

ENVOLTÓRIA DE FLUXO DE MASSA PARA MINÉRIO DE FERRO EM TREMONHAS PIRAMIDAIS INDUSTRIAIS: INFLUÊNCIA DA UMIDADE, DO TEMPO DE CONSOLIDAÇÃO E DO REVESTIMENTO DAS PAREDES

Joseph Oliveira Silva (Universidade Federal de Minas Gerais) E-mail: josephengmec@gmail.com

Roberto Galery (Universidade Federal de Minas Gerais) E-mail: rgallery@demin.ufmg.br

Carlito Calil Junior (Universidade de São Paulo) E-mail: calil@sc.usp.br

Resumo: Tremonhas piramidais para minério de ferro apresentam elevado índice de obstruções, atribuídas ao desconhecimento do comportamento do produto armazenado e à ausência de critérios objetivos de projeto de fluxo. Este trabalho propõe e aplica um procedimento paramétrico que converte propriedades de fluxo medidas em célula de cisalhamento de Jenike em uma envoltória de fluxo de massa: a curva do ângulo máximo admissível de parede em função da abertura de saída, dentro da qual o escoamento em fluxo de massa é previsto sem obstrução por arco coesivo. O procedimento foi implementado em modelo numérico e aplicado a três amostras industriais de minério de ferro, com teores de umidade entre 0,99% e 15%, tempos de consolidação de 0, 24 e 72 horas e quatro materiais de revestimento. As envoltórias foram confrontadas com a geometria de duas tremonhas piramidais retangulares em série de um sistema de carregamento de vagões. A elevação da umidade de 0,99% para 11% aumentou a abertura crítica de 0,38 m para 0,66 m, acréscimo de 74%; a substituição do revestimento UHMW pelo HARDOX 600 reduziu o ângulo máximo admissível de 40,0° para 21,8° em abertura de 1,0 m; e a amostra com maior proporção de goethita foi a única a exigir aberturas maiores após 72 horas de consolidação. A envoltória permitiu reprovar geometrias e condições operacionais previamente consideradas adequadas, constituindo uma ferramenta objetiva de decisão em projeto de tremonhas para produtos coesivos.

Palavras-chave: Tremonhas piramidais; Fluxo de massa; Propriedades de fluxo; Minério de ferro; Produtos a granel.

MASS FLOW ENVELOPE FOR IRON ORE IN INDUSTRIAL PYRAMIDAL HOPPERS: INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT, CONSOLIDATION TIME AND WALL LINER

Abstract: Pyramidal hoppers for iron ore show a high rate of flow stoppages, attributed to poor knowledge of the stored bulk behavior and to the absence of objective flow design criteria. This work proposes and applies a parametric procedure that converts flow properties measured in a Jenike shear cell into a mass flow envelope: the curve of the maximum admissible wall angle as a function of the outlet dimension, within which mass flow is predicted without cohesive arching. The procedure was implemented in a numerical model and applied to three industrial iron ore samples, with moisture contents between 0.99% and 15%, consolidation times of 0, 24 and 72 hours and four wall liner materials. The envelopes were compared with the geometry of two rectangular pyramidal hoppers in series from a train load out system. Raising the moisture content from 0.99% to 11% increased the critical outlet from 0.38 m to 0.66 m, a 74% increase; replacing the UHMW liner by HARDOX 600 reduced the maximum admissible wall angle from 40.0° to 21.8° at a 1.0 m outlet; and the sample with the highest goethite content was the only one requiring larger outlets after 72 hours of consolidation. The envelope allowed rejecting geometries and operating conditions previously regarded as adequate, providing an objective decision tool in hopper design for cohesive bulk solids.

Keywords: Pyramidal hoppers; Mass flow; Flow properties; Iron ore; Bulk solids.

1. Introdução

Como principal matéria-prima do aço, o minério de ferro teve sua demanda ampliada de forma contínua desde os anos 2000, o que impôs significativa expansão da infraestrutura de produção e de logística (LU, 2022). Nesse cenário, o correto manuseio e transporte do produto tornou-se determinante para o desempenho produtivo. O carregamento de vagões é um exemplo emblemático: executado por pá carregadeira, caminhões ou descarga direta de transportadores de correia, o processo é ineficiente quanto ao tempo de operação, à precisão do carregamento e à continuidade da alimentação. O sistema de carregamento por silos e tremonhas, conhecido como Train Load Out (TLO), corrige essas deficiências ao permitir carregamento constante e preciso, no qual os componentes atuam como pulmões do sistema (DUARTE, 2021).

As tremonhas para minério de ferro apresentam elevado índice de obstruções e deformações, causadas sobretudo pelo desconhecimento do comportamento do produto armazenado, por geometrias inadequadas e pela ausência de base técnica para o projeto de fluxo. São ainda poucos os trabalhos que tratam do fluxo induzido por esse produto, de densidade aparente elevada, composição química variada e alta abrasividade. Segundo Roberts (1994), o projeto de tremonhas segue quatro passos: determinação das propriedades de fluxo para as condições mais severas esperadas; definição da geometria que forneça a capacidade e o padrão de fluxo desejados; estimativa das cargas nas paredes; e detalhamento estrutural. Este trabalho concentra-se nos dois primeiros.

O ponto crítico da prática de projeto é que o roteiro clássico de Jenike (1964) fornece, para cada condição de consolidação, um único par formado pelo ângulo limite de parede e pela abertura crítica. O projetista, contudo, raramente dispõe de liberdade para escolher ambos: a abertura é frequentemente imposta pelo equipamento instalado sob a tremonha e o ângulo de parede é restringido pelo espaço disponível. Roberts (2005) já havia observado que, por razões práticas, a abertura precisa ser maior que a mínima calculada. Ainda não está disponível é o uso do critério de aceitação de geometrias já definidas, estendido a tremonhas piramidais e organizado em famílias de curvas que incorporem, simultaneamente, o teor de umidade, o tempo de consolidação e o material de revestimento a que o componente estará sujeito.

O objetivo deste artigo é desenvolver e aplicar um procedimento paramétrico que converte as propriedades de fluxo medidas em ensaio de cisalhamento direto em uma envoltória de fluxo de massa, isto é, a curva do ângulo máximo da tremonha em função da abertura de saída, e demonstrar seu uso como critério objetivo de aceitação de geometrias em tremonhas piramidais industriais. São analisadas três amostras industriais de minério de ferro, tempos de consolidação de 0, 24 e 72 horas e quatro materiais de revestimento. O trabalho restringe-se ao domínio do fluxo, não abrangendo o cálculo das cargas nas paredes, que constitui corpo teórico próprio.

