

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/480

Revisão Dos Fatores De Influência No Fluxo De Rejeitos Após O Colapso De Estruturas De Armazenamento

Ana Luiza Mendes Halabi

Engenheira Geotécnica, GEOCOBA, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, halabi.analu@alumni.usp.br

Victor Keniti Sakano

Pós-doc, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, victor.sakano@lme.pcc.usp.br

Marcos Massao Futai

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, futai@usp.br

Rafael Giuliano Pileggi

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, rafael.pileggi@lme.pcc.usp.br

RESUMO: O movimento de massa pós colapso de barragem de rejeitos consiste no fluxo de suspensões concentradas de rejeitos, misturas de partículas sólidas distribuídas em um meio líquido. Para as suspensões de rejeito em escoamento pós ruptura de barragem de rejeitos, são determinantes para o comportamento reológico o tempo decorrido após a mistura e características das partículas como morfologia, granulometria, rugosidade e interações interparticulares, concentração, peso molecular, etc. Este trabalho, então, faz uma revisão da literatura das condições de fluxo de suspensões de rejeitos concentradas em corridas de massa. São analisadas a interação entre as partículas sólidas da suspensão e a influência das características físico-químicas durante o fluxo, e nos parâmetros reológicos dos materiais. Observa-se que a interação entre as partículas sólidas durante o fluxo é um fator importante para o seu desenvolvimento. A tensão de escoamento de suspensões de minerais em água, como as suspensões de rejeitos, depende das propriedades físicas da mistura e o tipo de magnitude das forças interparticulares. Assim, é comum na literatura a previsão da tensão de escoamento e da viscosidade por modelos, como o YODEL e o Modelo de Interferência apresentados nesse trabalho, a partir de características físico-químicas das partículas e da suspensão.

PALAVRAS-CHAVE: Reologia de rejeitos, ruptura, estrutura de armazenamento de rejeitos, viscosidade, tensão de escoamento.

ABSTRACT: The mass movement after tailings dam collapse consists of the flow of concentrated tailings suspensions, mixtures of solid particles distributed in a liquid medium. For tailings suspensions in flow after tailings dam failure, the time elapsed after mixing and particle characteristics such as morphology, granulometry, roughness and interparticle interactions, concentration, molecular weight, etc. are decisive for the rheological behavior. This work, then, reviews the literature of the flow conditions of waste suspensions concentrated in mass runs. The interaction between the solid particles of the suspension and the influence of the physicochemical characteristics during the flow, and on the rheological parameters of the materials, are analyzed. It is observed that the interaction between solid particles during flow is an important factor for their development. The yield stress of mineral suspensions in water, such as tailings suspensions, depends on the physical properties of the mixture and the type of magnitude of the interparticle forces. Thus, it is common in the literature to predict yield stress and viscosity using models, such as YODEL and the Interference Model presented in this work, based on physical-chemical characteristics of the particles and suspension.

KEYWORDS: Tailings rheology, collapse, tailings storage facility, viscosity, yield strength.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeito após colapso podem gerar corrida de lama artificial com alta energia potencial (YU; TANG; CHEN, 2020). O movimento de massa após a ruptura de uma barragem de rejeitos consiste no fluxo de suspensões concentradas de rejeitos, misturas de partículas sólidas distribuídas em um meio líquido, a princípio, newtoniano. Assim, são movimentos que podem ser considerados como fluxos compostos pela

suspensão dos grãos de solo em água. O seu comportamento fluido ocorre em parte como consequência à redução drástica da resistência ao cisalhamento após a ruptura.

Os rejeitos de mineração são materiais artificiais resultantes da britagem e do beneficiamento do minério, e têm suas características intimamente relacionadas à composição das rochas lavradas e dos processos para concentração e extração desse minério, com granulometria variando de areias a argilas. Seu comportamento reológico, então, está relacionado às características físico-químicas das suas partículas.

Nos casos de fluxo de solo, em geral, encontramos condições de suspensões concentradas, em que as partículas estão mais próximas de seu empacotamento máximo que da condição diluída. Para essas suspensões, são determinantes para o comportamento reológico o tempo decorrido após a mistura e características das partículas como morfologia, granulometria, rugosidade e interações interparticulares, concentração, peso molecular, etc. A caracterização reológica desses fluidos é, portanto, necessária para a solução de problemas de engenharia envolvendo a corrida de massas, sendo ainda necessário estabelecer na literatura a variação dos seus parâmetros e a correlação com suas características (DELLA VECCHIA; CREMONESI; PISANÒ, 2019).

