

ANA LUIZA MENDES HALABI

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE SUSPENSÕES  
CONCENTRADAS EM MOMENTOS REOLÓGICOS  
REPRESENTATIVOS DO ESCOAMENTO PÓS RUPTURAS DE  
BARRAGENS DE REJEITOS

SÃO PAULO  
2024

ANA LUIZA MENDES HALABI

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE SUSPENSÕES  
CONCENTRADAS EM MOMENTOS REOLÓGICOS  
REPRESENTATIVOS DO ESCOAMENTO PÓS RUPTURAS DE  
BARRAGENS DE REJEITOS

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título Mestre em  
Ciências

Área de concentração: Engenharia  
Geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano  
Pileggi

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Massao  
Futai

São Paulo  
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de janeiro de 2024

Assinatura do autor: Ana Halabi

Assinatura do orientador: Rafael G. Pileggi

#### Catálogo-na-publicação

Halabi, Ana Luiza Mendes

Caracterização Reológica De Suspensões Concentradas Em Momentos Reológicos Representativos Do Escoamento Pós Rupturas De Barragens De Rejeitos / A. L. M. Halabi -- versão corr. -- São Paulo, 2024.  
260 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Rejeitos de Mineração 2.Reologia de rejeitos 3.Fluidos não newtonianos  
4.Dam Break I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, contribuem e inspiram meu percurso acadêmico.

À minha família, em especial minha mãe Ana Paula e meu pai William, pelo constante apoio, incentivo e compreensão ao longo desta jornada. Vocês foram minha fonte de força nos momentos desafiadores.

A meus amigos, pelo apoio e pelas experiências maravilhosas compartilhadas. A Jéssica, Carol e Mari por estarem comigo desde sempre. Isabela, Fernanda, Mateus e Wesley, por me apoiarem nas minhas decisões desde o meu início na engenharia civil da UFMG. Ao Luigi, por me escutar e me apoiar nas minhas decisões acadêmicas.

Ao meu orientador Prof. Rafael Pileggi, pela orientação, suporte e aprendizado ao longo deste processo de pesquisa.

Ao meu coorientados Prof. Massao Futai, pelo apoio e aprendizado em geotecnia.

Ao Victor pela ajuda, auxílio e, principalmente, pela amizade durante os anos de mestrado.

À Luísa, por sempre estar presente nesse mestrado, pelas conversas sérias e pelas risadas.

Aos colegas do LME, em especial à S-25, Alana, Gabriel, Nathália, Amanda e Tati, pelas risadas mesmo durante a pandemia.

Aos colegas do GEOINFRA, à Sílvia e ao Adrian, pelo suporte e conversas.

A todos do LMS, grandes companheiros e colegas nessa jornada. Em especial aos técnicos, Antônio e Val, pela ajuda, aprendizado e conversas.

Aos meus professores da EP-USP, pelo conhecimento transmitido, pela orientação cuidadosa e pelo estímulo contínuo ao meu crescimento acadêmico e pessoal.

À Wandrea por todo o apoio na burocracia da pós graduação.

*"Quando acordei hoje de manhã, eu sabia quem eu era,  
mas acho que já mudei muitas vezes desde então"*

**Lewis Carroll**  
**Alice no País das Maravilhas**

## RESUMO

O desenvolvimento de uma engenharia baseada em riscos requer o entendimento da segurança e das possíveis consequências em casos de falhas de estruturas de grande porte, entre elas, as barragens de rejeitos de mineração. Assim, é necessária a previsão de mapas de inundação, que preveem as prováveis consequências em casos de colapso.

As rupturas de barragens de rejeitos originam um movimento de corrida de massa a altas velocidades, que pode ser descrito como um fluxo do material liquefeito. Uma possibilidade para a explicação deste comportamento é a utilização de modelos reológicos e a utilização de ensaios de reometria rotacional para definir parâmetros que permitam simular seu comportamento pós ruptura.

Pouco ainda é definido acerca dos métodos de ensaio para a determinação desses parâmetros reológicos para simulação. As diferentes geometrias, tipo de ensaio e escala devem ser consideradas na realização de ensaios para a simulação do fluxo de rejeitos. Porém, pouco se sabe da diferença da aplicabilidade desses métodos para materiais de diferentes comportamentos reológicos.

Este trabalho, então, aplica diferentes métodos de reometria para avaliação de parâmetros reológicos e do comportamento de materiais em escoamento. Assim, pretende-se explorar técnicas de reometria rotacional propostas para descrever os momentos reológicos que se desenvolvem durante o escoamento de rejeitos a alta velocidade. Para isso foram utilizados quatro materiais com comportamentos reológicos diferentes – bentonita, caulim e dois rejeitos de minério de ferro, que foram estudados em ensaios de reometria rotacional com geometria placa-placa.

Os resultados demonstram a grande variabilidade do comportamento reológico dos diferentes materiais, em relação aos diferentes tipos de ensaio.

**Palavras-chaves:** rejeitos de mineração; reologia de rejeitos; fluidos não newtonianos; mapa de inundação.

## ABSTRACT

The development of risk-based engineering requires an understanding of safety and the possible consequences in cases of failure of large structures, including mining tailings dams. Therefore, it is necessary to forecast potential flood maps, which predict the likely consequences in cases of collapse.

Tailings dam failures give rise to a mass rushing movement at high speeds, which can be described as a flow of liquefied material. One possibility to explain this behavior is the use of rheological models and the use of rotational rheometry tests to define parameters that allow simulating its post-rupture behavior.

Little is still defined about the test methods for determining these rheological parameters for simulation. The different geometries, type of test and scale must be considered when carrying out tests to simulate the waste flow. However, little is known about the applicability of these methods to materials with different rheological behaviors.

This work, then, applies different rheometry methods to evaluate rheological parameters and the behavior of materials in flow. Thus, the aim is to study the rheological moments that develop during high-speed waste flow, in materials from different rheological families. For this, four materials were defined – bentonite, kaolin and two iron ore tailings, which were studied in rotational rheometry tests with plate-plate geometry.

The results demonstrate the great variability of the rheological behavior of the different materials, in relation to the different types of tests.

**Keywords:** tailings; tailings rheology; non-newtonian fluids; dam break.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVO .....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS NA LITERATURA.....	22
2.2 FLUXO DE SUSPENSÕES CONCENTRADAS EM CORRIDAS DE MASSA	25
2.2.1 Interação entre as partículas sólidas da suspensão .....	26
2.2.2 Influência da granulometria no fluxo .....	29
2.2.3 Distância de separação entre partículas durante o fluxo .....	30
2.3 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE REJEITOS LIQUEFEITOS EM FLUXO .....	32
2.2 REOLOGIA DE SUSPENSÕES.....	34
2.2.1 Modelos Reológicos.....	35
2.2.2 Caracterização reológica de suspensões por reometria rotacional.....	38
2.2.3 Ensaio de reologia de rejeitos na mineração .....	47
2.3 MOMENTOS REOLÓGICOS EM CORRIDAS DE MASSA .....	51
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>58</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS PARTÍCULAS.....	59
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	62
3.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS SUSPENSÕES.....	63
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>68</b>
4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES.....	68
4.1.1 Caracterização dos solos pelo sistema SUCS .....	68
4.1.2 Mineralogia dos materiais estudados.....	70
4.1.3 Distância média de separação das partículas (IPS) das suspensões.....	74



4.2	AVALIAÇÃO DO PROTOCOLO DE PRÉ-CISALHAMENTO.....	76
4.2.1	Repetibilidade de Ensaios Oscilatórios de Tensão do Caulim .....	76
4.2.2	Repetibilidade de Ensaios Oscilatórios de Tensão de Rejeito de Minério de Ferro em Granulometria Fina .....	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS MATERIAIS GEOMECÂNICOS PUROS .....	87
4.3.1	Oscilatório de deformação .....	87
4.3.2	Oscilatório de tensão .....	91
4.3.3	Oscilatório de Frequência .....	97
4.3.4	Oscilatório de Tempo .....	101
4.4	COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DE TENSÃO E DE DEFORMAÇÃO .....	104
4.5	ENSAIOS DE FLUXO .....	110
4.5.1	Avaliação do comportamento de materiais durante o fluxo.....	112
4.5.2	Avaliação dos parâmetros reológicos obtidos por ensaios de fluxo .....	121
4.6	COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DO IPS..	127
4.7	AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDA DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DE DEFORMAÇÕES E DE TENSÕES .....	132
4.8	EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES VISCOPLÁSTICAS NO ENSAIO DE OSCILATÓRIO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO .....	140
4.9	INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE REOLOGIA NOS MOMENTOS REOLÓGICOS DE CORRIDAS DE MASSA.....	155
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>161</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>164</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>178</b>
	ANEXO A - GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS DE REJEITO .....	179
A.2	POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO	
	188	

A.2.1	Mapa de Inundação .....	191
A.2.2	Barragens de rejeito no brasil .....	193
ANEXO B – ENSAIOS DE REOLOGIA DE REJEITOS NA LITERATURA .....		197
ANEXO C – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS 200		
ANEXO D – RESULTADOS DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DOS MATERIAIS..		208
D-1)	Resultados Ensaio Oscilatório De Deformação .....	208
D-2)	Resultados Ensaio Oscilatório De Tensões.....	228
D-3)	Resultados Ensaio Oscilatório De Frequência.....	236
D-4)	Resultados Ensaio Oscilatório De Tempo .....	244
ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUXO DOS MATERIAIS.....		252

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Granulometria acumulada típica de alguns rejeitos – obtidas por peneiramento e sedimentação.....	23
Figura 2-2: Classificação dos principais minerais inorgânicos presentes nos solos e nos rejeitos.....	24
Figura 2-3: Decomposição das principais fontes de perturbação de fluxo de suspensões concentradas. (a) movimento das partículas; (b) contato entre partículas.....	29
Figura 2-4: 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.....	30
Figura 2-5: Modelos reológicos clássicos: (1) Newtoniano, (2) de Bingham, (3) pseudoplástico, (4) pseudoplástico com tensão de escoamento, (5) dilatante e (6) dilatante com tensão de escoamento.....	36
Figura 2-6: Geometria típicas de ensaio de reometria rotacional; a) geometria placa-placa; b) geometria <i>vane</i> .....	40
Figura 2-7: Esquemático do procedimento experimental dos diferentes ensaios de rampa: (a) taxa de cisalhamento; (b) taxa de cisalhamento constante; (c) tensão de cisalhamento. ....	41
Figura 2-8: Esquema ilustrativo do ensaio oscilatório com aplicação de deformação senoidal e da obtenção da tensão como resposta defasada. ....	42
Figura 2-9: Resposta do ensaio oscilatório de varredura de tensão para a determinação da tensão de escoamento (pontos A, B e C) e a delimitação das regiões de pequenas, médias e grandes amplitudes (respectivamente SAOS, MAOS e LAOS).....	43
Figura 2-10: Curvas de Lissajous-Bowditch normalizada nas formas elástica, viscosa e plástica puras. A curva azul pertence a um sólido hookeano, a vermelha a um líquido newtoniano e a verde a um plástico ideal.....	45
Figura 2-11: Exemplo de curvas de Lissajous-Bowditch. ....	45
Figura 2-12: Resumo dos principais pontos da revisão bibliográfica de ensaios reológicos de rejeitos na mineração; (a) ano de publicação, (b) aplicação, (c) tipo de ensaio.....	48