2. Fundamentação teórica

2.1 Propriedades de fluxo do produto armazenado

Os produtos a granel diferem dos líquidos por transferirem tensões de cisalhamento entre grãos e nas paredes sob condições estáticas e por manterem a forma quando consolidados. Como é impraticável prever o comportamento do coletivo a partir de uma única partícula, o produto é tratado como substância própria e os ensaios de caracterização fornecem as chamadas propriedades de fluxo (McGLINCHEY, 2005), usualmente determinadas em aparelho de cisalhamento de translação (CALIL JUNIOR

& CHEUNG, 2007). Submetida a uma tensão de consolidação σ_1 e posteriormente aliviada, uma amostra confinada falha sob determinada tensão de compressão, denominada resistência coesiva σ_c (SCHULZE, 2021). No diagrama de tensão de cisalhamento τ versus tensão normal σ , a reta que passa pela origem e tangencia o maior círculo de Mohr define o efetivo ângulo de atrito interno δ (SCHWEDES, 2002), e a linearização do envoltório real de resistência define o critério de ruptura ao deslizamento, ou Yield Locus, cujo intercepto é a coesão c (CHEUNG, 2007).

A fluidez é medida pela função fluxo FF, relação entre a tensão de consolidação e a resistência coesiva obtidas do Yield Locus (ROBERTS, 2005), conforme a Equação 1.

$$FF = \sigma_1 / \sigma_c \quad (1)$$

Vários pares (σ_1 , σ_c) definem a curva FF, e Jenike (1964) propõe faixas para uma classificação rápida da fluidez: $FF < 2$ para produtos muito coesivos, $2 \leq FF < 4$ para coesivos, $4 \leq FF < 10$ para produtos que fluem facilmente e $FF \geq 10$ para fluxo livre. O produto transfere tensões de cisalhamento também para as paredes; o ângulo de atrito com a parede ϕ_w é obtido submetendo-se o produto a diferentes níveis de tensão normal σ_w sobre uma amostra do material da parede e medindo-se a tensão de cisalhamento τ_w necessária ao deslizamento (CHEUNG, 2007), conforme a Equação 2.

$$\phi_w = \arctg (\tau_w / \sigma_w) \quad (2)$$

A densidade aparente ρ_b , razão entre a massa do produto e o seu volume incluindo os vazios entre partículas, cresce com o grau de consolidação (SCHULZE, 2021) e influencia diretamente o dimensionamento da abertura (CALIL JUNIOR & CHEUNG, 2007). Sobre o comportamento de fluxo atuam ainda o ângulo de repouso (GELDART et al., 2006), o teor de umidade, cujas pontes líquidas aumentam a resistência coesiva (SCHULZE, 2021; CHEN & ROBERTS, 2017), a granulometria e a proporção de finos (ROBERTS, 1991) e o tempo de consolidação, descrito pelo Time Yield Locus (ROBERTS, 2005). No minério de ferro, diferentes composições mineralógicas exibem comportamentos de fluxo distintos (WANG, 2015) e a resistência coesiva depende sobretudo da fração de finos (KRULL et al., 2014); somam-se a elevada densidade aparente (CEMA, 2003) e a abrasividade, que condicionam a escolha do revestimento das paredes (MOHAJERI et al., 2020)..

2.2 Projeto de tremonhas para fluxo de massa

No fluxo de massa todas as partículas estão em movimento durante a descarga, garantindo descarga completa e vazão previsível; no fluxo de funil, que ocorre quando a inclinação e o acabamento das paredes são insuficientes, forma-se canal central de fluxo e zonas estagnadas (ROBERTS, 2005; CALIL JUNIOR & CHEUNG, 2007). A partir dos campos de tensões radiais, Jenike (1961) definiu os limites entre os dois padrões em função do ângulo de inclinação da parede α , do efetivo ângulo de atrito interno δ e do ângulo de atrito com a parede ϕ_w . Neste trabalho, como na referência citada e nos relatórios de ensaio utilizados, todos os ângulos de parede são medidos a partir da vertical: $\alpha = 0^\circ$ corresponde a uma parede vertical e valores crescentes indicam paredes progressivamente mais rasas, de modo que o fluxo de massa é garantido abaixo da envoltória. Para tremonhas piramidais, o ângulo a ser avaliado é o ângulo de vale α_v (GAYLORD JUNIOR & GAYLORD, 1984), obtido a partir das inclinações das duas paredes adjacentes, α_1 e α_2 , pela Equação 3.

$$\alpha_v = \arctg [(tg^2\alpha_1 + tg^2\alpha_2)^{0,5}] \quad (3)$$

Uma obstrução forma-se quando o produto adquire resistência suficiente para suportar o próprio peso. A abertura deve prevenir o arco mecânico, formado pelo travamento de poucas partículas, para o que Haaker (1999) sugere dimensão de 5 a 7 vezes o maior diâmetro de partícula. O arco coesivo decorre da resistência coesiva sob a tensão de consolidação: a tensão principal que atua no arco, σ'_1 , é proporcional à dimensão B, e a abertura crítica B_{cr} é dada pela condição $\sigma'_1 = \sigma_c$ (ROBERTS, 2005). A teoria do campo de tensões radiais de Jenike (1964) fornece o fator fluxo da tremonha ff , conforme a Equação 4: quanto menor ff , melhor o fluxo.

$$ff = \sigma_1 / \sigma'_1 \quad (4)$$

As resoluções de Jenike (1964) foram publicadas como gráficos de fator fluxo, um para cada valor de δ ; formulações analíticas alternativas foram propostas por Walker (1966), Enstad (1975) e Arnold e McLean (1976), e Moore e Arnold (1985) e Roberts (2005) desenvolveram apresentações gráficas que eliminam interpolações imprecisas. A abertura crítica ocorre na interseção entre a função fluxo e o fator fluxo, condição designada critério de fluxo e não fluxo, e é dada pela Equação 5, na qual $H(\alpha)$ é o parâmetro relativo à espessura do arco e g a aceleração da gravidade.

$$B_{cr} = H(\alpha) \cdot \sigma'_1 / (\rho_b \cdot g) \quad (5)$$

B_{cr} é a abertura na qual o arco coesivo está na iminência de se formar, e não pode ser considerada a dimensão de projeto. Calil Junior e Cheung (2007) registram que, por se tratar de um valor crítico, na prática a abertura adotada é sempre aumentada em 25% a 30%. Roberts (2005) faz recomendação de mesmo sentido, afirmando que a abertura efetivamente adotada será normalmente maior que o valor mínimo, tanto para que a vazão requerida seja obtida quanto para assegurar que o arco estável não se forme.

A razão para não projetar sobre a abertura crítica é a representatividade da amostra. Cada material foi amostrado uma única vez, em um ponto e em um momento determinados da operação, e a abertura crítica dele derivada descreve exatamente aquela condição. Variações de umidade, de distribuição granulométrica e de composição mineralógica estão representadas em uma amostra única e, sem repetições, não há base experimental para quantificar essa dispersão. Adota-se por isso o limite superior da faixa indicada por Calil Junior e Cheung (2007), o acréscimo de 30% sobre B_{cr} , e a abertura assim obtida é denominada abertura recomendada: a margem mais ampla é o meio de assegurar o escoamento sem deixar o projeto dependente de uma abertura crítica pontual. Para produtos coesivos, recomendam-se ainda chanfros e arredondamentos de arestas e vales em tremonhas piramidais e tipo cunha (GAYLORD JUNIOR & GAYLORD, 1984; ROBERTS, 2005).

