ao longo deste trabalho, serão apresentados os detalhes da metodologia utilizada, os resultados obtidos, bem como a discussão dos achados em relação aos objetivos propostos. Por fim, serão apresentadas as conclusões finais, juntamente com recomendações para futuras pesquisas nessa área.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Fazer um projeto de melhoria de um chute de um virador de vagões.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Investigar o comportamento do escoamento granular dos seguintes materiais manganês e minério de ferro em um virador de vagões.
- Analisar o grau de entupimento no chute e na região da grelha.
- Fazer a calibração de quatro tipos de materiais.
- Fazer a caracterização para quatro tipos de materiais.
- Fazer simulação numérica na condição atual.
- Propor melhoria.
- Fazer simulação na condição proposta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CADEIA DE PRODUÇÃO DO MINÉRIO

A cadeia produtiva do minério é composta por diversas etapas, desde a exploração mineral até o transporte e embarque do produto final no porto. Cada etapa possui particularidades e desafios específicos, que são gerenciados de forma integrada para garantir a eficiência e a qualidade do produto final. A cadeia de produção do minério envolve as seguintes etapas:

- a) **Exploração mineral:** Na fase de exploração mineral é fundamental para identificar áreas com potencial para ocorrências de minérios, por meios de estudos geológicos e geofísicos. Segundo Gonçalves *et al.*(2020), “A caracterização mineralógica é importante para identificar as características dos minerais presentes no minério, utilizadas no planejamento e controle do processo de beneficiamento e na definição de estratégias de mercado”;
- b) **Extração:** A extração do minério pode ser realizada por métodos a céu aberto e subterrâneos, dependendo das características do depósito mineral. Rocha et al.(2017) destaca que “A perfuração e desmonte de rochas são etapas fundamentais na mineração a céu aberto, utilizando perfuratrizes e explosivos para desmontar a rocha e liberar o minério”;
- c) **Beneficiamento:** A etapa do beneficiamento é responsável por separar os minerais úteis dos resíduos, por meio de processos de separação física e química, com objetivo de maximizar a concentração de minerais úteis e minimizar a quantidade de resíduos. Barros et al. (2018) afirma que “A eficiência do processo de beneficiamento é fundamental para garantir a qualidade do produto final e reduzir os custos de produção”;
- d) **Gestão ambiental:** A gestão ambiental e o desenvolvimento sustentável são temas cada vez mais relevantes na mineração, envolvendo a implementação de programas de monitoramento e controle ambiental, gestão de resíduos e recuperação de áreas degradadas. Silva et al (2019) ressalta que “A sustentabilidade é um fator crucial para a perenidade da atividade de mineração, e a gestão ambiental é a ferramenta essencial para garantir a conformidade legal e a responsabilidade social da empresa”;
- e) **Transporte e Embarque:** O transporte e embarque do minério envolvem a utilização de caminhões, trens e correias transportadoras, até o porto onde é embarcado em navios para exportação. Barros et al (2018) afirma que “O transporte e embarque são etapas

críticas da cadeia produtiva do minério, que exigem planejamento, eficiência e segurança para cumprir as exigências regulatórias e ambientais aplicáveis”.

2.2. VIRADORES DE VAGÃO

Os viradores de vagão, também conhecidos como viradores de trem ou tombadores Figura 1, são equipamentos utilizados para despejar o conteúdo de vagões ferroviários de forma rápida e eficiente. Eles são comumente encontrados em indústrias que lidam com materiais a granel, como a mineração e siderúrgica. O funcionamento básico de um virador de vagão é simples: o vagão é posicionado sobre uma plataforma rotativa, que pode ser acionada manual ou automaticamente. A plataforma é acionada para girar o vagão até que ele fique de cabeça pra baixo, permitindo que o conteúdo seja descarregado por gravidade. “Ao chegar no porto, o vagão carregado com minério passa pelo virador de vagões, o qual realiza o semi-giro (aproximadamente 180°) do vagão, em seu eixo longitudinal, de forma a despejar o minério que está dentro dele no alimentador de sapatas (TAVARES, 2012). Dependendo do modelo, o virador pode ser equipado com sistemas de segurança, como travas e sensores, para garantir a estabilidade do vagão durante o processo.

Figura 1 – Virador de Vagões



Fonte: VALE (2011)

2.3. CHUTES DE TRANSFERÊNCIA

Durante o manuseio e processamento de materiais particulados, são frequentemente utilizados pontos de transferência que permitem mudar a quantidade de movimento do material, seja em direção, sentido e/ou módulo. Nas indústrias siderúrgicas e em muitas outras que

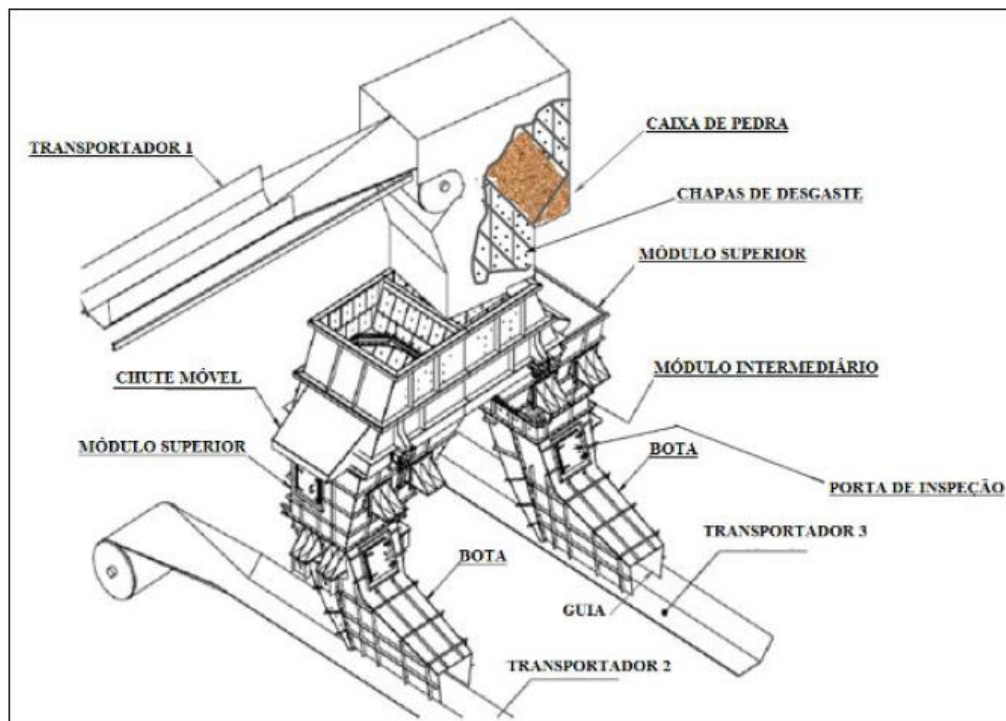
processam materiais granulados, os pontos de transferência envolvem normalmente [...] transportadores de correias de alimentação e recebimento, calhas de transferência (chutes), alimentadores, torre de suporte da transferência, silos, etc. (LEYVA; DENSSAUNE, 2007).

Segundo Chaves (2011, p.229): “Os chutes transferem o material de um transportador para o outro e para outros equipamentos.”. Assim, o chute pode ser considerado um equipamento, ou dispositivo, ou ponto de transferência, destinado a dirigir o material, pela ação da gravidade, a um determinado ponto ou região, mudando assim a quantidade de movimento do material.

2.3.1. ESTRUTURA DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA

A presente seção mostra as partes que constituem um chute de transferência, ilustrado na Figura 2. O transportador 1 é denominado de transportador de descarga (“*discharge conveyor*”). Os transportadores 2 e 3 são denominados transportadores de recebimento (“*receiving conveyor*”). Nota-se que o chute é constituído de caixa de pedra, chapas de desgaste, módulos (superior, intermediário e inferior), bota, porta de inspeção e guias.

Figura 2 – Estrutura de um chute de transferência.

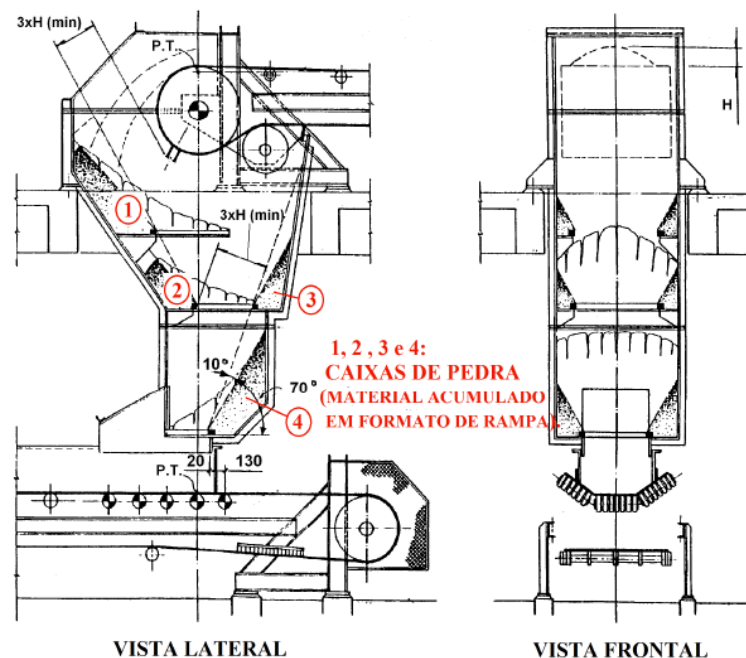


Fonte: Rocha e Macias (2012)

2.3.2. CAIXA DE PEDRA

A caixa de pedra é uma parte importante dos chutes de transferências de material granular, como pode ser visualizada na Figura 3 a forma como é construída. Segundo Swinderman *et al.* (2012) que tem como objetivo desacelerar o material que está sendo transferido, absorver impacto e reduzir a velocidade do fluxo, de forma a minimizar o desgaste e a formação de obstruções no equipamento. Na caixa de pedra é formado um acúmulo de material, que faz um volume morto, não atingindo a parede do chute.

Figura 3 – Esquema de caixas de pedra, dentro de um chute.



Fonte: Rocha e Macias (2013)

2.3.3. CHAPAS DE DESGASTES

As chapas de desgaste são placas que são instaladas no interior do chute para protegê-lo contra o desgaste causado pelo material a granel que está sendo transferido como pode ser visualizada na Figura 4. Segundo Swinderman *et al.* (2012) elas são geralmente feitas de materiais resistentes, como aço de alta dureza ou cerâmica, são substituídas periodicamente para manter a eficiência do equipamento e integridade do chute.

Figura 4 – Esquema real de chapas de desgaste.



Fonte: VALE

2.3.4. BOTA

A bota é um componente importante em chutes de transferência de material granular, pois é responsável pela distribuição do material de maneira uniforme na correia transportadora. Segundo Castro *et al.* (2020) a bota tem como função principal evitar o impacto do material com a correia transportadora, além de promover uma distribuição uniforme do fluxo do material na correia. Segundo Santos (2021) a bota também pode ser utilizada para controlar a altura do material na correia transportadora, o que pode afetar a eficiência do processo de transporte, na Figura 5 pode ser vista uma bota na parte inferior do chute.

Figura 5 – Bota na parte inferior de um chute.



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012)

2.3.5. PORTA DE INSPEÇÃO

A porta de inspeção é uma abertura que pode ser instalada em diferentes pontos do chute, permitindo o acesso interno para inspeções, limpeza e manutenção do equipamento. Ela é projetada para ser facilmente removida ou aberta para permitir o acesso seguro dos peradores, e apresentada na Figura 6 a porta de inspeção de um chute localizada no módulo superior.

Figura 6 – Porta de inspeção na parte superior de um chute (capota).

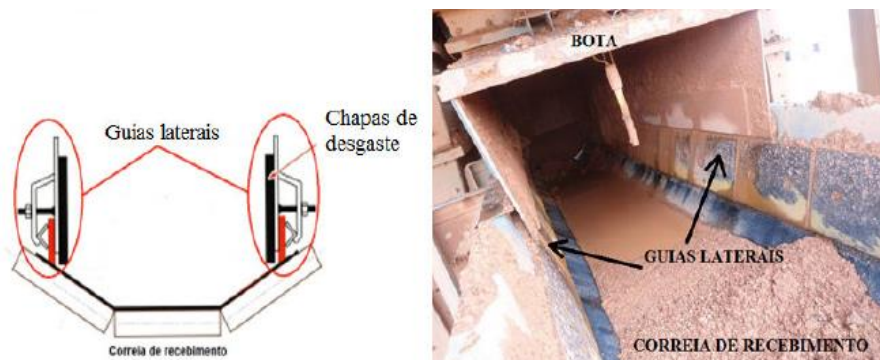


Fonte: VALE

2.3.6. GUIAS

As guias são estruturas que são projetadas para direcionar o fluxo do material granel ao longo do chute, ajudando manter o fluxo uniforme e a minimizar a formação de obstruções. Elas podem ser construídas em aço ou polímeros resistentes ao desgaste e podem ter formatos e tamanhos variados, dependendo das características do material que está sendo transferido, como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Guias laterais – a) Desenho e b) vista real das guias laterais.



Fonte: a) Adaptado de BENJAMIM, C *et al.* b) VALE

Swinderman *et al.* (2012) destaca a importância das guias como um componente fundamental no projeto de chutes de transferência de material granular. Sua contribuição ressalta a necessidade de considerar cuidadosamente a geometria e o tipo das guias para garantir a eficiência do processo, reduzir o desgaste dos componentes do chute e aumentar a segurança operacional.

2.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

O Método dos Elementos Discretos (MED ou DEM - *Discrete Element Method*) é um método de simulação numérica do movimento de partículas, normalmente modeladas por geometrias simples, através de um sistema fixo ou móvel variante com o tempo. O método fornece uma detalhada descrição das posições, velocidades e forças agindo em cada corpo ou partícula assim como nos contornos físicos em cada instante de tempo na análise devido a forças de atrito, eletrostáticas, magnéticas, gravidade e coesão (MESQUITA, 2013).

O DEM considera um número finito de partículas discretas interagindo por meio de forças de contato e não-contato, e cada partícula, no sistema considerado, pode se mover em movimentos de translação e rotação e tem seu movimento pela 2ª Lei do Movimento de Newton (Zhu et al, 2007).

O método foi originalmente desenvolvido por Cundall e Strack (1979). Que modelaram sistemas bem simples. Nos 15 anos seguintes, a modelagem foi restrita a problemas com simples geometrias, em escala reduzida (100 a 1000 partículas) e em 2D, tais como em escoamentos de chutes, pequenos silos e células de cisalhamento, mas apenas com o intuito de compreender os fundamentos do escoamento de materiais granulares (CLEARY, 2010).

Com o desenvolvimento da tecnologia computacional, os tamanhos (computacionais) dos modelos em estudos aumentaram significativamente a partir de meados dos anos 90. Modelos constituídos na faixa entre 10.000 a 100.000 partículas, sendo a maioria em 2D e alguns poucos já em 3D com geometria bem simples. Atualmente, o método tem sido aplicado em grande escala industrial, em três dimensões e em sistemas com geometrias complexas (CLEARY, 2010).

A modelagem do movimento das partículas envolve a solução da equação da segunda lei de Newton para o movimento, utilizando integração numérica. As partículas são afetadas por forças e momentos externos, que surgem de colisões com outras partículas, interações com as superfícies do fluxo, atração gravitacional, influência de ondas geradas por partículas que

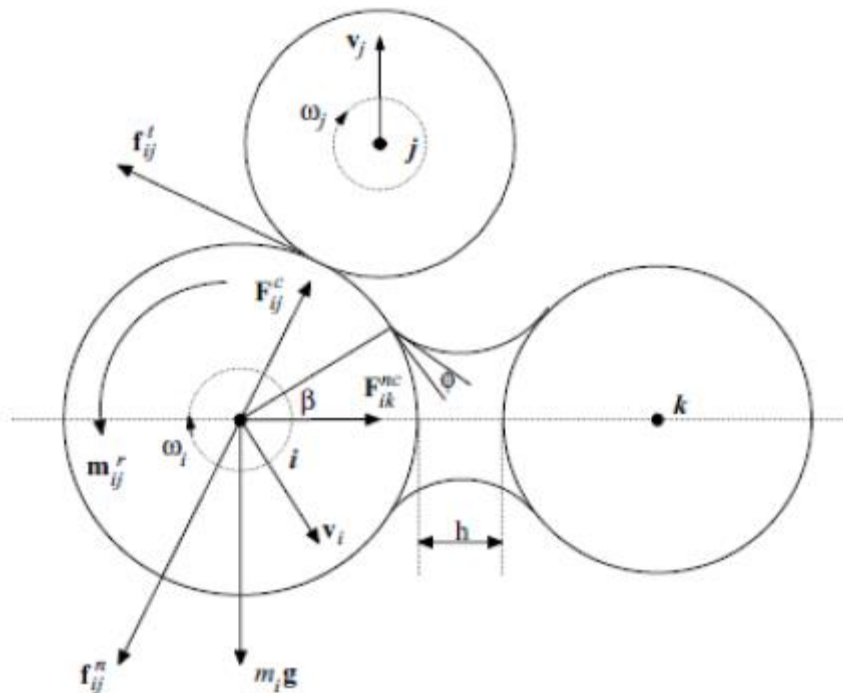
não estão em contato direto e do fluido que as envolve. Portanto, no Método dos Elementos Discretos (DEM), as equações que governam o movimento, de acordo com a segunda lei de Newton para translação e rotação, são expressas nas equações 1 e 2.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + \sum_k F_{ik}^{nc} + F_i^f + F_i^g \quad (1)$$

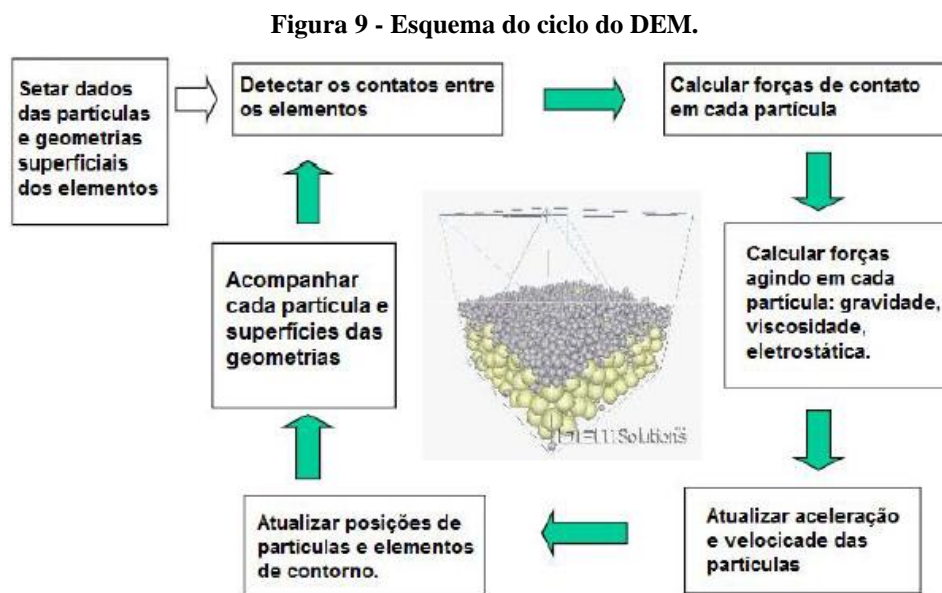
$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

Sendo m_i e J_i a massa e o momento de inércia da partícula i , respectivamente; v_i e ω_i as velocidades translacional e angular da partícula i , respectivamente; F_{ij}^c e M_{ij} são forças de contato e torque agindo, respectivamente, na partícula i pela partícula j ou pelas paredes; F_{ik}^{nc} é a força de não contato atuando na partícula i pela partícula k ou por outras fontes; F_i^f é a força de interação partícula-fluido na partícula i ; e F_i^g é a força gravitacional (ZHU et al., 2007). A Figura 8 esquematicamente mostra as típicas forças e momentos envolvidos em uma simulação DEM.

Figura 8 – Ilustração esquemática das forças agindo em uma partícula i a partir do contato com a partícula j e do não contato com a partícula k (aqui uma força de coesão devido à ponte líquida).



Após a obtenção das informações sobre as forças e torques envolvidos, procede-se à resolução das Equações (1.1) e (1.2) por meio de integração numérica. Dessa forma, é possível determinar as trajetórias e velocidades para um instante de tempo específico. No próximo intervalo de tempo, as influências externas são novamente avaliadas e as respostas (deslocamento e Velocidade) são recalculadas. Esse processo é repetido ao longo de toda a análise, conforme ilustrado na Figura 9. Na abordagem DEM, geralmente considera-se necessário escolher um intervalo de tempo menor que um valor crítico, garantido assim que, durante um único incremento de tempo, as perturbações nas partículas e no fluido não se propaguem além das partículas e fluidos vizinhos (CUNDALL e STRACK, 1979; apud NASATO, 2011).



Fonte: DEM solutions - 2013 com adaptações.

Segundo Zhu *et al.* (2008) na análise DEM as partículas são frequentemente representadas por discos ou esferas, dependendo da análise em duas ou três dimensões, respectivamente. Essas representações são mais favoráveis, pois possuem eficiência computacional.

Com base nas pesquisas realizadas, observa-se uma crescente eficácia do DEM na solução e avaliação de questões relacionadas ao fluxo de materiais granulares.

Na literatura existem uma grande variedade de aplicações do Método dos Elementos Discretos no escoamento de granulados. Zhu *et al.* (2008) e Cleary (2010), em seus trabalhos, descrevem várias aplicações do método na indústria, principalmente na mineração.

2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS GRANULARES

Os materiais granulares são caracterizados por um agrupamento de partículas que, de forma geral, possuem dimensões macroscópicas e variadas formas e tamanhos. São exemplos, minerais, carvão, areia, seixo, grãos de milho, entre outros. Esses materiais são reconhecidos como particulados, apresentam um comportamento interativo entre si (SHULZE, 2007). Esse comportamento refere-se às interações entre as partículas que ocorrem nesse contexto.

É bastante frequente encontrar nas áreas da Engenharia e da Física abordagens que utilizam conceitos físico-matemático para tratar de colisões inelásticas, forças de atrito, quantidade de movimento, energias, etc., envolvendo sistemas não granulares. No entanto, atualmente, os materiais granulares, sejam eles secos ou úmidos, têm ganhado destaque nesse campo, especialmente no contexto da aplicação do Método dos Elementos Discretos (DEM). Consequentemente, o foco de muitos cientistas tem se voltado para a compreensão da dinâmica dos fenômenos em sistemas particulados, que anteriormente recebiam menos atenção. Destaca-se, a influência de forças adesivas, tais como as forças de van der Waals, efeito capilar e tensão superficial, força eletrostática e pontes de líquido, coexistindo nos velhos fenômenos, como é o caso da coesão e adesão (SCHULZE, 2007).

O interesse em compreender o comportamento dinâmico dos materiais é justificável devido à sua ampla presença no mercado. De acordo com a Federação Europeia de Engenharia Química, cerca de 60% de todos os produtos produzidos na indústria química europeia, são sólidos granulares e, ainda, 20% dessa produção usam sólidos granulares em seus processos (SCHULZE, 2007).

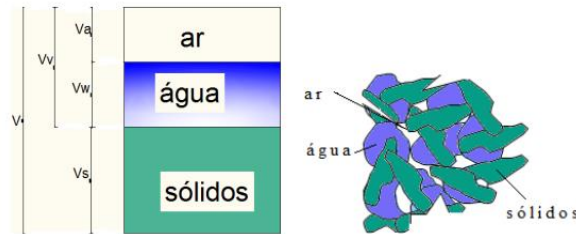
As pesquisas relacionadas à umidade abrangem uma ampla gama de observações. Um exemplo notável é o estudo realizado por Mitari (2006), que investigou a capacidade da areia de praia úmida sustentar enormes e relativamente altos castelos de areia de tamanho considerável, construído por crianças. Essa pesquisa ajuda a entender os fundamentos quantitativos das forças das pontes de líquido presentes nesse contexto.

Por outro lado, o emprego de modelos numéricos em simulações de sistemas granulares tem se tornado uma investigação na prevenção de diversos problemas da cadeia industrial, a exemplo, o efeito provocado pela umidade sobre sistemas granulares não saturados por líquido, que levam ao fenômeno da liquefação (ASHMAWY et al., 2003).

2.5.1. MASSA ESPECÍFICA REAL E APARENTE

A Figura 10 é uma amostra de material particulado. Nela identificamos as variáveis referenciadas no tratamento de sólidos granulares.

Figura 10 – Composição de um elemento de solo não saturado.



Fonte: Rocha e Macias (2012)

V_T é o volume total, $V_T = V_S + V_V$

V_V é o volume de vazios, $V_V = V_a + V_W$

V_a é o volume de ar

V_W é o volume de água

V_S é o volume de sólidos

m_S é a massa total dos sólidos

A massa específica aparente é a razão entre a massa total dos sólidos e o volume total dos sólidos, dado segundo a expressão;

$$\rho_b = \frac{m_S}{V_T} \quad (3)$$

A massa específica real é a razão entre a massa total dos sólidos e o volume dos sólidos, isto é;

$$\rho = \frac{m_S}{V_S} \quad (4)$$

2.5.2. ÂNGULO REPOUSO (β)

O ângulo de repouso (β) é fisicamente definido por Schulz (2007, p. 172) como a inclinação medida na base de uma pilha dos sólidos granulares, não compactados, após o escoamento.

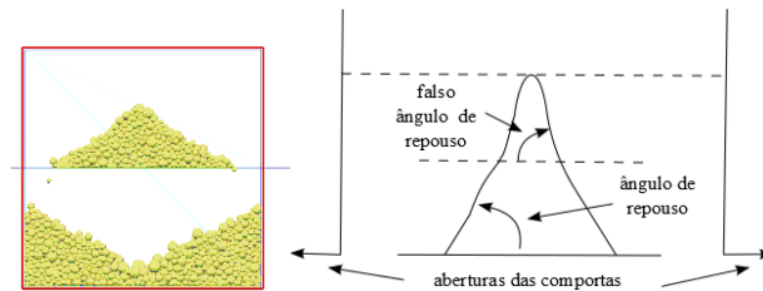
É comum encontrar para o ângulo de repouso, a seguinte classificação

- $\beta < 30^\circ$ - pó de escoamento fácil;

- $30^\circ < \beta < 50^\circ$ - pó de escoamento difícil;
- $\beta > 50^\circ$ - pó coesivo.

O ângulo não medido na base, que geralmente deforma a pilha, é conhecido como falso ângulo de repouso, consoante a Figura 11.

Figura 11 – Material coesivo com falso ângulo de repouso.

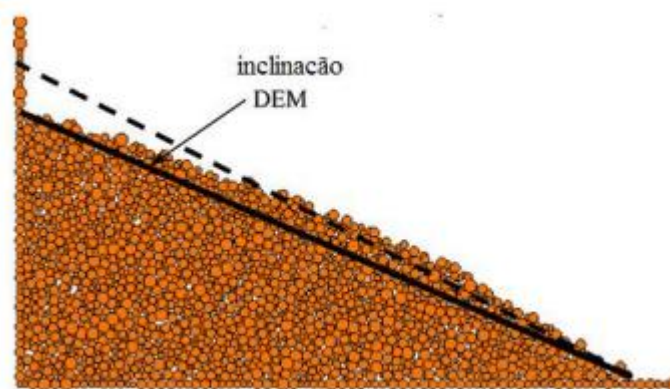


Fonte: Kaye (1997) com adaptações

Devido à presença do ângulo de repouso falso, enfrenta-se um desafio em relação à precisão numérica (Figura 11). No entanto, é comum medir o ângulo de repouso em relação à base da pilha (COETZEE e ELS, 2009). Um estudo relevante é realizado por Robinson e Friedman (2002), os quais investigaram dois valores associados à inclinação da pilha para descrever o ângulo de repouso conforme a Figura 12 – o ângulo máximo de estabilização da pilha (linha tracejada) e ângulo de repouso (linha contínua).

As abordagens para determinar o ângulo de repouso, conforme descrito por Robinson e Friedman (2002), são variadas, já que nesses estudos a definição precisa dos ângulos apresenta dificuldades. Conforme apontado por Zhou et al. (1999), a presença residual de energia cinética nas partículas impede a completa anulação, o que dificulta a formação de uma pilha estabilizada e resulta na ausência de um ângulo de repouso claramente definido.

Figura 12 – Ângulo de repouso medido numericamente (DEM).



Fonte: Coetzee e Els (2009)

2.5.3. UMIDADE (W)

A umidade representa outra característica significativa dos materiais granulares e pode ter um impacto considerável nas suas propriedades físicas e mecânicas. A umidade do material corresponde à quantidade de água presente nele em relação ao seu peso sem umidade. O teor de umidade pode variar dependendo da natureza do material, das condições de armazenamento e do ambiente circundante. Para medir a umidade dos materiais granulares, são realizados testes específicos, como o ensaio em estufa. Nesse método, o material é submetido a uma temperatura constante na estufa até que toda a umidade seja removida, permitindo a determinação da massa seca do material e, conseqüentemente, o cálculo do teor da umidade. A norma técnica brasileira NBR 6459 (ABNT, 19840), estabelece o procedimento para a determinação do teor de umidade em solos.

A presença de umidade pode afetar a trabalhabilidade do material, a resistência mecânica, a densidade aparente e a estabilidade do material. Segundo Pinto *et al.* (2019) afirmam que o teor de umidade também pode afetar a adesão entre partículas de agregados, influenciando as propriedades mecânicas do granular.

2.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS MATERIAIS PARTICULADOS

Segundo Smith *et al.* (2018), o módulo de elasticidade é definido como a razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante, ou seja, a relação entre a força externa e a mudança aplicada de forma do material particulado. Essa relação é expressa pela Lei de Hooke, que é válida dentro de uma faixa de deformações elásticas.

Diversos modelos e teorias têm sido propostos para determinar o módulo de elasticidade dos materiais particulados. Um dos mais conhecidos é o modelo da mistura de materiais, proposto por Gibson e Ashby (1997). Nesse modelo, o módulo de elasticidade é calculado considerando as propriedades dos constituintes individuais e a fração volumétrica de cada fase presente no material.

Outra abordagem relevante é a teoria da rede de contato, apresentada por Nedderman (1992). Nessa teoria, considera-se que a rigidez do material particulado é determinada pelas interações entre partículas vizinhas. O módulo de elasticidade é calculado a partir das características das partículas e das forças de contato entre elas.

Além desses modelos clássicos, recentemente, tem surgido um interesse cada vez maior na utilização de métodos de simulação computacional para determinar o módulo de elasticidade de materiais particulados. Especificamente, técnicas como o Método dos Elementos Discretos (DEM) têm sido adotadas para analisar o comportamento mecânico de sistemas particulados e estimar o módulo de elasticidade com base nas interações entre as partículas (O’Sullivan et al., 2018).

2.6. MODELOS DE HERTZ-MINDLIN COM COESÃO JKR

Segundo Johnson (1971) a coesão ou adesão pode ser representada através da inclusão de um elemento de força atrativa no modelo de contato. Normalmente, utiliza-se os termos coesão e adesão para descrever as forças atrativas entre materiais similares e diferentes, respectivamente. Entretanto, neste contexto, os dois termos são utilizados de maneira intercambiável.

O modelo JKR (Johnson-Kendall-Roberts) de contato é uma extensão do conhecido modelo de contato Hertz, proposto por Johnson em 1971. O modelo considera as forças de atração devido aos efeitos de van der Waals. O modelo é, no entanto, também utilizado para descrever a adesão em casos em que a atração é causada por capilaridade ou forças de ponte líquida, conforme mencionado em estudos com Hærvig (2017), Carr (2016), Morrissey (2013) e Xia (2019).

Ao incorporar a força de adesão, o modelo JKR permite prever o comportamento de sistemas nos quais a adesão é um fator significativo. Ele fornece uma descrição mais realista da distribuição de pressão e deformação nas regiões de contato e permite calcular a área efetiva de contato entre as superfícies.

No que diz respeito a atuação dos modelos, a Figura 13 revela que o modelo simplificado de Hertz opera no ponto de contato que o modelo de Coesão de JKR considera a área de contato sobreposta.

Figura 13 – Representação dos contatos entre duas partículas esféricas de raios R_1 e R_2



Fonte: Johnson-Kendall_Roberts (1971)

Segundo Carr (2016) este modelo quantifica a interação da partícula com qualquer geometria.

2.7. COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO (DIRECT SHEER TEST)

O coeficiente de atrito estático de um corpo é definido como a força de resistência ao movimento relativo entre corpos ou entre corpos e superfícies. Esta força atua ao longo dos pontos de contato entre as duas superfícies em direção oposta ao movimento. Existem ainda outras definições, leis empíricas e teorias que são usadas para descrever os coeficientes de atrito (DUNKIN e KIM, 1996).

Um grande número de diferentes mecanismos de dissipação de energia, referente ao movimento relativo entre corpos, foi proposto, e algumas leis foram formuladas para o atrito proveniente da observação fenomenológica (HUTCHINGS, 2016).

Historicamente, tais formulações foram inicialmente estabelecidas por Leonardo da Vinci, Guillaume Amontons e Charles Augustin Coulomb, sendo elas:

- 1° lei de atrito: Coeficientes de atrito estático ou de deslizamento são independentes da carga ou força normal aplicada sobre o corpo.
- 2° lei de atrito: Coeficientes de atrito estático ou de deslizamento são independentes da área de contato.
- 3° lei de atrito: Coeficiente de atrito de deslizamento independente da velocidade relativa entre corpos.

Segundo Maegawa et al. (2015), em contatos entre superfícies planas com movimento relativo entre elas, o atrito pode ser modelado como forças de deformação elástica e plástica das rugosidades presentes no material, que são responsáveis pelo contato interfacial. Para cada contato, a deformação tangencial é denominada elástica até que a força tangencial aplicada exceda o limite de resistência superficial do material, tornando-se assim uma deformação do tipo plástica.

Hutchings (2016) estudou o deslizamento entre placas de aço e alumínio polido para avaliar a influência da intensidade da força normal aplicada nas placas sobre o coeficiente de atrito. Com isso, foi verificado que o coeficiente de atrito permaneceu constante, mesmo após o aumento na ordem de 10⁶ N na força normal, corroborando com o enunciado da 1° lei de atrito.

Assim como realizado com a força normal, Hutchings (2016) também apresenta resultados experimentais onde foi avaliada a influência da área de contato entre superfícies de madeira e aço sobre o coeficiente de atrito. Neste caso, conforme apresentado na 2ª lei de atrito, variações na área de contato entre as superfícies também não promoveram mudanças significativas no coeficiente de atrito.