Figura 2-13: Condições de escoamento após a ruptura de barragens de rejeitos. ...	51
Figura 2-14: Física simplificada do escoamento de fluxos de corrida de massa.....	54
Figura 3-1: Fluxograma da metodologia de trabalho.....	59
Figura 3-2: Rampa com taxa máxima de cisalhamento diferente e gradiente constante. .....	66
Figura 4-1: Distribuição granulométrica dos materiais estudados: caulim, bentonita e rejeitos finos de minério de ferro. ....	68
Figura 4-2: Classificação dos materiais pela carta de plasticidade de Casagrande. ML = silte de baixa plasticidade; MH = silte de alta plasticidade; CL = argila de baixa plasticidade; CH = silte de alta plasticidade. ....	69
Figura 4-3: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da bentonita; a) <i>dotmap</i> da composição química da bentonita; b) detalhe morfológico de partículas de bentonita. ....	72
Figura 4-4: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do caulim; a) <i>dotmap</i> da composição química do caulim; b) detalhe morfológico de partículas de caulim.....	72
Figura 4-5: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do rejeito de minério de ferro em granulometria fina; a) <i>dotmap</i> da composição química do rejeito; b) detalhe morfológico de partículas de rejeito.....	73
Figura 4-6: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do rejeito de minério de ferro em granulometria total; a) <i>dotmap</i> da composição química do rejeito; b) detalhe morfológico de partículas de rejeito.....	73
Figura 4-7: Registro fotográfico do protocolo de pré-cisalhamento de amostras de caulim em (a) concentração volumétrica de 41%; e (b) concentração volumétrica de 39%. ....	77
Figura 4-8: Resultados de ensaios de verificação de repetibilidade em suspensões de caulim com alto teor de sólidos (a) pré-cisalhamento em concentração de 41%; (b) pré-cisalhamento em concentração de 39%; (c) oscilatório de tensões em concentração de 41%; e (d) oscilatório de tensões em concentração de 39%. .	78
Figura 4-9: Comparação da relação entre a tensão de escoamento obtida no final do protocolo de pré-cisalhamento e a tensão de escoamento obtida no ensaio oscilatório de tensões.....	78
Figura 4-10: Comparação da relação entre a concentração volumétrica os ensaios oscilatórios de tensão para as menores concentrações (28%, 31%, 36% e 37%)	

e as maiores concentrações (39% e 41%) com diferentes protocolos de pré-cisalhamento ( $10s^{-1}/60s$ e $10s^{-1}/600s$ ) com (a) a tensão de escoamento do ensaio oscilatório de tensões e (b) o módulo de armazenamento obtido na região linear. .....	80
Figura 4-11: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino $\Phi = 40\%$ - tensões de cisalhamento na fase de pré-cisalhamento .....	80
Figura 4-12: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com pré-cisalhamento de $1 s^{-1}$ com $\Phi = 40\%$ ....	81
Figura 4-13: Resultado do protocolo de pré-cisalhamento do rejeito de minério de ferro em granulometria fina com $\Phi = 34\%$ .....	83
Figura 4-14: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com diferentes taxas de pré-cisalhamento – $\Phi = 34\%$ .....	84
Figura 4-15: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com diferentes taxas de pré-cisalhamento – $\Phi = 34\%$ .....	86
Figura 4-16: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de deformação para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $Cv=22\%$ ); caulim ( $Cv=37\%$ ), rejeito fino ( $Cv=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz) e faixa de deformação de 0,00001 a 10. ....	89
Figura 4-17: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de deformação para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $Cv=22\%$ ); caulim ( $Cv=37\%$ ), rejeito fino ( $Cv=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz) e faixa de deformação de 0,00001 a 10.....	91
Figura 4-18: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de tensões para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $Cv=22\%$ ); caulim ( $Cv=37\%$ ), rejeito fino ( $Cv=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz). ....	93
Figura 4-19: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de tensão para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $Cv=22\%$ ); caulim ( $Cv=37\%$ ), rejeito fino ( $Cv=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz).....	95

- Figura 4-20: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de frequência para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - com amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS. .... 100
- Figura 4-21: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de frequência para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS..... 100
- Figura 4-22: Exemplo da evolução do  $G'$  e  $G''$  em função do tempo para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS. .... 101
- Figura 4-23: Exemplo de  $\tan(\delta)$  em função do tempo para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS. .... 104
- Figura 4-24: Análise estatística de covariância entre os parâmetros o ensaio oscilatório de deformação (a) da bentonita; (b) do caulim; (c) do rejeito fino; e (d) dos rejeitos totais. Nos gráficos, frequência ( $f$ ) e concentração volumétrica ( $\phi$ ) com os resultados obtidos para módulo de armazenamento ( $G'$ ) tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) e tensão de cisalhamento na transição sólido-líquido ( $\tau_{45^\circ}$ ). .... 106
- Figura 4-25: Análise estatística de covariância entre os parâmetros o ensaio oscilatório de tensão (a) da bentonita; (b) do caulim; (c) do rejeito fino; e (d) dos rejeitos totais. Nos gráficos, frequência ( $f$ ) e concentração volumétrica ( $\phi$ ) com os resultados obtidos para módulo de armazenamento ( $G'$ ) tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) e tensão de cisalhamento na transição sólido-líquido ( $\tau_{45^\circ}$ ). .... 108
- Figura 4-26: Ensaio de Fluxo da bentonita. Comparação entre o fluxo usado como referência (até  $80s^{-1}$ ) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até  $120 s^{-1}$ ). .... 113
- Figura 4-27: Ensaio de Fluxo do Caulim. Comparação entre o fluxo usado como referência (até  $80s^{-1}$ ) e um ensaio de fluxo de interesse (variável por concentração da suspensão)..... 116

Figura 4-28: Ensaio de Fluxo do rejeito de minério de ferro de granulometria fina. Comparação entre o fluxo usado como referência (até $80\text{s}^{-1}$ ) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até $20\text{s}^{-1}$ ). .....	117
Figura 4-29: Ensaio de Fluxo do rejeito de minério de ferro em granulometria total. Comparação entre o fluxo usado como referência (até $80\text{s}^{-1}$ ) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até $20\text{s}^{-1}$ ). .....	120
Figura 4-30: Relação entre (a) tensão de escoamento estática; (b) tensão de escoamento dinâmica; e (c) viscosidade de Bingham com a concentração volumétrica.....	124
Figura 4-31: Área de histerese das suspensões de (a) bentonita; (b) caulim; (c) rejeitos finos; e (d) rejeitos totais, nos Ciclos 01 e 02.....	126
Figura 4-32: Comparação entre a relação entre tensão de escoamento estática e IPS/concentração volumétrica para as frequências de (a) 0,1 Hz; (b) 1 Hz; e (c) 10 Hz. Em que CD = ensaio oscilatório de deformações e CS = ensaio oscilatório de tensões. O eixo do IPS foi invertido para interpretação. ....	128
Figura 4-33: Comparação entre a relação entre $G'$ no SAOS e IPS/concentração volumétrica para as frequências de (a) 0,1 Hz; (b) 1 Hz; e (c) 10 Hz. Em que CD = ensaio oscilatório de deformações e CS = ensaio oscilatório de tensões. O eixo do IPS foi invertido para interpretação. ....	129
Figura 4-34: Avaliação da histerese das suspensões de rejeitos finos e totais pelo IPS das suspensões. ....	131
Figura 4-35: Avaliação da relação entre a tensão de escoamento (linha sólida) e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido (linha tracejada) com a concentração volumétrica, para as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz) dos ensaios oscilatórios de deformação.....	134
Figura 4-36: Avaliação da diferença da tensão cisalhante medida no ensaio oscilatório de deformação entre a tensão de escoamento e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido para (a) bentonita; (b) caulim; (c) rejeito de minério de ferro fino; e (d) rejeito de minério de ferro totais, para as diferentes concentrações volumétricas e as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz).....	135
Figura 4-37: Avaliação da relação entre a tensão de escoamento (linha sólida) e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido (linha tracejada) com a concentração volumétrica, para as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz) dos ensaios oscilatórios de tensão.....	136

Figura 4-38: Comparação direta dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de tensão (CS) e de deformação (CD) para as duas argilas, caulim e bentonita, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.....	138
Figura 4-39: Comparação direta dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de tensão (CS) e de deformação (CD) para os dois rejeitos de minério de ferro, finos e totais, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz. .	139
Figura 4-40: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de bentonita. ....	141
Figura 4-41: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformações em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de bentonita. .	143
Figura 4-42: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de caulim.....	144
Figura 4-43: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de caulim. ....	145
Figura 4-44: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro fino. ....	146
Figura 4-45: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro fino. ....	148
Figura 4-46: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total.....	149
Figura 4-47: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total.....	150
Figura 4-48: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de bentonita. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica. ....	151
Figura 4-49: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de caulim. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica. ....	152
Figura 4-50: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em	



granulometria fina. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica. ....	154
Figura 4-51: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica. ....	155
Figura 4-52: Comparação direta da tensão de escoamento estática e da viscosidade aparente obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de deformação (CD) e os ensaios de fluxo no primeiro ciclo na aceleração (C1) e segundo ciclo na desaceleração (C2) para as duas argilas, caulim e bentonita, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz. ....	158
Figura 4-53: Comparação direta da tensão de escoamento estática e da viscosidade aparente obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de deformação (CD) e os ensaios de fluxo no primeiro ciclo na aceleração (C1) e segundo ciclo na desaceleração (C2) para os dois rejeitos, finos e totais, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz. ....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Características principais das geometrias de reômetros rotacionais aplicáveis a suspensões concentradas.....	40
Tabela 3-1: Umidade e teor de sólidos volumétrico das suspensões estudadas. ....	63
Tabela 3-2: Resumo dos protocolos adotados, apontando a variável controlada e o momento reológico descrito (Mobilização – M, Transporte – T e Deposição – D). .....	67
Tabela 4-1: Parâmetros de caracterização física dos materiais secos: densidade, área superficial específica, limite de liquidez, limite de liquidez em concentração volumétrica e índice de plasticidade. ....	69
Tabela 4-2: Resultados da Fluorescência de Raios -X dos Materiais. ....	70
Tabela 4-3: Cálculo da distância entre partículas IPS por diferentes autores. ....	75
Tabela 4-4: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos com $\Phi = 40\%$ com protocolo de pré-cisalhamento.....	82
Tabela 4-5: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos de umidade com $\Phi = 34\%$ com protocolo de pré-cisalhamento. .....	84
Tabela 4-6: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos de umidade com $\Phi = 34\%$ sem protocolo de pré-cisalhamento e com gabarito. ....	86
Tabela 4-7: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de bentonita. ....	96
Tabela 4-8: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de caulim.....	96
Tabela 4-9: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina. ....	97
Tabela 4-10: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total. ....	97

# 1. INTRODUÇÃO

Os rejeitos de mineração são os resíduos resultantes do beneficiamento do minério e, em geral, consistem em um material granular fino, saturado, com metais e reagentes de processamento dissolvidos. Devido à preocupação com o meio ambiente e com a segurança, esses materiais são geralmente armazenados em grandes estruturas de engenharia. Os rejeitos são, em geral, depositados em barragens de rejeitos e, mais atualmente, pilhas.

Atualmente, existem mais de 600 barragens de mineração no Brasil, que contém rejeitos ou sedimentos depositados hidraulicamente em estado fofo. A segurança dessas estruturas, e seus sistemas internos, são âmbito de estudo da geologia, da geotecnia e da hidráulica. Porém, o desenvolvimento de uma engenharia baseada nos riscos, motivada por rupturas recentes de barragens de rejeitos - a Barragem de Fundão, Mariana-MG, em 2016 (MORGENSTERN et al., 2016) e da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, Brumadinho-MG, em 2019 (ROBERTSON et al., 2019a) -, demonstra uma necessidade do entendimento do comportamento dos rejeitos após a sua ruptura.

O mapa de inundação potencial dessas estruturas é obtido a partir da modelagem no estudo de *dam break*, e delimita áreas potencialmente afetadas no caso de colapso da estrutura. A partir desse, espera-se prever as consequências de possíveis acidentes, o que auxilia na tomada de decisões quanto à segurança da barragem e no planejamento de planos de notificação e evacuação de áreas afetadas.

As barragens de rejeito, após colapso, podem gerar corrida de lama artificial com alta energia potencial (YU; TANG; CHEN, 2020). As corridas de massa, movimentos rápidos de solos como as rupturas de barragens de rejeitos e os deslizamentos de terra, são movimentos que podem ser considerados como fluxos compostos pela suspensão dos grãos de solo em água. Estas ocorrem devido à redução drástica da resistência ao cisalhamento após o rompimento, o que pode levar ao comportamento fluido dos materiais.

Observa-se que esses materiais liquefeitos em corridas de massas e rupturas de barragens de rejeitos apresentam comportamento que pode ser descrito por modelos

reológicos. A RESOLUÇÃO Nº 95, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2022 (ANM, 2022) assim, e exige que seja realizada a caracterização reológica do material que pode ser mobilizado para a modelagem da ruptura hipotética de barragens de rejeito de mineração.

A caracterização reológica dessas suspensões concentradas 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). Devido à complexidade do comportamento reológico de suspensões, porém, observa-se a necessidade de maiores estudos para o desenvolvimento de técnicas de ensaio que melhor simulem o fluxo de rejeitos.