3. Materiais e métodos

3.1 Amostras e materiais de revestimento

Foram utilizadas três amostras industriais de minério de ferro, designadas IO-A, IO-B e IO-C, cujas características estão reunidas na Tabela 1. As amostras IO-B e IO-C provêm de produtos distintos de uma mesma operação, com composições mineralógicas contrastantes: predominantemente hematítica na primeira e predominantemente goethítica na segunda. Os ensaios de fluxo foram realizados sobre a fração passante em 6,3 mm de cada amostra, procedimento usual para acomodar a amostra na célula de cisalhamento; as demais caracterizações foram feitas sobre o material integral.

Tabela 1 – Características das amostras de minério de ferro e revestimentos ensaiados

Característica	IO-A	IO-B	IO-C
Teores de umidade ensaiados (% base úmida)	0,99; 3,9; 6,9; 8,9; 11	11; 13; 15	10; 11; 12
Tempos de consolidação (h)	0 e 24	0 e 72	0 e 72
Densidade da partícula (kg/m ³): deslocamento de líquido / picnometria a hélio	5246 / –	4581 / 4425	3711 / 5040
Goethita / hematita (%)	–	18 / 82	61 / 39
Tamanho máximo (mm)	0,3	50	33
D_{50} (mm)	0,062	0,43	3,4
Passante em 0,075 mm (%)	–	14	1,3
Ângulo de repouso (°)	–	35 – 53	30 – 36
Revestimentos ensaiados	UHMW; HARDOX 600	HARDOX 500; CDP 4666	HARDOX 500; CDP 4666

Fonte: Elaborado pelos autores.

A distribuição granulométrica de IO-B e IO-C foi determinada por peneiramento a seco, em agitador de peneiras, com cinco minutos de vibração e secagem prévia ao ar. A amostra IO-A, de granulometria muito mais fina, teve sua distribuição determinada por difração a laser, resultando em D_{10} de 25 μm , D_{50} de 62 μm e D_{90} de 134 μm à pressão de dispersão de 0,5 bar. Os dois métodos medem grandezas distintas, pois o peneiramento fornece dimensão de abertura de malha e a difração a laser um diâmetro equivalente esférico, e foram empregados por serem os adequados a cada faixa de tamanho. Por essa razão, as distribuições de IO-A e das demais amostras não são diretamente comparáveis entre si, e nenhuma comparação granulométrica quantitativa entre IO-A e as amostras IO-B e IO-C é feita neste trabalho, uma vez que o IO-A é utilizado para resultados isoladas, apresentadas nas seções 4.1 à 4.3, e o IO-B e IO-C demonstram os resultados comparativos entre eles nas seções 4.4 e 4.5.

3.2 Ensaios de caracterização

As propriedades de fluxo foram determinadas em laboratório independente especializado, em aparelho de cisalhamento de translação (célula de Jenike), segundo o procedimento de Jenike (1964) padronizado pela ASTM D6128 (2016), empregando células circulares de 95 mm e de 64 mm de diâmetro conforme o nível de tensão. Cada Yield Locus foi obtido sob uma carga de consolidação fixa de 0,015 kN, 0,0637 kN e 0,132 kN, correspondendo a tensões de consolidação σ_1 da ordem de 5, 40 e 90 kPa, seguida de sete a oito etapas de cisalhamento sob tensões normais decrescentes; adotou-se como ruptura o valor de pico da força de cisalhamento em cada etapa. Os pares (σ , τ) de cada locus foram ajustados por regressão linear e σ_1 e σ_c obtidos pelos círculos de Mohr correspondentes, de onde decorrem também δ , ϕ_w e a coesão c . Todos os ensaios foram conduzidos a 22 °C.

Os teores de umidade foram preparados por adição controlada de água ao material seco ao ar, com homogeneização e repouso antes do ensaio, e determinados por secagem de amostras em estufa de convecção forçada a 107 °C até massa constante. Todos os teores relatados neste trabalho estão expressos em base úmida, isto é, como razão entre a massa de água e a massa total úmida. Os ensaios com tempo de consolidação foram executados mantendo-se a amostra confinada na própria célula, sob a carga de consolidação aplicada e em ambiente de laboratório à mesma temperatura, com a célula tampada durante todo o período de repouso de 24 h ou 72 h, de modo a impedir perda

de umidade por evaporação; o cisalhamento foi executado imediatamente após o término do repouso.

A composição mineralógica de IO-B e IO-C foi determinada por difração de raios X em laboratório universitário de caracterização tecnológica, sobre alíquota de 30 g britada a menos de 1 mm e homogeneizada; a composição química foi obtida por fluorescência de raios X sobre a mesma alíquota. A densidade das partículas foi medida por dois métodos independentes: deslocamento de líquido em proveta graduada e picnometria a gás hélio, esta última em amostra seca a 105 °C por 12 h. Os dois métodos forneceram resultados divergentes e de ordenamento inverso entre as amostras (Tabela 1), o que é discutido no item 4.4. Os ângulos de repouso foram medidos em ensaio de bancada, com formação de pilha sob mínima quantidade de movimento, e são reportados como faixa, refletindo a variação da base ao topo e ao longo do perímetro da pilha.

Não foram executadas repetições dos ensaios de cisalhamento para cada condição, prática usual em campanhas comerciais de caracterização.

3.3 Ensaios de desgaste por abrasão

Os ensaios de desgaste foram realizados em equipamento no qual um alimentador helicoidal apresenta continuamente produto novo à superfície de um disco de desgaste, com controle e medição da pressão de contato e da velocidade relativa entre o produto e a superfície ensaiada. Todos os ensaios foram conduzidos sob tensão normal única de 172 kPa, com as amostras na granulometria como recebidas (passante em 25 mm). O ângulo de atrito com a parede foi medido antes e depois de cada ensaio, com célula de 25 mm de diâmetro posicionada na borda externa do cupom e deslocamento tangente ao padrão de desgaste. A taxa de desgaste é adimensional, expressa em milímetros de perda de espessura do revestimento por milímetro de deslizamento do produto sobre a superfície, sob a pressão de contato do ensaio. Para facilitar a leitura em termos de durabilidade, a Tabela 2 apresenta também o desgaste equivalente por quilômetro de produto deslizado.

Tabela 2 – Taxas de desgaste e ângulos de atrito com a parede antes e após o ensaio

Amostra	Revestimento	Taxa de desgaste (mm/mm)	Desgaste (mm/km)	ϕ_w antes do ensaio (°)	ϕ_w após o ensaio (°)
IO-B	HARDOX 500	$6,7 \times 10^{-8}$	0,067	29 – 32	19 – 21
IO-B	CDP 4666	$7,3 \times 10^{-9}$	0,0073	35 – 38	15 – 16
IO-C	HARDOX 500	$1,3 \times 10^{-8}$	0,013	36 – 39	27 – 29
IO-C	CDP 4666	$4,8 \times 10^{-9}$	0,0048	36 – 43	25 – 32

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4 Procedimento paramétrico e envoltória de fluxo de massa

O procedimento proposto repete o roteiro clássico de projeto para uma série de tensões de consolidação, e não para um único ponto. Para cada σ_1 arbitrado obtêm-se, por interpolação das curvas experimentais, os valores de ρ_b , δ e ϕ_w . Com δ e ϕ_w entra-se nos gráficos de fator fluxo de Roberts (2005), obtendo-se o ângulo limite de parede α e o fator fluxo ff . Pelo critério de fluxo e não fluxo (Figura 1) determina-se a tensão crítica de arco σ_1 e, com $H(\alpha)$ e a Equação 5, a abertura crítica B_{cr} . O par (B_{cr}, α) é um ponto da envoltória; a repetição para tensões crescentes gera a curva completa. A envoltória é traçada em termos de B_{cr} , e a margem de segurança de 30% entra na verificação como

uma abscissa limite, $B_{rec} = 1,3 B_{cr}$, à esquerda da qual a geometria é reprovada, e não como um deslocamento da curva.