2.8. COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO

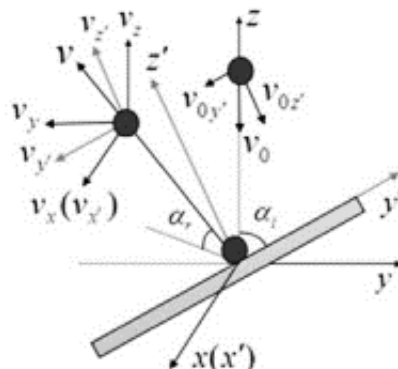
Para a determinação do coeficiente de restituição, diversas metodologias são apresentadas na literatura, como a que foi proposta por Zhu et al. (2008), na qual se efetua o lançamento de partículas sobre superfícies inclinadas, sendo aplicada preferencialmente para materiais com superfícies irregulares. Há também o método da queda livre, “drop test”, no qual as partículas colidem com a superfície horizontal plana, sendo preferencialmente aplicado às partículas com elevada esfericidade. Neste caso, o coeficiente de restituição é calculado conforme a Equação 5.

$$e_p = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (5)$$

em que h_1 e h_2 são a altura inicial e altura atingida após o choque, respectivamente (WANG et al., 2015).

Ao analisar partículas processadas industrialmente, as quais apresentam formas irregulares em sua grande maioria, Zhu et al. (2008) utilizaram a metodologia de colisão numa superfície inclinada (Figura 14). Deste modo, o vetor coeficiente de restituição e o vetor velocidade, se dividem em duas componentes: a normal e a tangencial.

Figura 14 : Impacto oblíquo de uma partícula



Fonte: (Adaptado de DIAS e BARROSO, 2006).

2.9. COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO

O atrito de rolamento é definido como a força que resiste ao movimento de uma partícula rolando em uma superfície ou sobre outras partículas (MOHAMED e GUTIERREZ, 2010). O coeficiente de atrito de rolamento é muito menor que o coeficiente de atrito estático ou de deslizamento (WEIZMAN, et al., 2013) e pode ser expresso por meio da Equação 6 como um parâmetro adimensional. No entanto, diferentes modelos e equações são apresentados na literatura para condições e aplicações específicas (HUTCHINGS, 2016; MOHAMED e GUTIERREZ, 2010)

$$F_R = \mu_R F_N \quad (6)$$

A resistência ao rolamento é chamada de atrito de rolamento e geralmente se apresenta em ordens de grandeza extremamente baixas, como para materiais de dureza elevada, em que são encontrados na literatura valores da ordem de 0,001 (ZHOU, 1999).

De acordo com o autor, um sólido que rola sem escorregar num plano horizontal vai progressivamente ceder energia ao meio no qual se encontra em contato. Além da resistência do ar, verifica-se também o atrito de rolamento causado pelas deformações plásticas sofridas pela superfície e pelo material granular, e de forças de adesão, que podem surgir a depender dos materiais envolvidos no contato. Desta forma, a principal diferença entre o atrito estático e o atrito de rolamento é que, quando o atrito é estático, ocorre a dissipação de energia mecânica em calor, enquanto que no atrito de rolamento é observada a presença de deformações plásticas no material (ZHOU, 1999).

Em sistemas físicos reais, a perda de energia devido ao rolamento é dada por dois tipos de mecanismos de dissipação. No primeiro mecanismo, a dissipação de energia ocorre no ponto de contato (microdeslizamento, viscoelasticidade, plasticidade, adesão superficial, etc.). Já no segundo mecanismo, os efeitos da forma promovem o aparecimento da força resistiva.

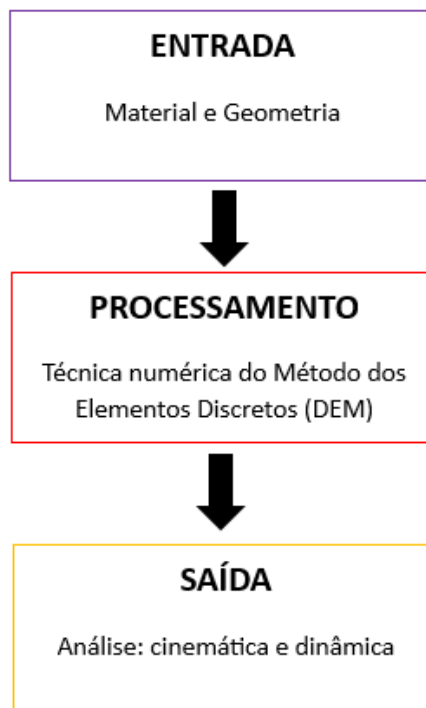
O uso do princípio de rolamento em detrimento do deslizamento tem como finalidade a obtenção de baixos coeficientes de atrito, sendo assim amplamente aplicado em diversas situações praticas, como pode ser verificado em rodas e em mancais de rolamento (LI et al., 2016).

3. MATERIAIS E METODOS

3.1. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DEM

O *Bulk Flow Analyst*TM (BFA), desenvolvido pela empresa Overland Conveyor, o software desenvolvido para simular a modelagem de escoamento de partículas através da técnica numérica do Método dos Elementos Discretos (DEM). O BFA, assim como qualquer outro software, possui uma estrutura lógica de entrada, processamento e saída, conforme demonstrado na figura 15.

Figura 15 – Estrutura lógica do BFA.



Fonte: Autoria própria (2023)

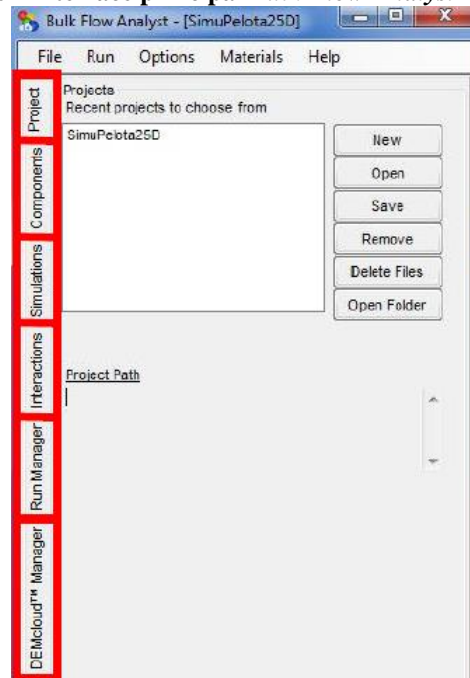
A entrada consiste nos dados para o material e à forma geométrica. O processamento envolve a utilização da técnica DEM para a resolução numérica. A saída é composta pelos resultados que viabilizam a análise do movimento e do comportamento dinâmico do escoamento das partículas.

Neste software, os principais parâmetros necessários para realizar a calibração do modelo numérico ao modelo físico são inseridos na entrada e consistem em: coeficiente de atrito interpartícula (*Interparticle Friction*), coeficiente de coesão interpartícula (*Interparticle Cohesion*), coeficiente de adesão da partícula à parede (*Particle surface Adhesion*) e coeficiente

de atrito com a parede (*Wall Friction*). Para calibrar o modelo numérico, são realizados ensaios de visualização do escoamento do material granular em caixa de fluxo – *box flow*.

A Figura 16 apresenta a interface principal do *software*, onde podemos observar as guias essenciais: Projeto (*Project*), Componentes (*Components*), Simulações (*Simulations*) e gerenciador de execução (*Run Manager*).

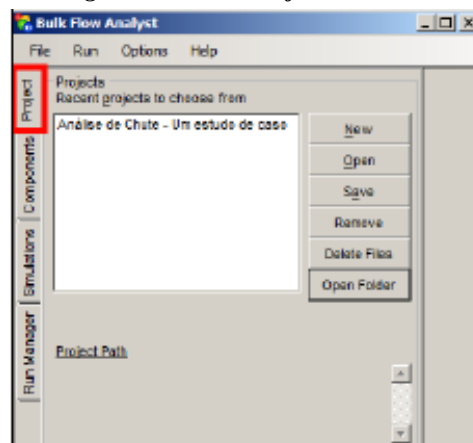
Figura 16 - Interface principal *Bulk Flow Analyst™*



Fonte: Adaptado de *Overland Conveyor Company* (2014).

Na guia *project*, em destaque na Figura 17, cria-se o projeto cujo formato do arquivo é *prj* e se escolhe o destino da pasta de projeto. A lógica é clicar em *New*, depois nomear a pasta de projeto e salvá-la para dar início ao novo projeto.

Figura 17 – *Aba Project*

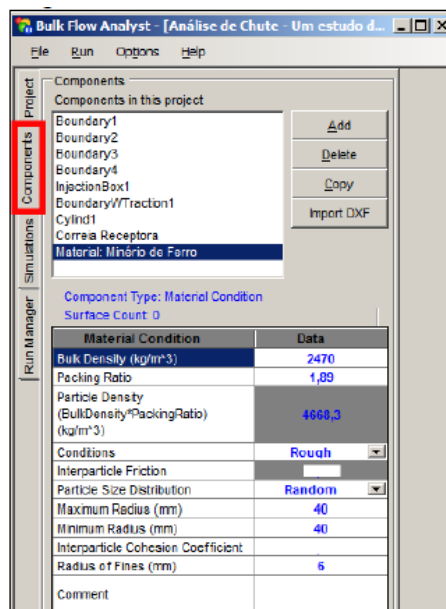


Fonte: Adaptado de BFA

Na aba *Components*, figura x, são inseridos os componentes do projeto: material e geometria do chute. A geometria consiste em: superfícies internas do chute (*Boundary*), caixa de alimentação (*InjectionBox*), correia transportadora de descarga (*BoundaryWTraction*), cilindro motriz (*Cylind*) e a Correia Receptora.

A figura 18, é apresentada a condição do material (Minério de Ferro). Neste componente são inseridos os dados: massa específica aparente (*Bulk Density*) em kg/m^3 , coeficiente de atrito interpartícula (*Interparticle Friction*), coeficiente de coesão interpartícula (*Interparticle Cohesion*), tamanho das partículas (*Particle Size Distribution*) em milímetros e o fino (*Radius of Fine*) medido na mesma unidade.

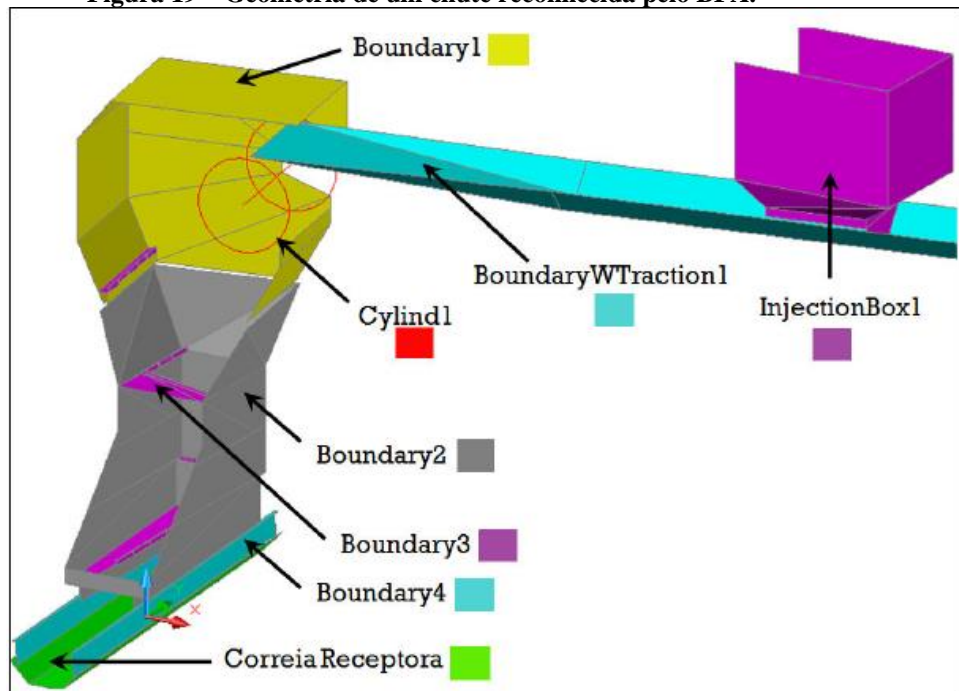
Figura 18 – Material: Minério de Ferro.



Fonte: Adaptado de BFA

Na Figura 19, é ilustrado o modo como o BFA identifica a estrutura de um chute como elementos constituintes de um projeto. Em seguida, são exibidos na interface do BFA esses elementos individuais, justamente com os dados correspondentes de entrada.

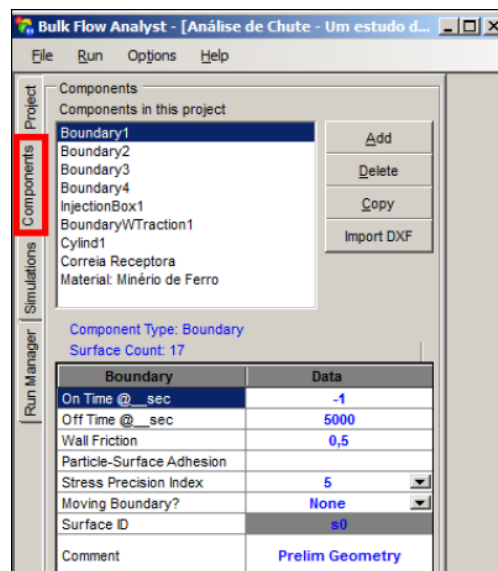
Figura 19 – Geometria de um chute reconhecida pelo BFA.



Fonte: Rocha e Macias (2012).

A componente *Boundary* é mostrada na figura 20. Nela são inseridos os parâmetros de coeficiente de adesão da partícula à parede (*Particle Surface Adhesion*) e coeficiente de atrito com a parede (*Wall Friction*).

Figura 20 – Superfícies internas do chute

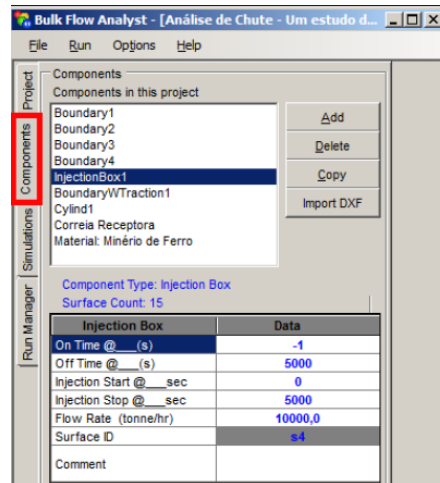


Fonte: Adaptado de BFA

Na figura 21 é apresentado a caixa de alimentação de material (*InjectionBox*). Ela é responsável pelo material envolvido na simulação, sendo a sua variável principal a taxa de fluxo

de massa (*Flow Rate*) em toneladas por hora. Essa taxa é uma simulação da capacidade dos transportadores de correia. Por exemplo, caso a capacidade planejada das correias seja de 2500 toneladas por hora, é necessário inserir esse valor para a *Flow Rate*.

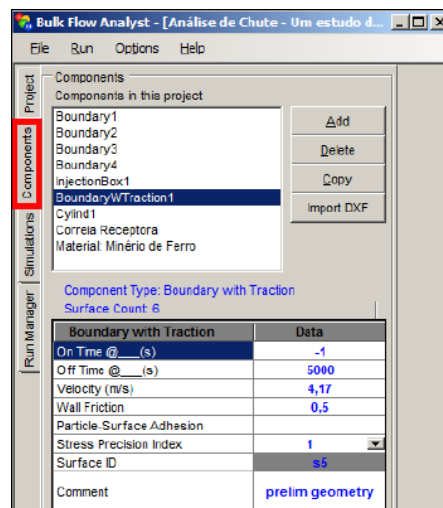
Figura 21 – Caixa de alimentação (*InjectionBox*)



Fonte: Adaptado de BFA

A figura 22 exibe a correia transportadora de descarga (*BoundaryWTraction*). Neste componente são inseridos os seguintes parâmetros: velocidade, coeficiente de atrito com a parede (*WallFriction*) e coeficiente de adesão da partícula a parede (*Particle Surface Adhesion*).

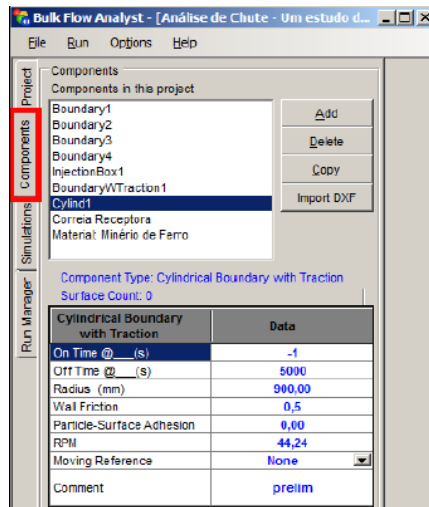
Figura 22 – Correria transportadora de descarga (*BoundaryWTraction*).



Fonte: Adaptado de BFA

A figura 23 exibe o tambor motriz (*Cylind*). Neste componente são inseridos os parâmetros: (*Radius*) em milímetros e a rotação por minuto RPM.

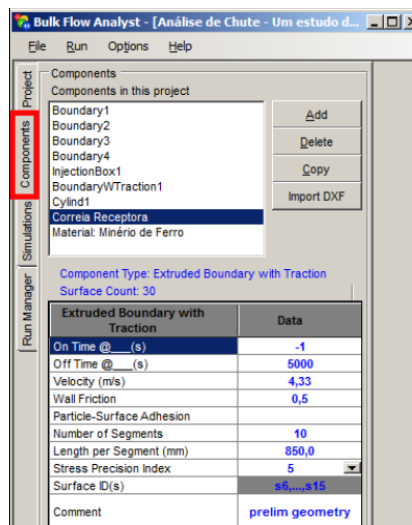
Figura 23 – Cilindro motriz ou tambor motriz (*Cylind*).



Fonte: Adaptado de BFA

Na figura 24 é mostrada a correia transportadora de recebimento (Correia Receptora). Neste componente são introduzidos os seguintes parâmetros: velocidade, coeficiente de atrito com a parede (*Wall Friction*) e coeficiente de adesão da partícula à parede (*Particle Surface Adhesion*).

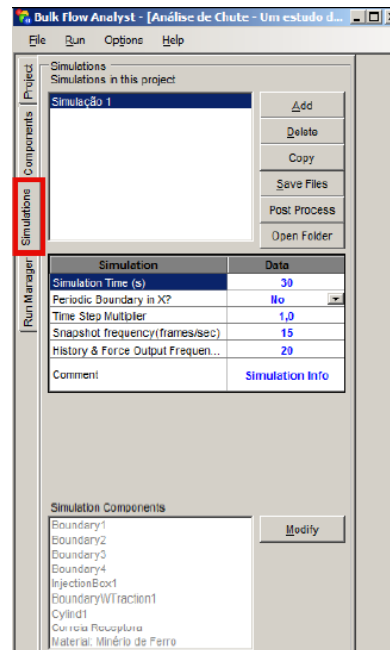
Figura 24 – Correia transportadora de recebimento (Correia Receptora)



Fonte: Adaptado de BFA

Na guia *Simulations*, figura 25, cria-se a pasta de simulação. Acessando a opção *Modify*, é possível escolher os componentes do projeto que podem fazer parte da simulação. Esta pasta será armazenada dentro da pasta de projetos criada.

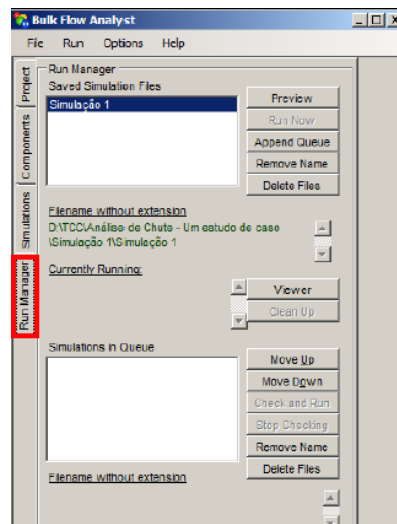
Figura 26 – Guia *Simulations*.



Fonte: Adaptado BFA

Por fim, na guia **Run Manager** figura 27, com a pasta de simulação já criada, é possível iniciar a simulação através da aba **Run Now**.

Figura 27 – Guia **Run Manager**.



Fonte: Adaptado de BFA

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os ensaios realizados na caixa de fluxo, servem de base para calibração do modelo numérico DEM, para o estudo de escoamento dos materiais FCSS, SFCK, PFCJ, MF14, nos chutes de transferência encontrados no Terminal Portuário de Ponta da Madeira na Vale em São Luís -MA.

Os ensaios de fluxo e célula de cisalhamento (material com parede) foram realizados para os materiais com suas respectivas umidades:

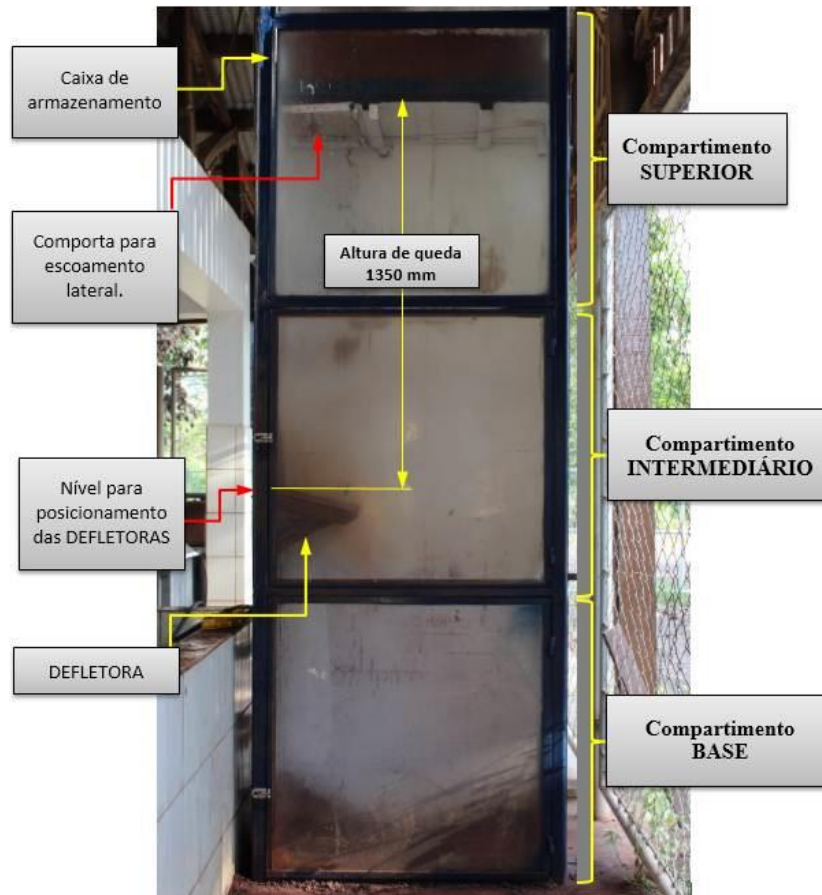
- FCSS: umidade mínima (7,0%), média (8,5%) e máxima (11%);
- SFCK: umidade mínima (7,0%), média (8,5%) e máxima (11%);
- PFCJ: umidade mínima (9,0%), média (11%) e máxima (14%);
- MF14: umidade mínima (13%), média (17,5%) e máxima (22%);

3.2.1. ENSAIO EM GRANDE CAIXA DE FLUXO

O aparato experimental caixa de fluxo, utilizado para os experimentos com os materiais supracitados, pode ser observado na Figura 28. Ele consiste numa estrutura cuja altura é 3000 mm [segmentada em três compartimentos de 1000 mm] e seção transversal [500 x 1000 mm]. Por dentro desta estrutura é possível movimentar [com auxílio de talha elétrica] uma caixa de armazenamento [seção: 496 x 996 mm], cujo fundo possui uma comporta [300 x 496 mm], permitindo o escoamento lateral do material armazenado quando ela se abre. Um *overview* do aparato (Figura 1) mostra: a caixa de armazenamento, a comporta [para escoamento lateral] no seu fundo [lado esquerdo], o compartimento superior, o compartimento intermediário [onde são posicionadas as defletoras], a altura de queda 1350 mm [distância entre a defletora e a comporta] e por fim o compartimento base.

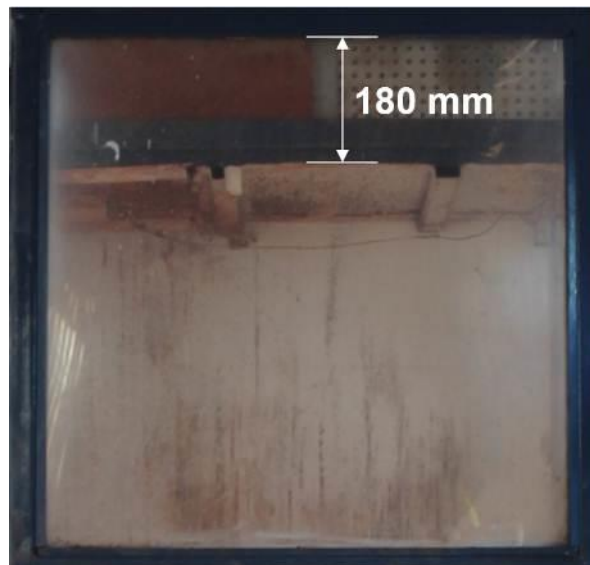
O ensaio consiste em: [i] armazenar o material na caixa de armazenamento, [ii] nivelar o material dentro dela adotando uma altura de 180mm conforme a figura 29, [iii] elevar esta caixa até posição de ensaio, previamente estipulada numa distância 1350 mm entre a comporta e a defletora, [iv] posicionar a defletora, [v] acionar o mecanismo de abertura da comporta lateral, [vi] registrar por meio de fotos o comportamento do material armazenado na defletora após o repouso do material.

Figura 28 – Modelo do aparato experimental caixa de fluxo Big Box Flow.



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Altura de material utilizado na caixa de armazenamento.

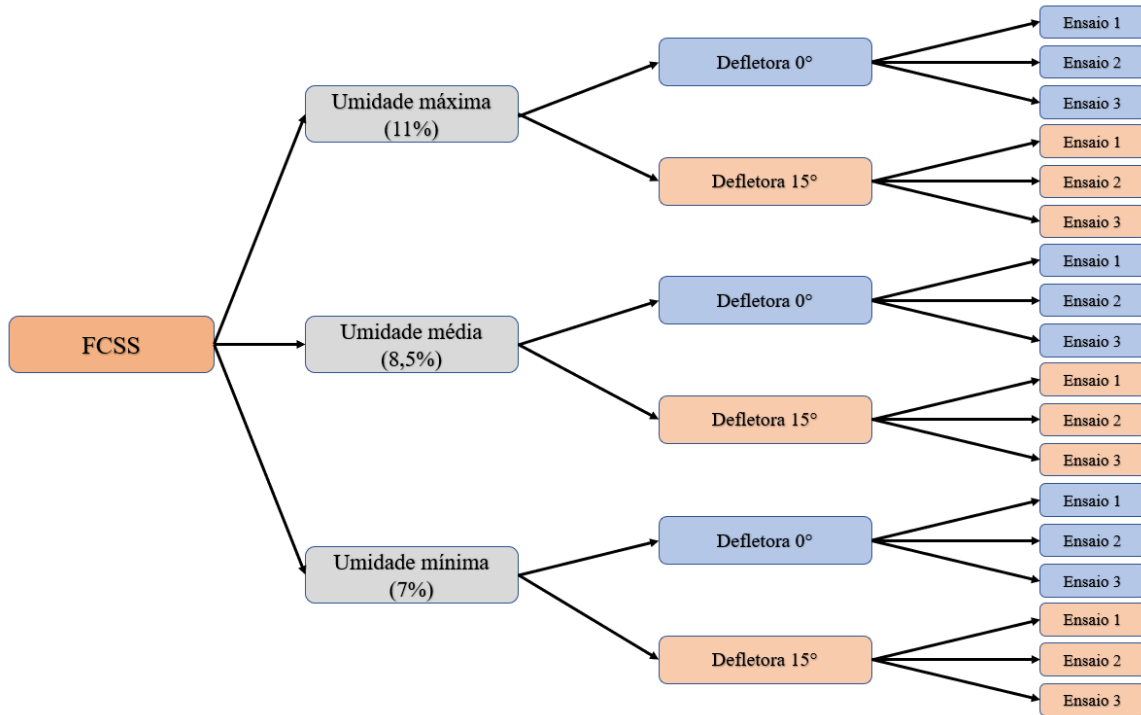


Fonte: Autoria própria

3.2.2. ENSAIOS PARA FCSS

Considerando a importância da reprodutibilidade dos resultados, em cada condição de umidade os ensaios foram realizados em triplicata para cada configuração de defletora, totalizando 18 (dezoito) ensaios como mostra o esquema da Figura 30.

Figura 30 – Total de ensaios realizados para o material FCSS.



Fonte: Autoria própria

A Figura 31 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 0° .

Figura 31 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A Figura 32 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 15° .

Figura 32 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A Figura 33 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade média e defletora com inclinação 0°.

Figura 33 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 34 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade média e defletora com inclinação 15°.

Figura 34 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 35 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação 0°.

Figura 35 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 36 resume e compara os três ensaios realizados para o FCSS, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação 15°.

Figura 36 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.

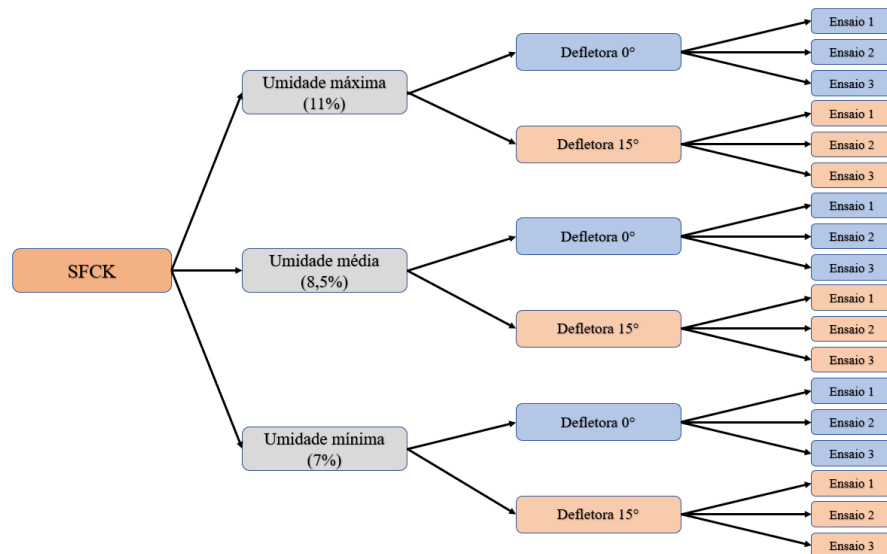


Fonte: Autoria própria

3.2.3. ENSAIOS PARA SFCK

Considerando a importância da reprodutibilidade dos resultados, em cada condição de umidade os ensaios foram realizados em triplicata para cada configuração de defletora, totalizando 18 (dezoito) ensaios como mostra o esquema da Figura 37.

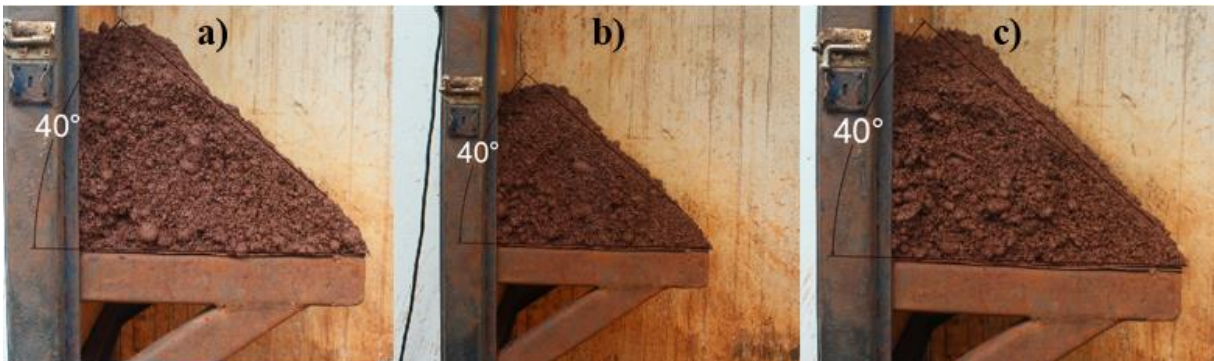
Figura 37 – Total de ensaios realizados para o material SFCK.



Fonte: Autoria própria

A figura 38 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 0°.

Figura 38 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 39 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 15°.

Figura 39 – Comparação dos resultados – 7,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 40 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade média e defletora com inclinação de 0°.

Figura 40 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 41 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade média e defletora com inclinação 15°.

Figura 41 – Comparação dos resultados – 8,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 42 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação 0°.

Figura 42 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 43 resume e compara os três ensaios realizados para o SFCK, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação 15°.

Figura 43 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.

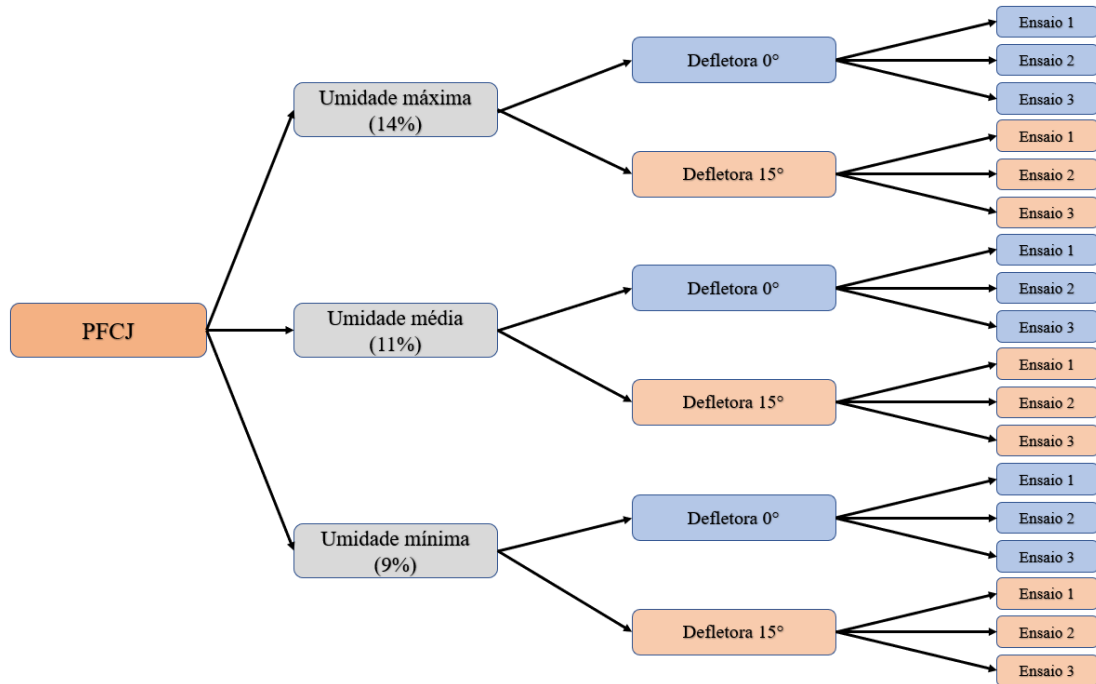


Fonte: Autoria própria

3.2.4. ENSAIOS PARA PFCJ

Considerando a importância da reprodutibilidade dos resultados, em cada condição de umidade os ensaios foram realizados em triplicata para cada configuração de defletora, totalizando 18 (dezoito) ensaios como mostra o esquema da Figura 44.