Este trabalho, então, faz uma revisão da literatura das condições de fluxo de suspensões concentradas de solos em corridas de massa. São analisadas a interação entre as partículas sólidas da suspensão e a influência das características físico-químicas durante o fluxo, e nos parâmetros reológicos dos materiais.

2 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO

Os rejeitos de mineração são materiais bastante utilizados na construção de estruturas da mineração. Estes materiais são o descarte do beneficiamento do minério, e apresentam características que dependem do material lavrado e do processamento mineral. Porém, a sua falta de coesão os torna pouco propensos a sua utilização, devido à possibilidade de erosão interna e superficial (SARSBY, 2013). Este fato, aliado à sua granulometria e deposição fofa, aumentam a susceptibilidade do material à liquefação.

Os rejeitos são geralmente compostos por partículas sólidas de composição granulométrica variável, de água e outras substâncias adicionadas no processo de beneficiamento do minério e que não possuem valor econômico. Devido ao grande volume gerado e à sua possível toxicidade, as empresas de mineração e os órgãos ambientais têm demonstrado grande interesse em alternativas para a disposição desses rejeitos de forma econômica e segura (PORTES, 2013).

Os rejeitos resultantes da lavra de rochas rijas (metamórficas e ígneas), das quais destacam-se os rejeitos de ouro, cobre e ferro, apresentam alta similaridade entre si. Isso porque, as características desses materiais estão intimamente ligadas às características do depósito mineral, e ao processo de moagem e britagem seguido por separação gravimétrica ou cíclica, que origina materiais de granulometria siltosa, com diâmetros entre 2 e 80 μm (BUSSIÈRE, 2007). Outros rejeitos apresentam granulometria mais fina relacionada à sua origem e processamento, como a lama-vermelha resultante do processamento do alumínio.

Além do processamento do material, a granulometria dos rejeitos ainda está bastante relacionada às diferentes técnicas de deposição. Dentre elas, destacam-se a deslamagem, em que a fração grossa é separada pela ciclonação para a construção do maciço, enquanto a fração fina é retida atrás deste (SARSBY, 2013) e a de aterro hidráulico, que causa segregação e variabilidade espacial na estrutura (ESPÓSITO, 2000). Assim, a variação granulométrica causada pela segregação na deposição dos rejeitos afeta a densidade e a porosidade do material, consequentemente influenciando todos os parâmetros geotécnicos que podem ser correlacionados a eles (ESPÓSITO, 2000).

Em geral, os rejeitos são dispostos nas barragens em forma de polpa ou pasta, suspensões com concentrações volumétricas iniciais entre 25 e 45%, que adensam com o tempo (BUSSIÈRE, 2007). Nas barragens de rejeitos, observa-se que a densidade relativa do material apresenta grande variabilidade dentro de um depósito, dentro da faixa de 30% a 50% (SARSBY, 2013). A técnica de deposição hidráulica do material apresenta pouca energia de compactação, resultando em material de compactidade fofa devido ao adensamento sob peso próprio.

As partículas de solo podem ser controladas primariamente por forças de massa ou de superfície (relacionadas às cargas elétricas das partículas), e a influência das cargas elétricas está diretamente relacionada à área superficial específica das partículas. Partículas que tem seu comportamento controlado por forças de superfície, como a maioria dos argilominerais, são denominadas coloides, com granulometrias geralmente menores que 1 μm . Assim, a variabilidade de comportamento dos rejeitos influencia no comportamento desse material em fluxo após ruptura de barragens de rejeitos.

3 FLUXO DE REJEITOS

O movimento de massa após a ruptura de uma barragem de rejeitos consiste no fluxo de uma mistura de partículas sólidas distribuídas em um meio líquido, a princípio, newtoniano. Nos casos de fluxo de solo, em geral, encontramos condições de suspensões concentradas, em que as partículas estão mais próximas de seu empacotamento máximo que da condição diluída. Para essas suspensões, são determinantes para o comportamento reológico: o tempo decorrido após a mistura; características das partículas como morfologia, granulometria, rugosidade e interações interparticulares; concentração; peso molecular; e conformação dos polímeros adsorvidos (MACOSKO, 1994).