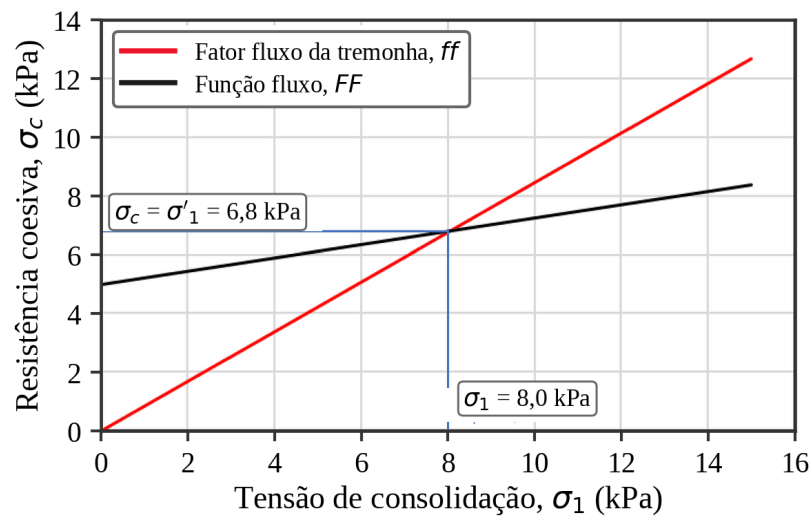


Figura 1 – Critério de fluxo e não fluxo para obtenção da tensão crítica de arco σ'_1

A envoltória delimita, no plano $B \times \alpha$, a região de fluxo de massa previsto: pontos abaixo da curva e à direita de B_{rec} correspondem a geometrias que escoam sem obstrução por arco coesivo nas condições ensaiadas; pontos acima da curva indicam paredes insuficientemente inclinadas ou de atrito elevado, e pontos à esquerda de B_{rec} indicam risco de obstrução. Traçada uma envoltória para cada combinação de umidade, tempo de consolidação e revestimento, a verificação de uma geometria reduz-se ao posicionamento de um ponto no gráfico.

O procedimento foi implementado em planilha com rotinas em Visual Basic for Applications (VBA). As propriedades medidas em três níveis de consolidação por condição são interpoladas linearmente entre pontos experimentais, sem extrapolação além da faixa ensaiada. Os gráficos de fator fluxo de Roberts (2005) foram digitalizados e parametrizados por famílias de curvas em função de δ , das quais α e ff são obtidos por dupla interpolação linear, primeiro em ϕ_w , dentro da curva de δ imediatamente inferior e superior, e depois entre essas duas curvas. O parâmetro $H(\alpha)$ foi parametrizado da mesma forma a partir dos gráficos de Jenike (1964). Cada envoltória foi construída com tensões de consolidação distribuídas entre 8 kPa e 31 kPa, faixa correspondente às aberturas de interesse do sistema analisado, e os pontos intermediários das curvas apresentadas resultam de interpolação entre esses pares (B , α) calculados, reportados na Tabela 4.

3.5 Sistema industrial analisado

O procedimento foi aplicado a um sistema industrial de carregamento de vagões composto por duas tremonhas piramidais retangulares em série. A tremonha superior, denominada pulmão, absorve as ineficiências de recuperação do produto no pátio de estocagem, mantendo regular a vazão de saída. A inferior, denominada dosadora, armazena a massa necessária ao descarregamento quando há controle de massa, sendo o fluxo entre as duas interrompido por uma válvula intermediária; a comporta dosadora controla os períodos de descarregamento e os tempos de passagem entre vagões. As dimensões relevantes, ou seja, a abertura de saída B e as inclinações de parede α_1 e α_2 , medidas a partir da vertical, estão na Tabela 5, na qual o ângulo de vale α_v é o resultado

da Equação 3. O sistema foi concebido para manusear os dois tipos de minério representados pelas amostras IO-B e IO-C.

4. Resultados e discussão

4.1 Propriedades de fluxo e efeito da umidade

Os valores de resistência coesiva e de coesão obtidos para a amostra IO-A a uma tensão de consolidação de 20 kPa estão reunidos na Tabela 3. A resistência coesiva cresce com o teor de umidade no conjunto da faixa ensaiada, de 9,56 kPa a 0,99% para 14,40 kPa a 11%, mas a tendência não é estritamente monotônica: entre 6,90% e 8,90% observa-se uma redução, de 12,03 kPa para 11,27 kPa, de magnitude compatível com a determinação única de cada ponto discutida no item 3.2. O crescimento é inequívoco apenas quando se comparam os extremos da faixa.

Nas três condições em que o tempo de consolidação de 24 h foi ensaiado, 6,90%, 8,90% e 11%, tanto σ_c quanto c aumentaram; para 0,99% e 3,90% esse tempo não foi ensaiado, e nada se pode afirmar sobre essas condições.

Tabela 3 – Resistência coesiva e coesão da amostra IO-A para $\sigma_1 = 20$ kPa

Teor de umidade (%)	$\sigma_c - 0$ h (kPa)	$\sigma_c - 24$ h (kPa)	$c - 0$ h (kPa)	$c - 24$ h (kPa)
0,99	9,56	—	2,64	—
3,90	10,10	—	2,14	—
6,90	12,03	13,12	2,58	2,82
8,90	11,27	12,55	2,25	2,51
11,0	14,40	16,17	4,09	4,59

Fonte: Elaborado pelos autores.

A interface produto/parede mostrou-se igualmente sensível. Comparando-se os Yield Locus obtidos com UHMW e com HARDOX 600 para a amostra IO-A a 0,99% de umidade, sob tensão normal na parede de 10 kPa, o ângulo de atrito com a parede passou de 17,2° com UHMW para 31,5° com HARDOX 600, e a tensão de cisalhamento na parede de 2,70 kPa para 4,05 kPa. O tempo de consolidação atua no mesmo sentido: a 11% de umidade e sob a mesma tensão normal, ϕ_w sobre HARDOX 600 subiu de 32,8° para 51,9° após 24 h. Confirma-se, portanto, que a tensão de cisalhamento na parede é influenciada simultaneamente pelo teor de umidade, pela característica da superfície de revestimento e pelo tempo de consolidação.