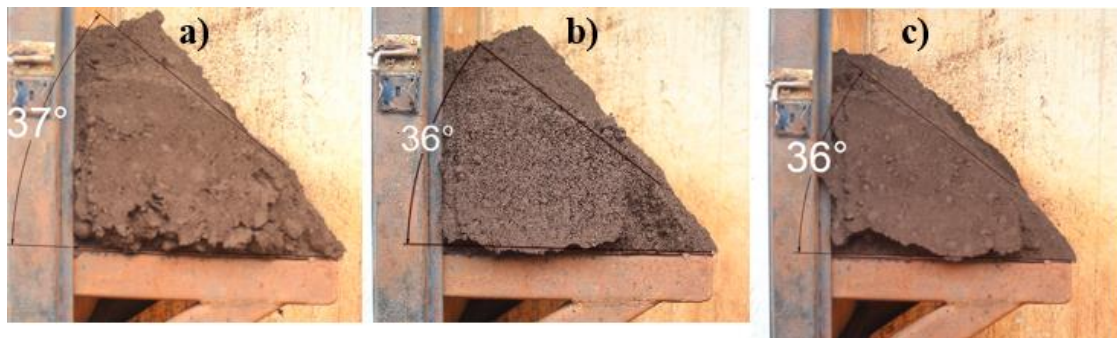
Figura 44 – Total de ensaios realizados para o material PFCJ.



Fonte: Autoria própria

A figura 45 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 0° .

Figura 45 – Comparação dos resultados – 9,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 46 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação 15° .

Figura 46 – Comparação dos resultados – 9,0% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 47 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade média e defletora com inclinação 0° .

Figura 47 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 48 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade média e defletora com inclinação 15° .

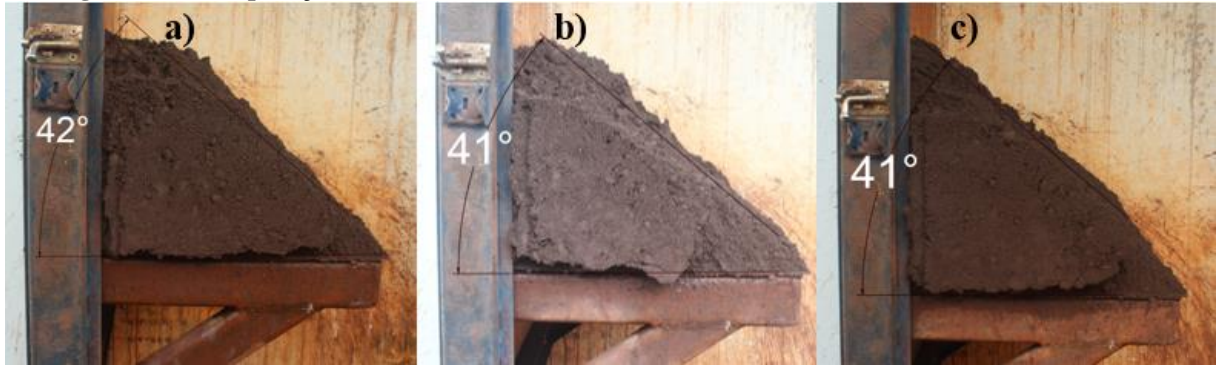
Figura 48 – Comparação dos resultados – 11% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 49 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação 0° .

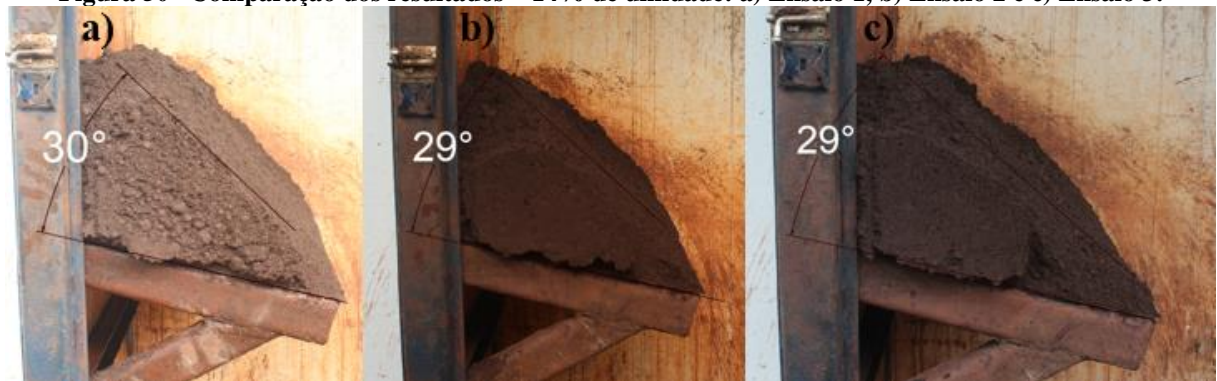
Figura 49 – Comparação dos resultados – 14% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 50 resume e compara os três ensaios realizados para o PFCJ, na condição de umidade máxima defletora com inclinação 15° .

Figura 50– Comparação dos resultados – 14% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.

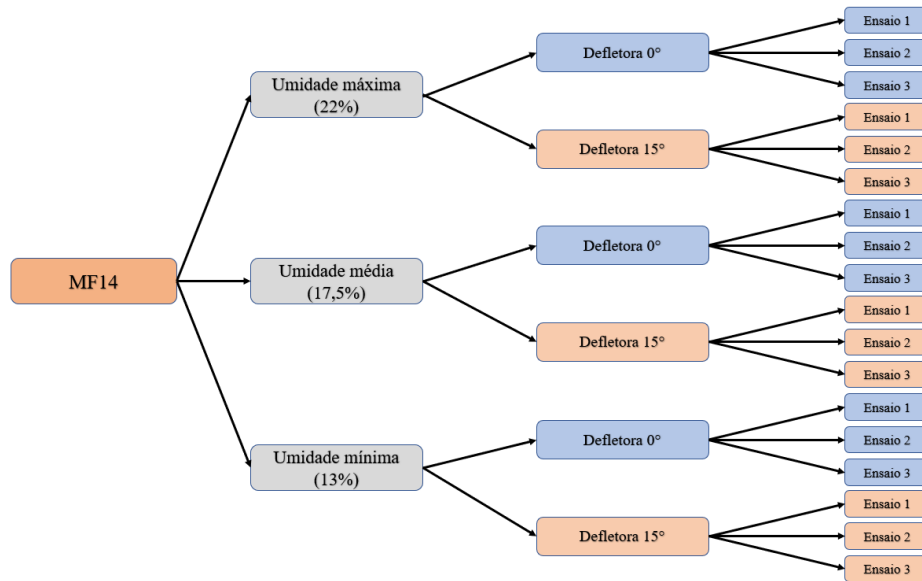


Fonte: Autoria própria

3.2.5. ENSAIOS PARA MF14

Considerando a importância da reprodutibilidade dos resultados, em cada condição de umidade os ensaios foram realizados em triplicata para cada configuração de defletora, totalizando 18 (dezoito) ensaios como mostra o esquema da Figura 51.

Figura 51 – Total de ensaios realizados para o material MF14.



Fonte: Autoria própria

A figura 52 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação de 0°.

Figura 52 – Comparação dos resultados – 13% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 53 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade mínima e defletora com inclinação de 15°.

Figura 53 – Comparação dos resultados – 13% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 54 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade média e defletora com inclinação de 0°.

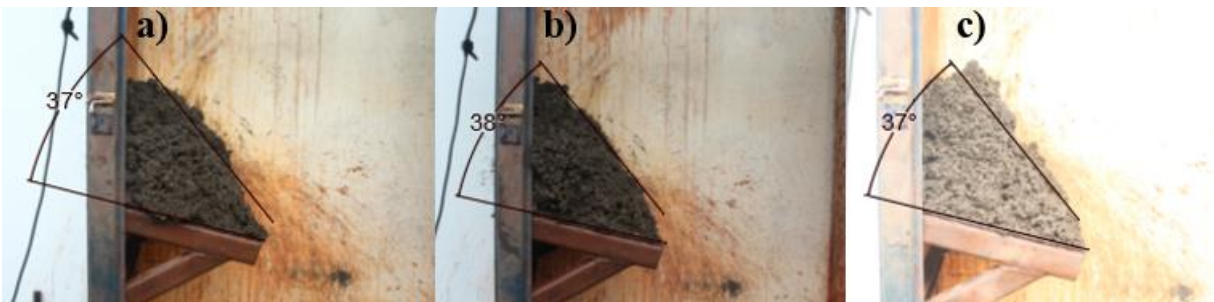
Figura 54 – Comparação dos resultados – 17,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 55 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade média e defletora com inclinação de 15°.

Figura 55 – Comparação dos resultados – 17,5% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 56 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação de 0° .

figura 56 – Comparação dos resultados – 22% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

A figura 57 resume e compara os três ensaios realizados para o MF14, na condição de umidade máxima e defletora com inclinação de 15° .

figura 57 – Comparação dos resultados – 22% de umidade: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2 e c) Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria

3.2.6. VERIFICAÇÃO DA UMIDADE NOS ENSAIOS

Antes de cada ensaio, são retiradas 5 amostras de material de pontos aleatórios, em seguida, essas amostras são pesadas e levadas a estufa onde ficam expostas a uma temperatura de 130°C durante um período de 24 a 28 horas. Após o período de secagem, as amostras são novamente pesadas para aferir a massa de material seco, a umidade então é calculada na base seca seguindo a equação 7.

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} = \frac{M_a}{M_s} \quad (7)$$

Onde:

M_u =Massa de material úmido;

M_s =Massa de material seco;

M_a =Massa de água;

U =Umidade;

As Tabelas 1 a 4 a seguir mostram os resultados das verificações das umidades antes de cada ensaio realizado.

Tabela 1 – Verificação da umidade para os ensaios com o material FCSS.

	Úmido	Seco	Água	Umidade
Umidade mínima (7%)	116,64	108,83	7,81	7,17%
	97,23	91,00	6,23	6,85%
	125,53	116,96	8,57	7,33%
	111,61	104,44	7,17	6,86%
	100,30	93,94	6,36	6,77%
	Média			7,00%
Umidade média (8,5%)	128,56	118,51	10,05	8,48%
	133,07	122,73	10,34	8,43%
	129,30	118,68	10,62	8,95%
	90,33	83,41	6,92	8,30%
	111,11	102,36	8,75	8,55%
	Média			8,54%
Umidade máxima (11%)	91,71	82,54	9,17	11,11%
	128,03	115,29	12,74	11,05%
	119,91	108,37	11,54	10,65%
	96,60	87,31	9,29	10,64%
	137,38	123,41	13,97	11,32%
	Média			10,95%

Tabela 2 – Verificação da umidade para os ensaios com o material SFCK.

	Úmido	Seco	Água	Umidade
Umidade mínima (7%)	95,92	89,84	6,08	6,77%
	88,34	82,71	5,63	6,80%
	122,88	114,84	8,04	7,00%
	134,42	125,82	8,60	6,83%
	131,77	123,48	8,29	6,71%
	Média			6,82%
Umidade média (8,5%)	88,23	81,15	7,08	8,72%
	89,68	82,31	7,37	8,95%
	112,73	104,33	8,40	8,05%
	130,05	119,66	10,39	8,68%
	105,16	96,92	8,24	8,50%
	Média			8,58%
Umidade máxima (11%)	118,40	106,49	11,91	11,18%
	116,39	105,09	11,30	10,75%
	131,92	118,77	13,15	11,07%
	101,69	91,30	10,39	11,38%
	98,76	88,74	10,02	11,29%
	Média			11,14%

Tabela 3 – Verificação da umidade para os ensaios com o material PFCJ

	Úmido	Seco	Água	Umidade
Umidade mínima (9%)	129,36	118,61	10,75	9,06%
	116,79	106,94	9,85	9,21%
	121,81	111,76	10,05	8,99%
	91,17	83,34	7,83	9,40%
	136,92	126,05	10,87	8,63%
	Média			9,06%
Umidade média (11%)	120,97	108,71	12,26	11,28%
	139,41	125,08	14,33	11,46%
	95,88	86,07	9,81	11,39%
	100,31	90,33	9,98	11,05%
	136,70	123,15	13,55	11,00%
	Média			11,24%
Umidade máxima (14%)	100,74	88,13	12,61	14,31%
	121,75	106,94	14,81	13,85%
	147,39	129,06	18,33	14,20%
	143,02	125,53	17,49	13,93%
	97,47	85,45	12,02	14,07%
	Média			14,07%

Tabela 4 – Verificação da umidade para os ensaios com o material MF14

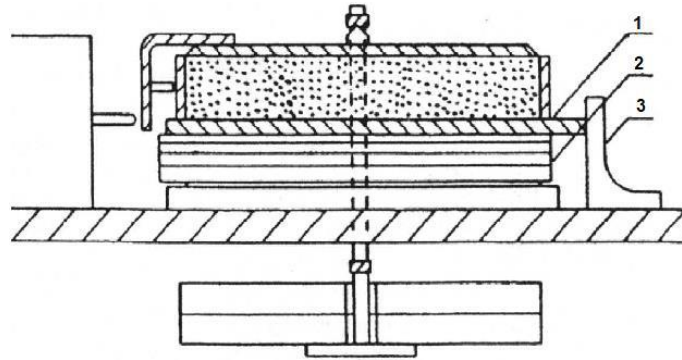
	Úmido	Seco	Água	Umidade
Umidade mínima (13%)	124,04	110,00	14,04	12,76%
	134,20	118,82	15,38	12,95%
	97,00	85,98	11,02	12,82%
	114,34	101,45	12,89	12,71%
	91,61	81,21	10,40	12,80%
	Média			
Umidade média (17,5%)	134,98	114,46	20,52	17,93%
	145,81	123,84	21,97	17,74%
	103,57	88,52	15,05	17,00%
	96,16	81,91	14,25	17,40%
	118,71	101,15	17,56	17,36%
	Média			
Umidade máxima (22%)	149,28	122,33	26,95	22,03%
	105,58	86,44	19,14	22,14%
	157,80	129,24	28,56	22,10%
	122,72	100,43	22,29	22,20%
	154,46	126,84	27,62	21,77%
	Média			

3.3. ENSAIOS DE ATRITO DE MATERIAL COM A PAREDE

Apresentação dos ensaios de atrito com a parede com placa de Aço em célula de cisalhamento direto dos materiais FCSS, SFCK, PFCJ e MF14 com fração abaixo de 3 mm para simulação de chutes de transferência. O teste de atrito é realizado na célula de cisalhamento em triplicata, conforme a norma ASTM D-6128, sendo que o cilindro inferior da célula é retirado e o material permanece em contato direto com a o material da parede, com ilustra a figura 58.

O ensaio é conduzido registrando-se os valores de tensão cisalhante e tensão normal.

Figura 58 - Teste de atrito em célula de cisalhamento.



Fonte: ASTM D-6128 (1997)

3.3.1. ENSAIO ATRITO PARA FCSS

A Tabela 5 mostra os resultados para o ensaio na célula de cisalhamento para o material FCSS para as umidades solicitadas, mostrando o valor médio para o ângulo de atrito e o fator de atrito para a interação do material com a Parede.

Tabela 5 – Resultado dos testes de atrito para o material FCSS.

Umidade mínima (7%)				Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de Atrito [-]	
	Massa [kg]	1	2					3
Umidade mínima (7%)	5	2,98	2,83	2,85	6,88	3,97	27,9	0,53
	4	2,35	2,28	2,36	5,51	3,21		
	3	1,93	1,88	1,90	4,13	2,62		
	2	1,21	1,22	1,23	2,75	1,68		
	1	0,70	0,83	0,78	1,38	1,06		
	0	0,26	0,23	0,25	0,00	0,34		
Umidade média (8,5%)				Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de Atrito [-]	
	Massa [kg]	1	2					3
	5	2,89	2,87	2,85	6,88	3,95	28,0	0,53
4	2,44	2,47	2,46	5,51	3,38			

	3	1,87	1,83	1,85	4,13	2,54		
	2	1,41	1,28	1,31	2,75	1,84		
	1	0,77	0,78	0,77	1,38	1,06		
	0	0,24	0,28	0,26	0,00	0,36		
Umidade mínima (11%)					<i>Tensão Normal [kPa]</i>	<i>Tensão Cisalhante [kPa]</i>	<i>Ângulo de Atrito com a Parede [graus]</i>	<i>Coefficiente de Atrito [-]</i>
	<i>Massa [kg]</i>	1	2	3				
	5	2,87	2,83	2,86	6,88	3,92	25,3	0,47
	4	2,49	2,41	2,44	5,51	3,36		
	3	2,02	1,98	2,03	4,13	2,76		
	2	1,43	1,42	1,42	2,75	1,95		
	1	1,13	0,98	1,05	1,38	1,45		
	0	0,52	0,49	0,50	0,00	0,69		

3.3.2. ENSAIO ATRITO PARA SFCK

A tabela 6 mostra os resultados para o ensaio na célula de cisalhamento para o material SFCK para as umidades solicitadas, mostrando o valor médio para o ângulo de atrito e o fator de atrito para a interação do material com a Parede.

Tabela 6 – Resultado dos testes de atrito para o material SFCK.

Umidade mínima (7%)					<i>Tensão Normal [kPa]</i>	<i>Tensão Cisalhante [kPa]</i>	<i>Ângulo de Atrito com a Parede [graus]</i>	<i>Coefficiente de Atrito [-]</i>
	<i>Massa [kg]</i>	1	2	3				
	5	2,75	2,85	2,87	6,88	3,89	27,7	0,52
	4	2,52	2,57	2,55	5,51	3,50		
	3	1,88	2,03	2,04	4,13	2,73		
	2	1,39	1,41	1,42	2,75	1,93		
	1	0,85	0,93	0,90	1,38	1,23		

	0	0,25	0,28	0,26	0,00	0,36		
Umidade média (8,5%)					<i>Tensão Normal [kPa]</i>	<i>Tensão Cisalhante [kPa]</i>	<i>Ângulo de Atrito com a Parede [graus]</i>	<i>Coefficiente de Atrito [-]</i>
	<i>Massa [kg]</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>				
	5	2,85	2,87	2,86	6,88	3,93		
	4	2,40	2,43	2,42	5,51	3,32		
	3	1,98	1,98	1,97	4,13	2,72		
	2	1,30	1,45	1,36	2,75	1,88		
	1	0,88	0,95	0,91	1,38	1,26		
	0	0,32	0,34	0,33	0,00	0,45		
							26,9	0,51
Umidade mínima (11%)					<i>Tensão Normal [kPa]</i>	<i>Tensão Cisalhante [kPa]</i>	<i>Ângulo de Atrito com a Parede [graus]</i>	<i>Coefficiente de Atrito [-]</i>
	<i>Massa [kg]</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>				
	5	2,67	2,70	2,68	6,88	3,69		
	4	2,38	2,40	2,35	5,51	3,27		
	3	1,89	1,82	1,85	4,13	2,55		
	2	1,48	1,44	1,47	2,75	2,01		
	1	1,00	0,90	0,93	1,38	1,30		
	0	0,39	0,43	0,41	0,00	0,56		
							24,7	0,46

3.3.3. ENSAIO ATRITO PARA PFCJ

A tabela 7 mostra os resultados para o ensaio na célula de cisalhamento para o material PFCJ para as umidades solicitadas, mostrando o valor médio para o ângulo de atrito e o fator de atrito para a interação do material com a Parede.

Tabela 7 – Resultado dos testes de atrito para o material PFCJ.

Umidade mínima (9%)					Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de Atrito [-]
	Massa [kg]	1	2	3				
Umidade mínima (9%)	5	3,25	3,15	3,14	6,88	4,38	29,7	0,57
	4	2,65	2,65	2,50	5,51	3,58		
	3	2,05	2,05	2,15	4,13	2,87		
	2	1,34	1,54	1,44	2,75	1,98		
	1	0,90	0,94	0,91	1,38	1,26		
	0	0,32	0,32	0,33	0,00	0,44		
Umidade média (11%)					Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de Atrito [-]
	Massa [kg]	1	2	3				
Umidade média (11%)	5	3,20	3,35	3,30	6,88	4,52	31,2	0,61
	4	2,80	2,92	2,85	5,51	3,93		
	3	2,15	2,34	2,21	4,13	3,07		
	2	1,60	1,60	1,65	2,75	2,23		
	1	0,95	0,98	0,97	1,38	1,33		
	0	0,31	0,29	0,30	0,00	0,41		
Umidade mínima (14%)					Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Ângulo de Atrito com a Parede [graus]	Coeficiente de Atrito [-]
	Massa [kg]	1	2	3				
Umidade mínima (14%)	5	3,26	3,29	3,27	6,88	4,50	30,6	0,59
	4	2,70	2,80	2,74	5,51	3,78		
	3	2,20	2,24	2,22	4,13	3,05		
	2	1,55	1,56	1,54	2,75	2,13		
	1	0,91	0,98	0,95	1,38	1,30		
	0	0,34	0,36	0,34	0,00	0,48		

4	2,45	2,48	2,42	5,51	3,37		
3	2,00	2,02	2,04	4,13	2,78		
2	1,38	1,58	1,60	2,75	2,09		
1	0,80	0,98	0,95	1,38	1,25		
0	0,30	0,36	0,28	0,00	0,43		

3.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO NÚMÉRICO

As simulações de calibração foram realizadas para os respectivos materiais e umidades:

- FCSS: umidade mínima (7,0%), média (8,5%) e máxima (11%)
- SFCK: umidade mínima (7,0%), média (8,5%) e máxima (11%)
- PFCJ: umidade mínima (9,0%), média (11%) e máxima (14%)
- MF14: umidade mínima (13%), média (17,5%) e máxima (22%)

Para materiais granulares úmidos, a força de coesão é fortemente influenciada pela ponte de ligação formada pela presença do líquido entre as partículas. Segundo Gröger et al. (2003), no escoamento de materiais granulares úmidos, a força coesiva que tende a aglomerar as partículas é devido à ação destas pontes de ligação e está diretamente correlacionada com a tensão superficial do líquido e com a granulometria do material. Dessa forma, a umidade é definida alterando-se os parâmetros de fricção entre partículas e coeficiente de coesão das partículas.

A simulação numérica nesse estágio tem por objetivo replicar o resultado dos experimentos, ou seja, para os mesmos parâmetros do material, deverá ser encontrado ângulos de repouso semelhantes aos medidos. Para uma maior confiabilidade, essas verificações de semelhança dos ângulos de repouso foram realizadas para duas placas defletoras com ângulos de inclinação diferentes, sendo 0° e -15° em relação ao eixo horizontal.

O software utilizado neste trabalho é o *Bulk Flow Analyst* v.14, desenvolvido pela empresa *Overland Conveyor*. Neste software, os principais parâmetros que permitem a calibração do modelo numérico, são:

- Interação Partícula – Superfície
 - *Wall Friction*
 - *Normal Contact Restitution*
 - *Rotating Friction*

- *Particle –Surface Adhesion*
- Interação Partícula – Partícula
- *InterParticle Cohesion coefficient*
- *Interparticle friction*
- *Normal contact restitution*
- *Rotating Friction*
- *Radius of fine*

O coeficiente de atrito com a parede (*wall friction*) é medido diretamente em ensaios de cisalhamento entre o material granulado e o material da parede do chute. O resultado obtido é utilizado como base para a calibração dos modelos de superfície dos equipamentos analisados. A calibração do coeficiente de coesão também leva em consideração o raio dos finos (*Radius of fine*), que representa um diâmetro médio da fração fina presente no material granular.

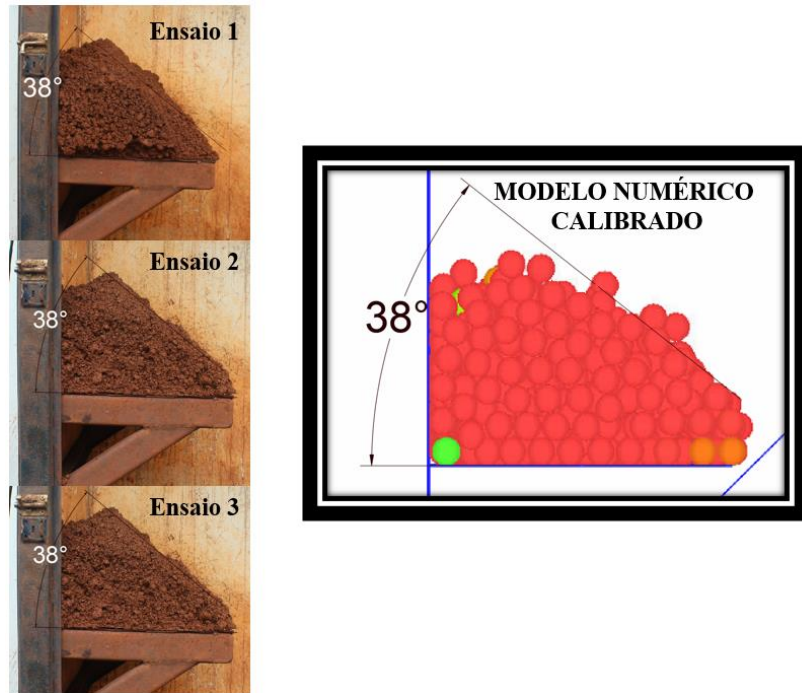
O grande problema para a utilização de modelos DEM em aplicações industriais é o tempo computacional, que é diretamente relacionado com número de partículas. É impossível, para aplicações industriais, simular o escoamento do minério das amostras recebidas com a sua granulometria real. Assim, a prática mais comum é aumentar o diâmetro da partícula.

Baseado em experiências anteriores, em experimentos de laboratório, análise da literatura técnica disponível e observações de campo, estabeleceu uma metodologia para a calibração de modelos DEM. Essa metodologia usa as informações de escoamento em caixas de fluxo padrão e ensaios de obtenção de coeficiente de atrito em célula de cisalhamento.

Os parâmetros de calibração foram variados, até se encontrar uma boa concordância entre os ensaios de visualização e de simulação numérica, assim, obtemos uma representação fiel ao comportamento global do escoamento do material.

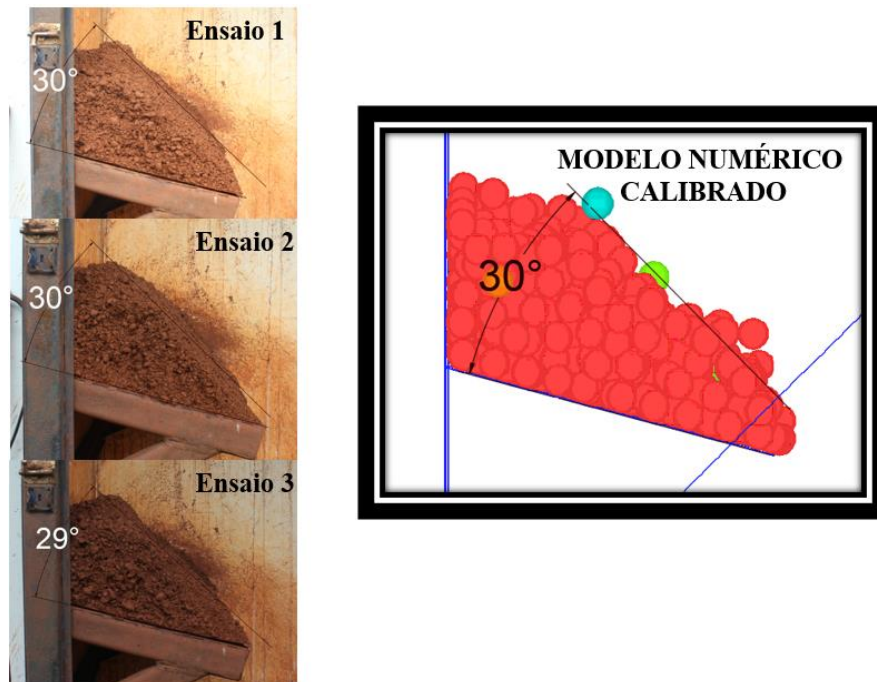
FCSS – Umidade mínima (7%)

Figura 59 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 7%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 7%, defletora de 15°



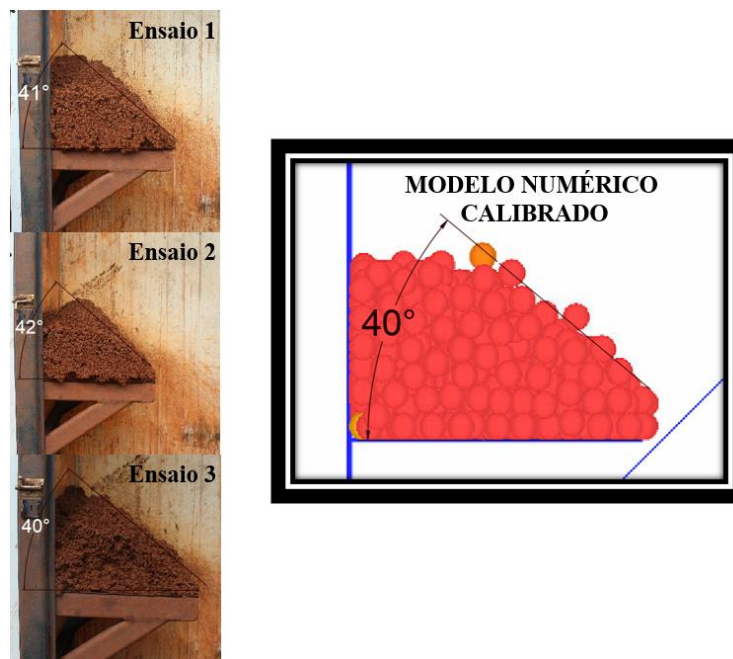
Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Parâmetros de calibração para o material FCSS a umidade 7%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.52
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.34
	<i>Normal contact restitution</i>	0.1
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.4484
	<i>Radius of fine</i>	0.8163
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1930
<i>Packing Ratio</i>	1.945	

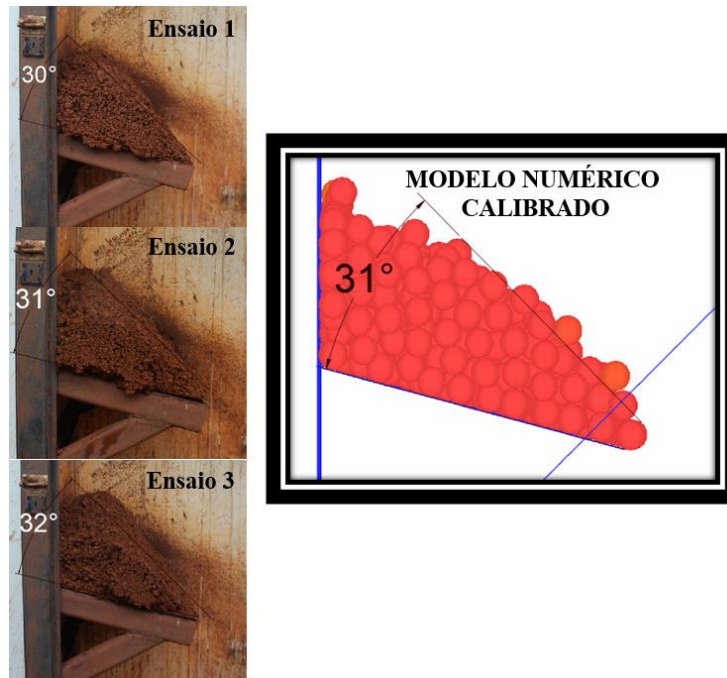
- FCSS - Umidade Média (8,5%)

Figura 61 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 8,5%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 62 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 8,5%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

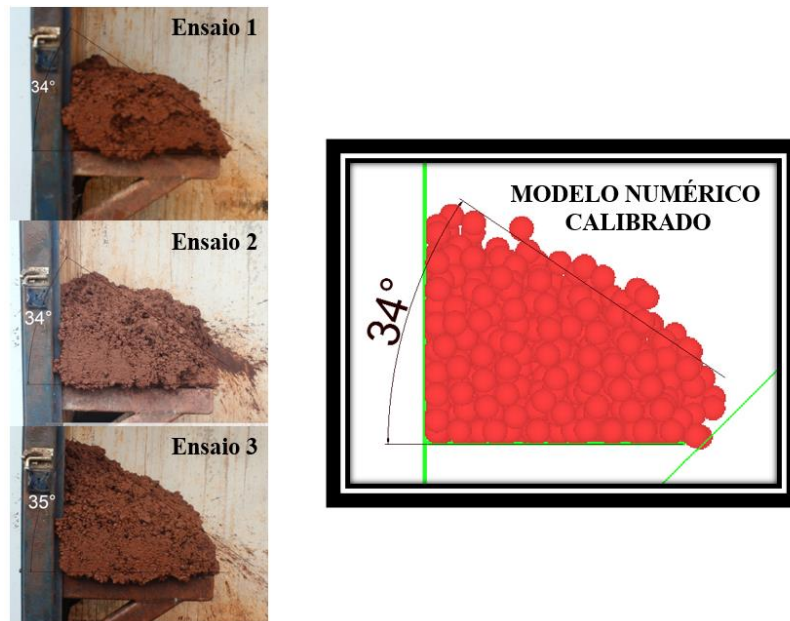
Tabela 10 – Parâmetros de calibração para o material FCSS a umidade 8,5%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.53
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.29
	<i>Normal contact restitution</i>	0.25
	<i>Rotating Friction</i>	0.40
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.46
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2040
<i>Packing Ratio</i>	1.945	

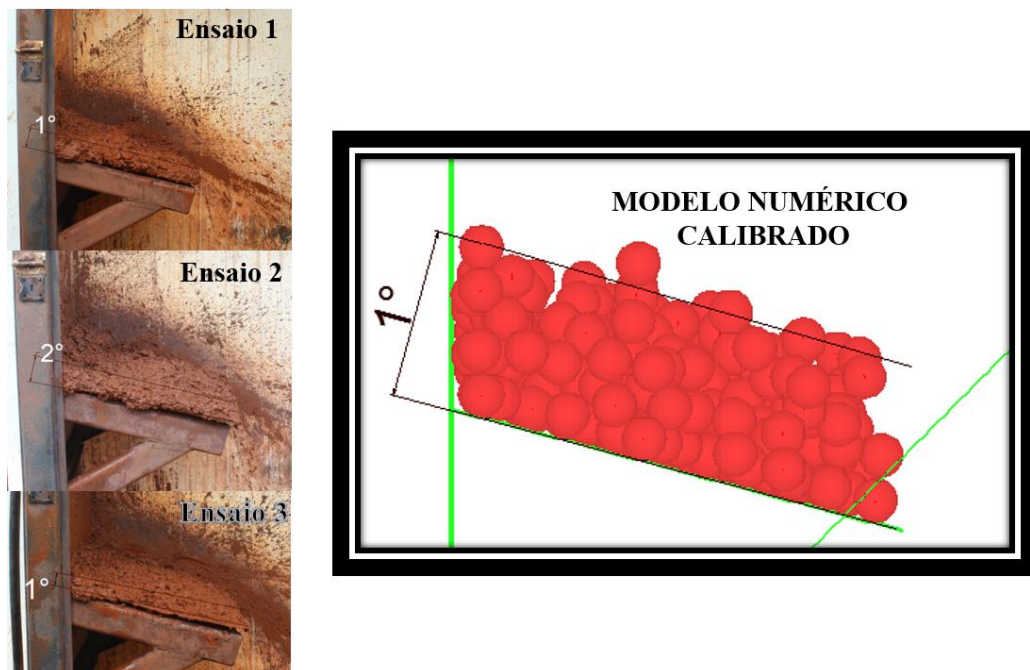
- FCSS – Umidade máxima (11%)