As técnicas experimentais utilizadas para a determinação das propriedades reológicas de um material, como a sua viscosidade e a sua tensão de escoamento, devem variar conforme as características das partículas e o teor de sólidos (BOGER, 2009). Deve ser observado, ainda, que os valores dessas propriedades são dependentes da geometria utilizada e do tipo de excitação. Por isso, é necessário definir geometrias e técnicas de ensaio que melhor representem o comportamento dos materiais durante o desenvolvimento de corridas de massa.

Estudos anteriores tentaram estudar o fenômeno de escoamento pós ruptura de barragem de rejeitos a partir do uso de diferentes métodos de ensaios reológicos (SAKANO, 2022). Porém, os métodos foram aplicados em apenas um material, e não consideram as diferenças de comportamento reológicos dos solos, e dos rejeitos, devido à sua variabilidade físico-química. Assim, vê-se necessário avaliar como diferentes materiais se comportam nos ensaios de reologia.

O tamanho dos grãos, e as características de superfície dos rejeitos, podem influenciar na possibilidade de utilização de ensaios reológicos nos materiais (MACOSKO, 1994). Assim, é importante estudar diferentes materiais sobre os ensaios reológicos para auxiliar a interpretação de diferentes comportamentos dos materiais. Além disso, é necessário estudar a possibilidade da aplicação de um ensaio reológico único para a definição de parâmetros para todas as famílias de rejeitos.

A utilização de diferentes tipos de ensaios em diferentes famílias de rejeitos também possibilita a análise da diferença de comportamento reológico durante o escoamento dos rejeitos pós colapso. Para isso, a resposta dos diferentes materiais às solicitações dos ensaios deve ser analisada em conjunto. Assim, visa-se a generalização do entendimento dos diferentes momentos reológicos durante o fluxo (SAKANO, 2022) para materiais com plasticidade diferentes.

Este trabalho, então, propõe a aplicação de diferentes técnicas de reometria para materiais com comportamentos reológicos diferentes. Assim, procura-se generalizar o uso dos ensaios reológicos para simular o escoamento pós ruptura para diferentes famílias de rejeitos.

### 1.1 OBJETIVO

Este trabalho visa caracterizar o comportamento reológico de suspensões concentradas com comportamentos reológicos diferentes visando auxiliar na compreensão do comportamento em fluxo do escoamento pós rupturas de barragens de rejeitos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mineração é um setor que historicamente trouxe grande contribuição para o desenvolvimento do Brasil a partir da geração de riquezas. Porém, o aumento da consciência ecológica gerou a necessidade de armazenamento seguro dos rejeitos de mineração, para se buscar a minimização dos impactos ambientais do setor. Os rejeitos de mineração são comumente armazenados em barragens de rejeitos, que porém podem apresentar consequências elevadas em caso de ruptura (HALABI et al. 2022) e que devem ser mais bem estudados e avaliados.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS NA LITERATURA

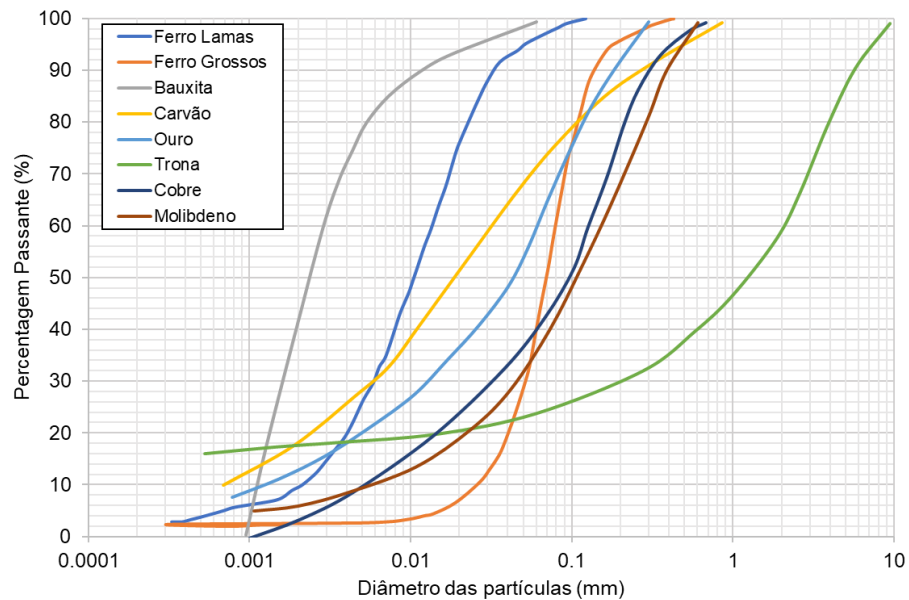
Os rejeitos de mineração são materiais bastante utilizados na construção de estruturas da mineração. Estes materiais são provenientes do beneficiamento do minério, e resultam em diferentes materiais a depender das características do material lavrado e do processamento mineral. Porém, a sua falta de coesão 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  $\mu\text{m}$  (BUSSIÈRE, 2007). Outros rejeitos apresentam granulometria mais fina relacionada à sua origem e processamento, como a lama-

vermelha resultante do processamento do alumínio. A Figura 2-1 apresenta a granulometria típica de alguns rejeitos encontrados na literatura.

Figura 2-1: Granulometria acumulada típica de alguns rejeitos – obtidas por peneiramento e sedimentação.



Fonte: (GUIMARÃES; VALADÃO; PERES, 2012; SARSBY, 2013) Adaptado pela Autora.

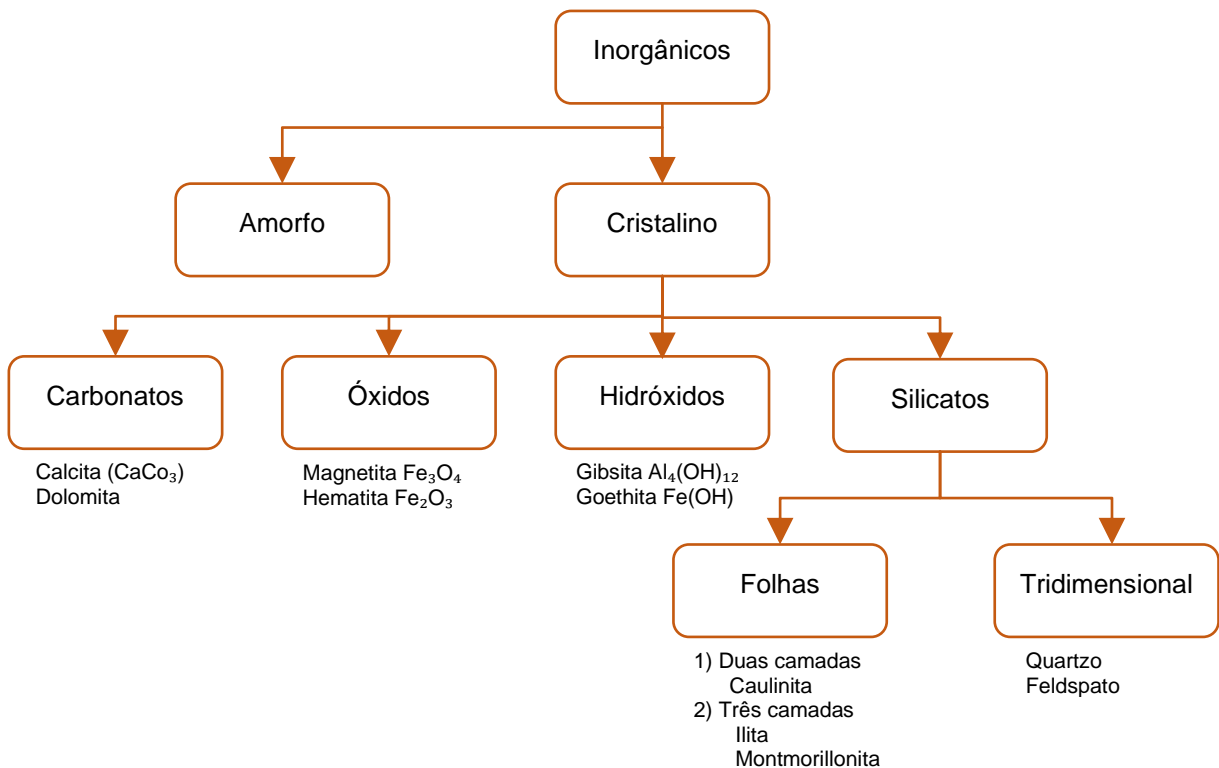
Além do processamento do material, a granulometria dos rejeitos ainda está bastante relacionada às diferentes técnicas de deposição. Dentre elas, destacam-se a deslamagem, em que a fração grossa é separada pela ciclonação para a construção do maciço, enquanto a fração fina é retida atrás deste (SARSBY, 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, conseqüentemente 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 compactação fofa devido ao adensamento sob peso próprio.

Os rejeitos podem apresentar mineralogia bastante variável a depender do processamento mineral e da rocha matriz, mas suas características físico-químicas ainda podem ser interpretadas como os minerais naturais. Minerais são elementos ou compostos químicos inorgânicos formados por processos geológicos e definidos por compósitos químicos e estruturas atômicas, e podem ser classificados pelo arranjo atômico atômica em cristalinos (mais comuns) ou amorfos. Além disso, os minerais podem ser classificados pela natureza de seus átomos em carbonatos, óxidos, óxidos hidratados, fosfatos ou silicatos, sendo os últimos os mais abundantes na superfície da Terra (MASSAD, 2012). A Figura 2-2 apresenta as principais classificações dos minerais cristalinos em relação à natureza do átomo e à estrutura dos silicatos, e a posição de alguns minerais de interesse. As folhas e estruturas tridimensionais são mais resistentes ao intemperismo e, por isso, mais comuns nos solos (LAMBE; WHITMAN, 1968).

Figura 2-2: Classificação dos principais minerais inorgânicos presentes nos solos e nos rejeitos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os argilominerais, como as caulinitas e as esmectitas, são silicatos que apresentam estruturas em folhas (com duas e três camadas, respectivamente). Suas estruturas podem apresentar deficiências de cargas ou distorções devido a substituições



isomórficas no arranjo atômico (MASSAD, 2012). As partículas de solos apresentam cargas elétricas devido à combinação de substituições isomórficas, dissociação dos íons hidroxila da superfície, ausência de íons no cristalino, adsorção aniônica e presença de matéria orgânica, sendo o primeiro o fator de maior importância (LAMBE; WHITMAN, 1968).

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  $1\mu\text{m}$ . Assim, na mecânica dos solos, as argilas apresentam superfícies específicas de 5 a  $800\text{ m}^2/\text{g}$ , enquanto siltes apresentam superfícies específicas de menos de  $1\text{m}^2/\text{g}$  (LAMBE; WHITMAN, 1968).

Devido às cargas superficiais nas partículas de solo coloidais, é observada a formação da camada dupla – um conjunto de íons e moléculas de água hidratados na superfície da partícula. O limite de liquidez é um ensaio bastante difundido na engenharia geotécnica por indicar indiretamente e de forma barata as características de retenção de água nos solos. Isso porque ele determina de uma resistência ao cisalhamento dos solos, que dependem primariamente das forças atrativas entre as partículas dos solos. Portanto, o limite de liquidez é afetado, entre outros, pela capacidade de troca catiônica, os tipos de cátions nos poros e área específica das partículas (MASSAD, 2012).

## 2.2 FLUXO DE SUSPENSÕES CONCENTRADAS EM CORRIDAS DE MASSA

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).

### 2.2.1 Interação entre as partículas sólidas da suspensão

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 ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ). Nota-se aqui, que  $\phi_{m\acute{a}x}$  poderia ser estimado a partir da porosidade teórica mínima do material (1-porosidade). Além disso, partículas finas, e com área específica elevada, causa 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; SIMON; GRABINSKY, 2013; SOFRÁ; BOGER, 2002; 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 (DAMINELLI et al., 2016). 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).

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 quando as tensões de cisalhamento são superiores à tensão de escoamento (ABOU; BONN; MEUNIER, 2003; AU et al., 2015; BAIRD; WALZ, 2007; COCARD; TASSIN; NICOLAI, 2000; LEONG et al., 2018; PAINEAU et al., 2011; PIGNON; MAGNIN; PIAU, 1998).

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; BERG, 2006; TEH et al., 2009).