4.2 Envoltória de fluxo de massa

A construção da envoltória é ilustrada para a amostra IO-A a 0,99% de umidade, em tremonha piramidal retangular com abertura retangular e paredes revestidas em UHMW. A parametrização conduziu à tensão de consolidação de 8,0 kPa para a abertura crítica, à qual correspondem δ de 53,1°, ϕ_w de 18° e ρ_b de 1975 kg/m³. Com esses valores, os gráficos de Roberts (2005) forneceram ângulo limite de parede de 37,2° e fator fluxo de 1,19, valores idênticos aos obtidos nos gráficos originais de Jenike (1964) para o δ mais próximo. Com $H(\alpha)$ de 1,18, a Equação 5 resultou em abertura crítica de 0,41 m e recomendada de 0,53 m.

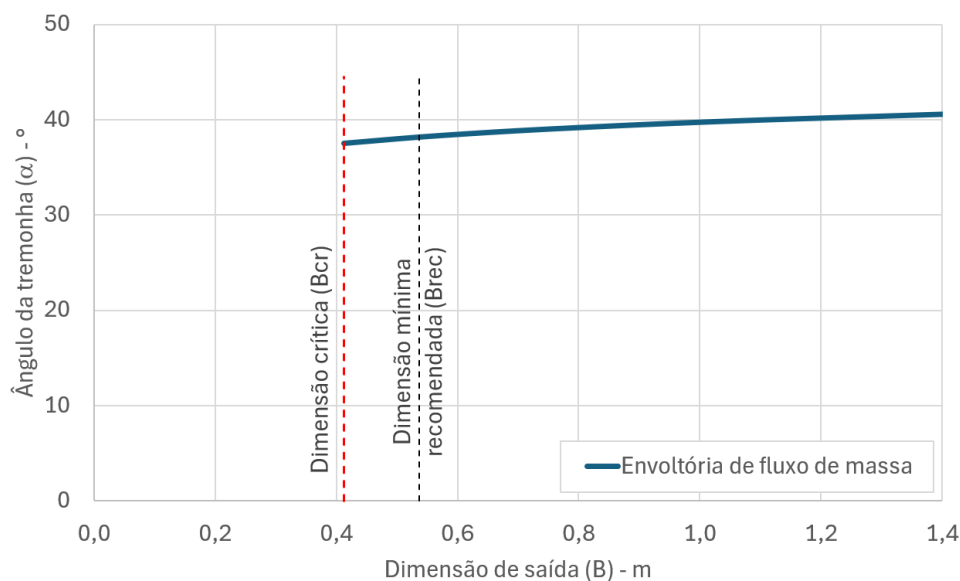


Figura 2 – Envoltória de fluxo de massa da amostra IO-A a 0,99% de umidade, revestimento UHMW, 0 h de consolidação. B_{cr} é a abertura crítica e $B_{rec} = 1,30 B_{cr}$ a abertura recomendada

Tabela 4 – Propriedades de fluxo e coordenadas da envoltória em função de σ_1 (IO-A, 0,99% de umidade, revestimento UHMW, 0 h). A primeira linha corresponde à abertura crítica e a segunda à abertura recomendada adotada em projeto, com acréscimo de 30%; as linhas abaixo da divisória completam o traçado da envoltória e não constituem condições de projeto

σ_1 (kPa)	ρ_b (kg/m ³)	δ (°)	σ'_1 (kPa)	σ_w (kPa)	ϕ_w (°)	ff	α (°)	$H(\alpha)$	B (m)
8,0	1975	53	6,8	7,2	18	1,19	37,2	1,18	0,41
10,7	2035	51	9,0	9,7	17	1,21	38,2	1,18	0,53
11,3	2047	51	9,3	10,2	17	1,21	38,4	1,18	0,57
15,8	2119	48	12,5	14,3	16	1,26	39,6	1,19	0,76
22,1	2192	46	17,1	20,0	16	1,29	39,7	1,19	1,04
30,9	2264	44	23,3	28,0	15	1,33	40,9	1,20	1,42

Fonte: Elaborado pelos autores.

A repetição do procedimento para tensões de consolidação crescentes forneceu os valores da Tabela 4 e a envoltória da Figura 2. A leitura da tabela requer atenção a uma distinção. A primeira linha é a única que corresponde à abertura crítica no sentido do projeto: é o par obtido pelo critério de fluxo e não fluxo na condição de consolidação de referência, e dele decorre B_{cr} igual a 0,41 m. A segunda linha é a condição de projeto efetivamente adotada, com a abertura recomendada de 0,53 m, que corresponde ao acréscimo de 30% sobre B_{cr} , e as demais propriedades são as lidas na envoltória nesse ponto, o que equivale a uma tensão de consolidação de 10,9 kPa. As linhas situadas abaixo da divisória não são condições de projeto: elas apenas fornecem pares adicionais para o traçado da curva na faixa de aberturas de interesse.

Observa-se que o efetivo ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito com a parede decrescem com a consolidação, enquanto a densidade aparente e o fator fluxo crescem; o efeito líquido é uma curva crescente, na qual aberturas maiores admitem paredes mais rasas. Entre 8,0 kPa e 30,9 kPa, o ângulo máximo admissível variou apenas 3,7°, ao passo que a abertura triplicou, o que indica ser a abertura a variável de projeto mais sensível às condições de consolidação. Cabe notar que o acréscimo de 30% na abertura

também amplia o ângulo admissível, de $37,2^\circ$ para $38,3^\circ$, de modo que a margem adotada atua nas duas variáveis simultaneamente.

4.3 Efeito do revestimento e da umidade sobre a envoltória

A Figura 3 reúne as envoltórias obtidas para a amostra IO-A com os dois revestimentos ensaiados e para os teores extremos de umidade. Para uma abertura de 1,0 m e 0,99% de umidade, o ângulo máximo admissível de parede passou de $40,0^\circ$ com UHMW para $21,8^\circ$ com HARDOX 600, uma redução de $18,2^\circ$; a mesma comparação a 0,7 m e a 1,2 m fornece reduções de $18,8^\circ$ e $17,8^\circ$, de modo que o efeito é praticamente constante ao longo da faixa de aberturas. Trata-se de consequência direta dos maiores ângulos de atrito com a parede medidos para o HARDOX 600, discutidos no item 4.1.

Já a elevação da umidade de 0,99% para 11%, mantido o revestimento UHMW e o tempo de consolidação nulo, aumentou a abertura crítica de 0,38 m para 0,66 m, acréscimo de 74%; em termos de abertura recomendada, os valores correspondentes passaram de 0,49 m para 0,86 m, na mesma proporção. Os dois efeitos são de natureza distinta: o revestimento atua predominantemente sobre o ângulo admissível de parede, e a umidade sobre a abertura. Essa separação é a principal vantagem prática da envoltória, pois indica qual variável deve ser corrigida diante de uma reprovação: alterar o revestimento não resolve abertura insuficiente, nem ampliar a abertura compensa parede excessivamente rasa.