Figura 63 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 11%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 64 - Resultado da calibração do modelo numérico do material FCSS a umidade de 11%, defletora de 15°



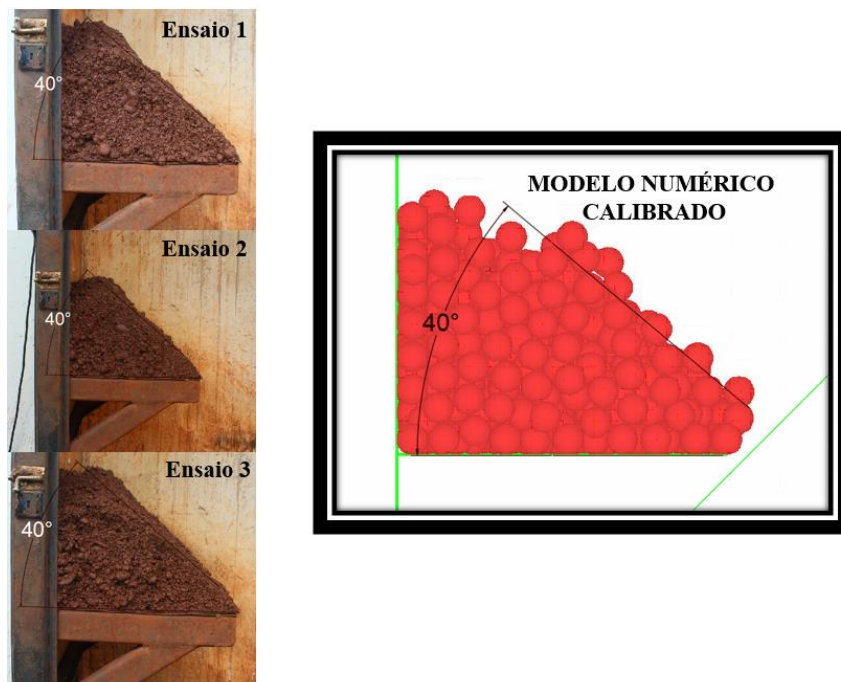
Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Parâmetros de calibração para o material FCSS a umidade 11%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.47
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.29
	<i>Normal contact restitution</i>	0.25
	<i>Rotating Friction</i>	0.20
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.60
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2495
	<i>Packing Ratio</i>	1.945

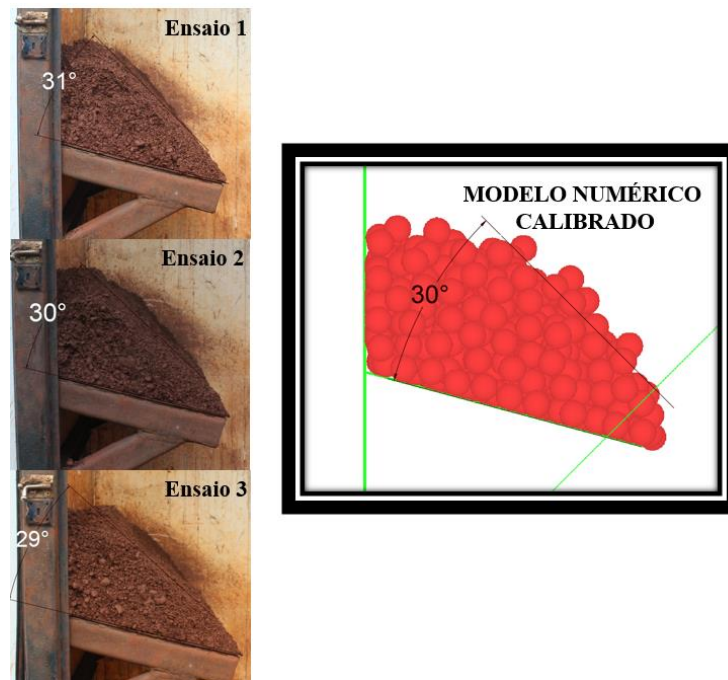
- SFCK – Umidade mínima (7%)

Figura 65 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 7%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 66 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 7%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

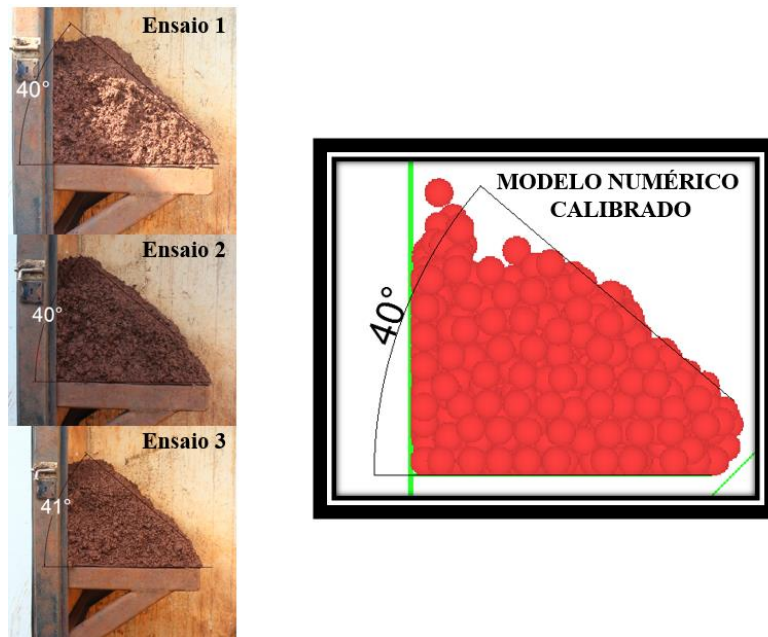
Tabela 12 – Parâmetros de calibração para o material SFCK a umidade 7%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.52
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.32
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.30
	<i>Radius of fine</i>	0.8163
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1950
	<i>Packing Ratio</i>	1.945

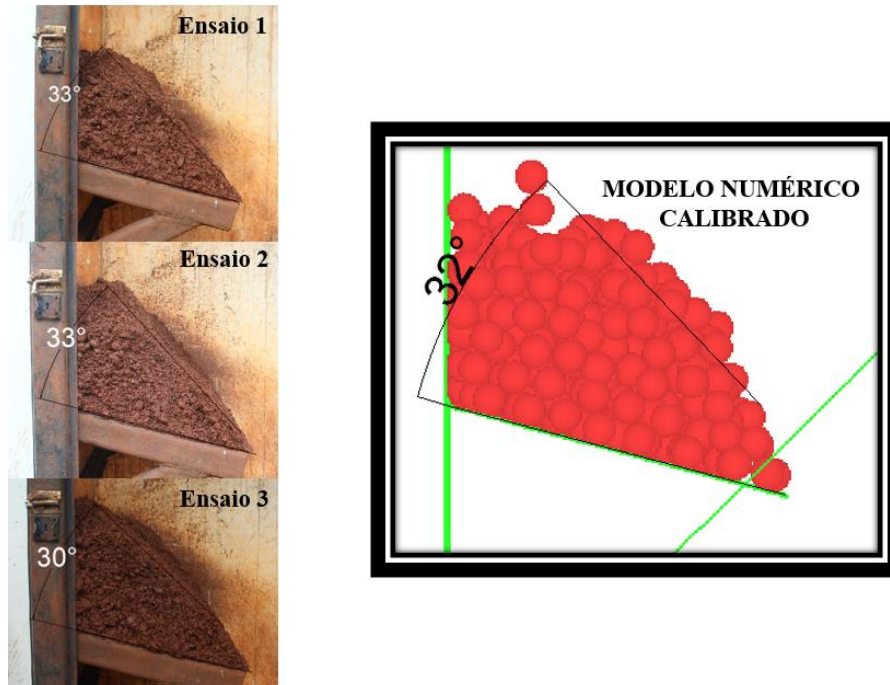
- SFCK – Umidade média (8,5%)

Figura 67 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 8,5%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 68 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 8,5%, defletora de 15°



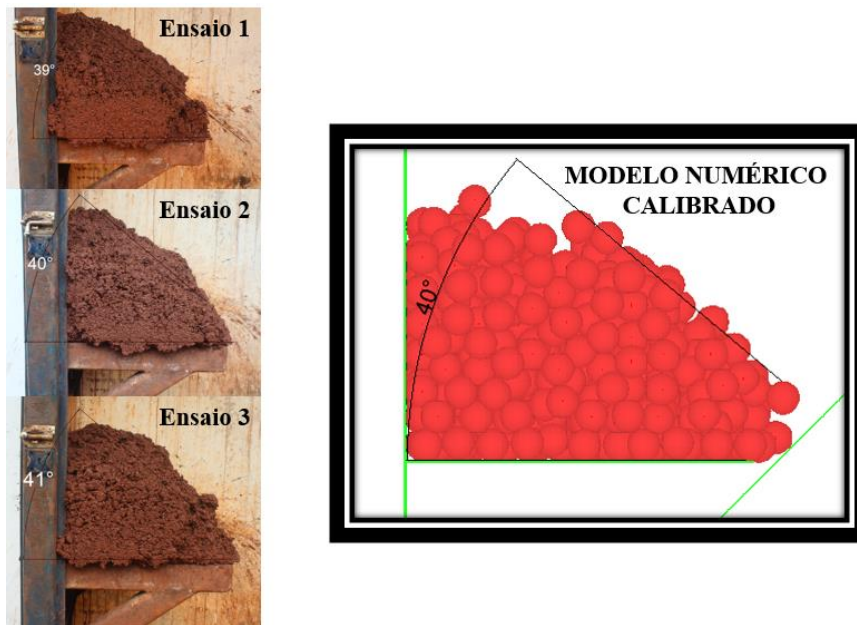
Fonte: Autoria própria

Tabela 13 – Parâmetros de calibração para o material SFCK a umidade 8,5%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.51
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.40
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.38
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2105
	<i>Packing Ratio</i>	1.945

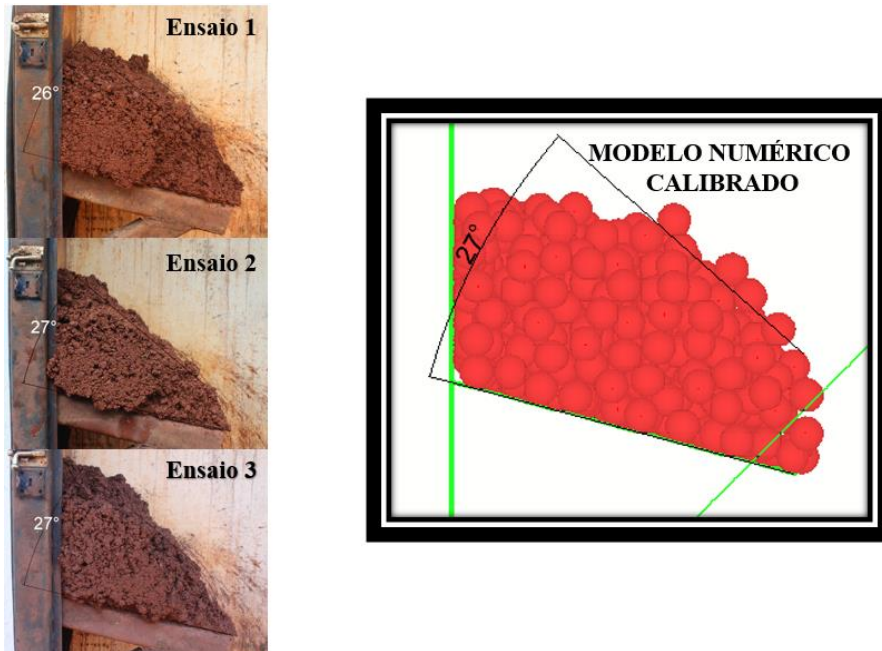
- SFCK – Umidade máxima (11%)

Figura 69 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 11%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 70 - Resultado da calibração do modelo numérico do material SFCK a umidade de 11%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

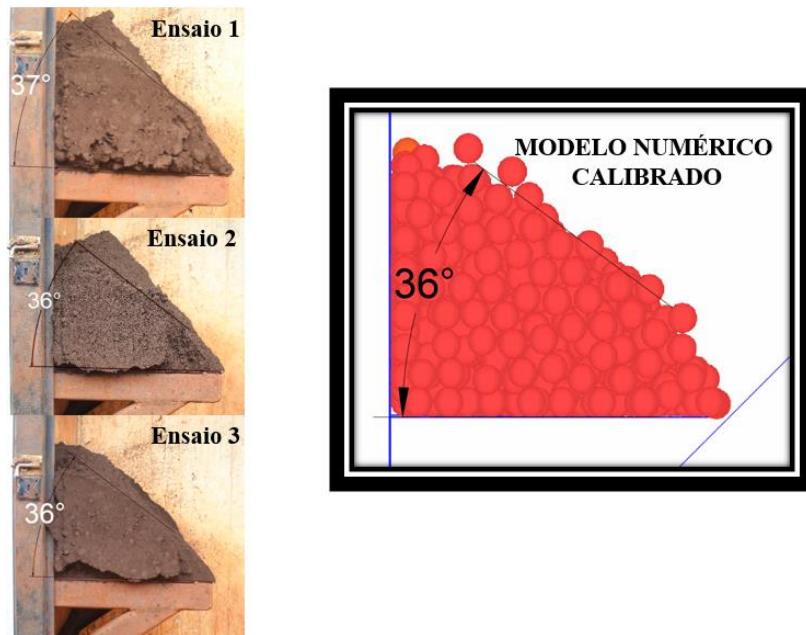
Tabela 14 – Parâmetros de calibração para o material SFCK a umidade 11%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.46
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.30
	<i>Normal contact restitution</i>	0.08
	<i>Rotating Friction</i>	0.21
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.69
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2515
<i>Packing Ratio</i>	1.945	

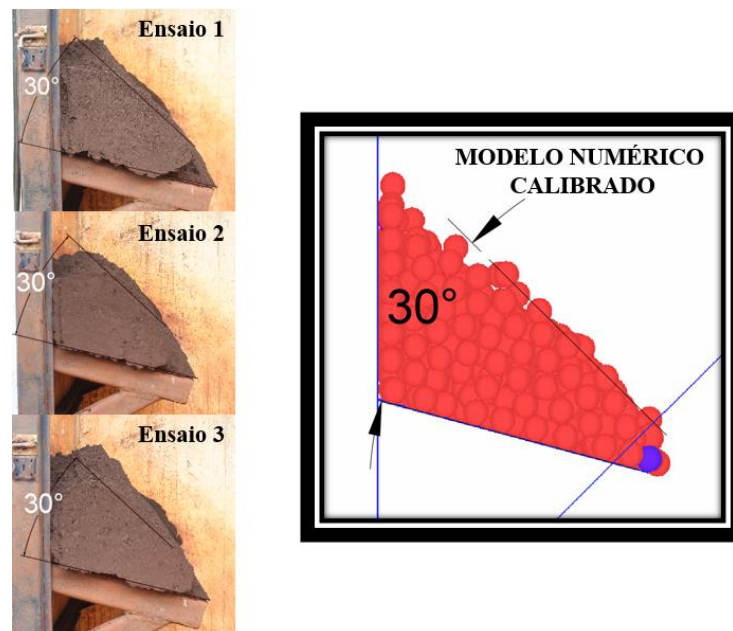
- PFCJ – Umidade mínima (9%)

Figura 71 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 9%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 72 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 9%, defletora de 15°



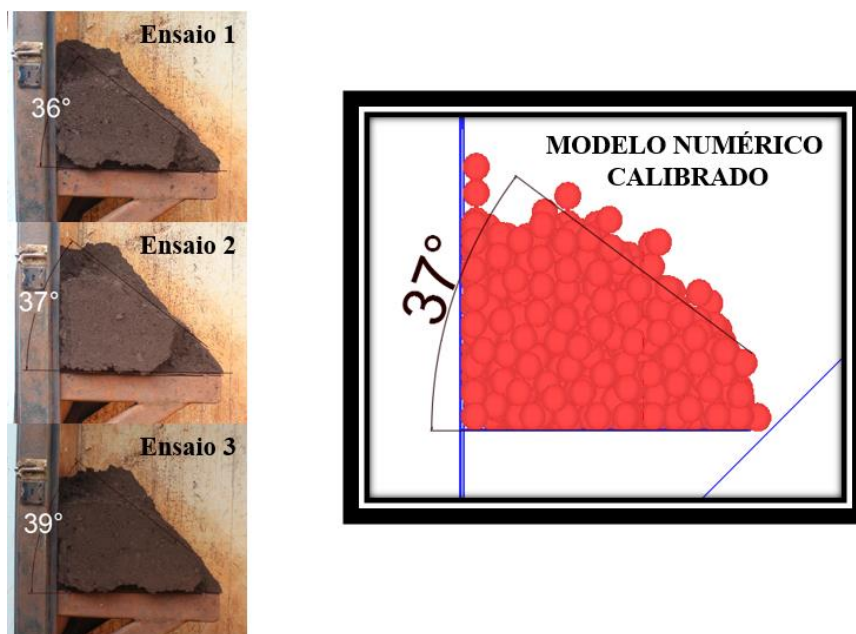
Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Parâmetros de calibração para o material PFCJ a umidade 9%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.57
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.265
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.80
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.458
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1940
	<i>Packing Ratio</i>	1.945

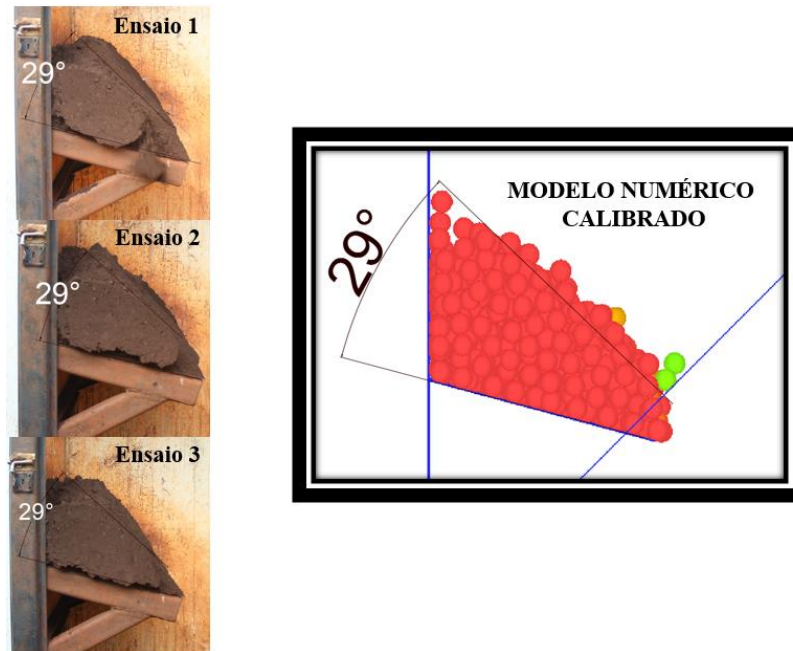
- PFCJ – Umidade média (11%)

Figura 73 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 11%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 74 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 11%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

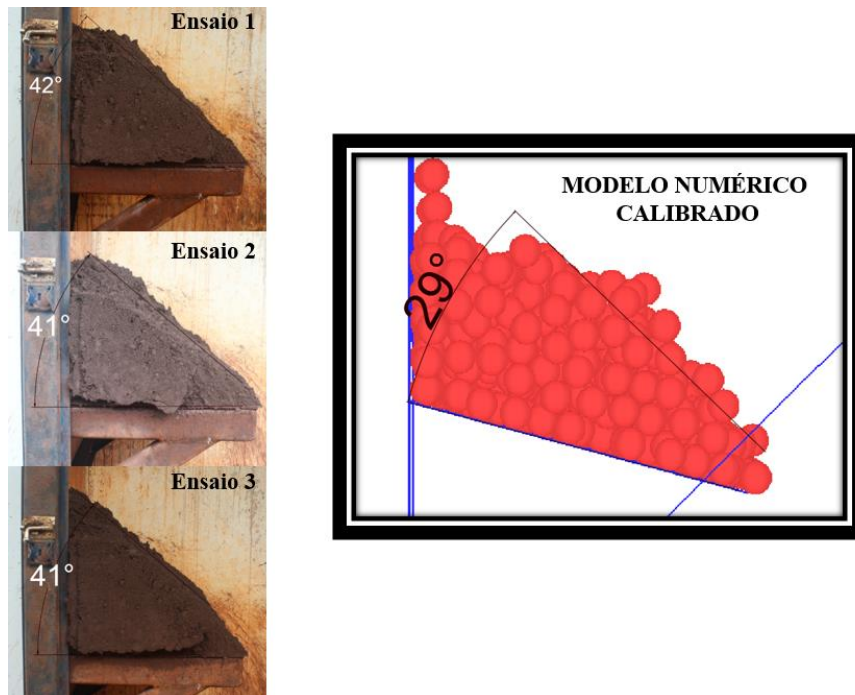
Tabela 16 – Parâmetros de calibração para o material PFCJ a umidade 11%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.45
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.45
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.11
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.46
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2000
<i>Packing Ratio</i>	1.945	

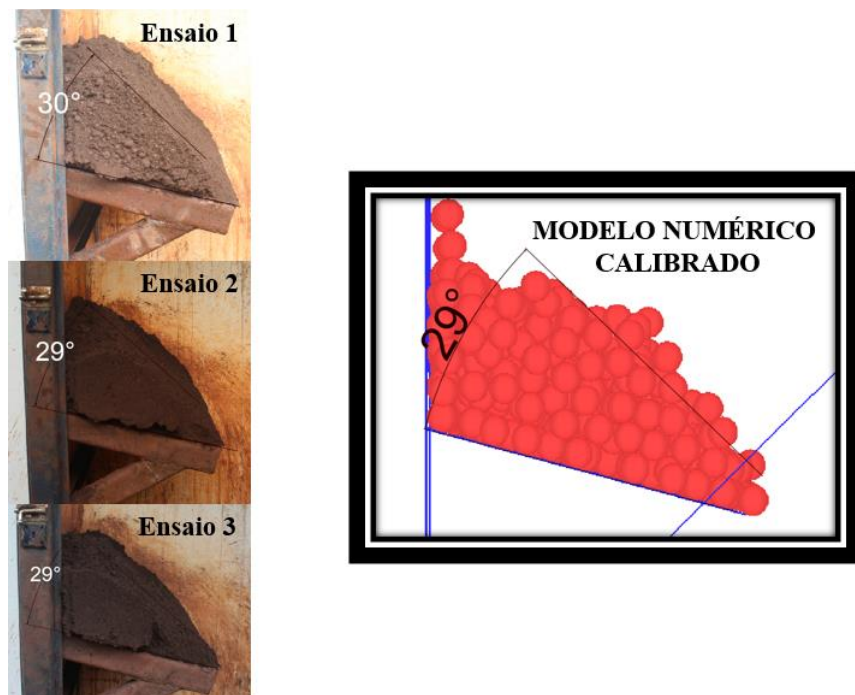
- PFCJ - Umidade máxima (14%)

Figura 75 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 14%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 76 - Resultado da calibração do modelo numérico do material PFCJ a umidade de 14%, defletora de 15°



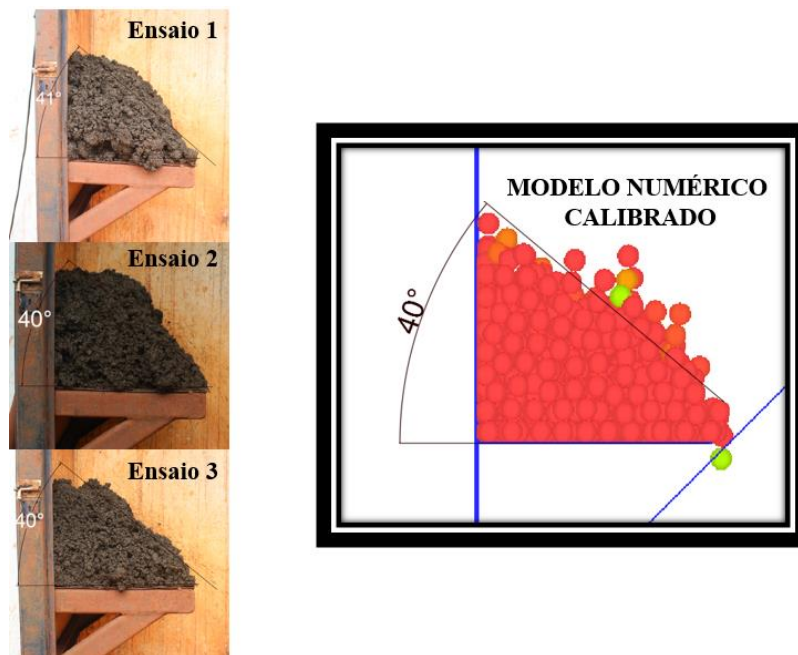
Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Parâmetros de calibração para o material PFCJ a umidade 14%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.59
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.43
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.46
	<i>Radius of fine</i>	0.75
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	2140
	<i>Packing Ratio</i>	1.945

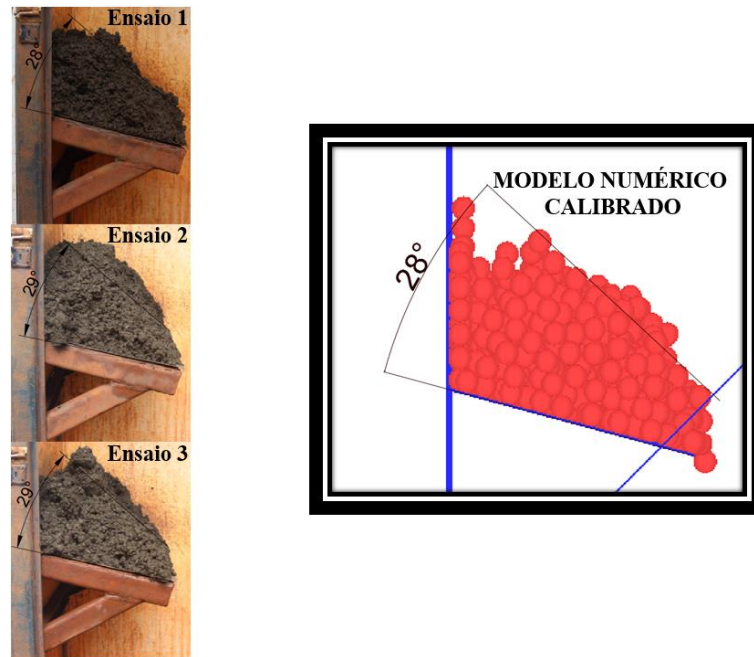
- MF14 – Umidade mínima (13%)

Figura 77 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 13%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 78 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 13%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

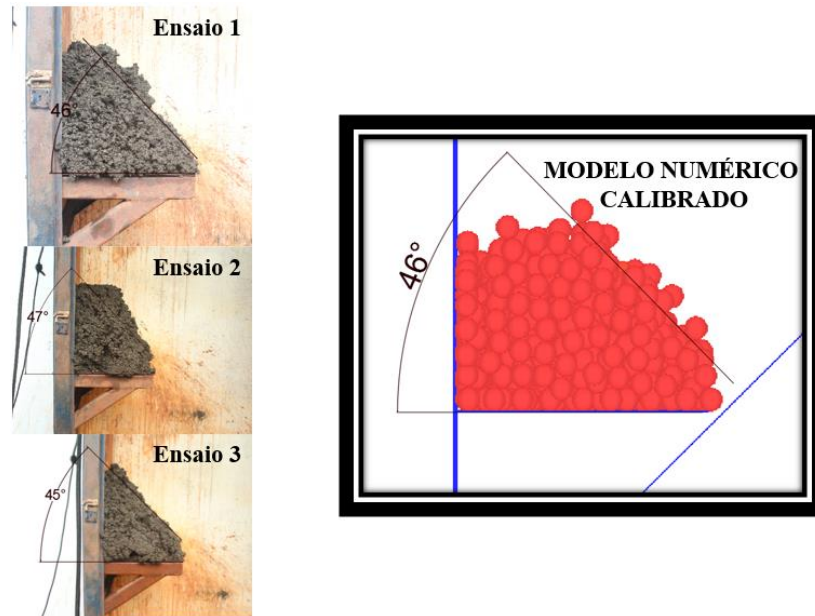
Tabela 18 – Parâmetros de calibração para o material MF14 a umidade 13%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.47
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.49
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.11
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.499
	<i>Radius of fine</i>	0.76
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1550
<i>Packing Ratio</i>	1.947	

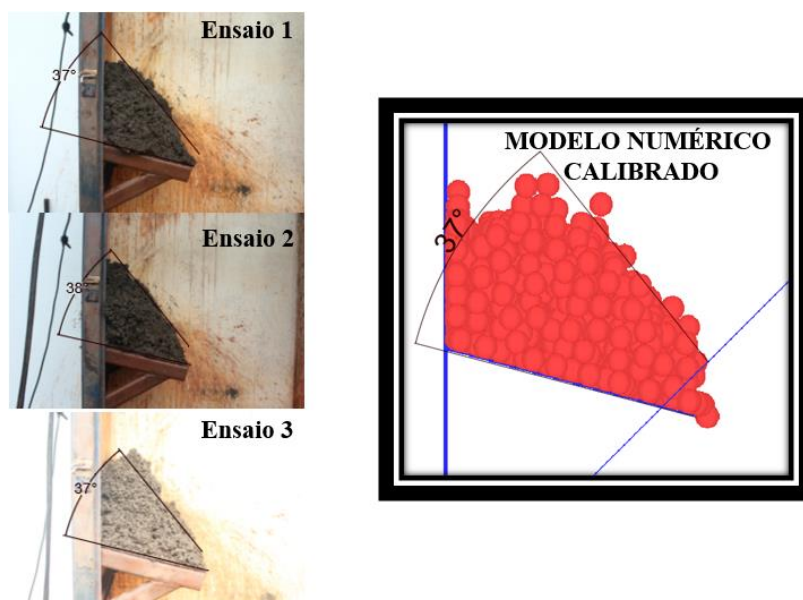
- MF14 – UMIDADE MÉDIA (17,5%)

Figura 79 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 17,5%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 80 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 17,5%, defletora de 15°



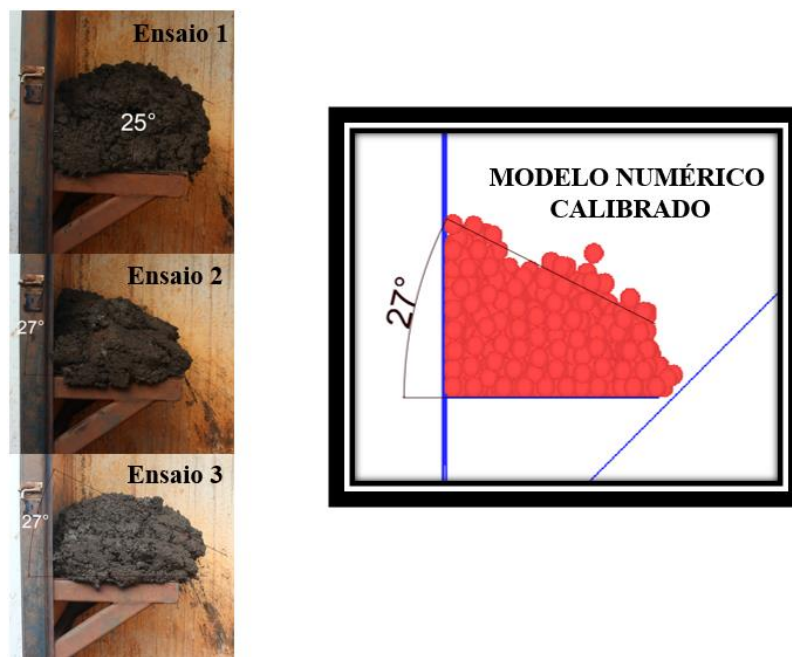
Fonte: Autoria própria

Tabela 19 – Parâmetros de calibração para o material MF14 a umidade 17,5%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.53
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.49
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.70
	<i>Radius of fine</i>	0.76
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1630
	<i>Packing Ratio</i>	1.947

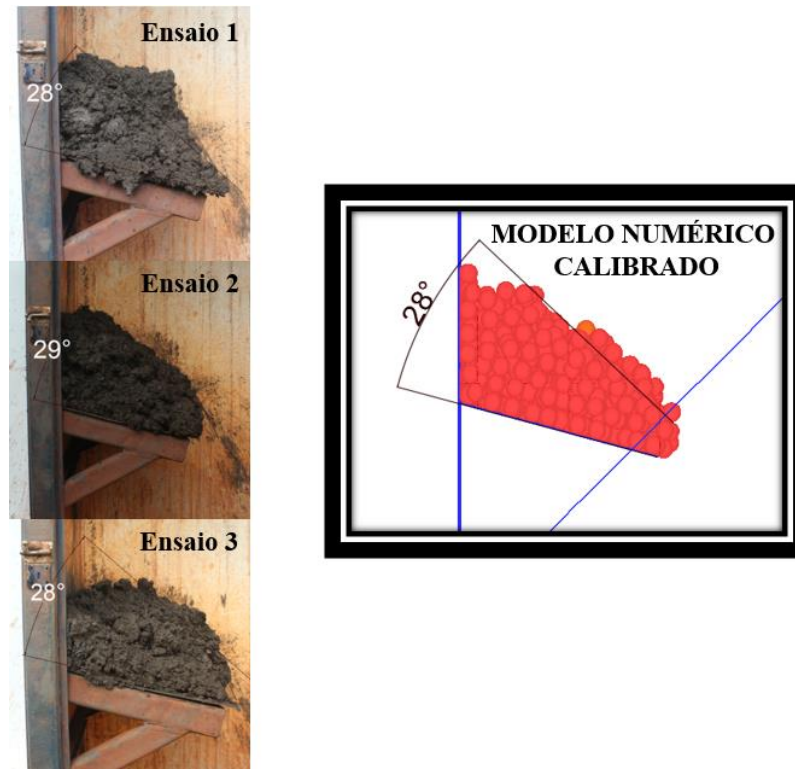
- MF14 – Umidade máxima (22%)

Figura 81 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 22%, defletora de 90°



Fonte: Autoria própria

Figura 82 - Resultado da calibração do modelo numérico do material MF14 a umidade de 22%, defletora de 15°



Fonte: Autoria própria

Tabela 20 – Parâmetros de calibração para o material MF14 a umidade 22%

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO		
Interação Partícula – Superfície	<i>Wall Friction</i>	0.50
	<i>Normal Contact Restitution</i>	0.2
	<i>Rotating Friction</i>	0.7
	<i>Particle-Surface Adhesion</i>	0.0125
Interação Partícula – Partícula	<i>Interparticle friction</i>	0.49
	<i>Normal contact restitution</i>	0.24
	<i>Rotating Friction</i>	0.05
	<i>Raio da partícula (mm)</i>	30
	<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	0.78
	<i>Radius of fine</i>	0.78
	<i>Bulk Density (kg/m³)</i>	1700
	<i>Packing Ratio</i>	1.947

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Foram realizados ensaios de visualização em caixa de fluxo e ensaio para verificação de ângulo de atrito do material com a parede para quatro tipos de materiais, a saber: FCSS, SFCK, PFCJ, MF14. 72 experimentos foram realizados, possibilitando a criação de um rico banco de dados para servir de base na calibração de modelos numéricos DEM para os respectivos materiais nas condições de umidade testadas.