Para a avaliação do fluxo de rejeitos após o colapso da estrutura de contenção, então, é necessário entender como as partículas de solo interagem durante o fluxo de rejeitos.

3.1 Fatores de Influência na Tensão de Escoamento

A compreensão da interação entre as partículas sólidas é importante para as características reológicas das suspensões. É razoável supor o espaço para a mobilidade das partículas na suspensão podem definidas a partir da diferença entre a concentração e a máxima concentração de sólidos do material ($\phi_{\text{máx}}$). Nota-se aqui, que $\phi_{\text{máx}}$ poderia ser estimado a partir da porosidade teórica mínima do material ($1 - \text{porosidade}$). Além disso, partículas finas, e com área específica elevada, apresentam interações interparticulares fortes, especialmente em óxidos minerais. Portanto, é possível deduzir que a tensão de escoamento das suspensões é inversamente proporcional ao tamanho das partículas e da diferença entre a concentração da suspensão e seu empacotamento máximo (ALEJO, BONIFACIO; BARRIENTOS, 2009).

A tensão de escoamento de suspensões de minerais em água, como as suspensões de rejeitos, depende das propriedades físicas da mistura e o tipo de magnitude das forças interparticulares (DZUY; BOGER, 1983; KWAK; JAMES; KLEIN, 2005; WU; WANG; WANG, 2015). A tensão de escoamento é razoavelmente prevista na literatura a partir de características como granulometria, fração volumétrica de sólidos, forças interparticulares, raio de curvatura dos contatos entre as partículas, dentre outros (DAMINELI et al., 2016).

O comportamento de argilas em condições quase-estáticas é bastante estudada. A tensão de escoamento de dispersões de caulinita é fortemente afetada pela concentração de argila e as mudanças na microestrutura devido ao empacotamento (LIN, 2015). A tensão de escoamento de laponitas, caulinita e bentonita diminui com o aumento do pH devido a mudanças do potencial eletrostático (LAXTON E BERG, 2006; TEH et al., 2009).

Para o caso de suspensões de argilas no estado estático, estas formam um gel com estrutura face-aresta ou face-face, que se torna um líquido de baixa viscosidade quanto as tensões de cisalhamento são superiores à tensão de escoamento (PAINÉAU et al., 2011; COCARD et al., 2000; ABOU et al., 2003; PIGNON et al., 1998; BAIRD & WALZ, 2007; AU et al., 2015; LEONG et al., 2018). Em baixas taxas de cisalhamento a viscosidade da suspensão é controlada, além da concentração volumétrica, pelas propriedades coloidais como cargas superficiais, distribuição granulométrica e propriedades do meio como pH e salinidade (SHAKEE, 2021). Porém, a altas condições de cisalhamento, a viscosidade é determinada pela granulometria e forma das partículas, além de seu arranjo na suspensão (CZIBULYA et al., 2010).

3.2 Fatores de Influência na Viscosidade

Sabendo-se que a viscosidade é uma medida de resistência do fluido ao escoamento, é coerente a suposição que a adição de partículas ao fluido aumente a viscosidade da suspensão (OLIVEIRA et al., 2000). Essas partículas, porém, podem ainda introduzir desvios do comportamento Newtoniano (VALENCIA, 2017). Em partículas maiores de 1 μm , as forças eletrostáticas são menos importantes, e é observado maior influência da inércia das partículas no fluxo. Além disso, a distribuição granulométrica influencia no empacotamento máximo da suspensão, sendo esse maior para curvas melhor graduadas, com distribuições bimodais ou trimodais.

Para as suspensões concentradas estão presentes as interações hidrodinâmicas e forças de lubrificação, além da interação dos contatos friccionais das partículas de maneira similar a meios granulares secos (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). A fricção, portanto, se torna uma questão central para a compreensão de fluxos de rejeitos concentrados.

As forças hidrodinâmicas e de lubrificação de tornam menos importantes com o aumento das concentrações, e os contatos entre partículas são predominantes na resposta reológica de suspensões granulares concentradas (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). O fluxo de suspensões granulares concentradas tem similaridades aos fluxos de material granular seco (ANDREOTTI, FORTESSE & POULIQUEN, 2013) no que diz respeito à importância dos contatos diretos. A determinação da viscosidade destes fluidos é complexa, devido a variações na microestrutura durante o fluxo, e às interações hidrodinâmicas pelo líquido e o contato mecânico direto.