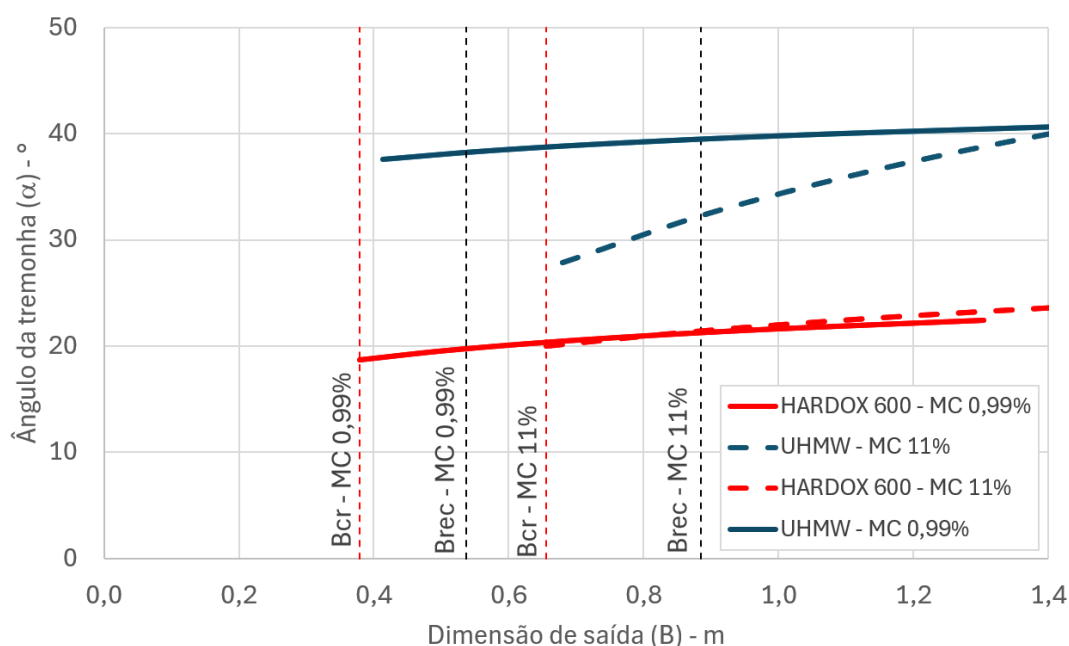


Figura 3 – Envoltórias da amostra IO-A para os revestimentos UHMW e HARDOX 600 e para os teores de umidade de 0,99% e 11%, 0 h de consolidação

4.4 Efeito da mineralogia e do tempo de consolidação

A Figura 4 compara a resistência coesiva das amostras IO-B e IO-C. A amostra IO-C, com 61% de goethita, apresenta valores de σ_c sistematicamente superiores aos da

amostra IO-B, com 82% de hematita, para as mesmas tensões de consolidação. A associação é consistente com a tendência observada por Wang (2015).

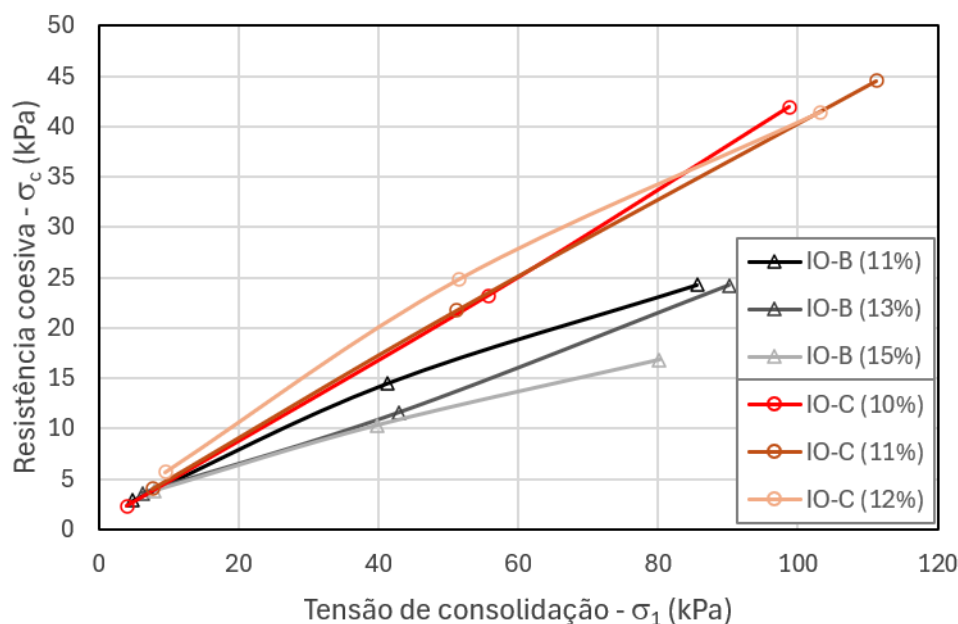


Figura 4 – Influência da mineralogia na resistência coesiva das amostras IO-B e IO-C

Um ponto importante é que além das duas amostras diferirem na mineralogia, elas também diferem na granulometria, pois a fração passante em 75 μm é de 14% em IO-B contra 1,3% em IO-C e o D_{50} é de 0,43 mm contra 3,4 mm. Diferem ainda nas faixas de umidade ensaiadas e na densidade das partículas (Tabela 1). A comparação deve, portanto, ser lida como uma diferença entre dois produtos industriais distintos, na qual a mineralogia é um fator plausível e não um efeito isolado. Essa limitação não restringe o uso prático do resultado: cada envoltória é traçada para uma combinação definida de material, teor de umidade, tempo de consolidação e revestimento, e incorpora na posição da curva o efeito conjunto dessas variáveis. É por essa via que a diferença de comportamento entre IO-B e IO-C chega ao projeto, como mostra a verificação das geometrias industriais no item 4.5, independentemente da causa que a origina.

Mais relevante para o projeto é o fato de que apenas a amostra IO-C mostrou-se sensível ao tempo de consolidação de 72 h: para IO-B as aberturas críticas calculadas para 0 h e 72 h resultaram idênticas, enquanto para IO-C o armazenamento prolongado exigiu aberturas maiores nos três teores de umidade ensaiados. Ainda que a resistência coesiva não varie, a tensão de cisalhamento na parede tende a aumentar com o tempo de consolidação, o que reduz os limites de ângulo em todas as envoltórias; esse é o mecanismo pelo qual o armazenamento prolongado penaliza a amostra IO-B mesmo sem alterar sua abertura crítica. Os ensaios de desgaste (Tabela 2) acrescentam um efeito de segunda ordem: a amostra IO-B, mais abrasiva, poliu as superfícies de revestimento em maior grau, reduzindo os ângulos de atrito após o ensaio, o que sugere que o polimento prévio dos revestimentos em fábrica poderia elevar as envoltórias.

4.5 Aplicação ao sistema de duas tremonhas em série

As Figuras 5 e 6 apresentam as envoltórias das amostras IO-B a 11% e IO-C a 12% de umidade, com as coordenadas geométricas das duas tremonhas do sistema posicionadas sobre os gráficos. Para a amostra IO-B a 11%, a tremonha dosadora encontra-se abaixo

de todas as curvas, admitindo qualquer dos dois revestimentos mesmo após 72 horas de armazenamento. A tremonha pulmão, ao contrário, situa-se acima das curvas do CDP 4666 e do HARDOX 500 para 72 horas: seu ângulo de vale de $18,6^\circ$ só é compatível com o fluxo de massa se o componente for revestido com HARDOX 500 e operado com carregamento e descarregamento simultâneos.