O material mais difícil de escoar testado foi o MF14 na umidade máxima, se mostrando bastante coesivo nos ensaios e de difícil visualização do ângulo de repouso nas placas defletoras. Por outro lado, o PFCJ, mesmo em sua maior umidade, se mostrou bem fácil de trabalhar, escoando sem problemas e formando um ângulo de repouso bem mais fácil de identificar.

O material FCSS apresentou saturação de água nos ensaios com umidade máxima, o que pode ter influenciado no resultado dos ensaios com a placa defletora de 15°, onde o material não permaneceu na placa.

4.2. PREMISAS DO PROJETO

Os dados principais do chute de transferência de material do virador de vagão VV-311K-03 são apresentados na tabela 21.

Tabela 21. Dados dos transportadores.

Transportador	Capacidade de Projeto (t/h)	Capacidade Nominal (t/h)	Largura (mm)	Velocidade (m/s)	Diâmetro do Tambor (mm)
Alimentador de sapatas	6.000	4.000	2.252	0,3	940
TR-311K-05	11.200	8.000	1.800	4,2	-

Valores considerados para o minério de ferro (Sinter Feed), para os materiais Pellet Feed (PFCJ) e Manganês (MF14), foram considerados como capacidade nominal do transportador TR-311K-05 como 6800 t/h e 5400 t/h respectivamente.

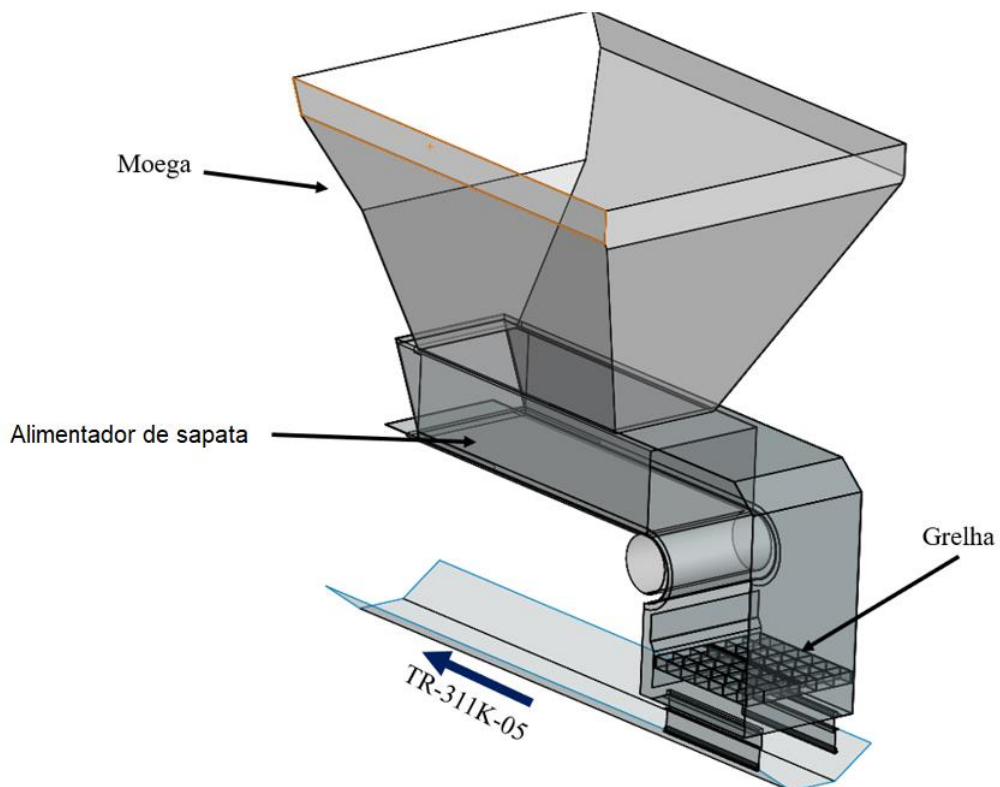
4.2.1. CHUTE DE TRANSFERÊNCIA

O conjunto do chute do alimentador de sapatas do virador de vagão VV-03, é composto pela tremonha de descarga do vagão, alimentador de sapatas, e o chute de transferência, onde está instalada a grelha.

A altura de queda do material do ponto de saída do alimentador de sapatas, até a face da grelha, é de aproximadamente 2,0 metros.

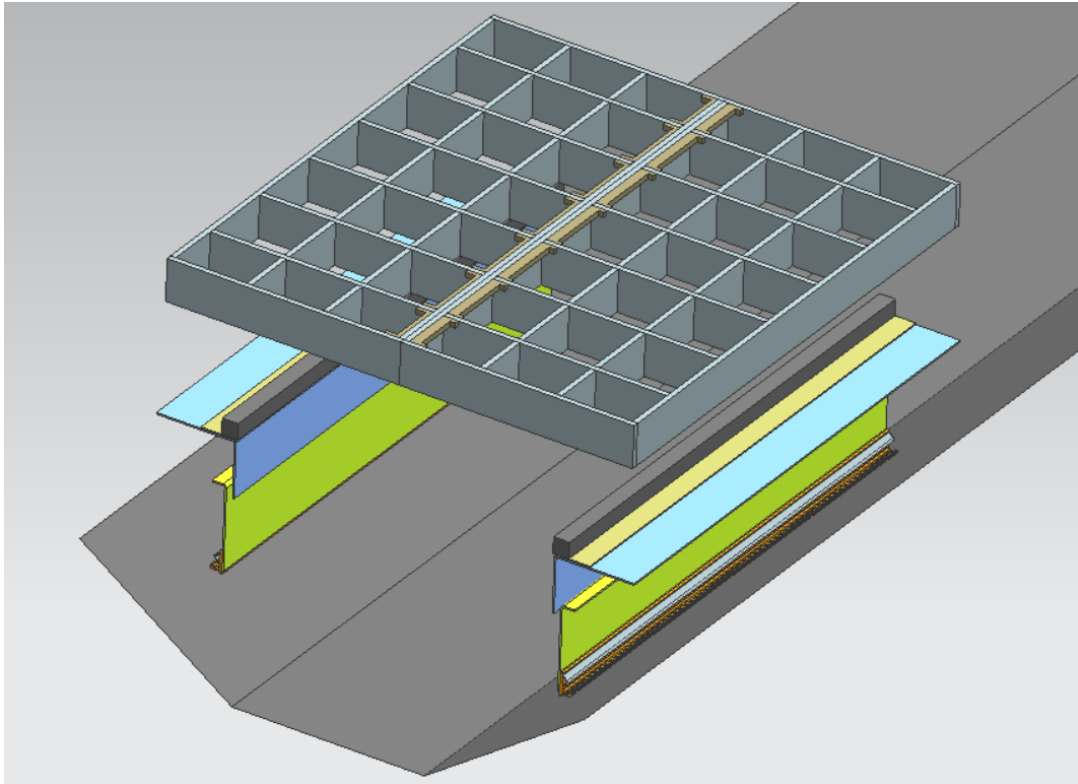
As Figuras 83 e 84, mostram a imagem do conjunto do chute do alimentador, e o detalhe da grelha e sua respectiva bancada, que são os elementos objetos do estudo em questão.

Figura 83. Chute do VV-311K-03 para a TR-311K-05 – Vista geral.



Fonte: Autoria própria

Figura 84. Correia TR-311K-05 – Detalhe grelha e bancada plana.



Fonte: Autoria própria

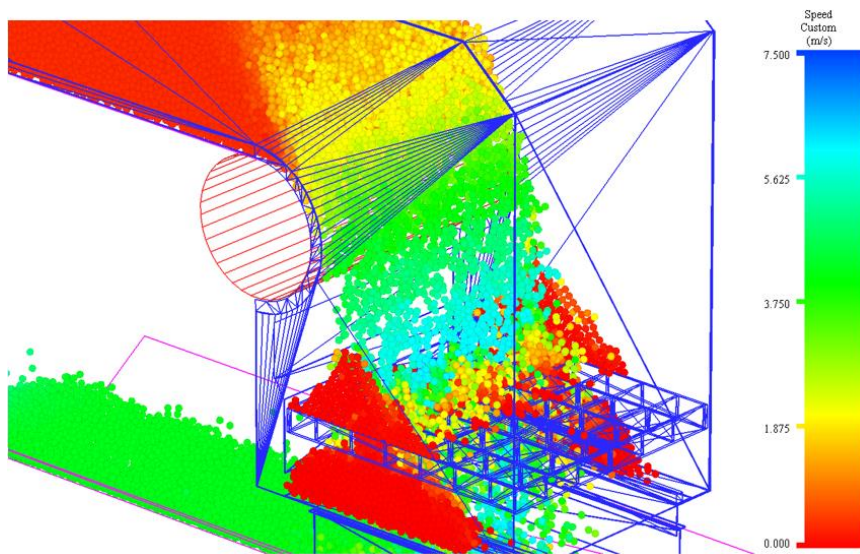
4.3. RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Para a condição nominal – FCSS – Umidade máxima (11%)

A Figura 85 apresenta uma visão geral da simulação do escoamento do material FCSS, para um tempo de 15 seg.

A simulação mostra o material transportado pelo alimentador, sendo descarregado na grelha. Em função do grande volume transportado e da baixa velocidade do alimentador, o material tende a se acomodar entre as paredes do chute e a bancada, e escoar pelo centro do chute, caindo direto na correia receptora.

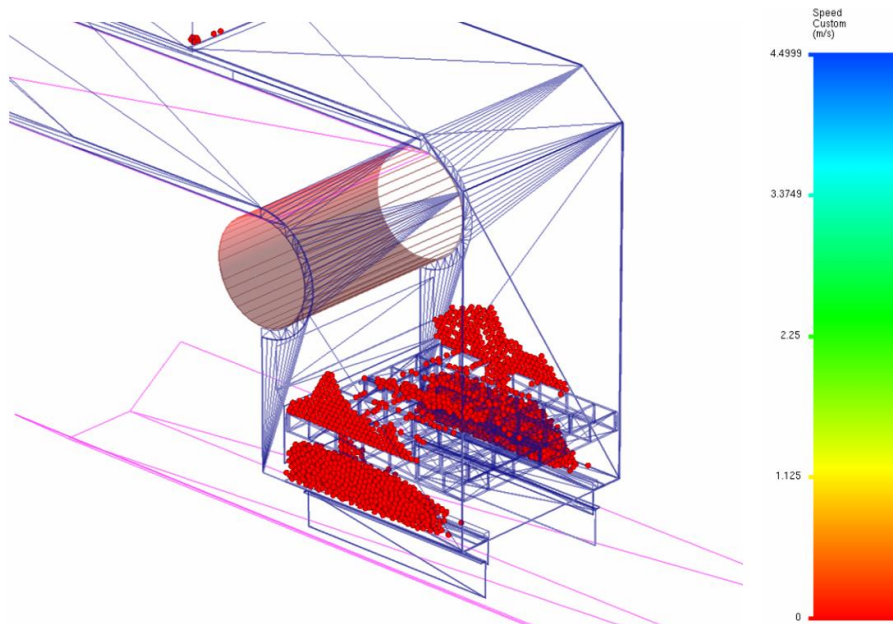
Figura 85. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03.



Fonte: Autoria própria

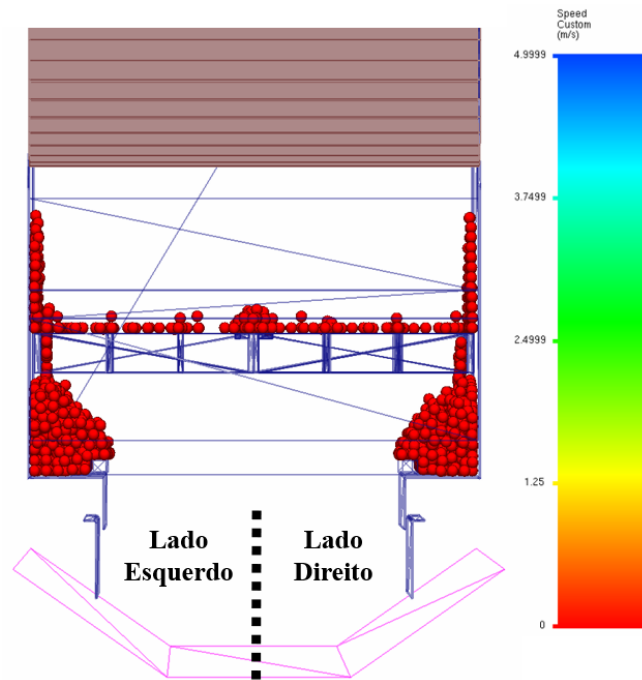
As Figuras 86 e 87, mostram o acúmulo moderado de material nas paredes laterais do chute, na região da superfície da grelha, juntamente com as bancadas planas, após o descarregamento do alimentador.

Figura 86. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento



Fonte: Autoria própria

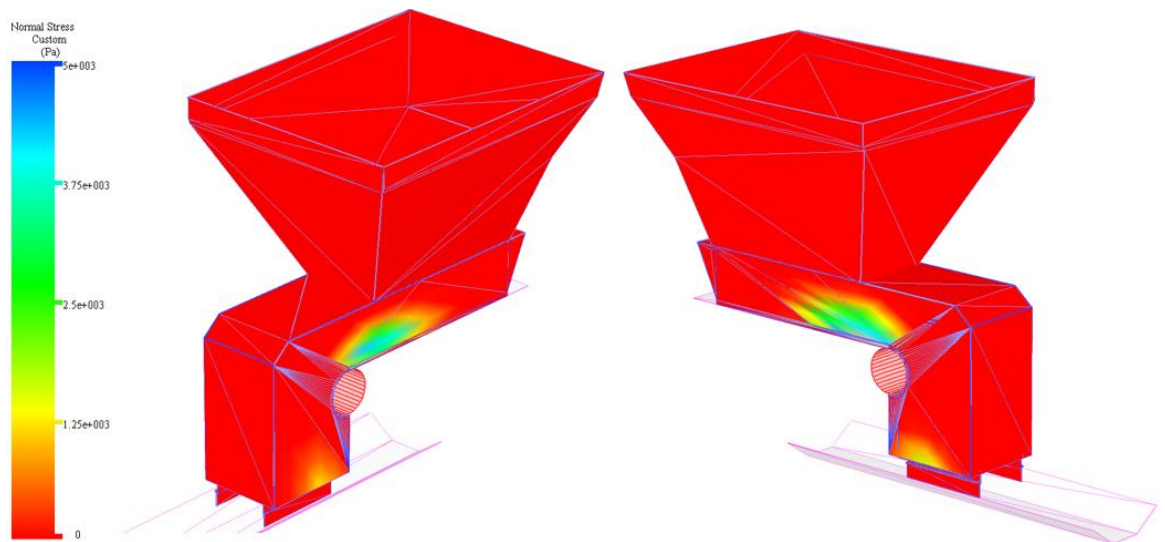
Figura 87. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03



Fonte: Autoria própria

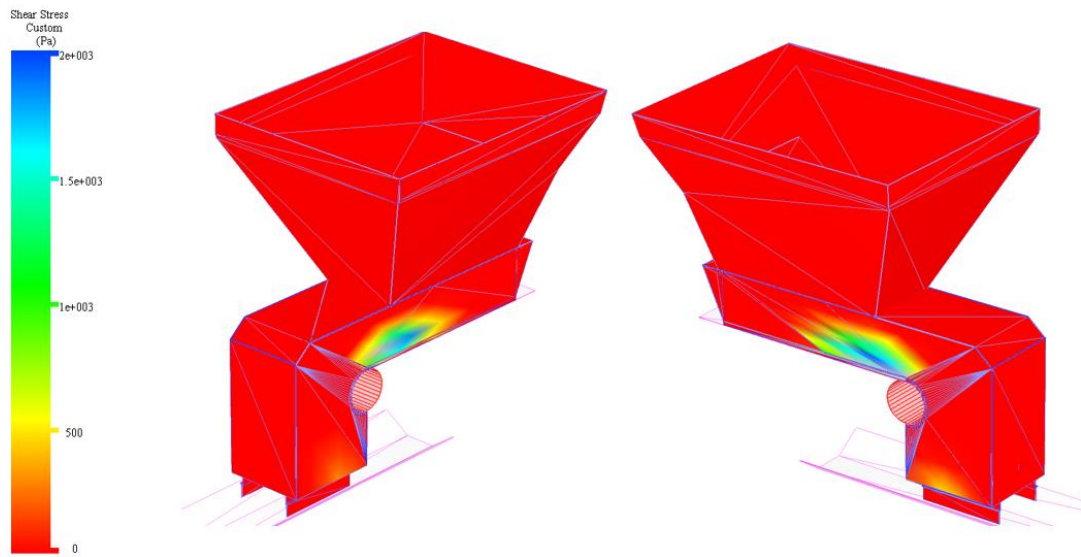
As Figuras 88 e 89 apresentam as regiões que sofrem esforços normais e cisalhantes na estrutura do conjunto do chute, em função do contato e acúmulo de material.

Figura 88. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

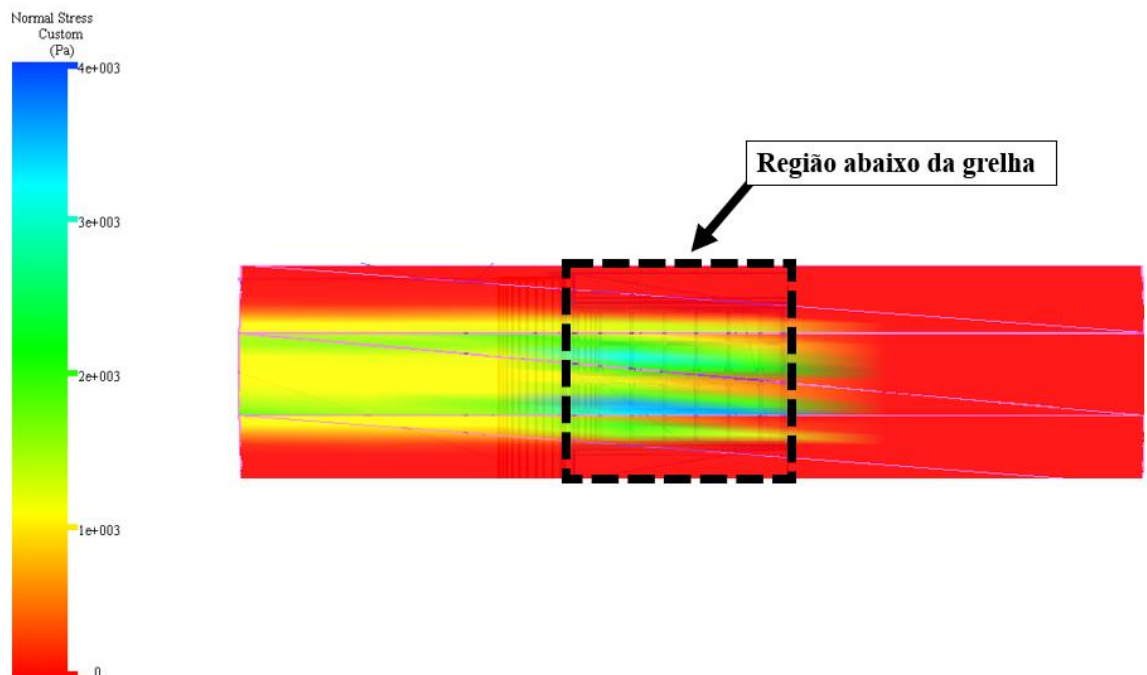
Figura 89. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

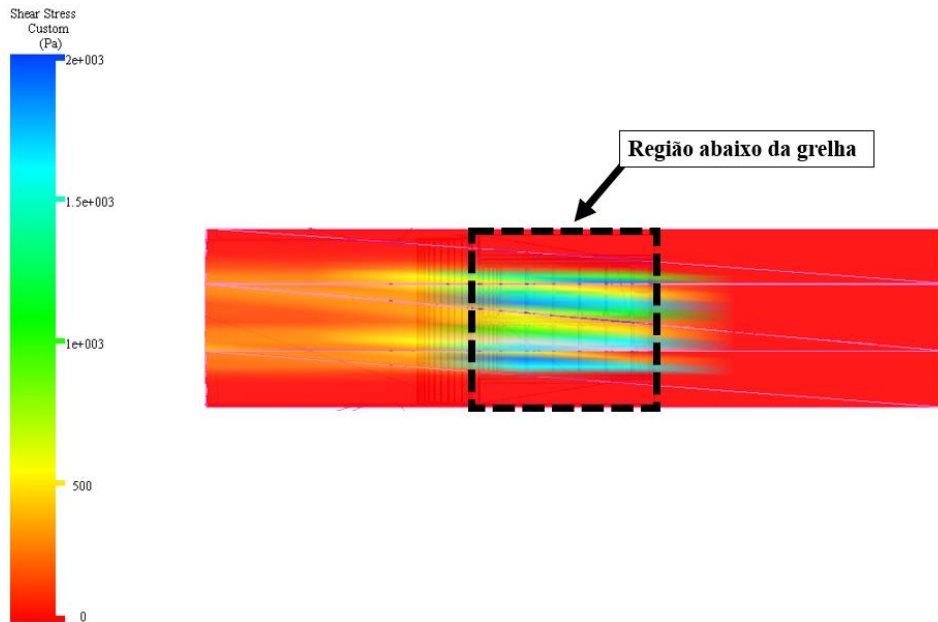
As Figuras 90 e 91, apresentam os gráficos com os esforços normais e cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05, durante o manuseio, com detalhe na região central do recebimento do material.

Figura 90. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05



Fonte: Autoria própria

Figura 91. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05

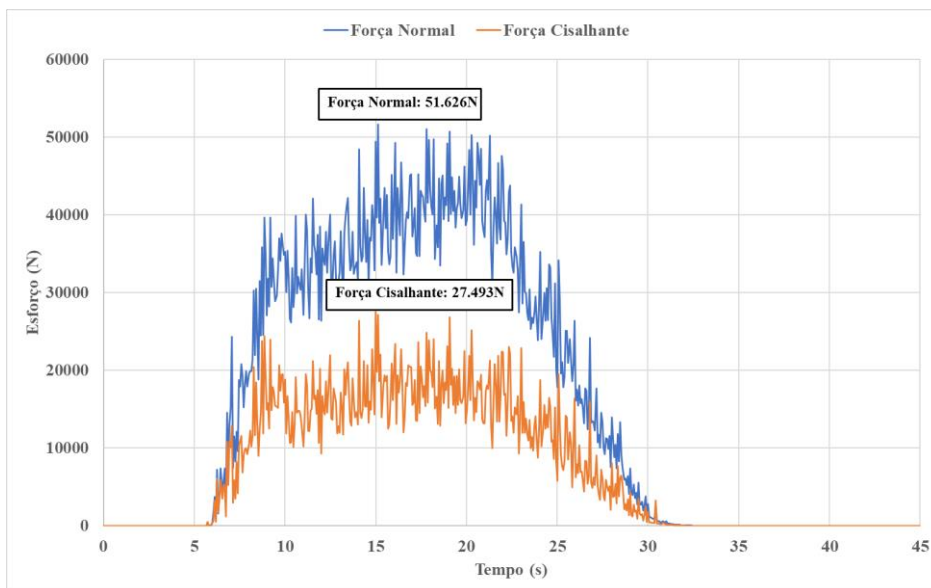


Fonte: Autoria própria

O ponto de maior esforço na correia receptora, é na região central, onde o material entra em contato direto, após uma queda livre de aproximadamente 2,0 metros do alimentador, a uma velocidade superior a 8 m/s. Toda a energia oriunda da queda livre, é descarregada em um ângulo de 90 graus na face da correia.

A Figura 92 apresenta os esforços normais e cisalhantes sofridos ao longo do tempo, pela correia receptora do TR-311K-05, sendo destacado a média desses esforços.

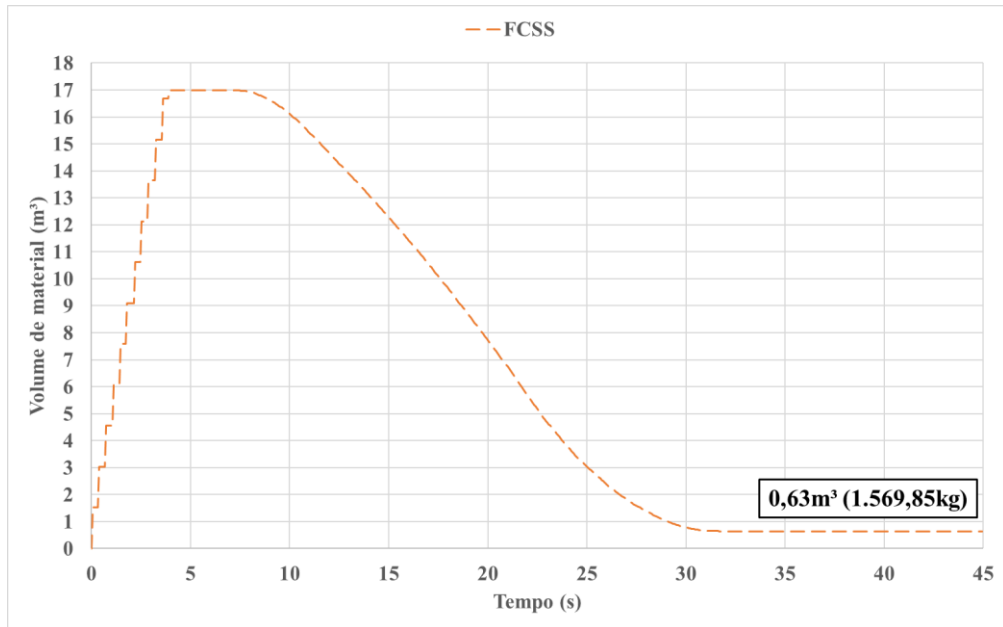
Figura 92. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05



Fonte: Autoria própria

A Figura 93, apresenta a evolução do número de material na simulação ao longo do tempo, ao final, o material remanescente representa o que ficou depositado nas bancadas e grelha.

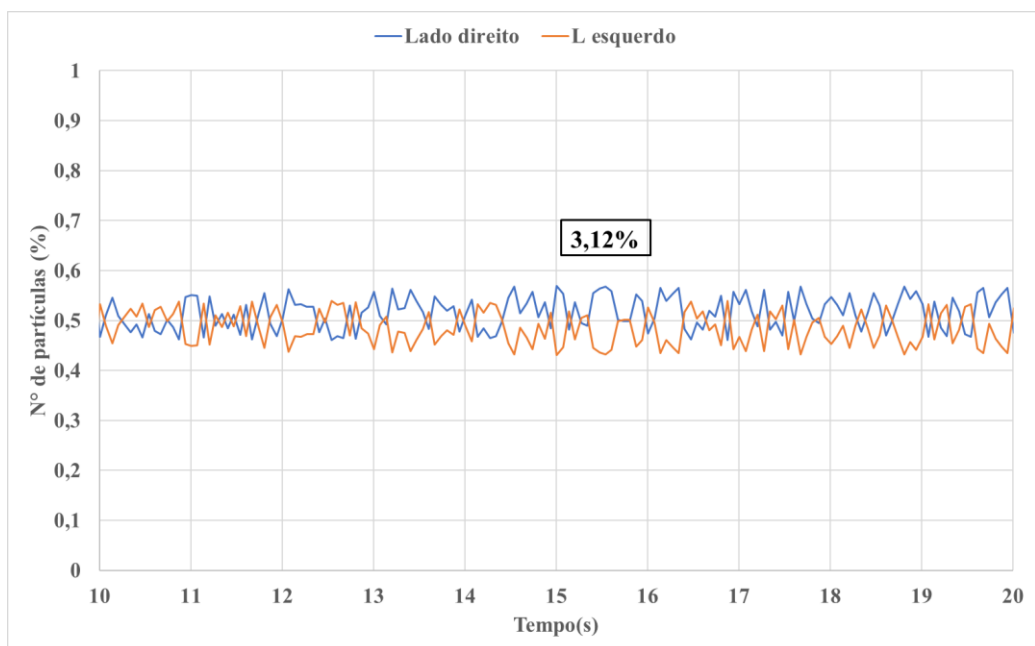
Figura 93. Material presente na simulação.



Fonte: Autoria própria

A Figura 94 apresenta o percentual médio de desalinhamento da correia receptora ao longo do tempo, durante o recebimento do material.

Figura 94. Desalinhamento da correia transportadora da lança



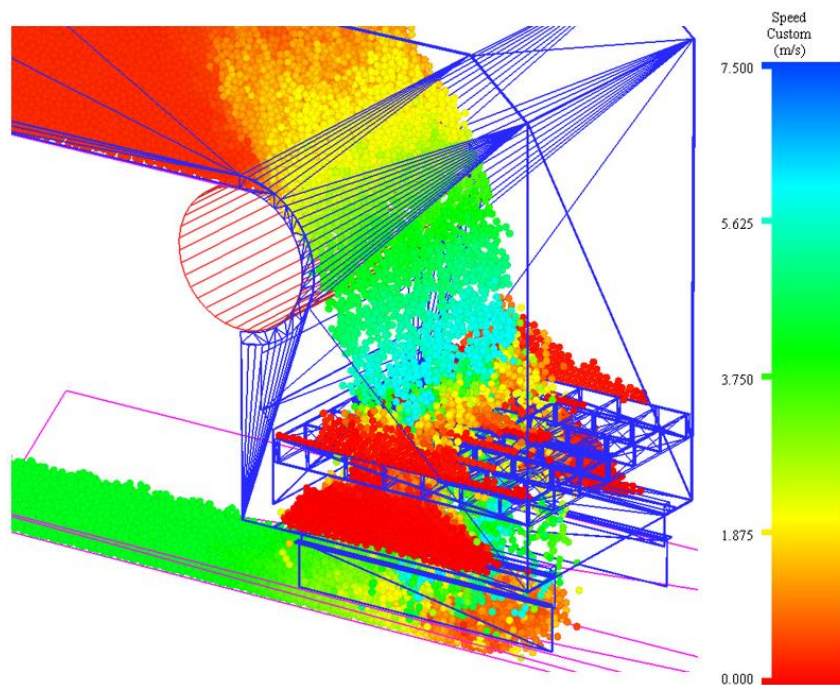
Fonte: Autoria própria

Para a condição nominal – SFCK – Umidade máxima (11%)

A Figura 95, apresenta uma visão geral da simulação do material SFCK, para um tempo de 15 seg.

A simulação mostra o material transportado pelo alimentador, sendo descarregado na grelha. Em função do grande volume transportado e da baixa velocidade do alimentador, o material tende a se acomodar entre as paredes do chute, e escoar pelo centro do chute, caindo direto na correia receptora.

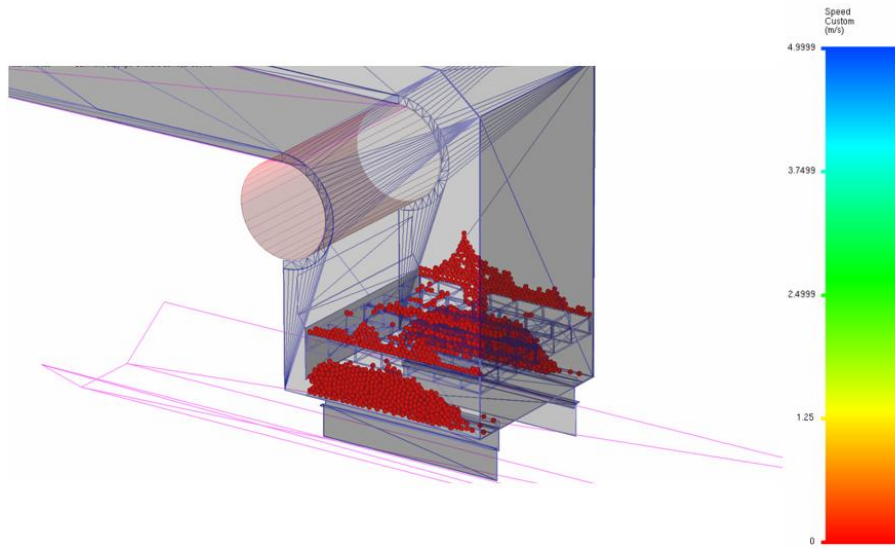
Figura 95. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03



Fonte: Autoria própria

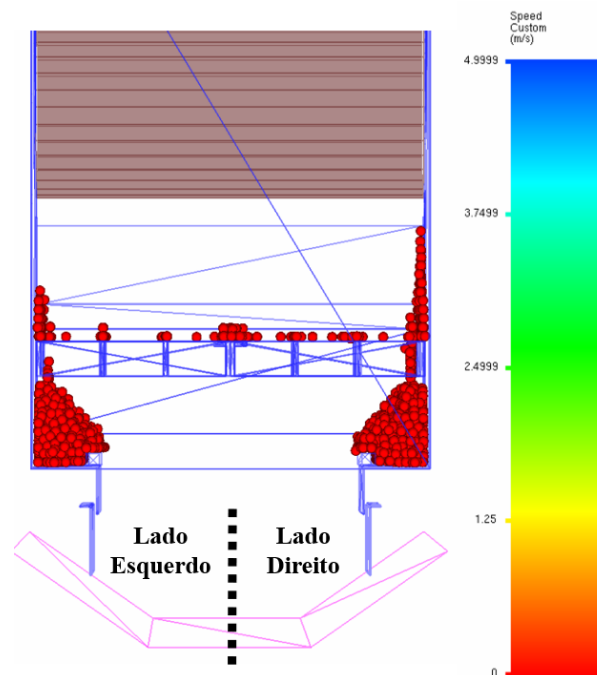
As Figuras 96 e 97, mostram o acúmulo moderado de material nas paredes laterais do chute, na região da superfície da grelha, juntamente com as bancadas planas, após o descarregamento do alimentador.