A Figura 2 apresenta a decomposição das principais perturbações nos fluxos de suspensões. Em (a) o comportamento de uma esfera em cisalhamento pode ser decomposto em rotação e deformação, e a resistência ao componente de deformação cisalhante da esfera gera perturbação no fluxo (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). Em (b) é apresentado o fluxo de avalanches submarinas, apresentando a complexidade envolvida no contato entre partículas. Em ambos os casos, as perturbações no fluxo causam aumento de taxa de dissipação de energia, o que aumenta a viscosidade do material (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). As interações hidrodinâmicas, e consequentemente a viscosidade, depende do tipo de fluxo (MACOSKO, 1994).

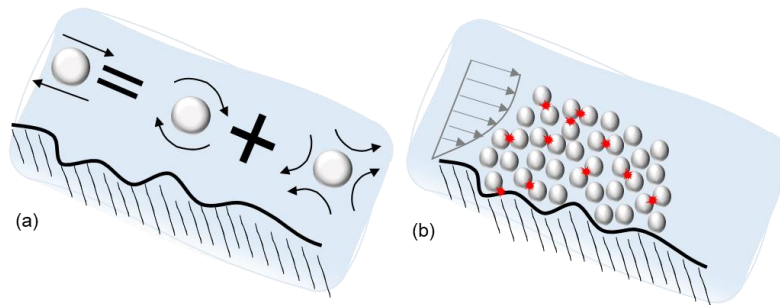


Figura 2. Decomposição das principais fontes de perturbação de fluxo de suspensões concentradas. (a) movimento das partículas; (b) contato entre partículas. Fonte: (Guazzelli e Pouliquen 2018). *Adaptado pela autora.*

Por fim, por se tratar de sistemas multifásicos, o fluxo relativo entre partículas e solvente pode, e geralmente é, importante (ISA et al., 2010). A separação entre as fases das suspensões concentradas pode, então, ocorrer durante a ruptura. Esse fenômeno foi descrito para a ruptura de Los Frailes, com registro de dois picos no hidrograma monitorado, um de fluxo mais aquoso e um segundo de fluxo de alta viscosidade com alta concentração de rejeitos (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008).

Em algumas configurações de fluxo, é possível o movimento relativo entre as partículas e o fluido, ou uma velocidade de escorregamento entre as fases. As partículas tem tendência a se movimentar da região de altas taxas de cisalhamento para as regiões de baixas taxas de cisalhamento, em um fenômeno conhecido como migração induzida por cisalhamento (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). Esse comportamento é importante tanto na compreensão do fluxo de rejeitos em campo quanto na interpretação de ensaios de laboratório em rejeitos.

3.3 Influência da Microestrutura de Argilominerais na Viscosidade

A granulometria influencia no comportamento do material, uma vez que para partículas abaixo de 1 μm , portanto a fração argila, o movimento Browniano se torna notável, o que resulta em elasticidade e efeitos de taxa de cisalhamento (MACOSKO, 1994). Uma orientação forte de partículas é afetada pelas interações eletrostáticas, com maior orientação para partículas menores e com menos ligações iônicas, e seu empacotamento é estabilizado na configuração face a face pelas repulsões entre camadas duplas elétricas (MICHOT, 2009).

As partículas de argilominerais se alinham a altas taxas de cisalhamento, resultando em arrasto hidrodinâmico, e a viscosidade diminui com o aumento das interações de repulsão entre as folhas de argila (PAINEAU ET AL. 2011). Este alinhamento durante o fluxo é ilustrado pela Figura 3. Algumas argilas, como a laponita, ainda apresentam comportamento dependente da espessura da amostra cisalhada, devido a ocorrência de cisalhamento não-homogêneo (formação de bandas e escorregamento de paredes) (LIN et al.,

2020).