Em casos de fluxo em corridas de massa, porém, observamos que o material passa por uma transição entre o comportamento mais sólido para mais líquido quando a tensão de escoamento é ultrapassada. Em uma curva de fluxo em suspensões de sedimentos finos, Besso e Campos (2019) observam que essa transição é de um *creep* (rápido aumento da tensão de cisalhamento devido a baixos incrementos em taxa de cisalhamento) para um regime de fluxo (em que o fluxo é estabelecido e as tensões de cisalhamento se desenvolvem em variações muito menores com o tempo).

A viscosidade é um parâmetro fundamental na compreensão das corridas de massa uma vez que está relacionada à fluidez dos solos, e conseqüentemente a mobilidade do fluxo e os riscos associados (DE CAMPOS; GALINDO, 2016). 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 (SHAKEEL; KIRICHEK; CHASSAGNE, 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).

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  $\mu\text{m}$ , 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.

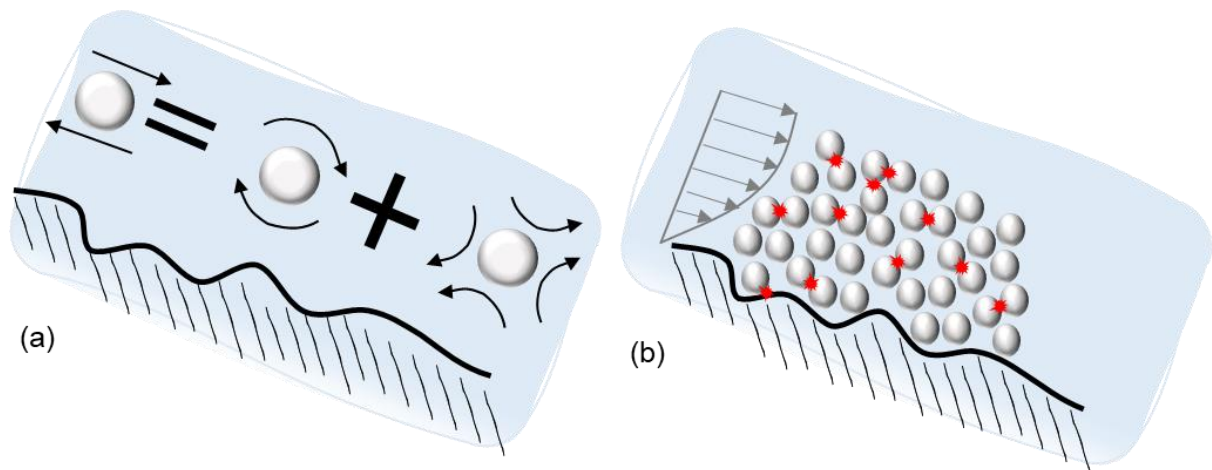
Para as suspensões concentradas estão presentes as interações hidrodinâmicas e forças de lubrificação, além da interação dos contatos friccionais das partículas de maneira similar a meios granulares secos (GUAZZELLI; POULIQUEN, 2018). A fricção, portanto, se torna uma questão central para a compreensão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

As forças hidrodinâmicas e de lubrificação tornam-se 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; FORTERRE; 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 2-3 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 2-3: 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.

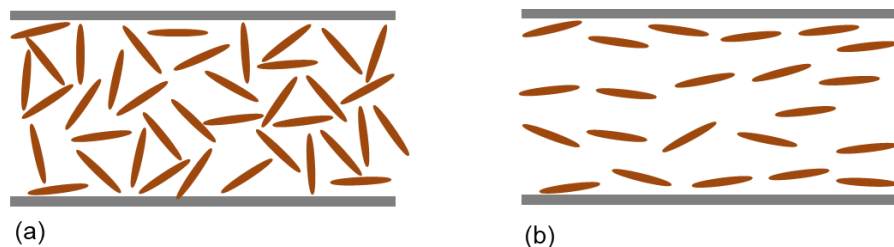
### 2.2.2 Influência da granulometria no fluxo

A granulometria influencia no comportamento do material, uma vez que para partículas abaixo de 1  $\mu\text{m}$ , 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 et al., 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 2-4. Algumas argilas, como a laponita, ainda apresentam comportamento dependente do *gap*, devido a ocorrência de cisalhamento não-homogêneo (formação de bandas e escorregamento de paredes) (LIN et al., 2020).

Figura 2-4: 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.

### 2.2.3 Distância de separação entre partículas durante o fluxo

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 ( $\eta_r$ ), 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 2-1 (FUNK; DINGER, 1994). Esse parâmetro é inversamente proporcional à área superficial volumétrica das partículas (VSA), à fração volumétrica dos sólidos ( $V_s$ ) e à fração de poros em condição máxima de empacotamento ( $P_{of}$ ).

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

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 partículas 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.

### 2.3 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE REJEITOS LIQUEFEITOS EM FLUXO

A modelagem da mancha de inundação e a determinação da distância de inundação (*runout*) e volume escoado superficialmente (*runoff*) de movimentos de massa é necessário para a delimitação de consequências em caso de rupturas hipotéticas. Essa modelagem, porém, não é simples, uma vez que o fluido dos rejeitos pós colapso apresenta comportamento complexo.

Alguns autores (CONCHA LARRAURI; LALL, 2018) tentaram estimar os parâmetros associados às rupturas de rejeitos (como o volume liberado, a distância de vazão de pico e a distância de final do escoamento) a partir da geometria da barragem, analogamente à metodologia aplicada a barragens de retenção de água. Além disso, diferentes correlações estatísticas foram encontradas entre volumes mobilizados em movimentos de massa, incluindo de deslizamentos de encosta e rupturas de barragens de rejeitos, e a área afetada (GHAHRAMANI et al., 2020).

Porém, devido à maior complexidade desse tipo de movimentos de massa, em razão, entre outras, do comportamento reológico dos materiais e do modo de ruptura, os autores observam que os erros podem ser significantes e que essa metodologia só deveria ser utilizada para uma análise de risco preliminar. Para o caso de barragens de rejeitos, pode-se considerar que o grande volume mobilizados e a grande área passível de inundação (CONCHA LARRAURI; LALL, 2018; GHAHRAMANI et al., 2020; RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008) faz com que os erros possam ter custos elevados – tanto em casos de sub ou de sobredimensionamento. Assim, é importante a estimativa assertiva de danos potenciais associados a essas estruturas.

O comportamento desses materiais liquefeitos ou após a ruptura, porém, é de conhecimento restrito. Os ensaios utilizados para a definição dos parâmetros



reológicos que devem ser modelados para estes ensaios não podem ser definidos de maneira assertiva com base na literatura.

Estudos anteriores tentaram entender os diferentes momentos durante o escoamento pós ruptura de barragem de rejeitos a partir do uso de diferentes métodos de ensaios reológicos (SAKANO, 2022), limitado, porém a somente um material. Além disso, pouco é definido quanto a natureza reológica dos diferentes tipos de rejeitos, e sua influência no escoamento pós colapso. Assim, é importante entender os possíveis comportamentos reológicos destes materiais em fluxo, e das técnicas de reometria aplicáveis para a simulação do escoamento.

Para a realização de simulações de rupturas hipotéticas, é necessária a determinação de parâmetros reológicos para os rejeitos liquefeitos que, inseridos em modelo numérico, simulem de maneira satisfatória o comportamento real do evento. O material, durante a corrida de massa, pode ser representado como fluido viscoplásticos, com comportamento de corpo rígido até que se atinja a tensão de cisalhamento de escoamento, e de fluxo com viscosidade plástica após se ultrapassar essa tensão.

Uma maneira comum para descrever esse comportamento é a partir da equação de Bingham, utilizada por diversos autores para corridas de massa e rupturas hipotéticas de barragens de rejeito (COUSSOT; LEONOV; PIAU, 1992; DE ALBA; BALLESTERO, 2006; HAN; WANG, 2002; JEYAPALAN; DUNCAN; SEED, 1983; MELO, 2014; RIBEIRO, 2015; WHIPPLE et al., 2016). O modelo de Herschel-Bulkley é também bastante estudado como representativo do comportamento desses materiais (BIN et al., 2002; FITTON; CHRYSS; BHATTACHARYA, 2006; FORNES et al., 2017; GHARIB et al., 2017; PELLEGRINO; SCHIPPA, 2018). Modelos granulares também são amplamente utilizados para modelagem, com parâmetros definidos por ensaios triaxiais (PÉREZ-LÓPEZ et al., 2009) ou retroanálise (PASTOR et al., 2004; PIRULLI et al., 2017). Modelos reduzidos ou modelos físicos também tem sido estudados para a compreensão do fluxo de rejeitos liquefeitos em topografias naturais (LAZARIM et al., 2021; SOUZA; TEIXEIRA, 2019; WU; QIN, 2018).

Os parâmetros reológicos são características determinantes nos modelos de propagação de rupturas de barragens de rejeitos (MACHADO, 2017; MARTIN;

FONTAINE; CATHCART, 2015; MOON et al., 2019). A partir da análise de PAE-BMs do quadrilátero ferrífero de 2019, foi observado que 88% não endereçavam os aspectos reológicos dos materiais ou os consideravam de maneira teórica, e em apenas 12% desses estudos os parâmetros foram obtidos através de ensaios (DE PAIVA; DA FONSECA SANTIAGO; DO PRADO FILHO, 2020). Porém, apesar das novas normas exigirem a utilização de reologia de rejeitos (FEAM-MG, 2020) nota-se ainda a necessidade da definição dos parâmetros reológicos apropriados para a modelagem numérica desses materiais (CDA, 2021; DE PAIVA; DA FONSECA SANTIAGO; DO PRADO FILHO, 2020; SAKANO, 2022; SAKANO et al., 2021).

Assim, nota-se a necessidade de avaliação tanto do tipo de modelo mais apropriado para essas rupturas quanto de ensaios que representem de maneira satisfatória o fluxo de rejeitos liquefeitos. Para auxiliar no desenvolvimento desses ensaios, propõe-se o estudo do comportamento reológico desses materiais e a criação de materiais miméticos a rejeitos.

## 2.2 REOLOGIA DE SUSPENSÕES

Os solos são constituídos de três fases (sólidos, água e ar), portanto podem ser compreendidos como uma suspensão concentrada, devido à faixa de concentrações volumétricas em que se apresenta, com comportamento dependente da interação entre essas fases. Suspensões concentradas, comumente definidas como pastas ou fluidos com tensão de escoamento, apresentam propriedades intermediárias entre os sólidos e os líquidos. Esse tipo de material apresenta propriedades físicas similares a sólidos, mas podem se comportar como de modo similar a líquidos conforme a excitação, atingindo uma forma final após esta é cessada.

O estudo do comportamento dos materiais geomecânicos em fluxo, então, tem sinergia com a reologia, pois seu comportamento se encontra intermédio entre sólidos e líquidos. Esta é, afinal, a ciência responsável pelo estudo da deformação ou escoamento da matéria quando submetida a esforços originados de forças externas. O comportamento reológico dos materiais, portanto, é representado pelas suas propriedades reológicas, sendo as principais para o fluxo de rejeitos a tensão de escoamento e a viscosidade.

### 2.2.1 Modelos Reológicos

São dois os materiais ideais da reologia clássica, sendo esses o sólido elástico, descrito primariamente por sua elasticidade, e o fluido viscoso, descrito por sua viscosidade (STEFFE, 1996). Para este trabalho, maior atenção é dada ao estudo do comportamento dos fluidos não newtonianos com tensão de escoamento, modelos que melhor descrevem o comportamento de suspensões.

O fluxo de matéria pode ser dividido em hidráulico (turbulento), viscoso (linear) ou plástico. Além disso, eles podem ser classificados como ideais, com viscosidade igual a zero, ou reais, que desenvolvem tensões de cisalhamento durante o movimento de massa. Os fluidos reais ainda divididos em newtonianos ou não-Newtonianos.

Os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam comportamento regido pela lei de viscosidade de Newton, apresentada na Equação 2-2, em que a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) desenvolvida pelo fluxo varia linearmente com a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) multiplicada pela constante definida como viscosidade do líquido ( $\mu$ ). Assim, a viscosidade seria uma característica intrínseca e constante no material, que não varia com a taxa de cisalhamento aplicada, ao tempo de aplicação dessa taxa, à temperatura ou à pressão.