Figura 96. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento



Fonte: Autoria própria

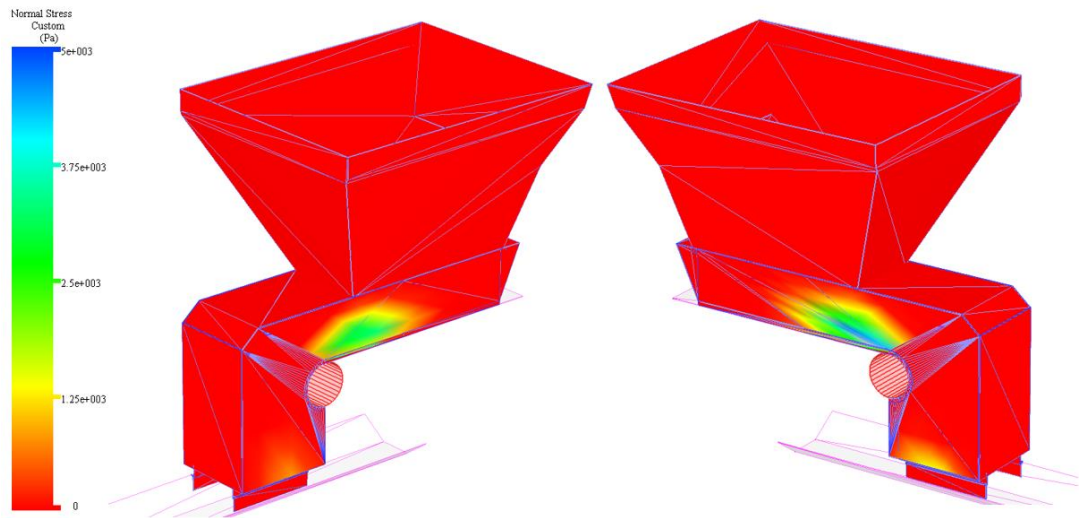
Figura 97. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03



Fonte: Autoria própria

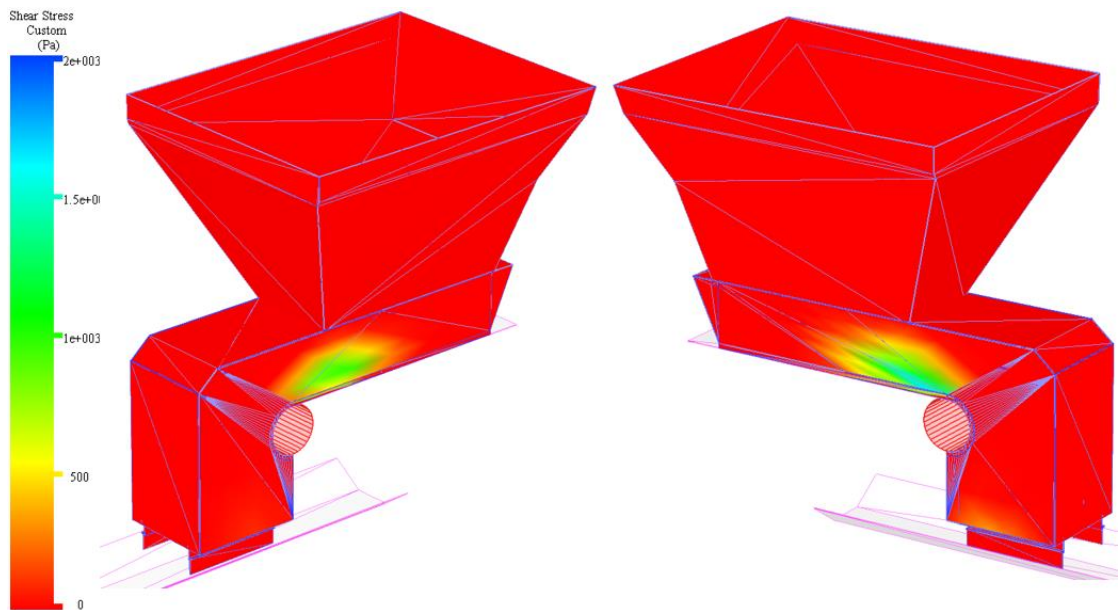
As Figuras 98 e 99 apresentam as regiões que sofrem esforços normais e cisalhantes na estrutura do conjunto do chute, em função do contato e acúmulo de material.

Figura 98. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

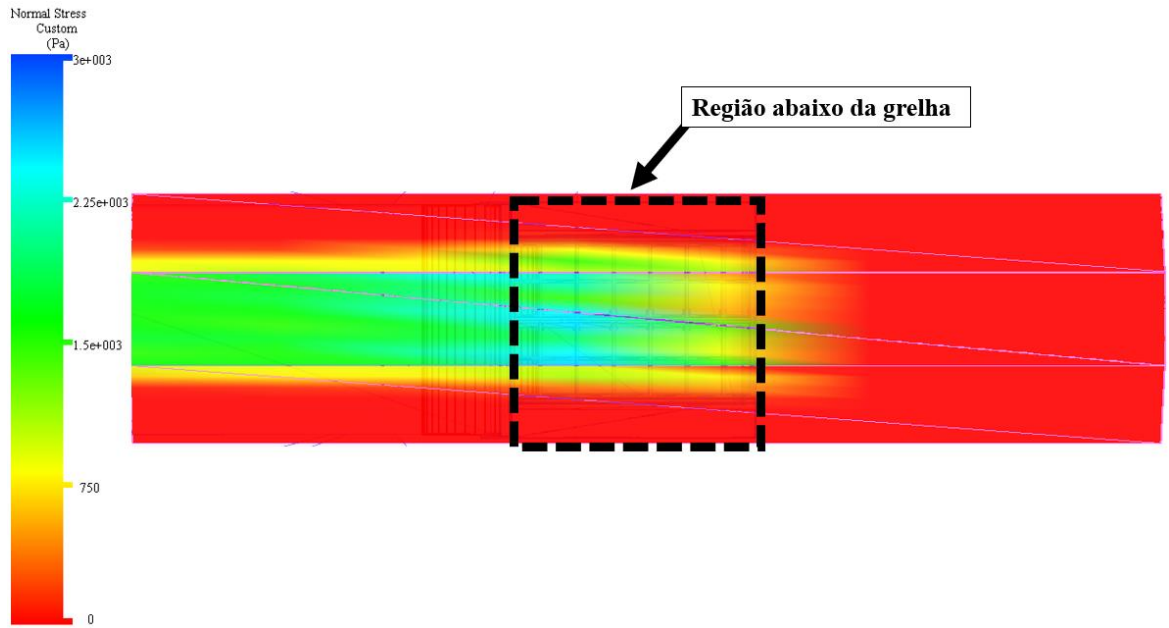
Figura 99. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

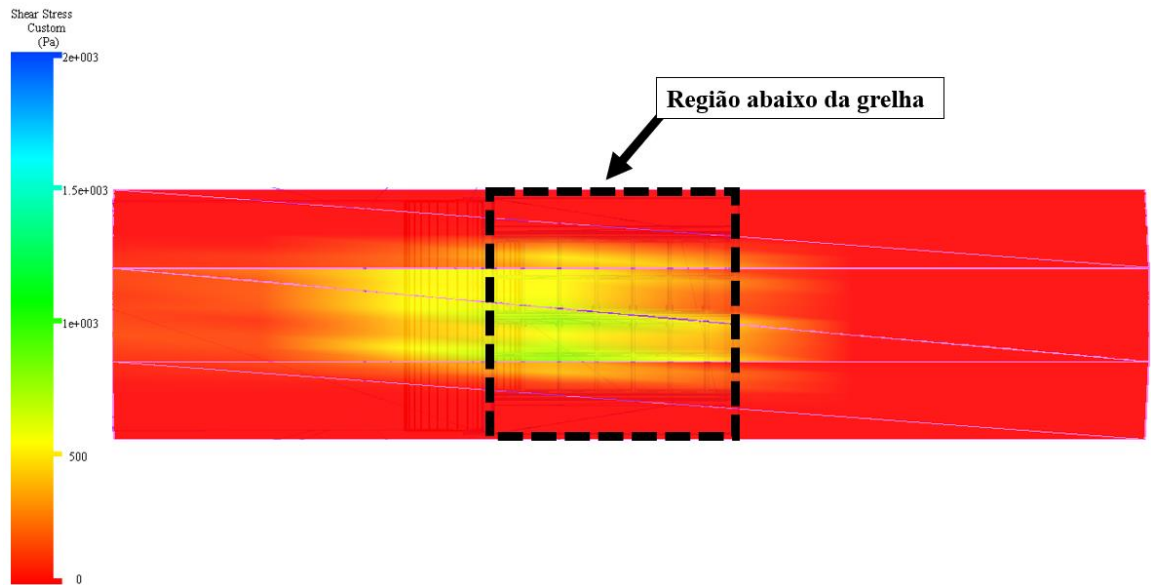
As Figuras 100 e 101, apresentam os gráficos com os esforços normais e cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05 durante o manuseio, com detalhe na região central do recebimento do material.

Figura 100. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05



Fonte: Autoria própria

Figura 101. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05

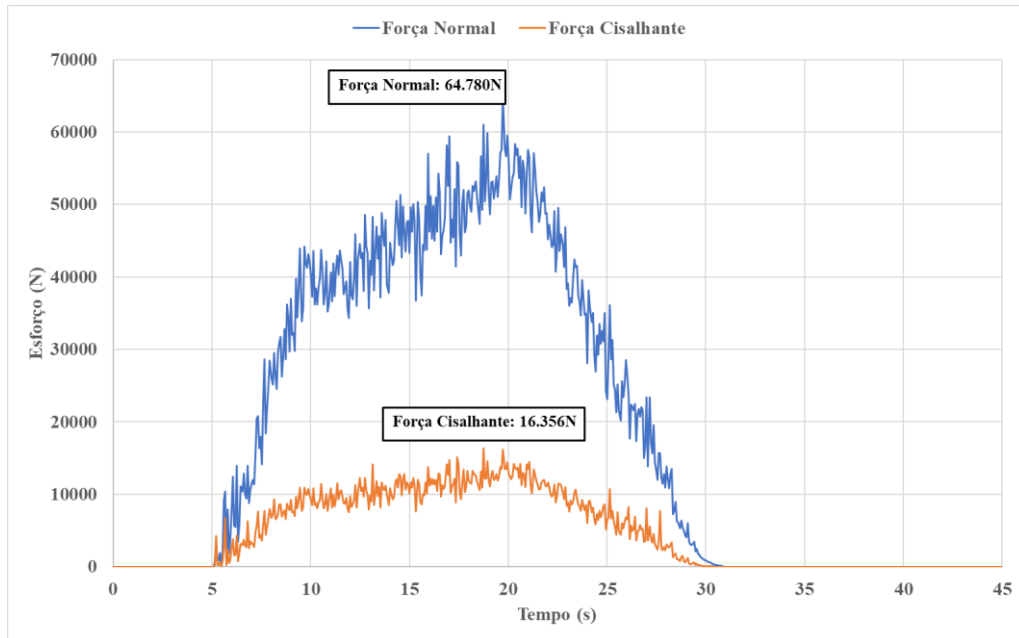


Fonte: Autoria própria

O ponto de maior esforço na correia receptora, é na região central, onde o material entra em contato direto, após uma queda livre de aproximadamente 2,0 metros do alimentador, a uma velocidade superior a 8 m/s. Toda a energia oriunda da queda livre, é descarregada em um ângulo de 90 graus na face da correia.

A Figura 102 apresenta os esforços normais e cisalhantes sofridos ao longo do tempo, pela correia receptora do TR-311K-05, sendo destacado a média desses esforços.

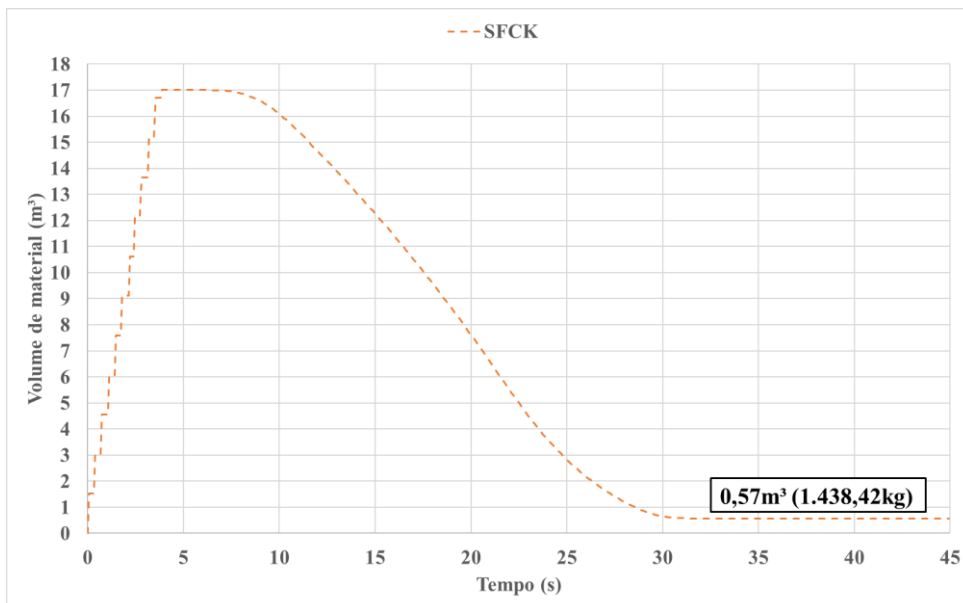
Figura 102. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05



Fonte: Autoria própria

A Figura 103, apresenta a evolução do número de material na simulação ao longo do tempo, ao final, o material remanescente representa o que ficou depositado nas bancadas e grelha.

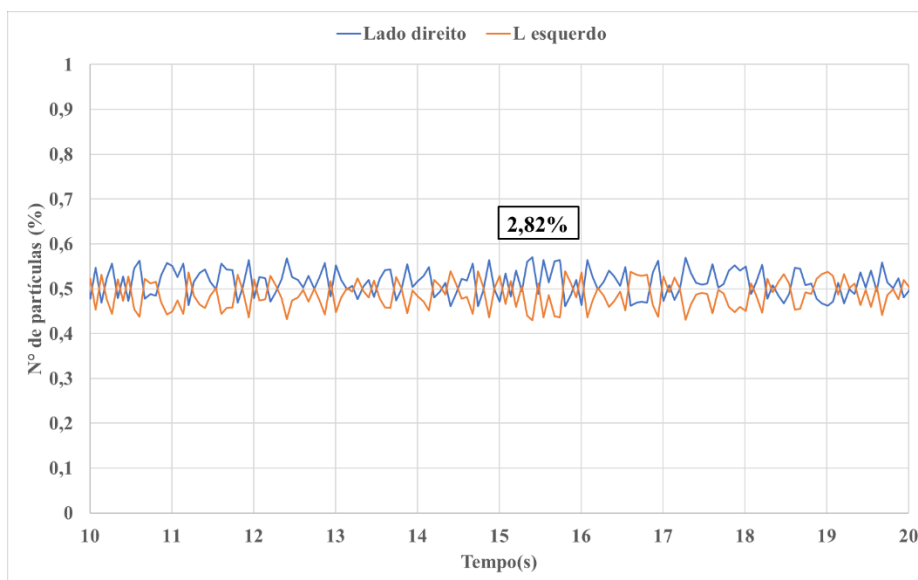
Figura 103. Material presente na simulação



Fonte: Autoria própria

A Figura 104 apresenta o percentual médio de desalinhamento da correia receptora ao longo do tempo, durante o recebimento do material.

Figura 104. Desalinhamento da correia transportadora da lança



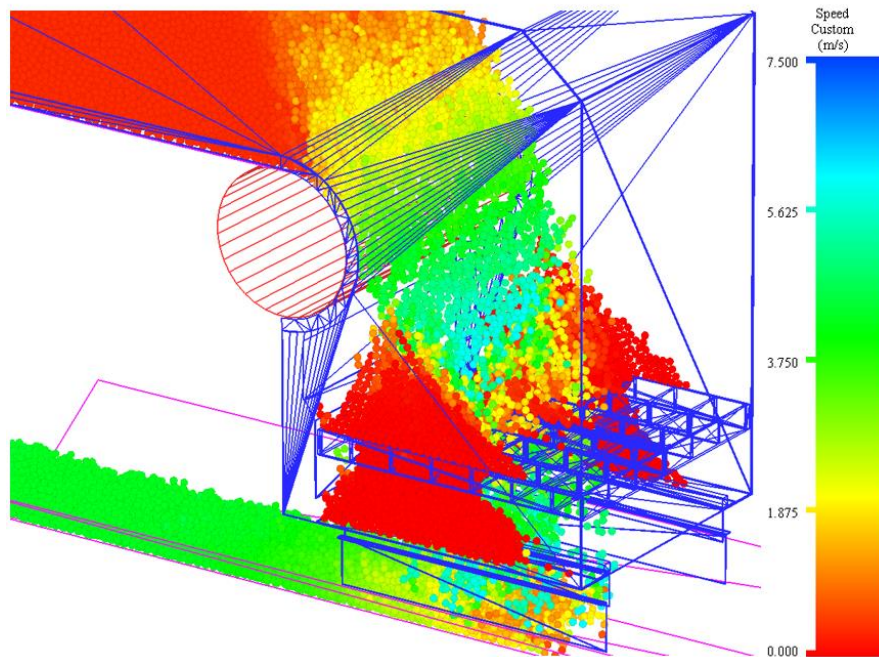
Fonte: Autoria própria

Condição nominal PFCJ – Umidade máxima (14%)

A Figura 105, apresenta uma visão geral da simulação do material PFCJ, para um tempo de 15 seg.

A simulação mostra o material transportado pelo alimentador, sendo descarregado na grelha. Em função do grande volume transportado e da baixa velocidade do alimentador, o material tende a se acomodar entre as paredes do chute, e escoar pelo centro do chute, caindo direto na correia receptora.

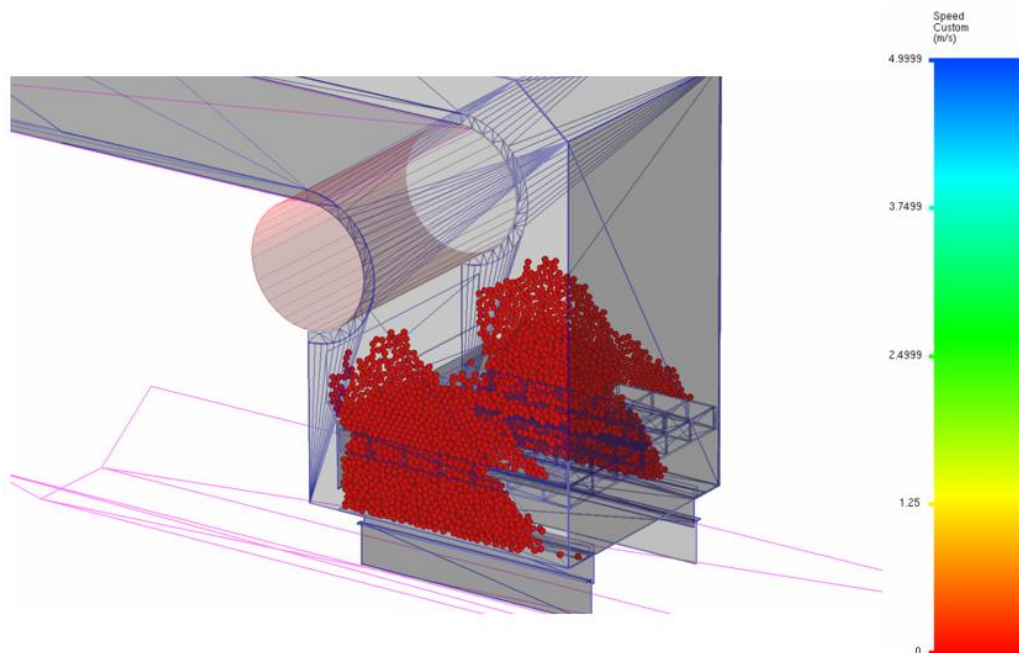
Figura 105. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03



Fonte: Autoria própria

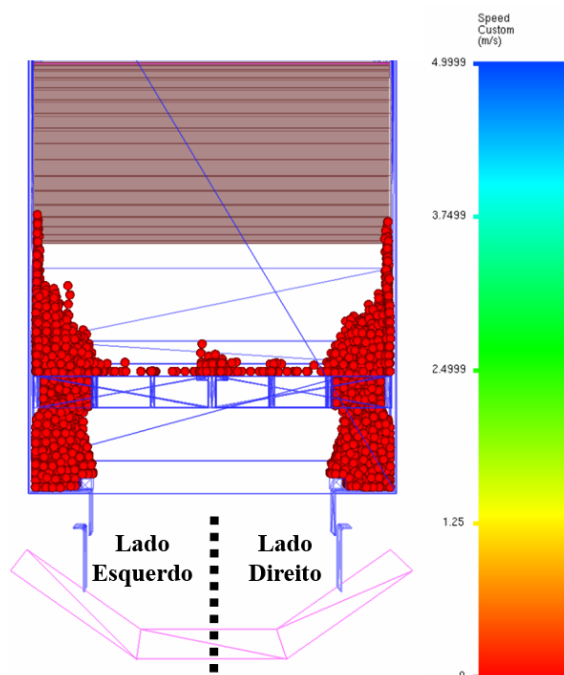
As Figuras 106 e 107, mostram o acúmulo moderado de material nas paredes laterais do chute, na região da superfície da grelha, juntamente com as bancadas planas, após o descarregamento do alimentador.

Figura 106. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento



Fonte: Autoria própria

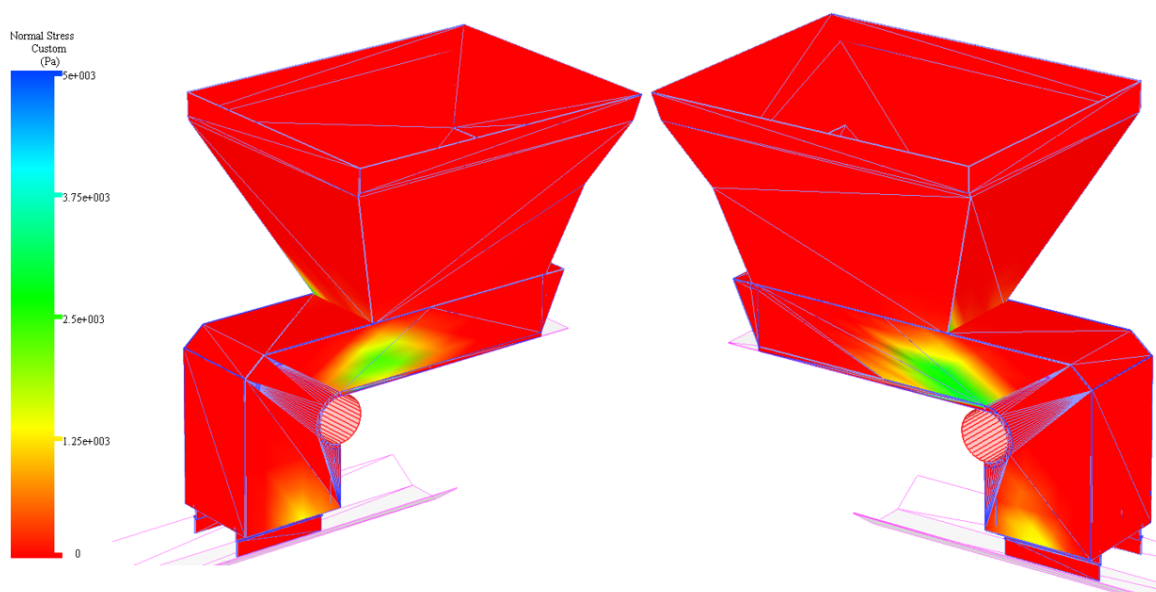
Figura 107. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03



Fonte: Autoria própria

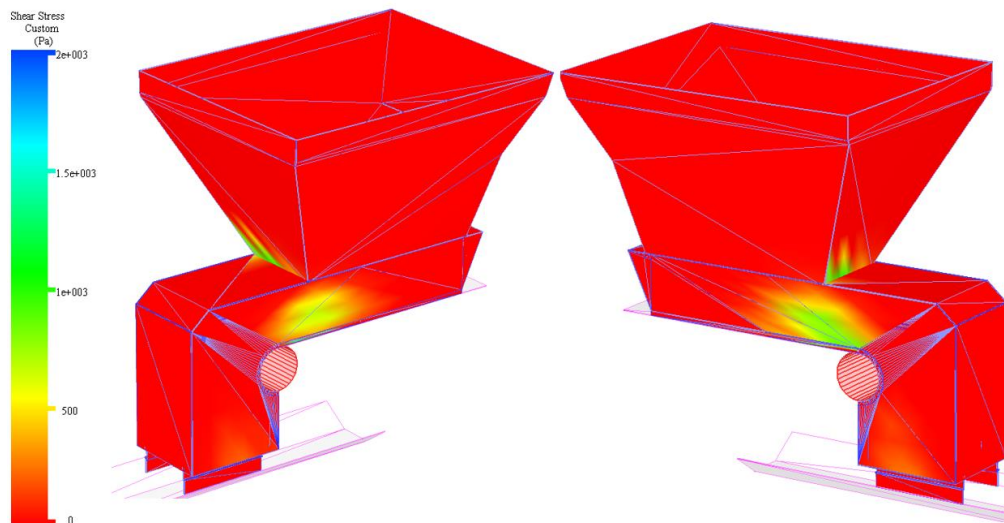
As Figuras 108 e 109 apresentam as regiões que sofrem esforços normais e cisalhantes na estrutura do conjunto do chute, em função do contato e acúmulo de material.

Figura 108. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

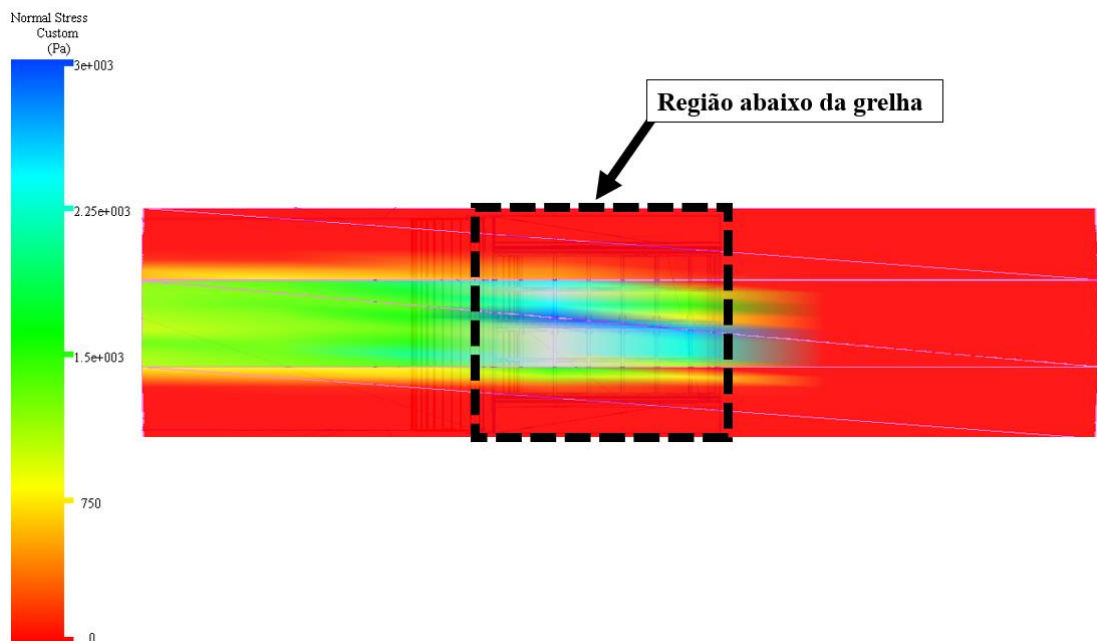
Figura 109. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

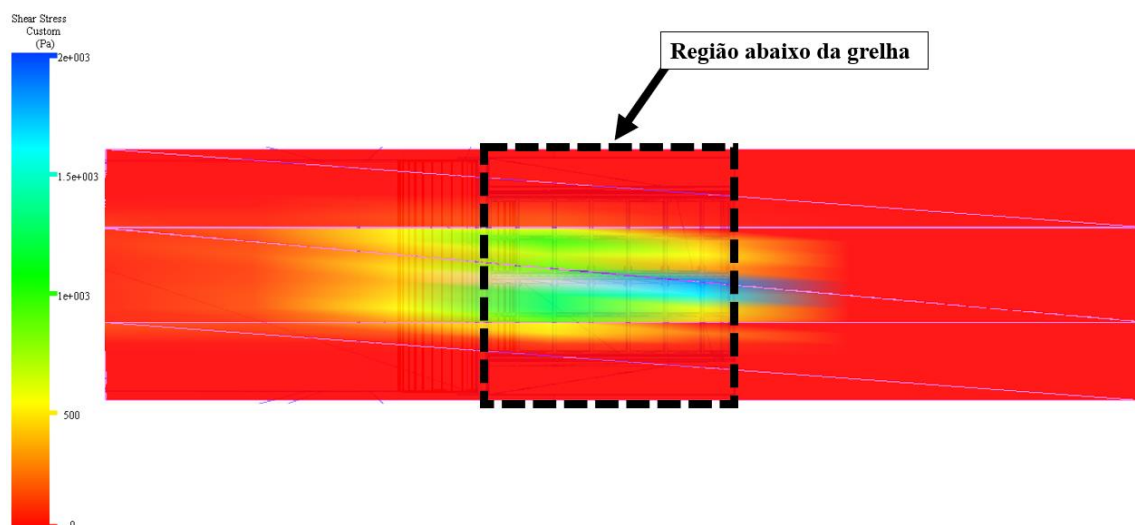
As Figuras 110 e 111, apresentam os gráficos com os esforços normais e cisalhantes sofridos pela correia receptora do TR 311K-05 durante o manuseio, com detalhe na região central do recebimento do material.

Figura 110. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05



Fonte: Autoria própria

Figura 111. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05

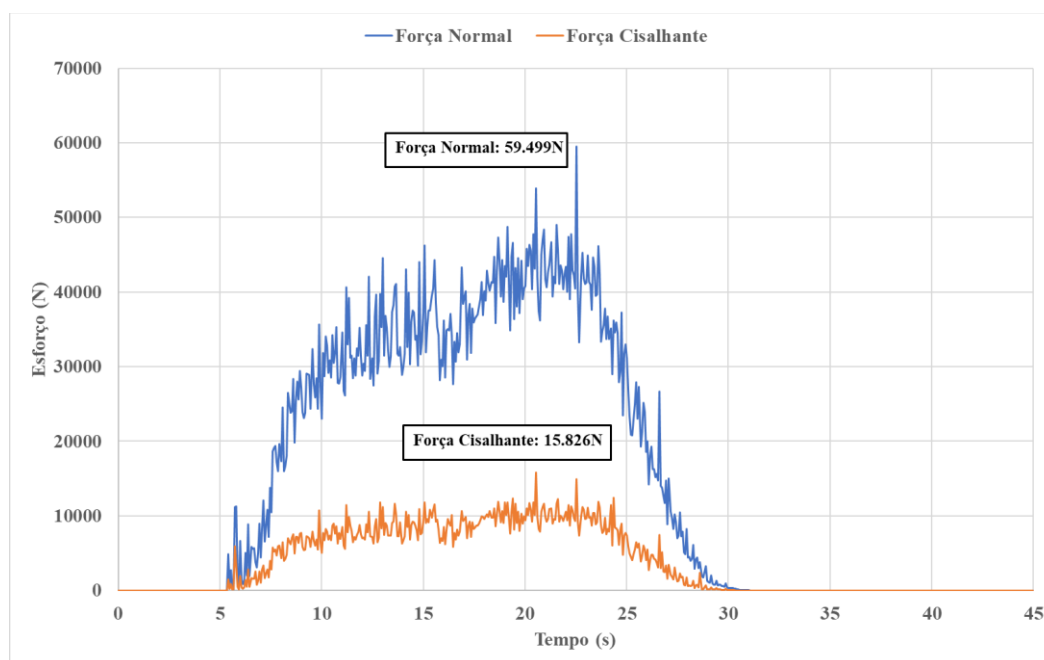


Fonte: Autoria própria

O ponto de maior esforço na correia receptora, é na região central, onde o material entra em contato direto, após uma queda livre de aproximadamente 2,0 metros do alimentador, a uma velocidade superior a 8 m/s. Toda a energia oriunda da queda livre, é descarregada em um ângulo de 90 graus na face da correia.

A Figura 112 apresenta os esforços normais e cisalhantes sofridos ao longo do tempo, pela correia receptora do TR-311K-05, sendo destacado a média desses esforços.

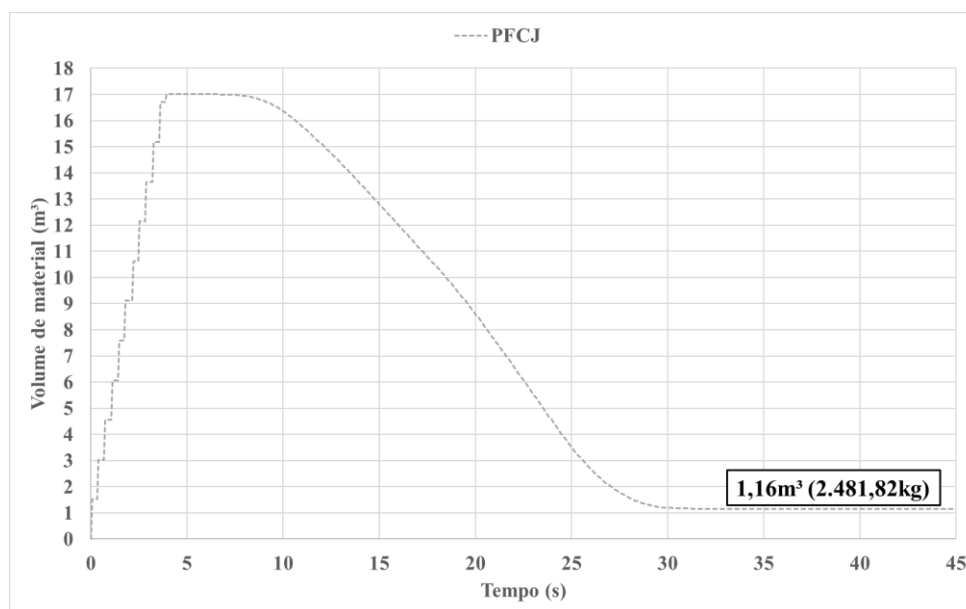
Figura 112. Esforços normais e cisalhantes na correia TR-311K-05



Fonte: Autoria própria

A Figura 113, apresenta a evolução do número de material na simulação ao longo do tempo, ao final, o material remanescente representa o que ficou depositado nas bancadas e grelha.