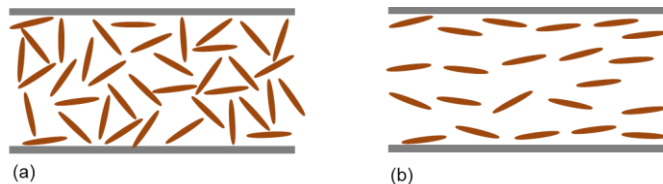


Figura 3. Microestrutura de argilominerais durante o fluxo. (a) microestrutura onde pontas positivamente carregadas são eletrostaticamente atraídas pelas faces negativamente carregadas; (b) microestrutura alinhada em altas taxas de cisalhamento. Fonte: *Elaborado pela autora.*

4 MODELOS DE PREVISÃO DE PARÂMETROS REOLÓGICOS

Considerando a influência de diferentes características físico-químicas das partículas no comportamento reológico de suspensões, diferentes modelos tentaram estimar parâmetros reológicos a partir de características como concentração volumétrica, granulometria, forças superficiais e eletrostáticas. Neste trabalho, a título de ilustração, são apresentados o modelo YODEL para a previsão de tensão de escoamento e o modelo de interferência de previsão de viscosidade. Destaca-se que a literatura apresenta diferentes modelos não citados nesse trabalho, e que podem ser mais adequados para a descrição de comportamentos de diferentes suspensões.

Esses modelos simplificados ou generalistas para previsão da tensão de escoamento e da viscosidade podem ser úteis para a previsão de comportamento de suspensões de diferentes rejeitos ou para a compreensão dos diferentes fatores que influenciam o fluxo de rejeitos. Porém, destaca-se que é indicado a utilização de ensaios reológicos adequados para a determinação de parâmetros reológicos em rejeitos.

4.1 Modelo YODEL de Previsão de Tensão de Escoamento

Observando as influências dos parâmetros de concentração volumétrica, tamanho e distribuição granulométrica das partículas, máximo empacotamento, rede de percolação formada pelas partículas e forças interparticulares, o modelo YODEL (FLATT; BOWEN, 2006) propõe uma previsão de valores para tensão de escoamento de suspensões concentradas.

O modelo YODEL foi desenvolvido para a previsão de comportamento reológicos de sistemas cimentícios, especialmente em presença de aditivos dispersantes. Ele considera como forças interparticulares as forças eletrostáticas, forças de dispersão, ou de van der Waals, e forças estéricas resultantes da adsorção de uma molécula dispersante (VALENCIA, 2017). O modelo propõe, então, que a tensão de escoamento é proporcional às ligações entre as partículas e ao número de contatos (FLATT; BOWEN, 2006).

4.2 Modelos de Interferência de Previsão de Viscosidade

A viscosidade pode ser entendida como uma medida de resistência do fluido ao escoamento e, portanto, também aumenta com a dificuldade ao fluxo imposta pelas partículas sólidas dispersas (PILEGGI et al., 2000). Além disso, é aceito que a bidispersão ou polidispersão reduzem a viscosidade se considerar uma mesma concentração volumétrica de sólidos, uma vez que o empacotamento máximo aumenta (PEDNEKAR; CHUN; MORRIS, 2017). É comum que modelos reológicos de previsão de viscosidade de suspensões apresentem uma viscosidade relativa (η_r), correspondente à razão entre a viscosidade da suspensão e a viscosidade do solvente puro, para facilitar a comparação entre meios líquidos.

Modelos mais antigos assumem a existência de uma concentração máxima de sólidos a partir da qual os sólidos incompressíveis impediriam o fluxo (ZHU; WANG; PENG, 2017). Ao contrário, porém, observa-se a variação do regime reológico da suspensão, com o aparecimento da tensão de escoamento e da caracterização da suspensão como comportamento não-Newtoniano (COUSSOT; ANCEY, 1999).

O Modelo de Interferência (DAMINELI et al., 2016) propõe estimar a viscosidade de uma suspensão a partir da mobilidade espacial determinada pelo tamanho das partículas e a distância disponível entre elas. Apesar de seus resultados serem relativos, dependentes da técnica de ensaio tem a principal vantagem de prever

a viscosidade das suspensões a partir de sua caracterização física (granulometria, área superficial e concentração de partículas) (PILEGGI et al., 2000).