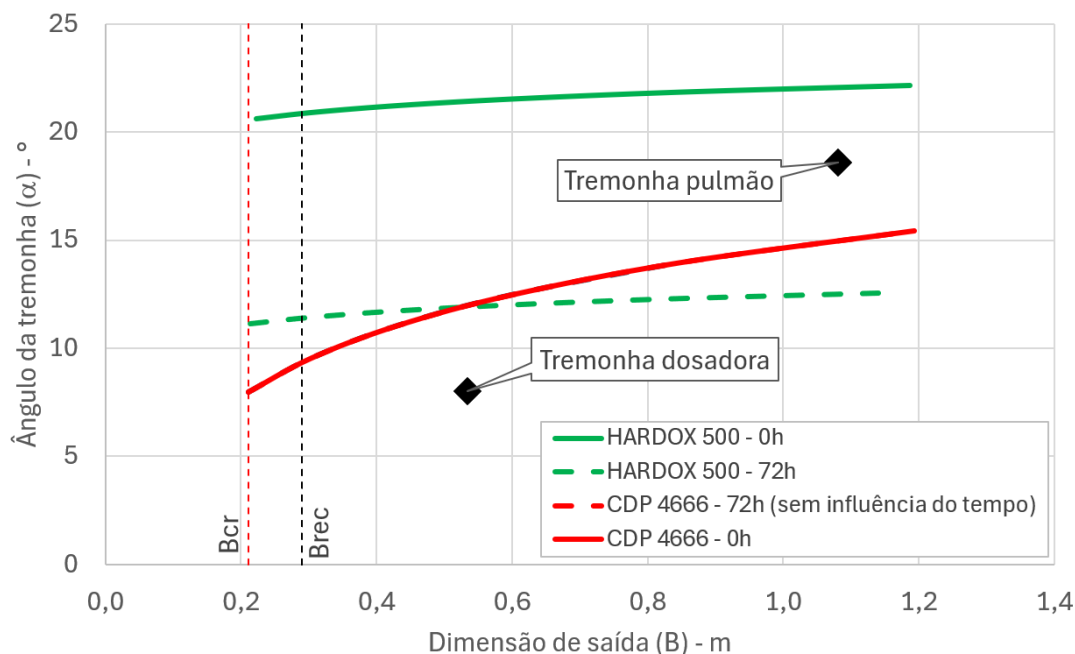


Figura 5 – Envoltórias e coordenadas geométricas das tremonhas para a amostra IO-B (11%)

O comportamento para a amostra IO-B a 13% e 15% de umidade é análogo, com progressiva restrição das condições admissíveis. Para a amostra IO-C, a tremonha pulmão passa a admitir apenas condições instantâneas de fluxo com HARDOX 500 já a 10% de umidade. No caso mais severo, IO-C a 12% de umidade (Figura 6), a abertura crítica para 72 h de armazenamento é de 0,46 m e a abertura recomendada correspondente de 0,60 m, enquanto a abertura instalada na tremonha dosadora é de 0,534 m: a geometria supera a abertura crítica, mas não atende à margem de segurança de 30%, e por isso é reprovada para armazenamento prolongado. Nessa condição, o armazenamento de 72 h deve ser proibido em procedimento operacional, e não corrigido por alteração geométrica, uma vez que a abertura está limitada pelo equipamento instalado sob a tremonha. Para 0 h de armazenamento, a abertura recomendada é de 0,42 m e a geometria é aprovada..

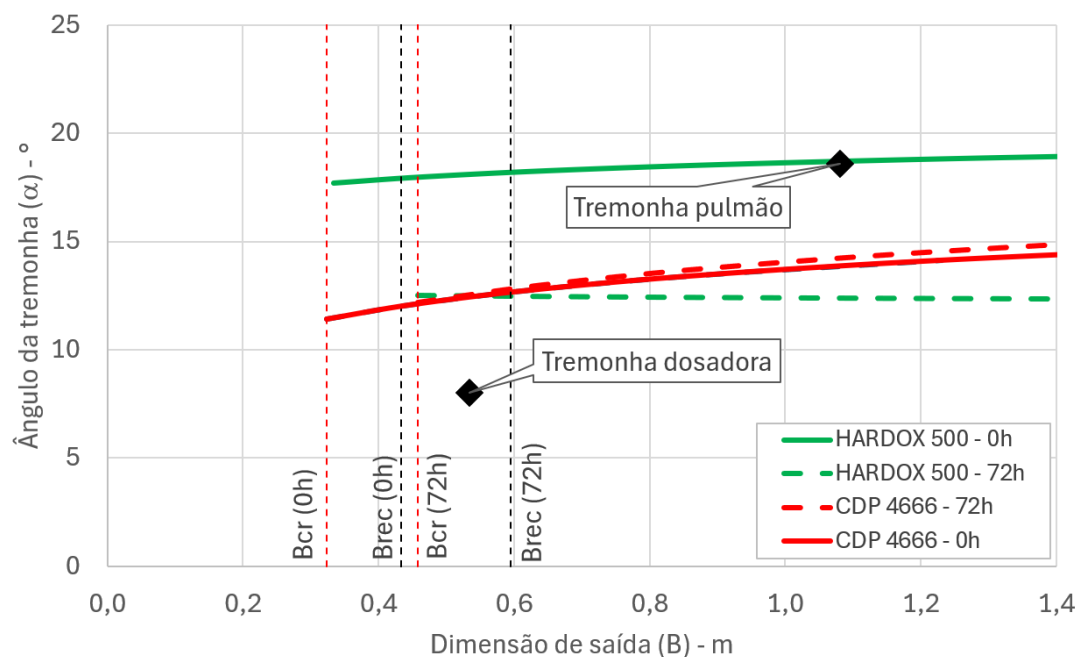


Figura 6 – Envoltórias e coordenadas geométricas das tremonhas para a amostra IO-C (12%)

A análise conjunta dos dois produtos consolida as premissas de projeto da Tabela 5. O HARDOX 500 é o revestimento que amplia a região de fluxo de massa em todas as condições ensaiadas, mas sua taxa de desgaste é cerca de uma ordem de grandeza superior à do CDP 4666, o que o torna desfavorável em regiões de alta velocidade. Diante das inclinações da tremonha pulmão, o CDP 4666 não deve ser usado nesse componente; a dosadora, com ângulos mais favoráveis, admite ambos. A operação com carregamento e descarregamento simultâneos é recomendada por manter o tempo de consolidação próximo de zero, condição em que as envoltórias são mais permissivas; ela não substitui, contudo, a verificação das demais premissas geométricas e operacionais, que devem ser atendidas simultaneamente. Recomendam-se ainda chanfros e arredondamentos de arestas e vales.