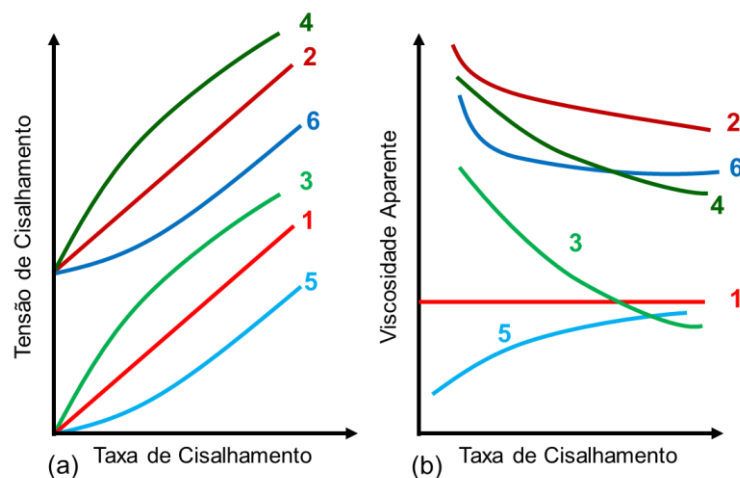
$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma}' \quad 2-2$$

Um fluido é chamado de não newtoniano, então, quando apresenta uma relação não linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, e, portanto, não obedece a relação proposta por Newton. A Figura 2-5 apresenta os comportamentos clássicos independentes do tempo para fluidos e suspensões, a partir da representação gráfica da variação da tensão de cisalhamento (a) ou da viscosidade aparente (b) em função da taxa de cisalhamento.

A curva (1) ilustra o comportamento, com uma tensão de escoamento linearmente proporcional à taxa de cisalhamento e a viscosidade aparente é uma constante. A curva (3) ilustra o comportamento denominado pseudoplástico, representado no gráfico de tensão de escoamento por taxa de cisalhamento como uma função côncava, em que se observa a diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. A curva (5) ilustra o comportamento dilatante, representado

no gráfico de tensão de escoamento por taxa de cisalhamento como uma função convexa, em que a viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. As curvas (2), (4) e (6) são similares comportamentos newtoniano, pseudoplástico e dilatante, respectivamente, com a particularidade de apresentarem uma tensão de escoamento, ou seja, o início do escoamento só acontece após excedida uma tensão de cisalhamento mínima. Assim, esses materiais são denominados como fluido de Bingham (2), pseudoplástico com tensão de escoamento (4) e dilatante com tensão de escoamento (6). Destaca-se que essa similaridade acontece apenas na relação entre a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, e a viscosidade aparente decresce com o aumento da taxa de cisalhamento para as três curvas.

Figura 2-5: Modelos reológicos clássicos: (1) Newtoniano, (2) de Bingham, (3) pseudoplástico, (4) pseudoplástico com tensão de escoamento, (5) dilatante e (6) dilatante com tensão de escoamento.



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2000). Adaptado pela Autora.

A maneira mais aplicada de se descrever o comportamento reológico dos fluidos sem tensão de escoamento é a denominada Lei da Potência (MACOSKO, 1994). Essa, então, é descrita pela Equação 2-3, em que a tensão de escoamento é proporcional a potência da taxa de cisalhamento, elevada a um índice de comportamento do fluido  $n$ , multiplicada por uma constante  $k$ . Essa equação permite a modelagem do comportamento pseudoplástico ( $n < 1$ ), o comportamento dilatante ( $n > 1$ ), e o comportamento newtoniano ( $n = 1$ ).

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n$$

2-3

Para os modelos em com tensão de escoamento, então, são observados modelos análogos aos previamente apresentados. O modelo de Bingham (Equação 2-4), é o mais simples para materiais viscoplásticos. Esse considera o material como possuindo uma tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), que após excedida o material se comporta como no modelo newtoniano, com viscosidade plástica ( $\mu$ ) constante (MACOSKO, 1994).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad 2-4$$

De maneira similar, o modelo de Herschel-Bulkley apresenta uma relação não linear com a taxa de cisalhamento similar à Lei de Potência (Equação 2-3) e uma tensão de escoamento como a equação de Bingham (Equação 2-4) (MACOSKO, 1994). Na Equação 2-5,  $\tau_y$  é a tensão de escoamento de Herschel-Bulkley,  $k$  é uma constante e  $n$  é um índice de consistência do fluido.

$$\tau = \tau_y + k(\dot{\gamma})^n \quad 2-5$$

Uma maneira alternativa de representação da não linearidade do fluxo de um fluido com tensão de escoamento é a Equação de Casson, porém com uma transição mais gradual para o escoamento (MACOSKO, 1994). Nesse modelo, apresentado na Equação 2-6,  $\tau_c$  é a tensão de escoamento de Casson e  $\mu_c$  a viscosidade de Casson.

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \mu_c^{1/2} \cdot \dot{\gamma}^{1/2} \quad 2-6$$

As mudanças induzidas pelo fluxo em suspensões com pouca atração entre partículas podem afetar a microestrutura dos materiais (MEWIS; WAGNER, 2009). Esse comportamento define a tixotropia dessas suspensões, uma redução reversível dependente do tempo da viscosidade a uma taxa de cisalhamento, causado pela quebra da estrutura da suspensão ao longo do tempo (HACKLEY; FERRARIS, 2001). Esse comportamento ainda pode ser originado da orientação das partículas de maneira a facilitar o fluxo com a taxa de cisalhamento. Ao contrário, a tixotropia negativa, ou anti-tixotropia, é um aumento reversível dependente do tempo da viscosidade a uma taxa de cisalhamento particular, causado pelo crescimento da estrutura da suspensão ao longo do tempo (HACKLEY; FERRARIS, 2001).

O comportamento tixotrópico desses materiais, então, sugere uma viscosidade que depende do histórico de cisalhamento, e, portanto, torna-se evidente em fluxos

transientes (MEWIS; WAGNER, 2009). Para se avaliar o comportamento dependente do tempo dos materiais, uma possibilidade é a avaliação da área de histerese do ensaio de fluxo com ciclo de cisalhamento. Nesse ensaio, é realizada uma aceleração seguida de uma desaceleração da taxa de cisalhamento do material, e a diferença entre essas curvas é avaliada. Assim, para os materiais tixotrópicos a curva de desaceleração fica abaixo da de aceleração e para os materiais anti-tixotrópicos a curva de desaceleração fica acima da de aceleração (HACKLEY; FERRARIS, 2001). Comumente usados como sinônimo de anti-tixotropia, o termo reopexia descreve um comportamento dependente do tempo similar. Um material reopéxico, então, apresenta a indução ou a aceleração da formação de flocos e estrutura quando é cisalhado lentamente (HACKLEY; FERRARIS, 2001; MEWIS; WAGNER, 2009; POTANIN, 2004).

Os rejeitos em escoamento são suspensões concentradas e, portanto, podem ter seu comportamento

Os rejeitos liquefeitos apresentam uma resistência inicial, resistência de pico, que precisa ser vencida antes de se iniciar o fluxo. Assim, pode-se entender que o material pode ser bem descrito por fluidos com resistência ao escoamento, como de Bingham e de Hershel-Bulkley. Após o início do fluxo, o material perde a resistência sobre condições de carregamento a velocidade constante (OLSON & STARK, 2003). A tixotropia, assim, deve ser analisada para o fluxo de rejeitos pós ruptura.

### 2.2.2 Caracterização reológica de suspensões por reometria rotacional

O uso de reômetros rotacionais são bastante difundidos para a obtenção dos parâmetros reológicos que descrevem o fluxo de suspensões, inclusive rejeitos, devido à possibilidade de impor maiores deformações em uma escala reduzida. As geometrias mais comuns são placas paralelas, cone/placa e cilindros concêntricos, e a partir dessas é possível determinar os parâmetros que descrevem o fluxo de maneira analítica a partir de medidas de torque e velocidade de rotação (MACOSKO, 1994).

A utilização de reometria rotacional permite a obtenção de valores para várias taxas de cisalhamento. Assim, esse tipo de ensaio apresenta vantagens quando comparado a ensaios de ponto único, como o Slump Test.

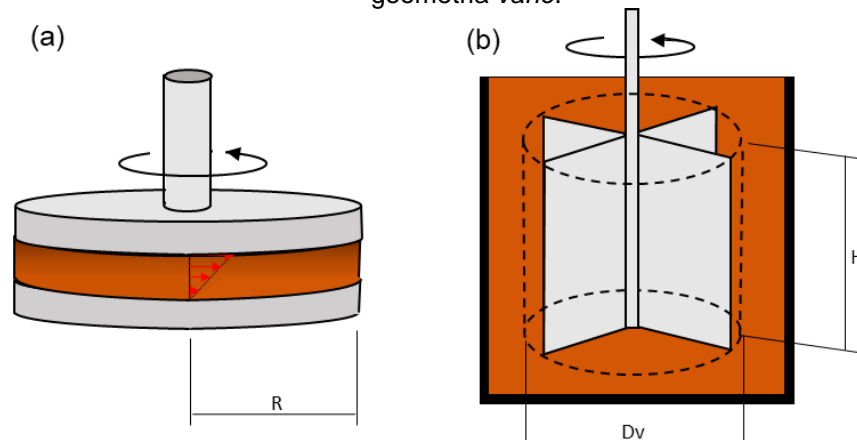
Para que um ensaio reológico seja adequado para medir as características de um material, este deve acomodar uma quantidade razoável de material, produzir taxas de cisalhamento equivalentes à que ocorre durante a ruptura em campo e apresentar resultados reprodutíveis e precisos (PHILLIPS; DAVIES, 1991). De Campos e Galindo (2017) e Besso e De Campos (2019) utilizaram ensaios de *Slump Test* modificados para tentar estimar as taxas médias observadas em casos de corridas de massa, de modo a melhor definir as taxas de interesse dos ensaios de reometria rotacional.

As técnicas experimentais utilizadas para a determinação das propriedades reológicas de um material, como a sua viscosidade e a sua tensão de escoamento, devem variar conforme suas características. Para os solos liquefeitos, que necessitam de superar um certo valor de tensão antes de se iniciar o fluxo, Coussot (2017) destaca o impacto do escorregamento das paredes da geometria, uma vez que isso mascara o valor da tensão de escoamento e faz com que o fluxo comece em tensões.

O ensaio na geometria placa-placa, ilustrado na Figura 2-6 (a), consiste em duas placas paralelas, com a inferior estática e a superior móvel. Esse arranjo entre as placas garante um gradiente de velocidades que impõe o cisalhamento puro e garante um contínuo na amostra desde que o *gap* seja de 5 a 10 vezes o diâmetro máximo das partículas (RAKSHITH et al., 2018). Para fluidos com umidades muito acima do limite de liquidez a tensão de cisalhamento é baixa (entre 1 e 100 Pa) porém, para umidades mais baixa como pastas, podem ser observada fraturas induzidas pelo cisalhamento nos ensaios de fluxo (COUSSOT; PIAU, 1995). Assim, os valores definidos correspondem somente à fricção da interface fraturada, e o ensaio não pode ser interpretado da mesma maneira.

A geometria *vane* é bastante conhecida e difundida na mecânica dos solos. Consiste em uma palheta de quatro lâmina que aplica um torque na amostra conforme a Figura 2-6 (b), e foi adaptado para a reologia do teste de mesmo nome comumente utilizado na mecânica dos solos. Esse ensaio apresenta como principais vantagens a eliminação do escorregamento na parede e a minimização do amolgamento causado na introdução da geometria na amostra (DZUY; BOGER, 1983), quando comparado com outras geometrias de cilindros concêntricos. Devido à geometria do ensaio, é capaz de capturar bem os valores da tensão de escoamento dos rejeitos estudados, sendo, porém, necessárias modificações para eliminar os efeitos de final.

Figura 2-6: Geometria típicas de ensaio de reometria rotacional; a) geometria placa-placa; b) geometria *vane*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com cada geometria é possível a aplicação de diferentes configurações de ensaios, sendo os principais o ensaio oscilatório, o ensaio de fluência e recuperação e os ensaios de fluxo estacionário, divididos em ensaio de taxa de cisalhamento constante, ensaio de rampa de taxa de cisalhamento e ensaio de rampa de tensão de cisalhamento. A Tabela 2-1 resume as principais vantagens de cada tipo de geometria rotacional comumente utilizada, conforme apresentado por Macosko (1994).