Para a utilização do modelo, é necessário definir a distância média de separação entre as partículas (IPS – Interparticle Separation), conforme Equação 1 (FUNK; DINGER, 1994). Esse parâmetro é inversamente proporcional à área superficial volumétrica das partículas (VSA), à fração volumétrica dos sólidos (Vs) e à fração de poros em condição máxima de empacotamento (Pof).

$$IPS = \frac{2}{VSA} \frac{1}{V_s} - \frac{1}{1 - P_{of}} \quad (1)$$

O IPS é inversamente proporcional à viscosidade de suspensão, uma vez que seu aumento indica maior mobilidade entre partículas e, conseqüentemente, menos interação e menor dissipação de energia (OLIVEIRA et al., 2000). A viscosidade, então, é influenciada pela relação entre o IPS e o diâmetro das partículas, uma vez que essa está relacionada à mobilidade e à dissipação de energia por choque entre partículas. Considerando que materiais geomecânicos são, raramente, monomodais, é aplicável o uso do modelo de interferência para sistemas multimodais. Para estender o uso do modelo monomodal do Modelo de Interferência para uma suspensão formada por partículas com uma distribuição granulométrica mais graduada é preciso considerar que cada partícula interage somente com outras de dimensões 10 vezes maior ou menor. Assim, cada partícula flui dentro de uma sub-suspensão, cada qual definida por diâmetros específicos que abrange sua interferência granulométrica imersa na fase líquida da suspensão total (DAMINELI et al., 2016).

Portanto, o comportamento reológico de suspensões concentradas é influenciado, entre outros fatores, pelas forças interparticulares, morfologia, distribuição granulométrica, empacotamento, temperatura e concentração. O IPS visa entender a relação entre estes parâmetros e a resistência do material ao escoamento de maneira simplificada e direta.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho faz uma revisão da literatura das condições de fluxo de suspensões de solos em concentradas em corridas de massa. São analisadas a interação entre as partículas sólidas da suspensão e a influência das características físico-químicas durante o fluxo, e nos parâmetros reológicos dos materiais. São também analisados diferentes geometrias de reometria rotacional, que permitem a descrição do comportamento durante o fluxo por parâmetros reológicos.

Observa-se que a interação entre as partículas sólidas durante o fluxo é um fator importante para o seu desenvolvimento. A tensão de escoamento de suspensões de minerais em água, como as suspensões de rejeitos, depende das propriedades físicas da mistura e o tipo de magnitude das forças interparticulares. Assim, é razoavelmente prevista na literatura a partir de características como granulometria, fração volumétrica de sólidos, forças inter-particulares, raio de curvatura dos contatos entre as partículas, dentre outros.

Para partículas abaixo de 1 µm, portanto a fração argila, o movimento Browniano se torna notável, o que resulta em elasticidade e efeitos de taxa de cisalhamento. Durante o fluxo ocorre maior orientação para partículas menores e com menos ligações iônicas, e seu empacotamento é estabilizado na configuração face a face pelas repulsões entre camadas duplas elétricas.