Tabela 5 – Geometria das tremonhas analisadas e premissas de projeto de fluxo resultantes

Parâmetro	Tremonha pulmão	Tremonha dosadora
Abertura de saída B (m)	1,081	0,534
Inclinação α_1 (°)	18	4
Inclinação α_2 (°)	5	7
Ângulo de vale α_v (°)	18,6	8,0
Revestimento admissível	HARDOX 500	HARDOX 500 ou CDP 4666
Modo de operação	Carregamento e descarregamento simultâneos	Carregamento e descarregamento simultâneos
Restrição de armazenamento	Não recomendado acima de 72 h	Armazenamento de 72 h reprovado para IO-C a 12% de umidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

Cabe distinguir a natureza das informações apresentadas. Os valores das Tabelas 1 a 3 são resultados experimentais de laboratório. As coordenadas das envoltórias e as aberturas críticas e recomendadas das Tabelas 4 e 5 são resultados de cálculo, obtidos

pelo procedimento do item 3.4 a partir daqueles ensaios e das teorias de Jenike (1964) e Roberts (2005). As premissas de revestimento e de modo de operação da Tabela 5 são recomendações de engenharia derivadas desse cálculo. As previsões não foram confrontadas com registros operacionais, ocorrências de obstrução ou histórico de manutenção do sistema; o trabalho constitui, portanto, uma avaliação preditiva de projeto, cuja validação em campo permanece como etapa necessária.

5. Conclusões

O procedimento paramétrico proposto converte propriedades de fluxo medidas em célula de cisalhamento de Jenike em uma envoltória de fluxo de massa, que relaciona de forma contínua o ângulo máximo admissível de parede à abertura de saída. A verificação de uma geometria existente reduz-se ao posicionamento de um ponto no gráfico, o que transforma um roteiro de cálculo pontual em um critério objetivo de aceitação, aplicável tanto ao projeto de novas unidades quanto à avaliação de tremonhas em operação, dentro da faixa de condições efetivamente ensaiadas.

Para as amostras analisadas, os principais fatores que governam o fluxo do minério de ferro em tremonhas piramidais são o teor de umidade, o tempo de armazenamento, o revestimento das paredes, a granulometria e a composição mineralógica. A elevação da umidade de 0,99% para 11% aumentou a abertura crítica de 0,38 m para 0,66 m, acréscimo de 74%; a substituição do UHMW pelo HARDOX 600 reduziu o ângulo máximo admissível de 40,0° para 21,8° em abertura de 1,0 m; e a amostra com 61% de goethita foi a única a exigir aberturas maiores após 72 h. Umidade e revestimento atuam sobre variáveis de projeto diferentes, o que orienta a correção a ser adotada diante de uma reprovação.

Aplicado a um sistema industrial de duas tremonhas piramidais em série, o procedimento reprovou o revestimento CDP 4666 para a tremonha pulmão e identificou que a abertura da tremonha dosadora, embora superior à abertura crítica, não atende à margem de segurança de 30% para o produto mais coesivo sob armazenamento de 72 h. Nenhuma dessas restrições havia sido explicitada pelo dimensionamento convencional.

Como continuidade, recomenda-se o confronto das previsões com registros operacionais de obstrução e de manutenção, a repetição dos ensaios para quantificar a dispersão experimental, a avaliação em tremonhas-piloto instrumentadas e a investigação do efeito do polimento prévio dos revestimentos sobre a posição das envoltórias.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES-PROEX, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio a esta pesquisa, desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D6128-16: standard test method for shear testing of bulk solids using the Jenike shear cell*. West Conshohocken: ASTM International, 2016. 17 p.
- ARNOLD, P. C. & McLEAN, A. G. *An analytical solution for stress function at the wall of converging channel*. Powder Technology, v. 13, p. 255-260, 1976. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)85011-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)85011-5)
- CALIL JUNIOR, C. & CHEUNG, A. B. *Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo*. São Carlos: EESC-USP, 2007. 232 p.
- CHEN, W. & ROBERTS, A. W. *A modified flowability classification model for moist and cohesive bulk solids*. Powder Technology, v. 325, p. 639-650, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.054>

CHEUNG, A. B. *Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos*. 2007. 333 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION. *CEMA Standard 550: classification and definitions of bulk materials*. Naples: CEMA, 2003. 80 p.

DUARTE, R. A. *Aplicação de simulação dinâmica para suporte à decisão de alterações físicas e de controle em processos de cominuição*. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

ENSTAD, G. *On the theory of arching in mass flow hoppers*. Chemical Engineering Science, v. 30, p. 1273-1283, 1975. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)85051-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)85051-2)

GAYLORD JUNIOR, E. H. & GAYLORD, C. N. *Design of steel bins for storage of bulk solids*. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 359 p.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L. C. & WOUTERS, I. *Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose*. China Particuology, v. 4, n. 3-4, p. 104-107, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1672-2515\(07\)60247-4](https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60247-4)

HAAKER, G. *An introduction to the storage of bulk solids in silos*. Enschede: University of Twente, 1999. 46 p.

JENIKE, A. W. *Gravity flow of bulk solids*. Bulletin n. 108, v. 52, n. 29. Salt Lake City: University of Utah, 1961.

JENIKE, A. W. *Storage and flow of solids*. Bulletin n. 123, v. 53, n. 26. Salt Lake City: University of Utah, 1964.

KRULL, T.; WILLIAMS, K.; DONOHUE, T. & ILIC, D. *The importance of iron ore characterization and DEM modelling in materials handling applications with a focus on wear*. In: IRONMAKING AND RAW MINERAL TECHNOLOGY SEMINAR, 44., 2014, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte, 2014. p. 91-102.

LU, L. *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability*. 2. ed. Brisbane: Woodhead Publishing, 2022. 822 p.

McGLINCHEY, D. *Bulk property characterization*. In: McGLINCHEY, D. *Characterization of bulk solids*. Glasgow: Blackwell Publishing, 2005. cap. 2, p. 48-84.

MOHAJERI, M. J.; BOS, M. J.; VAN RHEE, C. & SCHOTT, D. L. *Bulk properties variability and interdependency determination for cohesive iron ore*. Powder Technology, v. 367, p. 539-557, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.018>

MOORE, B. A. & ARNOLD, P. C. *An alternative presentation of design parameters for mass flow hoppers*. Powder Technology, v. 42, p. 79-89, 1985. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)80040-1](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)80040-1)

ROBERTS, A. W. *Bulk solids handling: recent developments and future directions*. Newcastle: The Institution of Engineers Australia, 1991. 78 p.

ROBERTS, A. W. *Characterization for hopper and stockpile design*. In: McGLINCHEY, D. *Characterization of bulk solids*. Glasgow: Blackwell Publishing, 2005. cap. 3, p. 85-131.

ROBERTS, A. W. *Developments in silo design for the safe and efficient storage and handling of grain*. In: INTERNATIONAL WORKING CONFERENCE ON STORED-PRODUCT PROTECTION, 6., 1994, Canberra. Proceedings [...]. Canberra, 1994. v. 1, p. 259-280.

SCHULZE, D. *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*. 2. ed. Cham: Springer, 2021. 625 p.

SCHWEDES, J. *Consolidation and flow of cohesive bulk solids*. Chemical Engineering Science, v. 57, p. 287-294, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00378-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00378-5)

WALKER, D. M. *An approximate theory for pressures and arching in hoppers*. Chemical Engineering Science, v. 21, p. 975-997, 1966.

WANG, Z. *An investigation of flowability and compaction of iron ore fines*. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Materials Science and Engineering) – The University of New South Wales, Sydney, 2015.