Tabela 2-1: Características principais das geometrias de reômetros rotacionais aplicáveis a suspensões concentradas

Reômetro	Vantagens	Desvantagens
Cilindros Concêntricos <i>Vane</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taxa de cisalhamento relativamente elevada;</li> <li>- Deformações homogêneas;</li> <li>- Ideal para suspensões;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitado a <math>\eta &lt; 100</math> Pa.s;</li> <li>- Difícil de medir <math>N</math>;</li> <li>- Efeito parede;</li> <li>- Dissipação viscosa;</li> <li>- Escoamentos secundários;</li> </ul>
Placas paralelas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de carregamento da amostra;</li> <li>- Possibilidade de medição do <math>N_2</math> (através de <math>N_1 - N_2</math>);</li> <li>- Permite retardar a fratura diminuindo o gap;</li> <li>- Gama limitado de viscosidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taxas de cisalhamento inferiores a <math>30 \text{ s}^{-1}</math> para fluidos muito viscosos;</li> <li>- Deformação não homogênea;</li> <li>- Escoamento secundário;</li> <li>- Correções inerciais para <math>\eta</math> baixos.</li> </ul>

Fonte:(MACOSKO, 1994). Adaptado pela Autora.

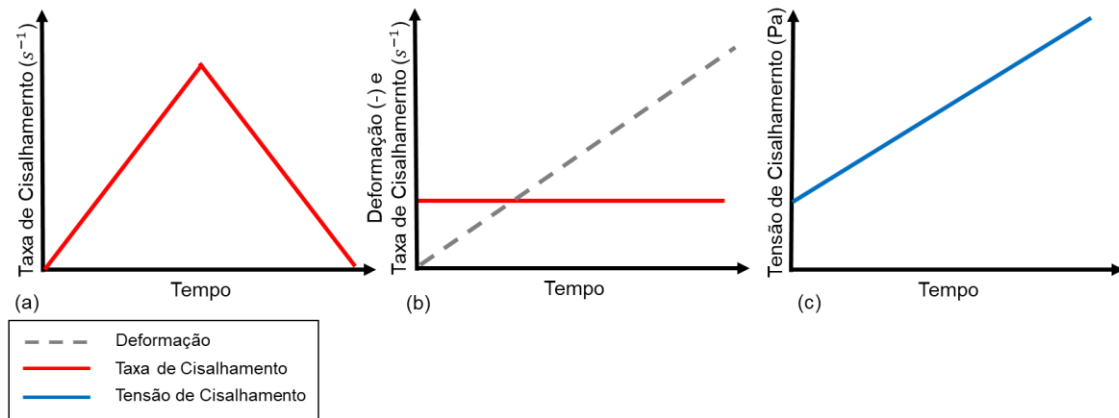
### 2.2.2.1 Ensaios de Fluxo

O ensaio de fluxo é o método de ensaio reológico mais comumente utilizado para a determinação dos parâmetros reológicos dos rejeitos em fluxo. Consiste na aplicação de uma deformação – ou tensão – e a consequente medida da resistência desse material ao fluxo. A solicitação é aplicada em um mesmo sentido, podendo ser



realizada com taxa constante (*stress growth*), rampa de taxa de cisalhamento ou rampa de tensão de cisalhamento (*stress ramp*), conforme apresentado na Figura 2-7.

Figura 2-7: Esquemático do procedimento experimental dos diferentes ensaios de rampa: (a) taxa de cisalhamento; (b) taxa de cisalhamento constante; (c) tensão de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o caso de ensaio de taxa de cisalhamento constante, obtém-se a tensão de escoamento do material. Como resposta do ensaio de rampa de tensão ou taxa de cisalhamento, por sua vez, é obtida a tensão de cisalhamento, a força normal e a viscosidade aparente – a relação pontual entre a tensão e a taxa de cisalhamento. No caso de ensaios com rampa crescente e decrescente de taxa de cisalhamento, os resultados experimentais podem ser aproximados aos modelos reológicos apresentados no item 2.2.1. Além disso, a área de histerese formada entre a curva de aceleração e desaceleração indica a estabilidade do sistema (DOLZ et al., 2000).

### 2.2.2.2 Ensaios oscilatórios

Ensaios oscilatórios são outros tipos de ensaios amplamente utilizados para investigar o comportamento reológico de suspensões, a partir da varredura de tensão, deformação ou frequência. O método consiste na aplicação de uma deformação senoidal, aproximada pela Equação 2-7, com a resposta à solitação (a tensão) aproximada pela Equação 2-8 (MACOSKO, 1994) - sendo  $\omega$  a velocidade angular,  $t$  o tempo,  $\gamma_0$  a amplitude máxima de deformação e  $\delta$  o ângulo de defasagem entre a tensão e a deformação. O significado gráfico dessa relação está apresentado na

Figura 2-8.

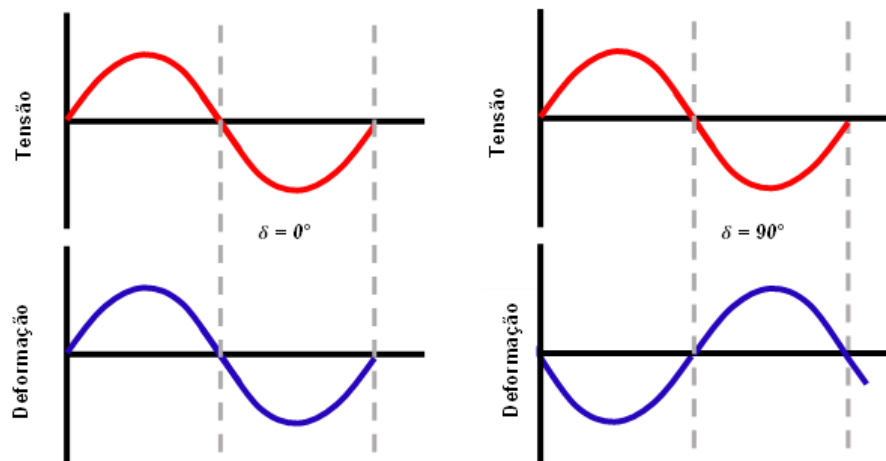
$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$$

2-7

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$$

2-8

Figura 2-8: Esquema ilustrativo do ensaio oscilatório com aplicação de deformação senoidal e da obtenção da tensão como resposta defasada.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio, é possível calcular o módulo completo ( $G^*$ ) do material, que pode ser entendida como uma medida da resistência à deformação total do material (VALENCIA, 2017). Por se tratar de um número complexo, o módulo pode ser dividido em uma componente elástica ( $G'$ ) – ou módulo de armazenamento - e uma componente viscosa ( $G''$ ) – módulo de perda.

Além desses parâmetros, retira-se do ensaio o parâmetro de viscosidade complexa ( $\eta^*$ ), a razão entre o módulo complexo ( $G^*$ ) e a frequência ( $\omega$ ). Essa se relaciona à viscosidade aparente quando a frequência e a taxa de cisalhamento são correspondentes (SCOTTO DI SANTOLO et al., 2012; STEFFE, 1996).

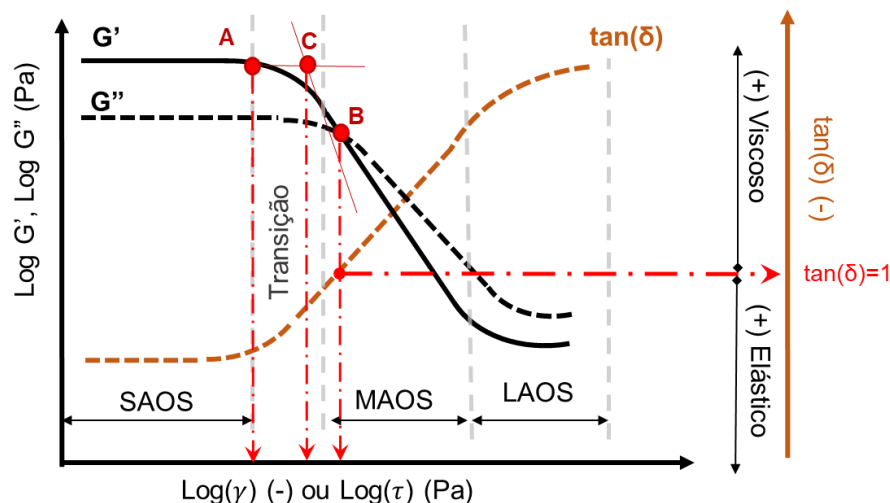
A partir desses parâmetros, é possível descrever o comportamento do material. Para materiais com comportamento Hookeano (sólido puro - elástico), a tensão e a deformação estão em fase ( $\delta = 0^\circ$ ), e  $G^* = G'$ . Materiais com comportamento Newtoniano (fluido puro - viscoso), os sinais estão fora de fase ( $\delta = 90^\circ$ ), e  $G^* = G''$ . As suspensões, porém, não apresentam um comportamento de fluido ou sólido puro, estando intermediárias entre as duas situações. Define-se, assim, o valor de  $\tan(\delta)=1$  ( $\delta=45^\circ$  e  $G'=G''$ ) como a transição de comportamento predominante do material. Assim, materiais com  $\tan(\delta)<1$  ( $G'>G''$ ) são mais elásticos que viscosos, apresentando comportamento viscoelástico, e com  $\tan(\delta)>1$  ( $G''>G'$ ) são mais viscosos que

elásticos, apresentando comportamento viscoplásticos (MACOSKO, 1994; STEFFE, 1996).

As suspensões em geral apresentam uma região inicial aproximadamente linear em pequena (LVE), em que  $G'$  é maior que  $G''$  e paralelos. A estrutura do material é quebrada quando se atinge uma tensão de escoamento – ou deformação crítica – e o material esco.

A tensão de escoamento pode ser determinada por diferentes métodos, conforme representados na Figura 2-9. No ponto A, esta é definida como o início da queda de  $G'$  (BARNES; NGUYEN, 2001). O ponto B, em que é observado  $G'=G''$  (KUGGE; VANDERHOEK; BOUSFIELD, 2011) ou  $\tan(\delta)=1$ , e que neste trabalho foi utilizado para determinar a mudança de comportamento do material,  $\tau_{45^\circ}$  e  $\delta_{45^\circ}$ . E por C, a interseção entre a reta horizontal que representa  $G'$  na LVE e a reta que melhor representa os valores após a ruptura da estrutura (DINKGREVE et al., 2016), e que neste trabalho foi usado para determinar a tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) ou a deformação crítica ( $\delta_{crit}$ ). Entre esses três pontos, temos uma região de transição, a zona da tensão de escoamento.

Figura 2-9: Resposta do ensaio oscilatório de varredura de tensão para a determinação da tensão de escoamento (pontos A, B e C) e a delimitação das regiões de pequenas, médias e grandes amplitudes (respectivamente SAOS, MAOS e LAOS).



Fonte: Elaborado pela autora.

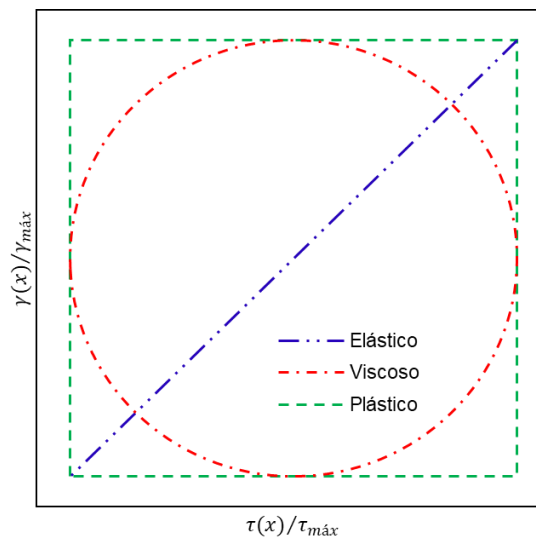
De maneira geral, o parâmetro controlado (tensão, deformação ou frequência) oscila de pequena a grande amplitude e pode ser dividido em três partes: resposta viscoelástica linear em pequenas amplitudes (SAOS – *Small Amplitude Oscillatory*

*Shear*) e resposta não linear em largas amplitudes (LAOS - *Large Amplitude Oscillatory Shear*) (HYUN et al., 2011; KATE GURNON; WAGNER, 2012); intermediário a estas, pode-se observar em alguns materiais, e dependendo do tipo de controle do ensaio, uma região de amplitudes médias (MAOS - *Medium Amplitude Oscillatory Shear*), definida pela redução de  $G'$  e  $G''$ . A região SAOS é linear, enquanto as regiões MAOS e LAOS apresentam comportamento não linear. Essas regiões estão ilustradas na Figura 2-9.