Além disso, são apresentados modelos de previsão de comportamento reológico que podem ser úteis para a previsão de parâmetros (tensão de escoamento e viscosidade), se bem aplicados. Esses modelos podem ser úteis para a previsão de comportamento de suspensões de diferentes rejeitos ou para a compreensão dos diferentes fatores que influenciam o fluxo de rejeitos. Porém, destaca-se que é indicado a utilização de ensaios reológicos adequados para a determinação de parâmetros reológicos de suspensões de rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à GEOCOBA, à Universidade de São Paulo (USP), ao Laboratório de Microestruturas (LME-USO) e ao Geoinfra-USP pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU, Bérengère; BONN, Daniel; MEUNIER, J. *Nonlinear rheology of Laponite suspensions under an external drive*. *J. Rheol.*, [S. l.], v. 979, n. 47, 2003.
- ALEJO, BONIFACIO; BARRIENTOS, Arturo. *Model for yield stress of quartz pulps and copper tailings*. *International Journal of Mineral Processing*, [S. l.], v. 93, n. 3–4, p. 213–219, 2009. DOI: [10.1016/j.minpro.2009.08.002](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.002).
- ANDREOTTI, Bruno; FORTERRE, Yoel; POULIQUEN, Olivier. *Granular Media - Between Fluid and Solid*. [s.l.] : Cambridge University Press, 2013.
- AU, Pek Ing; HASSAN, Siti; LIU, Jishan; LEONG, Yee Kwong. *Behaviour of laponite gels: Rheology, ageing, pH effect and phase state in the presence of dispersant*. *Chemical Engineering Research and Design*, [S. l.], v. 101, p. 65–73, 2015. DOI: [10.1016/j.cherd.2015.07.023](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.07.023).
- BAIRD, J. C.; WALZ, J. Y. *The effects of added nanoparticles on aqueous kaolinite suspensions. II. Rheological effects*. *Journal of Colloid and Interface Science*, [S. l.], v. 306, n. 2, p. 411–420, 2007. DOI: [10.1016/j.jcis.2006.10.066](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.10.066).
- BUSSIÉRE, Bruno. *Colloquium 2004 : Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches*. [S. l.], v. 1052, p. 1019–1052, 2007. DOI: [10.1139/T07-040](https://doi.org/10.1139/T07-040).
- COCARD, Stéphane; TASSIN, Jean François; NICOLAI, Taco. *Dynamical mechanical properties of gelling colloidal disks*. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 44, n. 3, p. 585–594, 2000. DOI: [10.1122/1.551107](https://doi.org/10.1122/1.551107).
- COUSSOT, P.; ANCEY, C. *Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes*. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, [S. l.], v. 59, n. 4, p. 4445–4457, 1999. DOI: [10.1103/PhysRevE.59.4445](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.4445).
- CZIBULYA, Zsuzsanna; TOMBÁČZ, Etelka; SZEGI, Tamas; MICHÉLI, Erika; ZSOLNAY, Adam. *Standard state of soil dispersions for rheological measurements*. *Applied Clay Science*, [S. l.], v. 48, n. 4, p. 594–601, 2010. DOI: [10.1016/j.clay.2010.03.009](https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.03.009).
- DAMINELI, Bruno L.; JOHN, Vanderley M.; LAGERBLAD, Björn; PILEGGI, Rafael G. *Viscosity prediction of cement-filler suspensions using interference model: A route for binder efficiency enhancement*. *Cement and Concrete Research*, [S. l.], v. 84, p. 8–19, 2016. DOI: [10.1016/j.cemconres.2016.02.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.012).
- DELLA VECCHIA, Gabriele; CREMONESI, Massimiliano; PISANÒ, Federico. *On the rheological characterisation of liquefied sands through the dam-breaking test*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, [S. l.], v. 43, n. 7, p. 1410–1425, 2019. DOI: [10.1002/nag.2905](https://doi.org/10.1002/nag.2905).
- DZUY, Nguyen Quoc; BOGER, D. V. *Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions*. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 321–349, 1983. DOI: [10.1122/1.549709](https://doi.org/10.1122/1.549709).
- ESPÓSITO, Terezinha Jesus. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Tese de Doutorado, [S. l.], p. 363, 2000.
- FLATT, Robert J.; BOWEN, Paul. *Yodel: A yield stress model for suspensions*. *Journal of the American Ceramic Society*, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 1244–1256, 2006. DOI: [10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x).
- FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*. [s.l.: s.n.]. DOI: [10.1007/978-1-4615-3118-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3118-0).
- GUAZZELLI, Élisabeth; POULIQUEN, Olivier. *Rheology of dense granular suspensions*. *Journal of Fluid Mechanics*, [S. l.], v. 852, p. P11–P173, 2018. DOI: [10.1017/jfm.2018.548](https://doi.org/10.1017/jfm.2018.548).
- ISA, Lucio; BESSELING, Rut; SCHOFIELD, Andrew B.; POON, Wilson C. K. *Quantitative Imaging of Concentrated Suspensions Under Flow*. [S. l.], p. 163–202, 2010. DOI: [10.1007/12_2009_38](https://doi.org/10.1007/12_2009_38).
- KWAK, Minkyung; JAMES, David F.; KLEIN, Katherine A. *Flow behaviour of tailings paste for surface disposal*. *International Journal of Mineral Processing*, [S. l.], v. 77, n. 3, p. 139–153, 2005. DOI: [10.1016/j.minpro.2005.06.001](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.06.001).