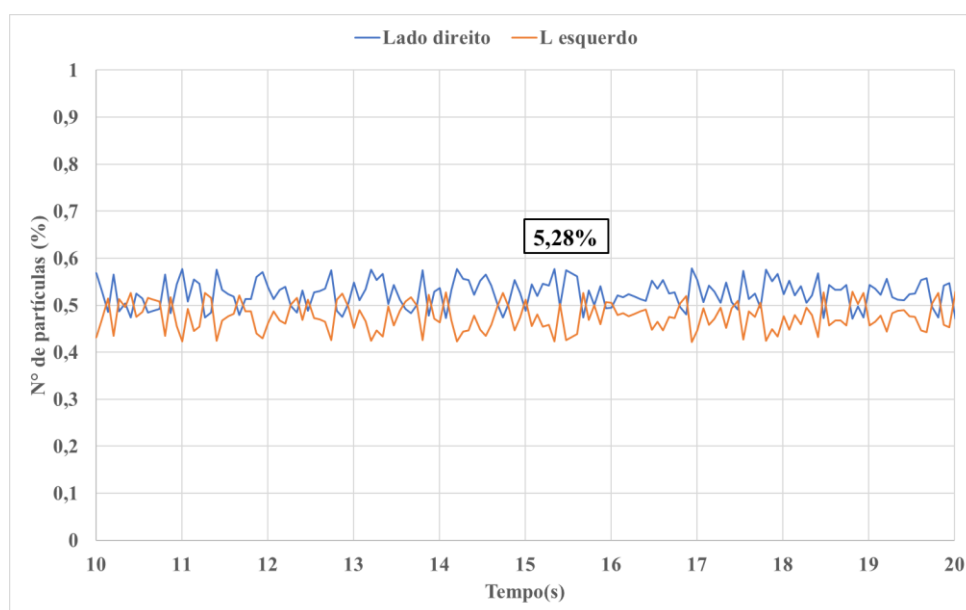
Figura 113. Material presente na simulação.



Fonte: Autoria própria

A Figura 114 apresenta o percentual médio de desalinhamento da correia receptora ao longo do tempo, durante o recebimento do material.

Figura 114. Desalinhamento da correia transportadora da lança



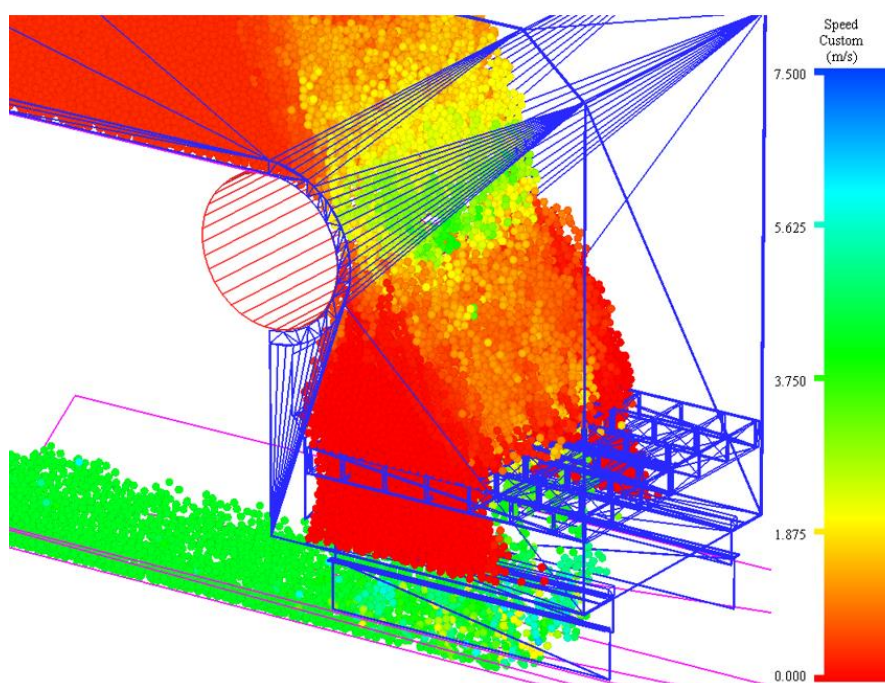
Fonte: Autoria própria

Condição nominal – MF14 – Umidade máxima (22%)

A Figura 115, apresenta uma visão geral da simulação do material PFCJ, para um tempo de 45 seg.

A simulação mostra o material transportado pelo alimentador, sendo descarregado na grelha. Em função do grande volume transportado e da baixa velocidade do alimentador, o material tende a se acomodar entre as paredes do chute, e escoar pelo centro do chute, caindo direto na correia receptora.

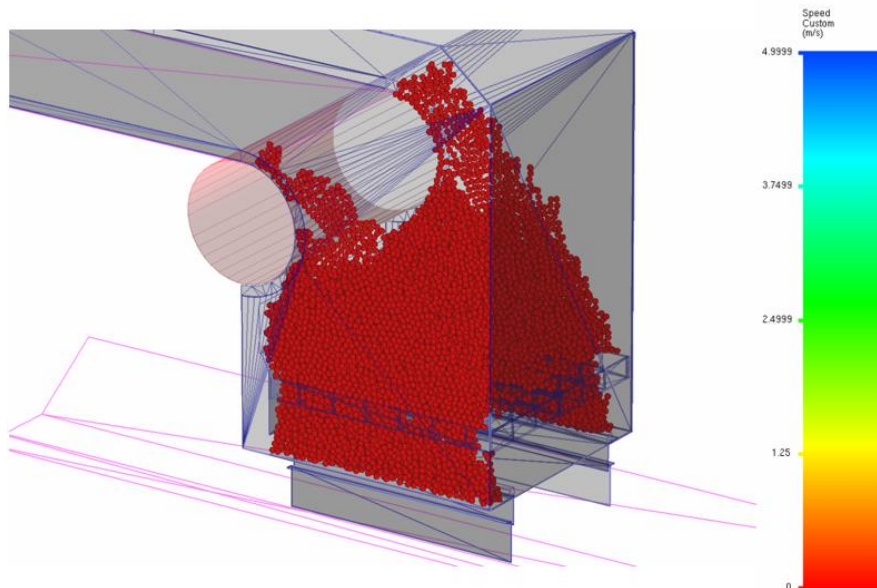
Figura 115. Escoamento do material entre alimentador de sapatas e a grelha do VV-03



Fonte: Autoria própria

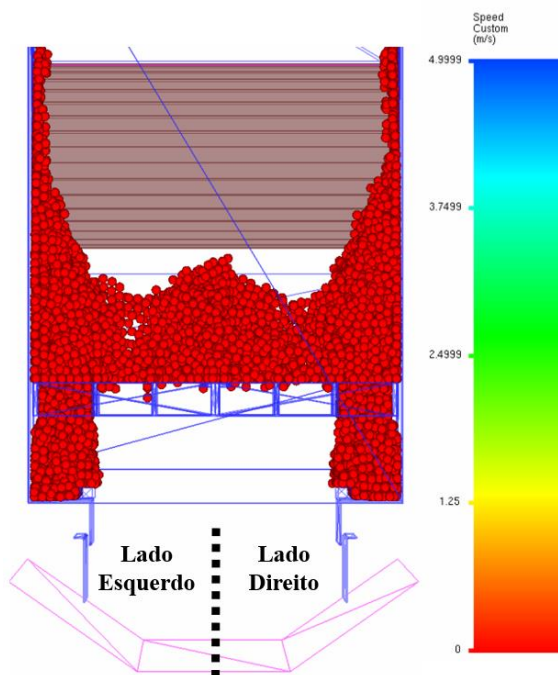
As Figuras 116 e 117, mostram o acúmulo elevado de material nas paredes laterais do chute, na região da superfície da grelha, juntamente com as bancadas planas, após o descarregamento do alimentador.

Figura 116. Material retido na grelha e bancadas do VV-03, após o descarregamento



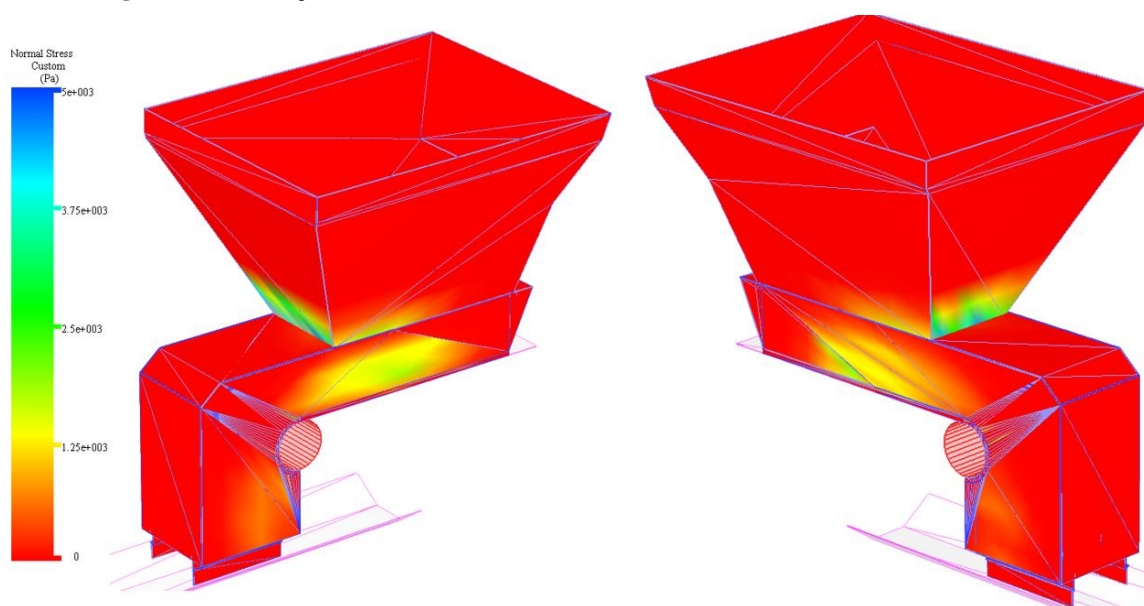
Fonte: Autoria própria

Figura 117. Vista frontal do acúmulo de material na grelha e bancadas do VV-03

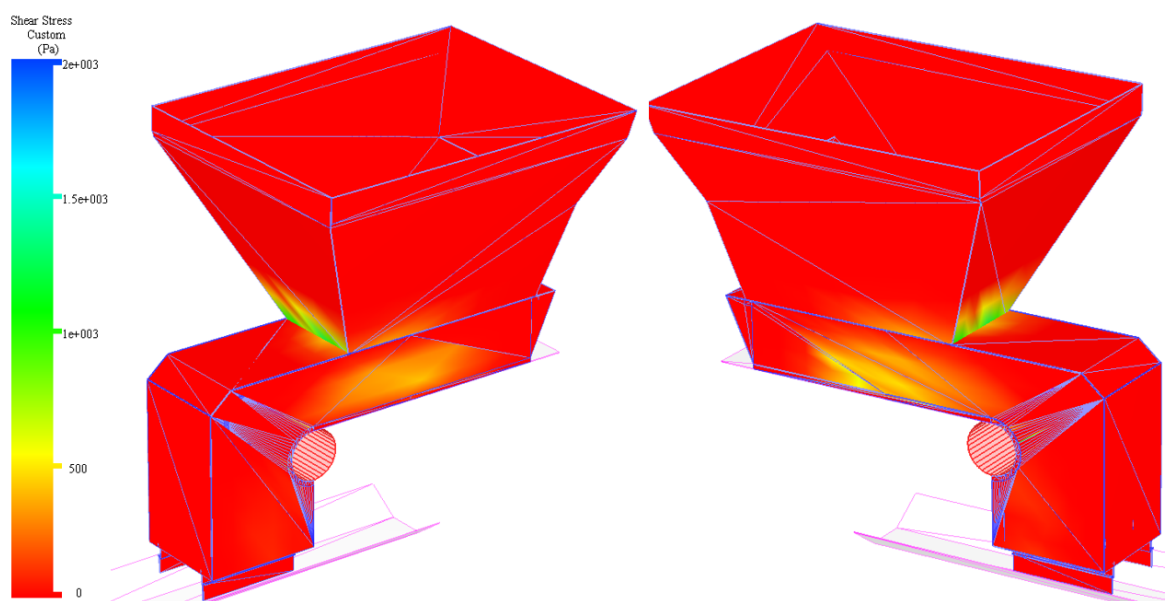


Fonte: Autoria própria

As Figuras 118 e 119 apresentam as regiões que sofrem esforços normais e cisalhantes na estrutura do conjunto do chute devido, em função do contato e acúmulo de material.

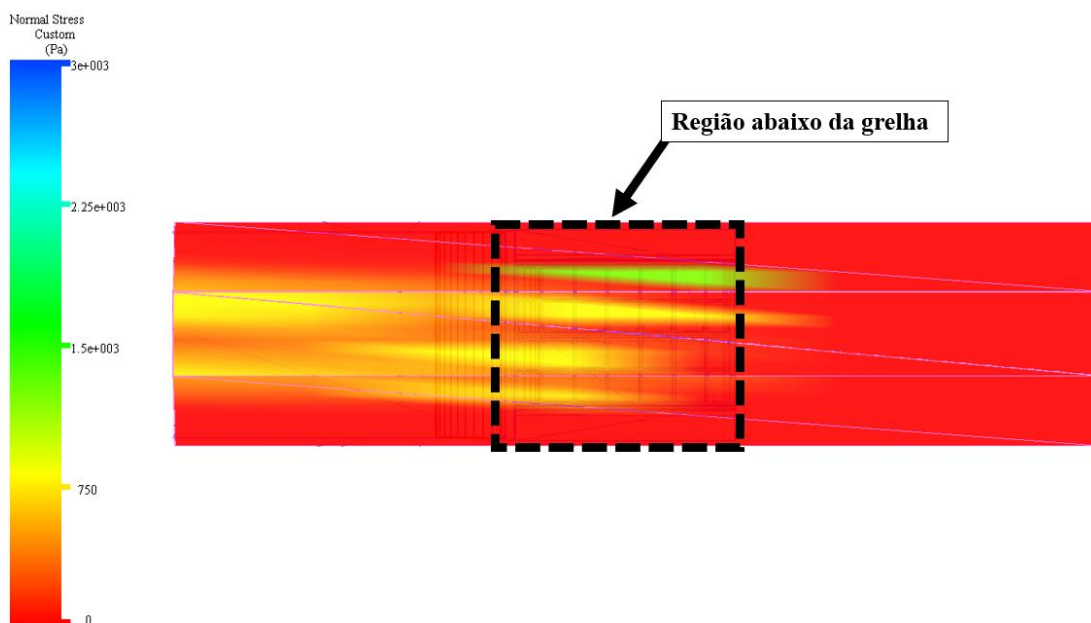
Figura 118. Esforços Normais sofridos no chute do alimentador do VV-03

Fonte: Autoria própria

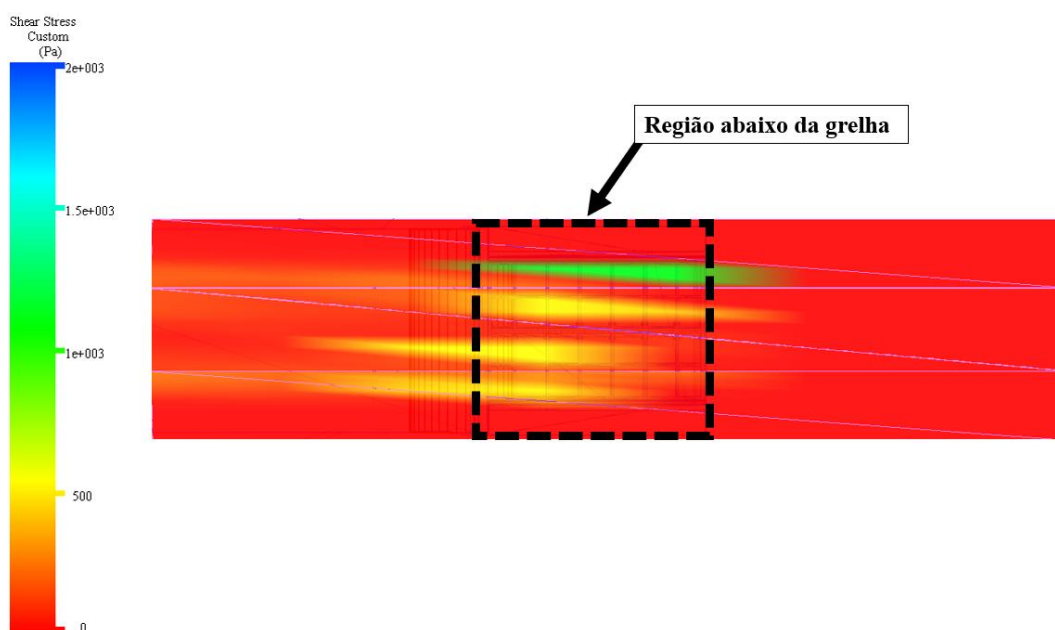
Figura 119. Esforços Cisalhantes sofridos no chute do alimentador do VV-03

Fonte: Autoria própria

As Figuras 120 e 121, apresentam os gráficos com os esforços normais e cisalhantes sofridos pela correia receptora do TR 311K-05 durante o manuseio do material, com detalhe na região central do recebimento do material.

Figura 120. Esforços Normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05

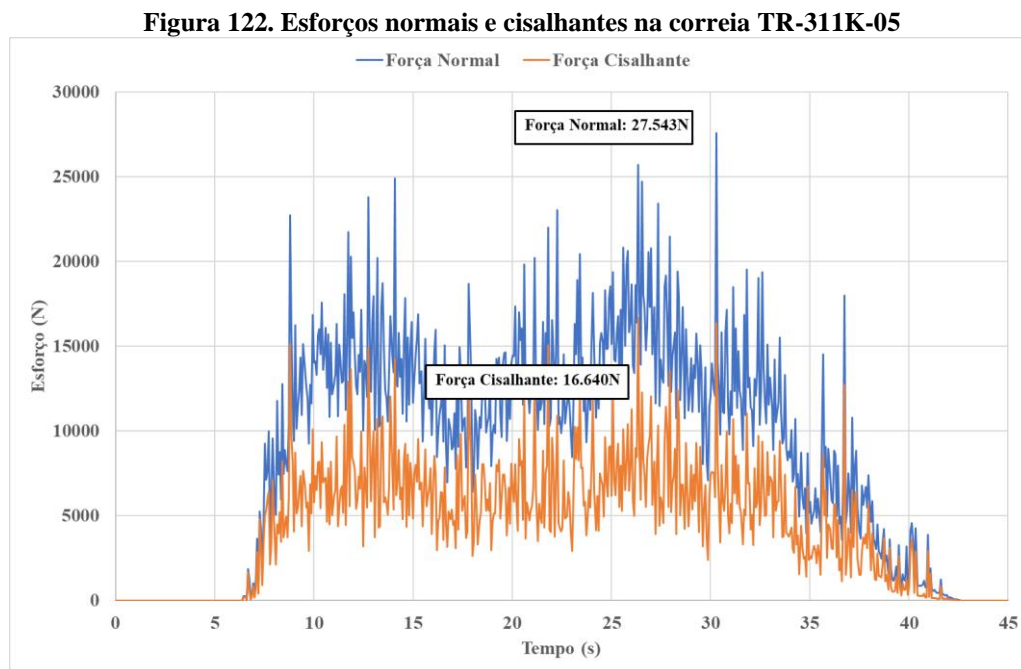
Fonte: Autoria própria

Figura 121. Esforços Cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05

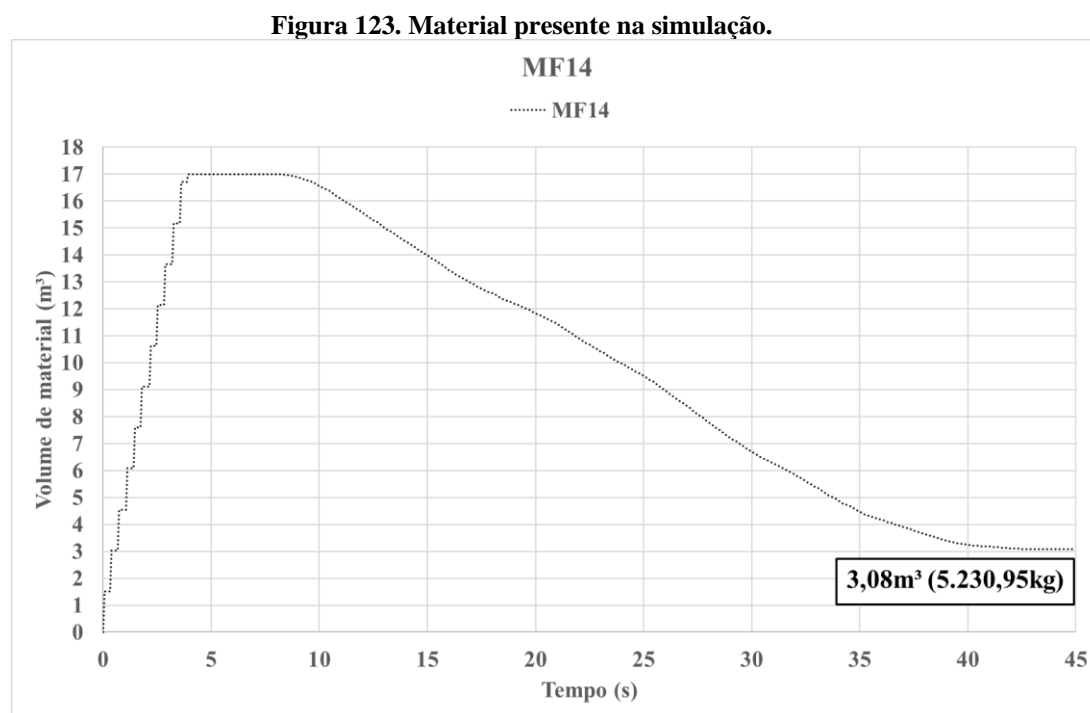
Fonte: Autoria própria

O ponto de maior esforço na correia receptora, é na região central, onde o material entra em contato direto, após uma queda livre de aproximadamente 2,0 metros do alimentador, a uma velocidade superior a 8 m/s. Toda a energia oriunda da queda livre, é descarregada a um ângulo de 90 graus na face da correia.

A Figura 122 apresenta os esforços normais e cisalhantes sofridos ao longo do tempo, pela correia receptora do TR-311K-05, sendo destacado a média desses esforços.

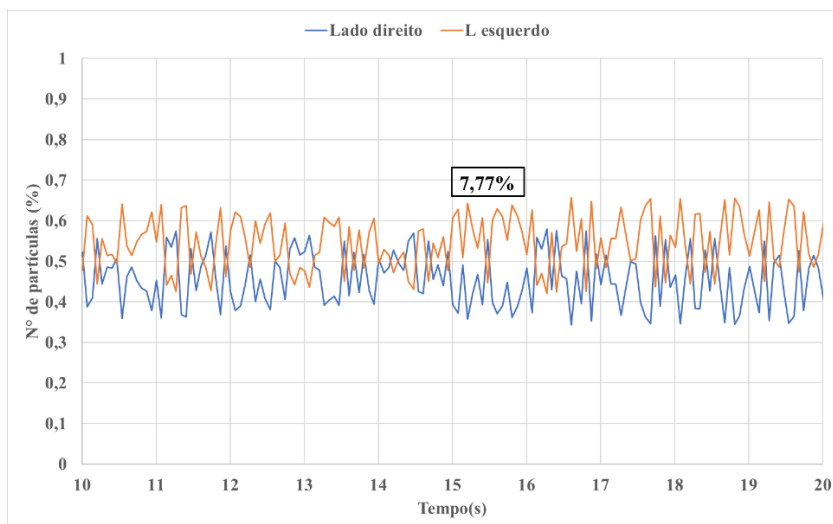


A Figura 123, apresenta a evolução do número de material na simulação ao longo do tempo, ao final, o material remanescente representa o que ficou depositado nas bancadas e grelha.



A Figura 124 apresenta o percentual médio de desalinhamento da correia receptora ao longo do tempo, durante o recebimento do material.

Figura 124. Desalinhamento da correia transportadora da lança



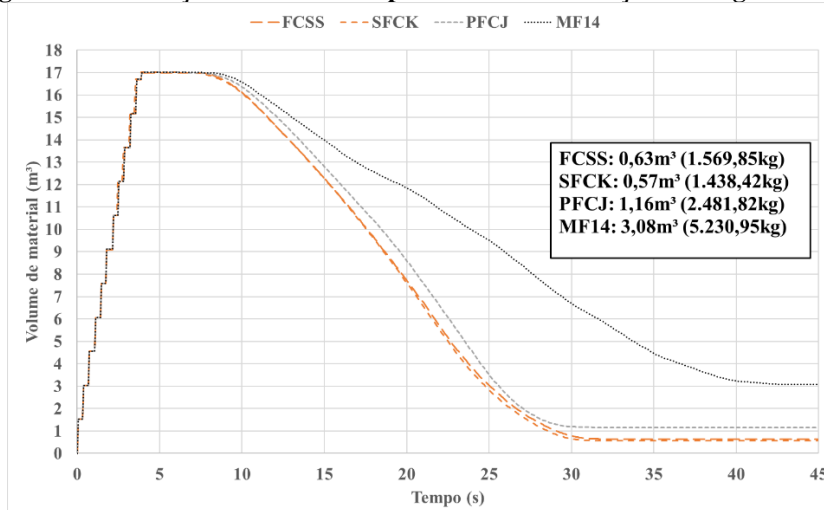
Fonte: Autoria própria

4.3.1. MATERIAL ACUMULADO

A Figura 125 apresenta o gráfico com o comparativo da evolução do número de partículas na simulação dos 4 materiais, ao longo de 45 segundos de simulação.

O resultado do comparativo aponta um maior acúmulo do material MF14, devido às suas propriedades, em segundo está o PFCJ, em função da sua menor massa específica, se comparado ao FCSS e SFCK.

Figura 125. Evolução do número de partículas na simulação ao longo do tempo



Fonte: Autoria própria

Os resultados da simulação mostraram, que dos 4 materiais estudados, o FCSS e o SFCK, apresentaram um escoamento com melhor fluidez, sem muitas restrições e com baixa tendência de entupimento. O PFCJ e principalmente o MF14, se mostraram com o escoamento com menos fluidez, com uma tendência maior de acúmulo durante o escoamento.

A área livre de passagem do material pelo centro do chute, tem uma altura aproximada 2,0 metros. Nessa região, o material passa a uma velocidade de 8,0 m/s, e cai diretamente no centro da correia.

A baixa velocidade do alimentador de sapatas, o grande volume de material transportado e a pequena diferença de altura entre o alimentador de sapatas e a grelha, contribuem para que materiais mais coesivos tenham mais dificuldades de escoar durante a transferência.

Um ponto importante na dinâmica do escoamento dos materiais, é a bancada plana, abaixo da grelha. Por ser plana, a bancada permite que o material se acumule durante a passagem pela grelha, e obstrua as regiões limitadas pelas paredes laterais do chute, e, a faixa central da emenda da grelha.

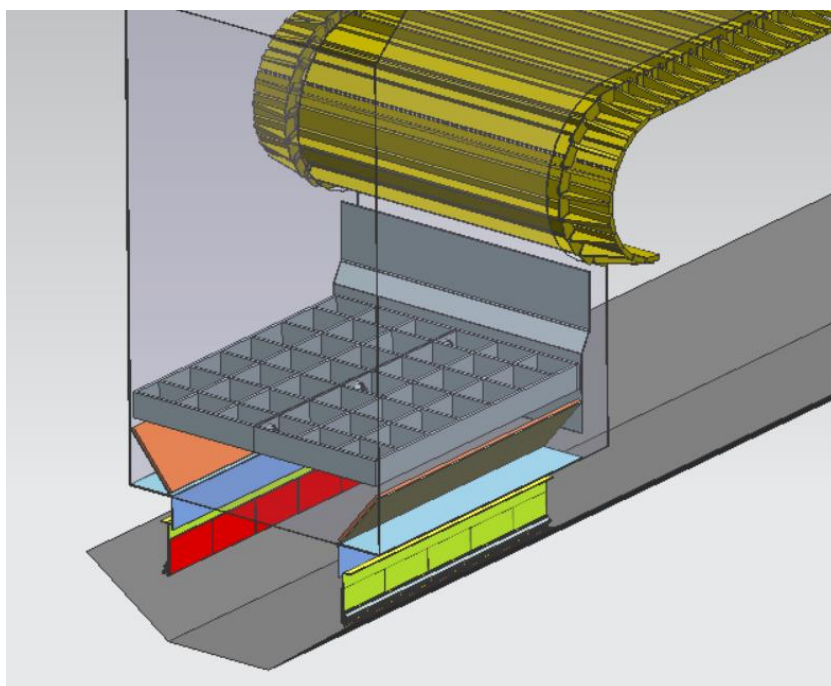
No geral, o problema que ficou mais evidente após os resultados da simulação, foi o volume de material acumulado nas bancadas, e com tendência de entupimento do chute, em específico quando manuseando o material MF14, em função de seus maiores índices de coesão, atrelado à sua umidade mais alta.

O volume de material acumulado, acaba reduzindo a área da seção do chute, e de consequência, uma quantidade menor de material, é direcionado para a correia receptora, o que acaba reduzindo a taxa de produtividade do equipamento.

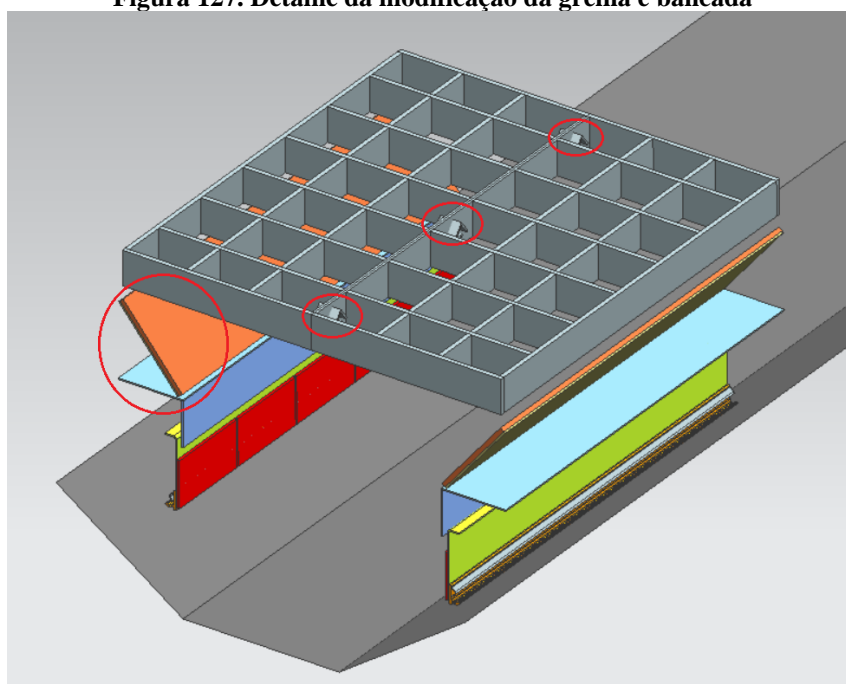
4.4. SUGESTÃO DE MELHORIA

Baseado nos resultados das simulações realizadas, foi feito um estudo como sugestão de melhoria, com o objetivo de otimizar o escoamento do material durante a transferência, e reduzir o acúmulo de material nas bancadas do chute.

A Figuras 126 e 127, mostram o conceito principal do projeto de melhoria do chute, com o detalhe da região modificada da grelha e das bancadas.

Figura 126. Modificação proposta para a grelha

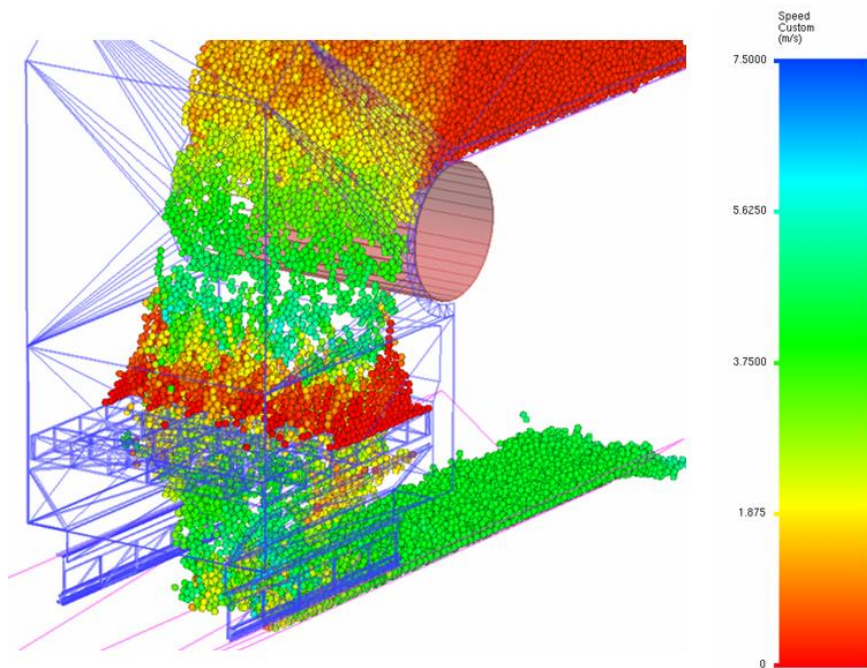
Fonte: Autoria própria

Figura 127. Detalhe da modificação da grelha e bancada

Fonte: Autoria própria

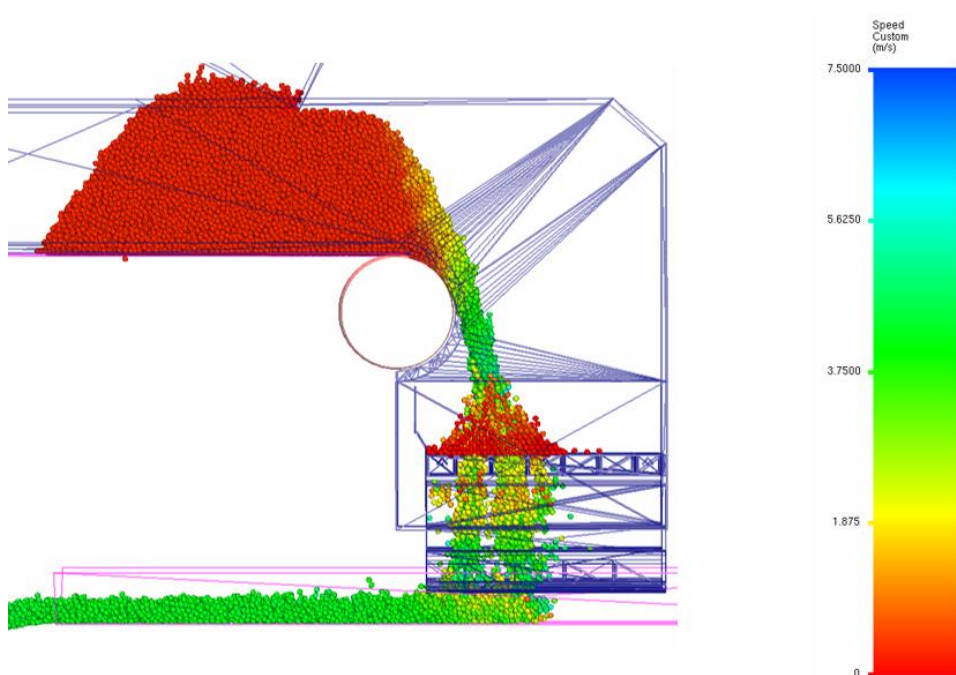
As informações das Figuras 128 a 130, são referentes aos resultados das simulações realizadas após a modificação geométrica na grelha e bancadas, utilizando o material MF14 na maior umidade como referência, em função da maior criticidade de manuseio comparado aos demais materiais manuseados no equipamento objeto do estudo.