### 2.2.2.3 Avaliação das curvas paramétricas dos ensaios oscilatórios

Uma forma de se analisar os resultados de ensaios oscilatórios é através da análise qualitativa das curvas paramétricas, chamadas de Lissajous-Bowditch (LB), de oscilação senoidal de tensão e a resposta de deformação – ou o contrário (PHILIPPOFF, 1966; TEE; DEALY, 1975). A geometria formada na curva de LB está relacionada à defasagem entre os sinais de entrada e saída do ensaio. Para sólidos elásticos (Hookeanos), os sinais de entrada e saída estão em fase, a curva LB resultante é uma linha reta, e a tensão de escoamento é proporcional à deformação. Por outro lado, líquidos newtonianos apresentam defasagem de  $90^\circ$  entre as curvas de entrada e saída, e a curva resultante é uma órbita circular (HYUN et al., 2011). Já o comportamento perfeitamente plástico apresenta curva resultante quadrada, correspondente a uma microestrutura com deformação incremental desprezível até superar a tensão de escoamento e romper (NADAI; WAHL, 1931). Assim, uma maneira de interpretar os resultados das curvas LB de maneira qualitativa é através da análise da forma do gráfico (CHO et al., 2005; HYUN et al., 2011). Para isso, compara-se a curva às formas de materiais teóricos: elásticos (linha), viscoso (círculo) e plástico (quadrado). Essa análise gráfica é apresentada na Figura 2-10.

Figura 2-10: Curvas de Lissajous-Bowditch normalizada nas formas elástica, viscosa e plástica puras. A curva azul pertence a um sólido hookeano, a vermelha a um líquido newtoniano e a verde a um plástico ideal.

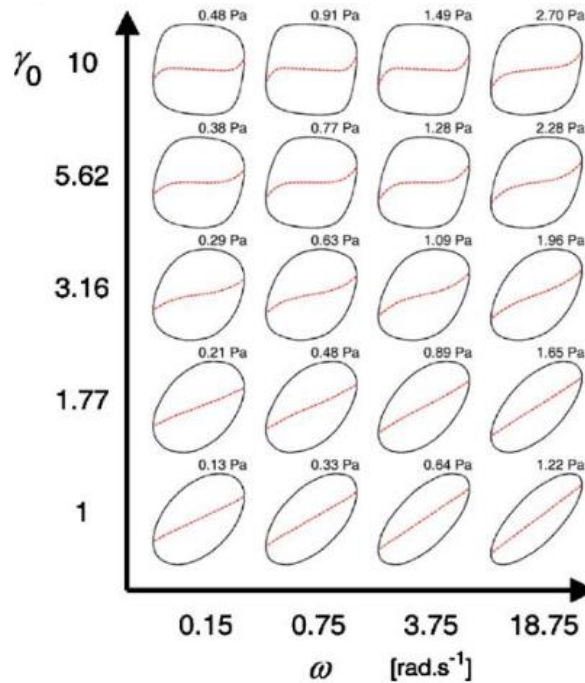


Fonte: Elaborado pela autora.

Os ensaios de amplitude de tensão ou deformação podem ainda ser estudados em suas regiões linear e não linear. Na região linear, as deformações ou tensões aplicadas se encontram na região linear do ensaio e avaliam a resposta viscoelástica do material (SAOS). Já na região não linear, além da tensão de escoamento, são aplicadas amplitudes grandes de deformação ou tensão (LAOS).

O diagrama de Pipkin, ilustrado na Figura 2-11 apresenta no eixo x as diferentes frequências de oscilação do material ( $\omega$ ) e no eixo y a máxima deformação imposta ( $\gamma_0$ ). É uma ferramenta útil para a visualização do comportamento do material em diferentes condições (EWOLDT; HOSOI; MCKINLEY, 2008).

Figura 2-11: Exemplo de curvas de Lissajous-Bowditch.



Fonte: (EWOLDT et al., 2010).

O diagrama de Pipkin pode ser compreendido como uma impressão digital reológica do material, e é utilizado para ajudar a entender a dependência das propriedades reológicas dos materiais a parâmetros múltiplos (CHO et al., 2005). Este apresenta uma imagem da microestrutura do material, e pode ser utilizado para verificar se o modelo constitutivo escolhido pode prever o comportamento não linear do material (EWOLDT; HOSOI; MCKINLEY, 2008). Além disso, pode indicar a quebra estrutural gradual, que indica a transição da região linear para não-linear, com o aumento das deformações no material (ETTEHADI; ÜLKER; ALTUN, 2022). Comportamento reológico de suspensões

É possível ainda calcular as taxas de cisalhamento a partir da amplitude de deformação obtidos em cada oscilação a partir da equação 2-9 nas porções do ensaio em que o material se encontra fluindo (ROGERS et al., 2011), sendo  $\omega$  a frequência angular. A frequência do ensaio (em Hz) pode ser convertida em frequência angular (rad/sec) multiplicando-se por um fator de  $2\pi$ .

$$\dot{\gamma} = \omega \gamma_0 \cos(\omega t) \quad 2-9$$

A amplitude da taxa de cisalhamento pode ser calculada a partir de ponto de amplitude máxima do senoide da oscilação, então, teremos  $\cos(\omega t) = 1$  e, conseqüentemente,  $\dot{\gamma} = \omega \gamma_0$  (ROGERS et al., 2011). A taxa de oscilação máxima também pode ser usada

para compreender os ensaios oscilatórios de bentonitas usadas como fluido de perfuração (ETTEHADI; TEZCAN; ALTUN, 2020; ETTEHADI; ÜLKER; ALTUN, 2022). A partir dos ensaios oscilatórios é possível ainda calcular taxas de cisalhamento momentâneas, que permitem melhor avaliação do fluxo dos materiais (ROGERS et al., 2011). Esse tipo de análise mais complexa, porém, é válida apenas para polímeros, materiais visco-elásticos e com baixa tixotropia.

### 2.2.3 Ensaios de reologia de rejeitos na mineração

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 está relacionado às características físico-químicas das suas partículas.

A compreensão do escoamento dos rejeitos é importante para a atividade mineradora como um todo. O rejeito se encontra, ao longo do processamento mineral, em diferentes concentrações volumétricas, podendo ser caracterizado como uma suspensão em fluxo da sua geração no processamento mineral até a sua deposição, dependendo das características da lavra.

Em busca de aumento da segurança e sustentabilidade, há uma procura pela minimização da água no processamento mineral, para diminuir custos operacionais e volume de material armazenado (PULLUM; BOGER; SOFRA, 2017). Para isso, o conhecimento da reologia do fluido não newtoniano, com consistência mais pastosa, resultante da diminuição do volume de água nos rejeitos deve ser explorado pela indústria mineral (BOGER, 2009).

As suspensões analisadas variaram bastante em concentrações. Foram analisadas concentrações em peso a partir de 20% (FAITLI; GOMBKÖT, 2015; GAWU; FOURIE, 2004; TRAMPUS, 2019), sendo porém o foco da maioria dos estudos as maiores concentrações, entre 50-70% em peso (ADIANSYAH et al., 2016; CHÁCARA, 2020; DÖRR; SADIKI; MEHDIZADEH, 2013; ENGELS et al., 2011; FITTON; CHRYSS; BHATTACHARYA, 2006; KUMAR; RAO, 2022; OLCAY et al., 2020; OSORIO; ARAÚJO; VALADÃO, 2008; SÁNCHEZ-PERALTA et al., 2020; SENAPATI; MISHRA,

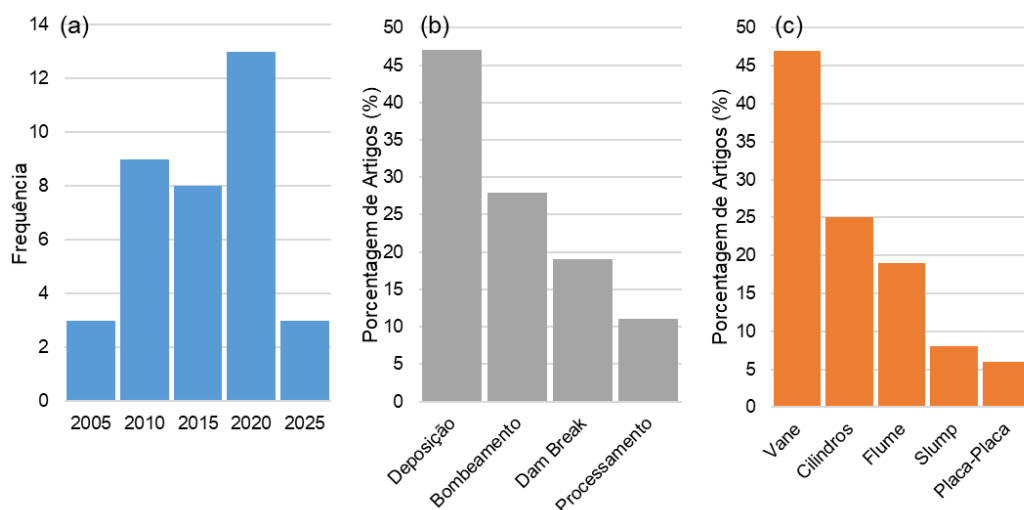
2010, 2010; WU; WANG; WANG, 2015). Assim, entende-se a grande variabilidade das concentrações das suspensões de rejeitos no processamento mineral.

Assim, este item apresenta algumas características reológicas de rejeitos conforme encontrados na literatura, assim como o objetivo sobre o qual o ensaio foi realizado, ou seja, o tipo de escoamento que o ensaio se propôs a simular. Uma investigação científica foi realizada para reunir, avaliar e sintetizar os resultados de diferentes estudos sobre o comportamento reológico desses materiais.

Foram estudados um total de 36 artigos, para avaliar o histórico da reologia de rejeitos na mineração, com ênfase no tipo de rejeito, na geometria de ensaio, no método de ensaio, no modelo utilizado e na aplicação. As referências e as principais características observadas são apresentadas na Tabela 1 do Anexo B.

A Figura 2-12 ilustra alguns dos principais pontos da revisão bibliográfica – o ano de publicação, a aplicação e a geometria de ensaio. São apresentados os anos de publicação dos artigos estudados, e é observado o aumento do estudo da reologia de rejeitos a partir do ano de 2015, possivelmente devido ao crescimento de leis ambientais. Nesses anos também se observa o aumento do interesse do comportamento reológico de rejeitos em eventos de rupturas hipotéticas de barragens de rejeitos.

Figura 2-12: Resumo dos principais pontos da revisão bibliográfica de ensaios reológicos de rejeitos na mineração; (a) ano de publicação, (b) aplicação, (c) tipo de ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora.



Os rejeitos puros encontrados nos trabalhos foram separados quanto ao momento reológico principal estudado. Entre eles se destacam estudos sobre deposição de rejeito em pastas (48%), bombeamento de rejeitos espessados (28%), reologia de rejeitos no estudo de *Dam Break* (18%) e processamento mineral (11%). Os principais rejeitos estudados eram provenientes da mineração de Ouro (20%), cobre (18%), Ferro (18%), Carvão (14%), Lama Vermelha/Rejeito de Bauxita (14%) e Níquel (9%).

Quanto às geometrias de ensaio, foram utilizadas principalmente a geometria vane (47%) e cilindros concêntricos (27%), seguido do flume (19%). Destaca-se o uso reduzido de outras geometrias utilizadas nesse trabalho – a placa-placa foi utilizado em apenas dois trabalhos (5%) e o *squeeze flow* não foi utilizado em nenhum trabalho para a caracterização reológica de rejeitos concentrados. Não é possível ser observada uma correlação entre a geometria de ensaio e o tipo de escoamento a ser simulado, sendo o *vane* a geometria de preferência para simular corridas de massa, bombeamento e deposição. Observa-se o uso de ensaios flume, limitados na análise da deposição do material nos reservatórios, e os condutos tubulares mais comuns no estudo do bombeamento. Assim, observa-se uma tendência à realização de ensaios com escoamento que simule as condições de campo.

Para as geometrias rotativas, é observado um predomínio da realização de ensaio de fluxo artigos analisados, com análise apenas de tensão de escoamento em diversos artigos. Destaca-se ainda o uso limitado de ensaios oscilatórios. Os modelos reológicos mais utilizados para representar os rejeitos de mineração são Bingham e Herschel-Bulkley.