- LAXTON, Peter B.; BERG, John C. *Relating clay yield stress to colloidal parameters*. Journal of Colloid and Interface Science, [S. l.], v. 296, n. 2, p. 749–755, 2006. DOI: [10.1016/j.jcis.2005.09.061](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.09.061).
- LEONG, Yee Kwong; DU, Mingyong; AU, Pek Ing; CLODE, Peta; LIU, Jishan. *Microstructure of Sodium Montmorillonite Gels with Long Aging Time Scale*. Langmuir, [S. l.], v. 34, n. 33, p. 9673–9682, 2018. DOI: [10.1021/acs.langmuir.8b00213](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00213).
- MACOSKO, Christopher W. *Rheology: Principles, Measurements and Applications*. [s.l.] 1994. DOI: [10.2514/3.15201](https://doi.org/10.2514/3.15201).
- MICHOT, Laurent J.; BARAVIAN, Christophe; BIHANNIC, Isabelle; MADDI, Solange; MOYNE, Christian; DUVAL, Jérôme F. L.; LEVITZ, Pierre; DAVIDSON, Patrick. *Sol-gel and isotropic/nematic transitions in aqueous suspensions of natural nontronite clay. influence of particle anisotropy. 2. gel structure and mechanical properties*. Langmuir, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 127–139, 2009. DOI: [10.1021/la801894a](https://doi.org/10.1021/la801894a).
- OLIVEIRA, Ivone R. De; STUDART, André R.; PILEGGI, Rafael G.; PANDOLFELLI, Victor C. *Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. [s.l.] 2000.
- PAINEAU, Erwan; MICHOT, Laurent J.; BIHANNIC, Isabelle; BARAVIAN, Christophe. *Aqueous suspensions of natural swelling clay minerals*. 2011. Rheological characterization. Langmuir, [S. l.], v. 27, n. 12, p. 7806–7819, 2011. DOI: [10.1021/la2001267](https://doi.org/10.1021/la2001267).
- PEDNEKAR, Sidhant; CHUN, Jaehun; MORRIS, Jeffrey. *Bidisperse and polydisperse suspension rheology at large solid fraction*. arXiv, [S. l.], p. 1–23, 2017. DOI: [10.1122/1.5011353](https://doi.org/10.1122/1.5011353).
- PIGNON, Frédéric; MAGNIN, Albert; PIAU, Jean-Michel. *Thixotropic behavior of clay dispersions: Combinations of scattering and rheometric techniques*. Journal of Rheology, [S. l.], v. 42, n. 6, p. 1349–1373, 1998. DOI: [10.1122/1.550964](https://doi.org/10.1122/1.550964).
- PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C.; FEDERAL, Universidade; UFSCAR, De S. Carlos; WASHINGTON, Rod; KM, Luiz; CARLOS, S. *Um modelo para previsão da viscosidade mínima de suspensões cerâmicas (A new model to predict the minimum viscosity of ceramic suspensions)*. Cerâmica, [S. l.], v. 46, n. 299, p. 160–165, 2000.
- RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. *Floods from tailings dam failures*. Journal of Hazardous Materials, [S. l.], v. 154, n. 1–3, p. 79–87, 2008. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.09.110](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110).
- SARSBY, Robert. *Environmental geotechnics*, [S. l.], 2013. DOI: [10.1680/eg.27527](https://doi.org/10.1680/eg.27527).
- SHAKEEL, Ahmad; KIRICHEK, Alex; CHASSAGNE, Claire. *Rheology and yielding transitions in mixed kaolin/bentonite suspensions*. Applied Clay Science, [S. l.], v. 211, n. June, p. 106206, 2021. DOI: [10.1016/j.clay.2021.106206](https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106206).
- TEH, E. Jen; LEONG, Y. K.; LIU, Y.; FOURIE, A. B.; FAHEY, M. *Differences in the rheology and surface chemistry of kaolin clay slurries: The source of the variations*. Chemical Engineering Science, [S. l.], v. 64, n. 17, p. 3817–3825, 2009. DOI: [10.1016/j.ces.2009.05.015](https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.05.015).
- VALENCIA, Gabriela Araújo. *Estudo das características de dispersão de suspensões de carbonato de cálcio*. São Paulo. 2017. [S. l.], 2017.
- YU, Dayu; TANG, Liyu; CHEN, Chongcheng. *Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain*. Natural Hazards and Earth System Sciences, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 727–741, 2020. DOI: [10.5194/nhess-20-727-2020](https://doi.org/10.5194/nhess-20-727-2020).
- ZHU, Zhongfan; WANG, Hongrui; PENG, Dingzhi. *Dependence of sediment suspension viscosity on solid concentration: A simple general equation*. Water (Switzerland), [S. l.], v. 9, n. 7, 2017. DOI: [10.3390/w9070474](https://doi.org/10.3390/w9070474).