Figura 128. Vista geral do escoamento do material no chute do alimentador

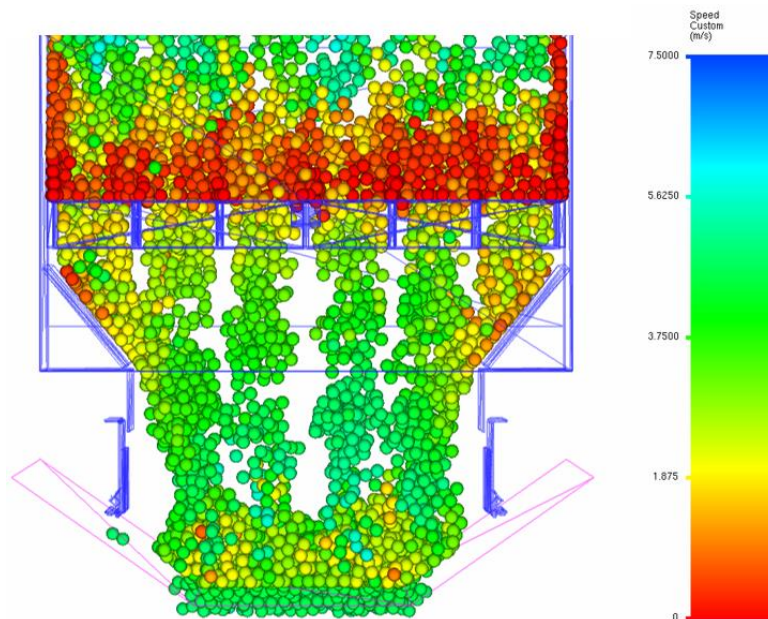


Fonte: Autoria própria

Figura 129. Vista lateral do escoamento do material no chute do alimentador

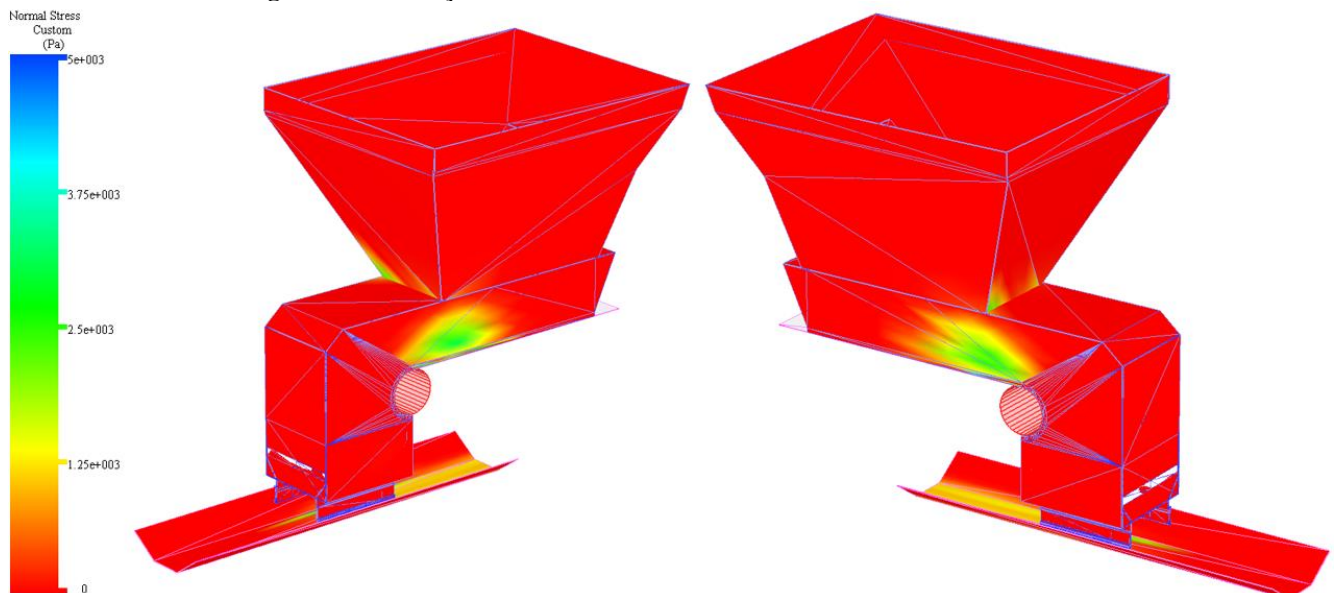


Fonte: Autoria própria

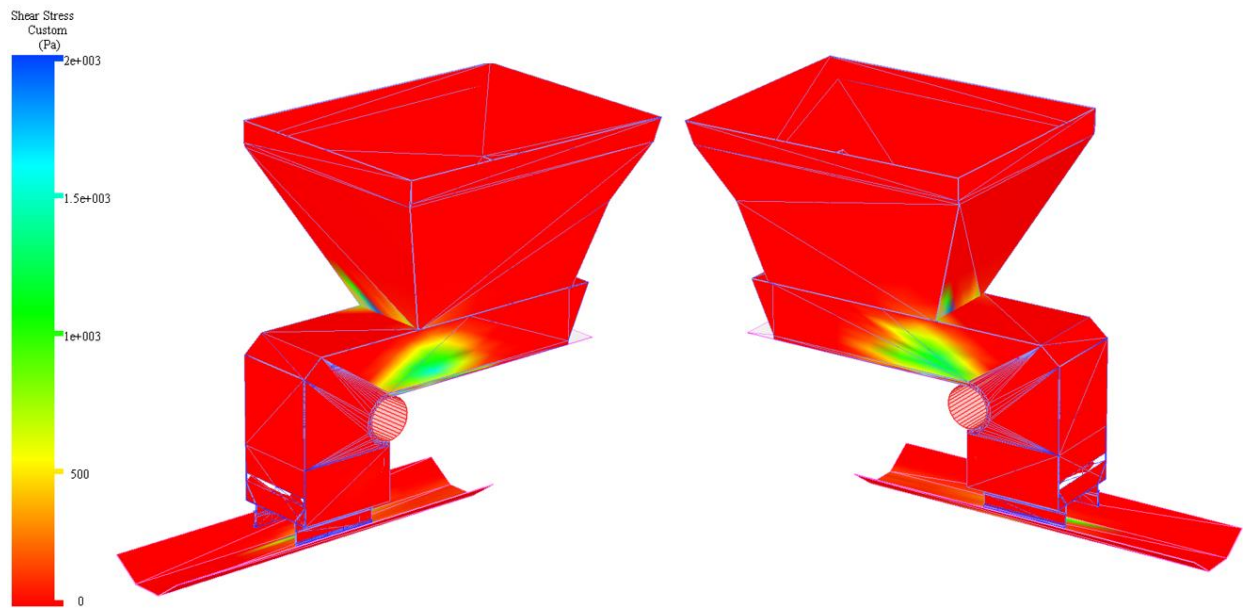
Figura 130. Vista frontal do escoamento do material na bancada

Fonte: Autoria própria

As Figuras 131 e 132 apresentam as regiões que sofrem esforços normais e cisalhantes na estrutura do conjunto do chute, em função do contato e acúmulo de material.

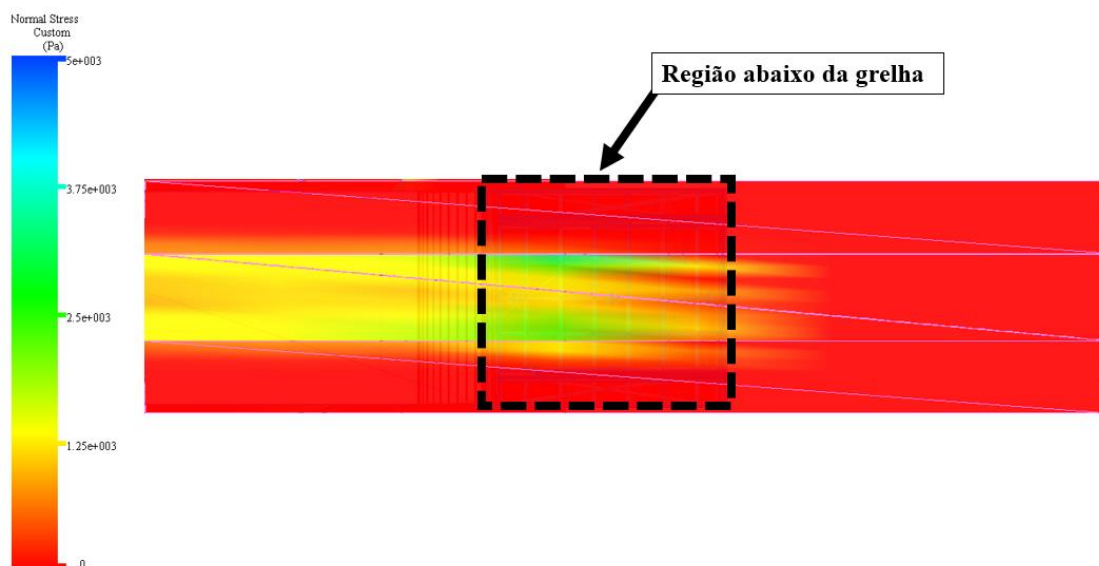
Figura 131. Esforços Normais no chute do alimentador do VV-03

Fonte: Autoria própria

Figura 132. Esforços Cisalhantes no chute do alimentador do VV-03

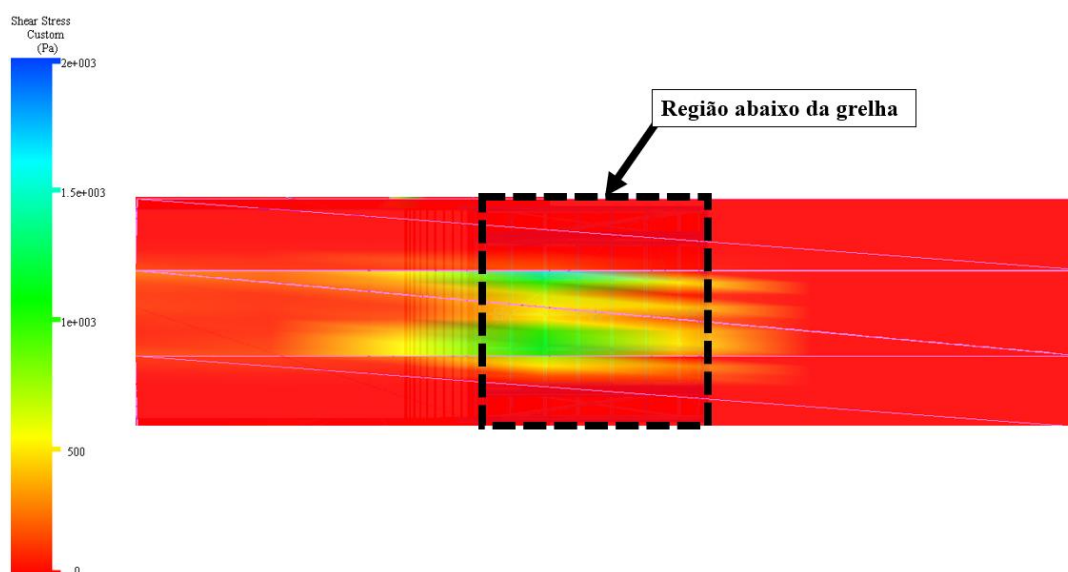
Fonte: Autoria própria

As Figuras 133 e 134 representam os esforços normal e cisalhante na correia receptora do TR 311K-05

Figura 133. Esforços normais sofridos na correia receptora do TR 311K-05

Fonte: Autoria própria

Figura 134. Esforços cisalhantes sofridos na correia receptora do TR 311K-05

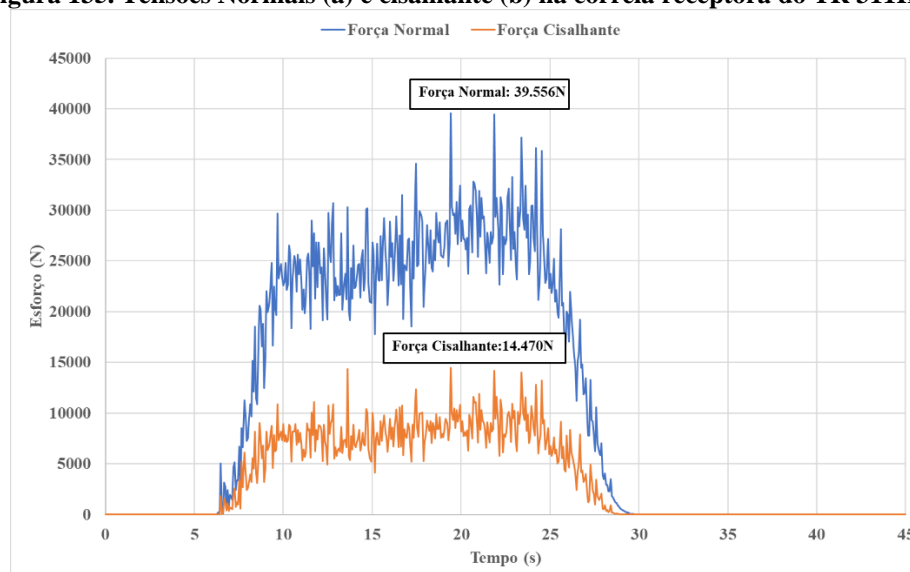


Fonte: Autoria própria

A Figura 135, mostra o gráfico com a variação ao longo do tempo, dos esforços normal e cisalhante na correia receptora do TR 311K-05, destacando os máximos valores. Por não haver mais obstrução na passagem de material, houve um maior carregamento na correia ao longo do tempo, aumentando a carga normal sobre ela em relação a condição de projeto. O aumento de material na região abaixo da grelha possibilitou que os materiais subsequentes não tivessem contato direto com a correia a todo tempo, reduzindo os esforços cisalhantes.

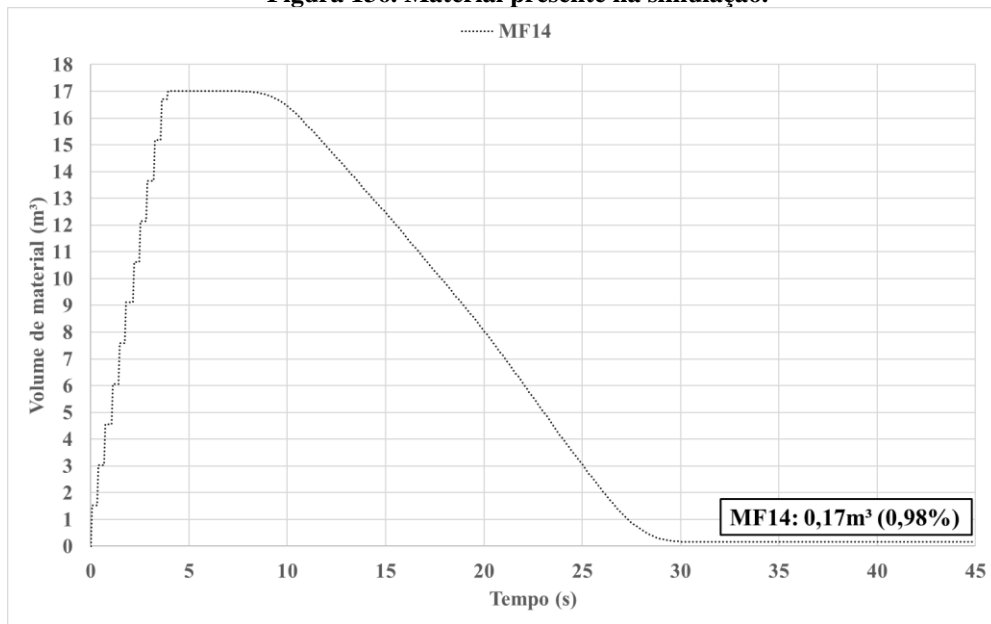
A Figura 136, apresenta a quantidade de partículas presente na simulação ao longo do tempo, destacando a quantidade de partículas presente nas bancadas ao final da simulação.

Figura 135. Tensões Normais (a) e cisalhante (b) na correia receptora do TR 311K-05



Fonte: Autoria própria

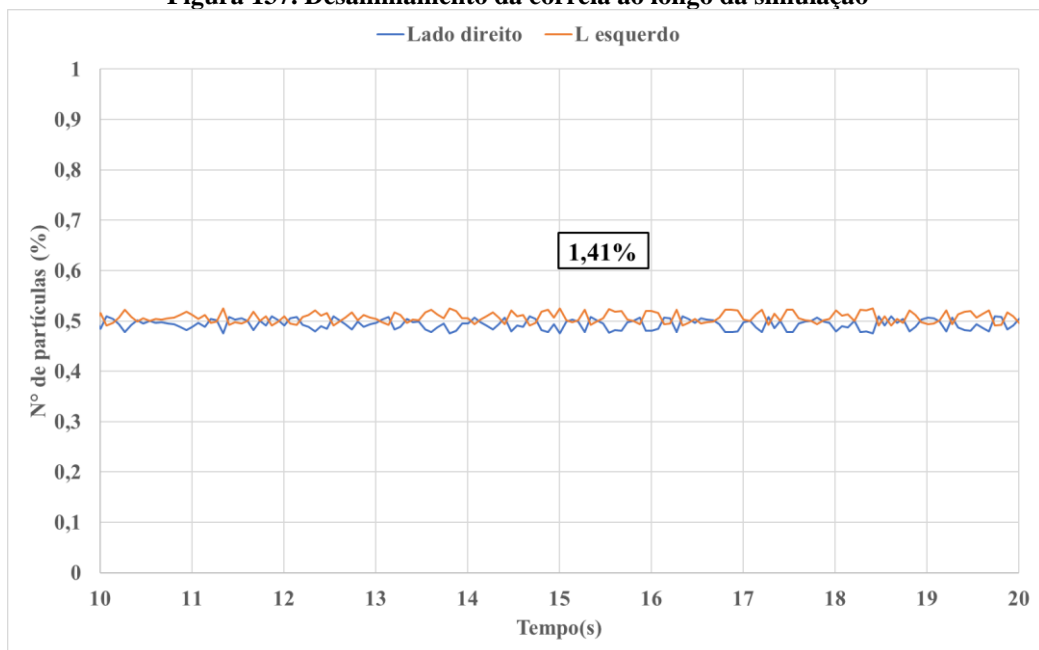
Figura 136. Material presente na simulação.



Fonte: Autoria própria

A Figura 137 mostra o gráfico com o grau de desalinhamento da correia receptora do TR 311K-05

Figura 137. Desalinhamento da correia ao longo da simulação

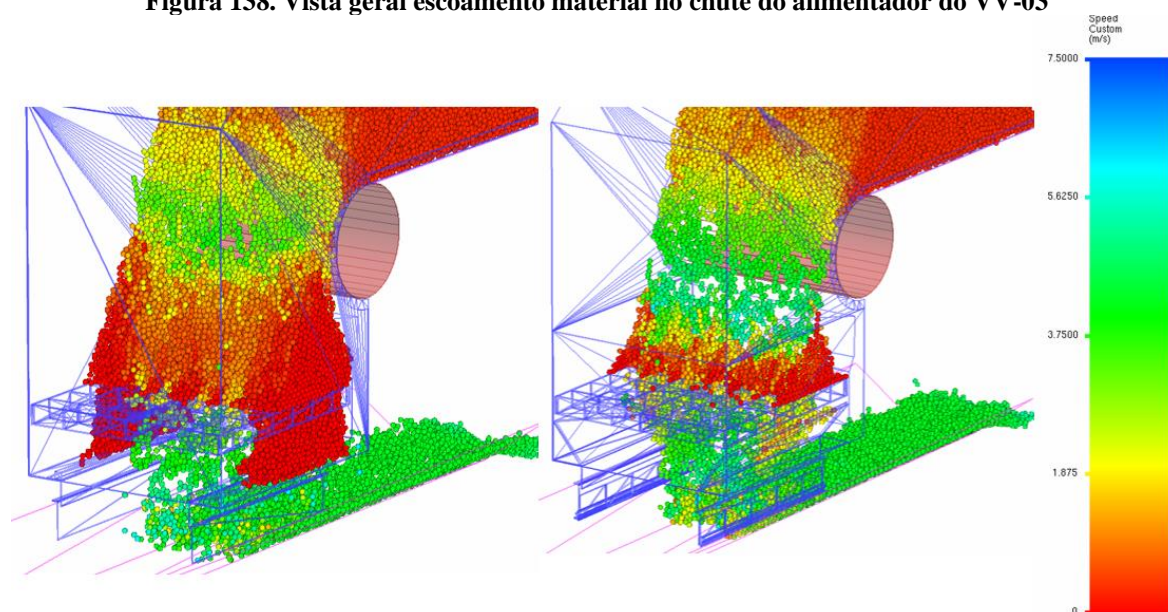


Fonte: Autoria própria

4.4.1. COMPARATIVO DO ESCOAMENTO ENTRE AS SOLUÇÕES

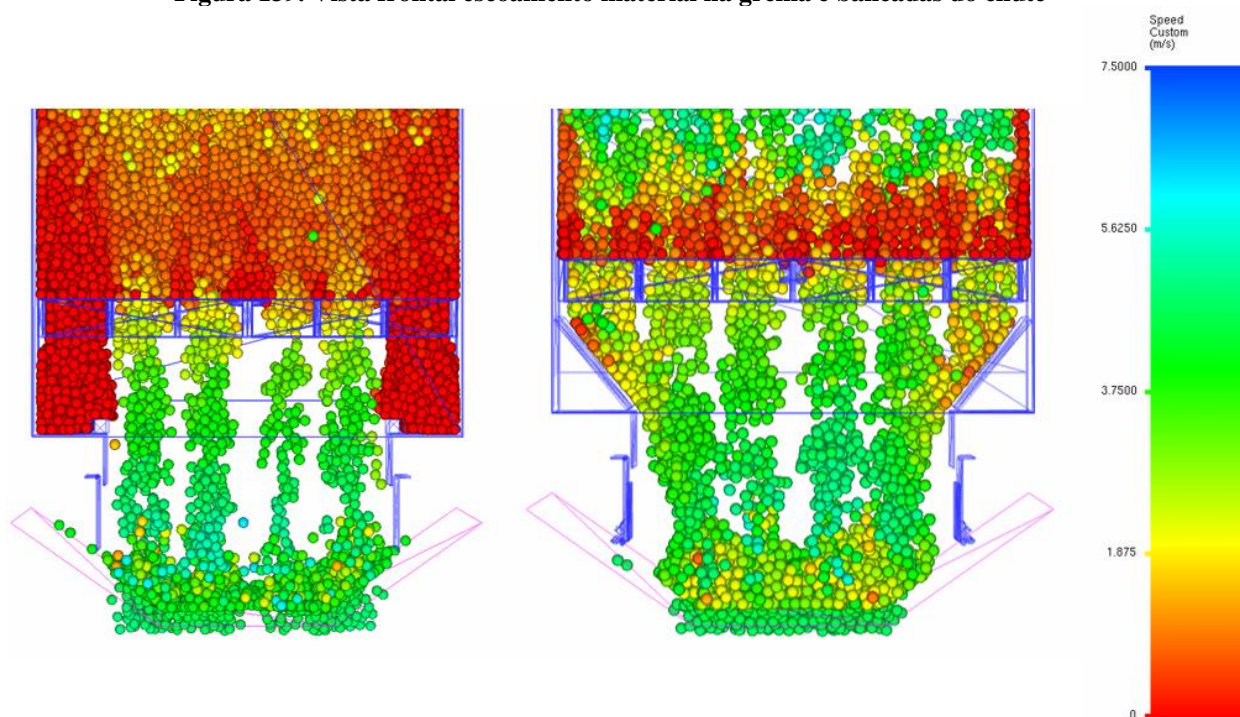
As Figuras 138 e 139, apresentam o comparativo das simulações de escoamento entre a solução atual e a sugestão de melhoria, utilizando como referência o material MF14, por ser o de maior dificuldade de manuseio.

Figura 138. Vista geral escoamento material no chute do alimentador do VV-03



Fonte: Autoria própria

Figura 139. Vista frontal do escoamento de material na grelha e bancadas do chute



Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo do escoamento dentro de um chute de virador de vagão que recebe 4 tipos de materiais, FCSS, SFCK, PFCJ e MF14.

Para cada material, foram selecionados três tipos de umidade, sendo as umidades que mais dificultam o escoamento sendo escolhidas para esse projeto. As umidades que proporcionavam uma piora no escoamento para todos os casos foram as umidades máximas, podendo ser observados nos ensaios de caracterização.

As simulações da condição atual demonstraram que ao receber o MF14 e o PFCJ, existe a possibilidade de o chute entupir na região da grelha e um pouco abaixo dela, o que instigou uma investigação de proposta de modificação.

Como proposta de modificação, foram sugeridos a redução da área de contato na parte central do chute e a eliminação da caixa de pedra nas regiões abaixo da grelha, substituindo por placas defletoras inclinadas.

A simulação da proposta de modificação, mostrou uma grande melhora no escoamento do material. A inclinação das placas defletoras em 50 graus, permitiu a redução total do acúmulo de material nessa região.

O volume de material parado dentro do chute, na região da grelha e bancada, reduziu consideravelmente após a modificação. Os resultados são mais evidentes, quando o material MF14 está sendo manuseado, devido à sua massa específica e maior índice de coesão.

A substituição da caixa de pedra por placas defletoras inclinadas proporcionou uma redução no percentual de desalinhamento da correia durante o recebimento, em função do maior direcionamento para o centro da correia durante o escoamento.

Um maior volume de material é recebido pela correia durante a transferência. Notou-se um pequeno aumento no percentual do esforço normal na correia, com esse maior volume de material sendo transferido. Por outro lado, a força cisalhante reduziu um pouco, o que se traduz em uma redução no desgaste da correia transportadora.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

Diante da avaliação das condições de escoamento, identifica-se um potencial área de pesquisa voltada para a análise estrutural da proposta de modificação. O objetivo seria investigar possíveis impactos no sistema estrutural decorrentes do escoamento de materiais. Além disso, um aspecto crucial é a elaboração de um projeto executivo abrangente para a implementação da referida modificação em campo.

REFERÊNCIAS

LEYVA, Carlos; DESSAUNE, Marcio. Projeto de pontos de transferência de minérios: influência da geometria e das propriedades do material. 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 23 a 27 de julho, 2007, Vitória – ES.

GONÇALVES, A. et al. Estudo de caracterização mineralógica de minérios de ferro itabiríticos por difração de raios X. REM: Revista Escola de Minas, v. 73, n. 4, p. 349-354, 2020.

ROCHA, E. T. et al. Mineração a céu aberto: planejamento e operação. In: Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2017.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios - Volume 5: Manuseio de Sólidos Granulados. 1. ed. São Paulo: Signus, 2011.

COETZEE, C.J.; ELS, D. N. Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade–granular material interaction. Journal of Terramechanics, v. 46: p.15–26, 2009.

JOHNSON, K.L. (1985). Contact Mechanics Cambridge University Press.

MARTIN ENGINEERING. Tecnologias avançadas para transportadores: sistemas de transferências de MARTIN® INERCIAL FLOW™ e sistemas de transportadores MARTIN® S-CLASS™, 2005.

COETZEE, C. J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. Powder Technology, v. 297, p. 50-70, 2016.

MAEGAWA, S.; ITOIGAWA, F.; NAKAMURA, T. Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane. Tribology International, v. 92, p. 335-343, 2015.

ZHU, H. P.; ZHOU, Z. Y.; YANG, R. Y.; YU, A. B. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. *Chemical Engineering Science*, v. 63, n. 23, p. 5728-5770, 2008.

ZHU, H. P.; YU, A. B. A theoretical analysis of the force models in discrete element method. *Powder Technology*, v. 161, n. 2, p. 122-129, 2006.

CASTRO, L. B. *et al.* Avaliação do desempenho de chutes de transferência em correias transportadoras. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, e12656, 2020.

CLEARY, P. W. DEM prediction of industrial and geophysical particle flows", *Particuology*, v.8, pp. 106-118, 2010.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979.

MACIAS, P; ROCHA, D. **Projeto de transportadores de correia e chutes de transferência através de pacotes computacionais**. Belém: 2012, 131f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

PINTO, L. F. R. *et al.* Influência do teor de umidade no comportamento mecânico do concreto com agregados reciclados. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 19., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: ENTAC, 2019.

SWINDERMAN, R; MARTI, A; GOLDBECK, L; MARSHALL, D. **Foundations™: Guia Prático para um Controle mais Limpo, Seguro e Produtivo de Pó e Material a Granel**, 4ª ed.. Martin Engineering, Ltda: Neponset, Illinois, 2012.

TAVARES, L.M. *et al.* A comparative study of different strategies for chute blockage detection in a mineral processing plant. **Minerals Engineering**, v. 169, p. 106831, 2021.

SANTOS, E. R. **Análise de desempenho de bota de alimentação em transportador de correia.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

CORNACCHIA, L.; GOMES, L. A. V.; BORGES, G. R.; MARZAN, A. J. Determination of bulk density of granular materials: a comparative study of four methods. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1573, n. 1, p. 012070, 2020.

Carr, M. J., W. Chen, K. Williams, and A. Katterfeld. “Comparative investigation on modelling wet and sticky material behaviours with a simplified JKR cohesion model and liquid bridging cohesion model in DEM,” ICBMH 2016 - 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Proceedings, pages 40–49, 2016.

Hærvig, J., U. Kleinhans, C. Wieland, H. Spliethoff, A. L. Jensen, K. Sørensen, and T. J. Condra. “On the adhesive JKR contact and rolling models for reduced particle stiffness discrete element simulations,” Powder Technology, 319:472–482, 2017. ISSN 1873328X.

Morrissey, J. P. “Discrete Element Modelling of Iron Ore Pellets to Include the Effects of Moisture and Fines,” PhD thesis, Edinburgh, Scotland: University of Edinburgh (2013).

Xia, R., B. Li, X. Wang, T. Li, and Z. Yang. “Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal,” Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 142:84–95, 2019.

VALE. **Informações Internas.**

ANEXO A – Vídeos das simulações

Abaixo, seguem os links com os vídeos referentes às simulações do escoamento de cada um dos 4 materiais, durante a transferência no chute do alimentador do virador de vagão VV-03.

Simulação – Condição de projeto/operação

FCSS:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

SFCK:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

PFCJ:

- [Vista3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

MF14:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

Simulação – Condição de melhoria/operação

FCSS:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

SFCK:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

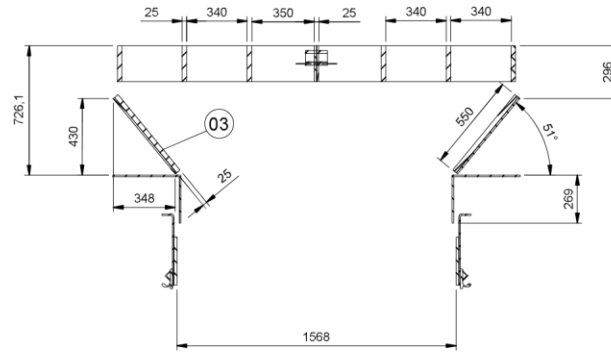
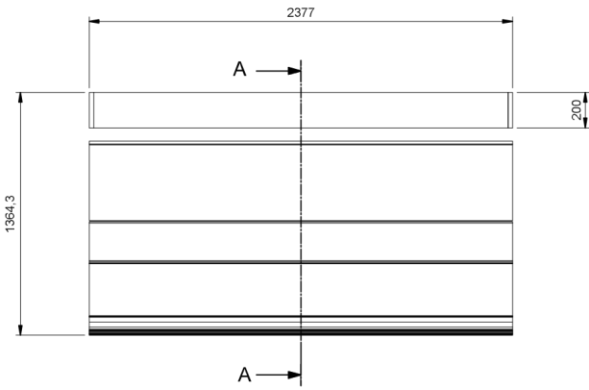
PFCJ:

- [Vista3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

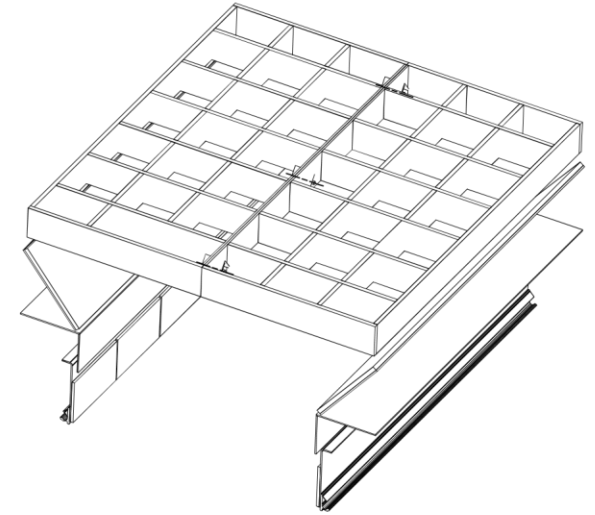
MF14:

- [Vista 3D;](#)
- [Vista Frontal da correia;](#)
- [Vista de perspectiva da grelha;](#)

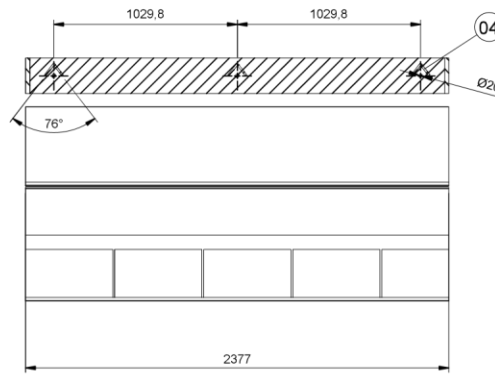
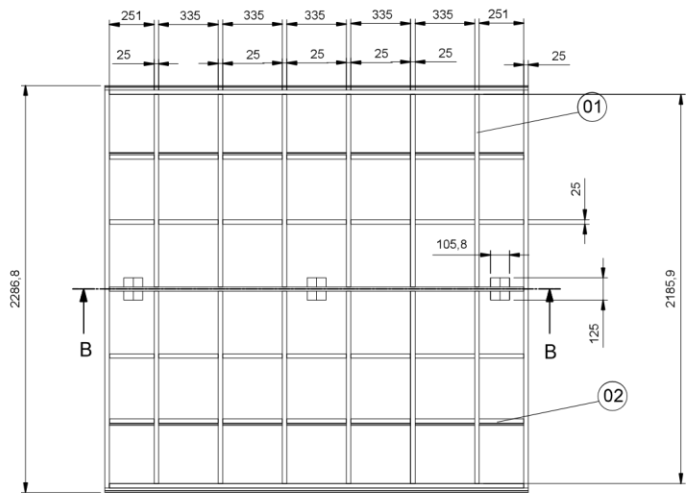
ANEXO B – Desenho básico da modificação



CORTE A-A



VISTA ISOMETRICA



CORTE B-B