Entre os comportamentos analisados para a compreensão da reologia dos rejeitos, destaca-se a segregação em fluxo. Esse comportamento é importante para a disposição dos materiais em barragens, e inclusive essencial no caso das barragens de rejeito de montante, para a garantia da permeabilidade do maciço. Suspensões concentradas segregam em fluxo cisalhante, e para evitar esse comportamento misturas devem ser otimizadas e taxas de cisalhamento devem ser mínimas (TALMON et al., 2014). Além disso, a segregação em um canal de lama de rejeitos não é observada caso a concentração do material seja acima de uma concentração crítica e a topografia íngreme o suficiente (FITTON; CHRYSSE; BHATTACHARYA, 2006).

Boger (2009) apresentaram a tensão de escoamento em função da concentração de sólidos de um número de lamas de rejeitos industrialmente relevantes, notando que o perfil dessa propriedade é específico para o material, e uma função da mineralogia, condições de processamento, granulometria, química superficial e histórico de cisalhamento. É observado uma relação clara entre a química superficial das partículas e as condições de fluxo, como a influência do potencial zeta em rejeitos específicos (REYES et al., 2019). Assim, é importante compreender a influência de argilominerais e flocculantes no comportamento desses rejeitos.

Dos fatores que influenciam o comportamento reológico de rejeitos, destacam-se o tipo de minério, o tamanho das partículas, a concentração de sólidos na suspensão e a taxa de cisalhamento (WANG et al., 2018). A presença de maior quantidade de fração argila, com sua natureza eletroquímica, aumenta as interações sólido-líquidas resultando na existência de tensão de escoamento a menores teores de sólidos que em rejeitos mais siltosos e arenosos (BHUIYAN et al., 2016).

O comportamento reológico dos argilominerais, porém, ainda diferem entre si. Isso ocorre devido a diferenças de tamanho das partículas, de área superficial específica, de razão de forma (*aspect ratio*), de cargas de superfície e de morfologia e cristalinidade superficiais, e a interações entre partículas (NDLOVU et al., 2014). O comportamento tixotrópico das suspensões de montmorilonitas, em especial, é complexo e de grande relevância a problemas observados no processamento mineral.

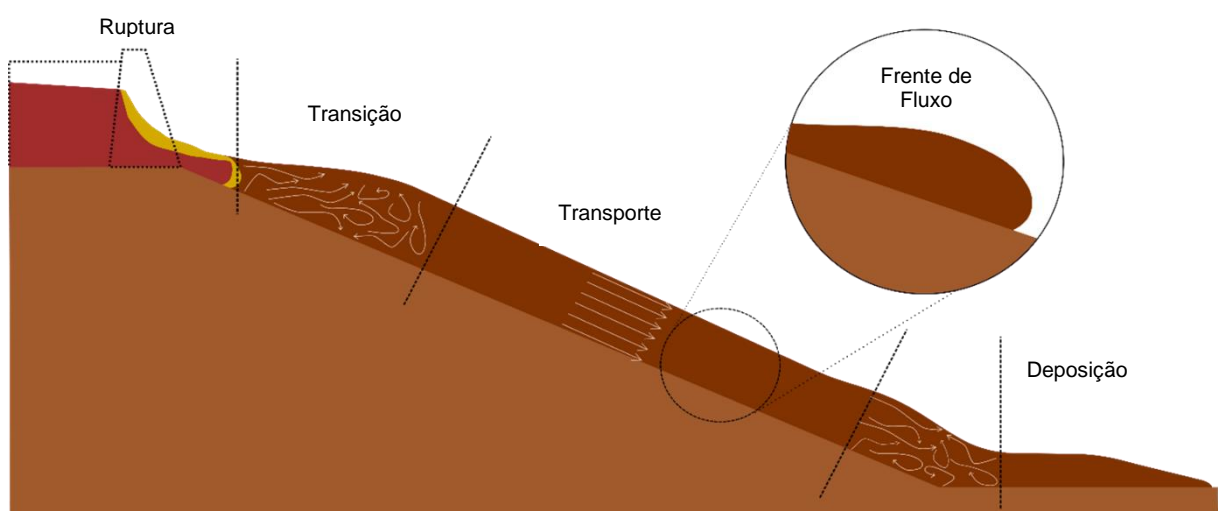
A geometria *vane* foi utilizada por Dias (2017) para a caracterização de rejeitos de minério de ferro por ensaios de fluxo, oscilatório de tensão e de frequência, e creep para compreensão do escoamento de barragens de rejeitos. O autor chegou à conclusão que o material apresenta características viscoelastoplásticas, com tensão de escoamento, e comportamento altamente complexo. As tensões de escoamento estáticos obtidas foram similares para os diferentes ensaios. Além disso, observou-se a limitação do uso do modelo de Bingham ou de outros modelos que não consideram as deformações elásticas dos materiais, que ocorrem antes da tensão de escoamento estática, o que também dificulta o ajuste de curvas a este modelo.

### 2.3 MOMENTOS REOLÓGICOS EM CORRIDAS DE MASSA

O mecanismo de ruptura de barragens de rejeitos é um evento complexo, que pode envolver um ou mais mecanismos de falha. Em geral, os tipos mais comuns e mais desastrosos são as rupturas que geram liquefação – em geral devido a terremotos ou instabilidade de taludes (HALABI et al, 2022). A quantidade de material mobilizada, isso é, a quantidade de material que sai da barragem, também influencia na área de inundação potencial (CONCHA LARRAURI; LALL, 2018; GHAHRAMANI et al., 2020; RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008).

O escoamento da massa de solo em eventos de corridas de massa pode ser separado em diferentes estágios, que agrupam diferentes momentos (instantes) no escoamento do material (GUO et al., 2020, p. 202; SAKANO et al., 2021), com histórico de cisalhamento e tipos de solicitações diversos. O histórico de cisalhamento pode ser influenciado pelo tipo de ruptura, as características físicas da barragem e a topografia da região (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008). Desta forma, é importante avaliar a relação do material com as diferentes condições de fluxo durante os diferentes momentos reológicos. A Figura 2-13 ilustra a separação das condições de fluxo após rupturas de barragem de rejeitos conforme definidas por Sakano (2022), separados por motivos de simplificação em mobilização, transporte e deposição.

Figura 2-13: Condições de escoamento após a ruptura de barragens de rejeitos.



Fonte: Sakano (2022).

O material se rompe quando a tensão de cisalhamento solicitante é maior que a resistência ao cisalhamento estático do material no instante da ruptura. No caso de rupturas em que ocorre liquefação do material, o comportamento tensão-deformação é frágil. Como a resistência residual é muito menor que as tensões de cisalhamento de pico, resulta-se num desbalanço de forças elevado, a massa acelera e ganha velocidade, e fluidifica (EDENVILLE DAM, 2022). Ao contrário, para solos com comportamento mais dúctil, as resultantes de força na direção da instabilidade são menores e, conseqüentemente, as acelerações de saída do material também.

O mecanismo de ruptura de barragens de rejeitos pode envolver ou não o fluxo de rejeitos liquefeitos e água (CDA, 2021; GILDEH et al., 2020). De modo análogo à dinâmica de corridas de massa, estima-se que os rejeitos apresentariam fluxo turbulento nos primeiros metros, depois estabilizaria e desaceleraria, até sua deposição no canal (IVERSON et al., 2010). Um comportamento similar é interpretado a partir dos vídeos da ruptura de Brumadinho, em 2019 (RECORD, 2019; BAND, 2019).

O momento de mobilização pode ser entendido como ocorrendo instantes após a solicitação extrema que causa a ruptura da barragem, e corresponde à liberação do material do reservatório. Por isso, é fortemente relacionado ao modo de falha da estrutura, a resistência residual do material, à resultante de forças e às deformações no início do movimento. A legislação brasileira, porém, determina que no caso de rupturas de barragens de rejeito por liquefação seja considerada a mobilização de todo o volume do maciço e do reservatório (Res 95 ANM, 2022).

A ruptura das barragens pode ser separada em três grupos principais: colapso estrutural global do maciço, *overtopping* (seguido de erosão do talude de jusante e abertura de brecha) ou *piping* (com percolação de fluidos contaminados e possível abertura de brecha) (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008). Todos os cenários devem ser considerados na definição do cenário de maior dano (CDA, 2021; FEAM-MG, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017) no desenvolvimento de estudos de ruptura hipotética de barragem.

A mecânica da ruptura influencia no escoamento, com possibilidade de escoamento de material liquefeito ou não e de propagação do volume de água do lago

sobrenadante, levando a teores de sólidos comportamentos reológicos bastante diferentes (CDA, 2021; GILDEH et al., 2020; HANCK et al., 2019; SAKANO et al., 2021). A ruptura gera a mobilização de parte do material contido na barragem, que pode ser relacionada ao deslizamento da massa, liquefeita ou não, após a ruptura da barragem (SAKANO, 2022).

A tensão de escoamento após uma situação de ruptura, na geotecnia, é definida pela resistência residual e geralmente é determinada por ensaios geotécnicos e de campo (OLSON; STARK, 2003a; ROBERTSON, 2010). Os ensaios de laboratório utilizados para a determinação da resistência residual em solos podem ser ensaios triaxiais (OLSON; STARK, 2003b), ensaios *ring shear* (SASSA et al., 2004) que permitem maiores deformações, ou a utilização de ensaios de cisalhamento simples (OLSON; STARK, 2003b). Estes ensaios utilizam-se de grandes deformações a baixas taxas de cisalhamento para a determinação de uma tensão de escoamento do material, e, portanto, não necessariamente representa o comportamento do material na deposição. A resistência ao cisalhamento de areias após a liquefação, a qual resiste o escorregamento e o fluxo, depende fortemente das taxas de cisalhamento, das condições de drenagem e da geometria do material (DE ALBA; BALLESTERO, 2006), portanto a utilização de ensaios em taxas lentas é inapropriado para a determinação da tensão de escoamento após o fluxo.

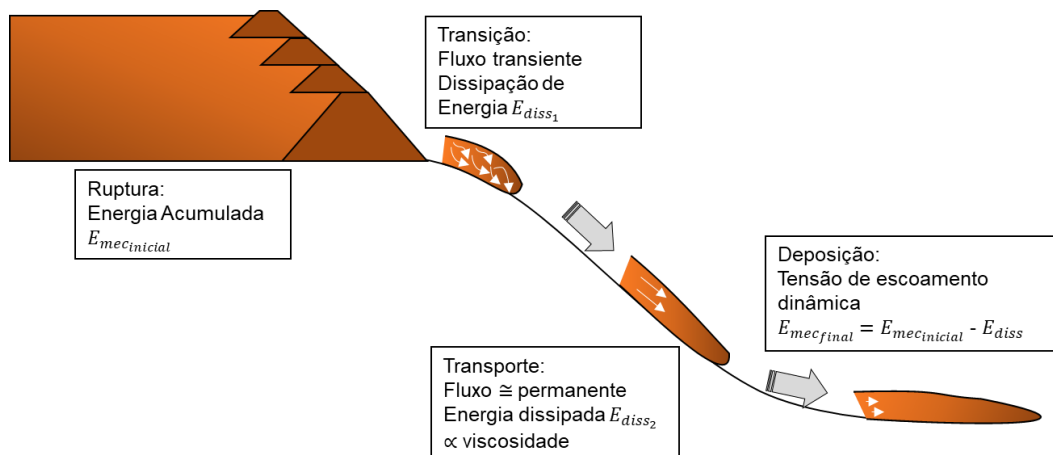
O estudo do modo de ruptura da estrutura não é foco de estudo desse trabalho e a quantidade de material mobilizada no reservatório não foi avaliada nesse trabalho. Porém, é avaliada a influência da velocidade das deformações no instante de mobilização no comportamento reológico do material. O ensaio oscilatório de varredura de deformações permite a avaliação da mobilização do material no início do deslocamento, com as frequências menores sendo associadas a processos mais lentos e frequências maiores a processos mais rápidos (SAKANO, 2022), conforme será detalhado no item 3.2.

O momento de transporte do material corresponde ao escoamento dos rejeitos no terreno natural após a ruptura da estrutura, e é intrinsecamente relacionado ao risco hidrodinâmico das rupturas (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008). O transporte, então, é o principal estágio de comportamento reológico dos rejeitos, e é influenciado

pelas características do material e da área (BASELT et al., 2021; CAROTENUTO et al., 2015; GUO et al., 2020; PROCHASKA et al., 2008).

De maneira bastante simplista, é possível uma analogia do escoamento de um bloco em superfície inclinada ao escoamento de fluxos de corridas de massa, conforme apresentado na Figura 2-14. Assim, as forças cisalhantes solicitantes no material, e portanto a aceleração e as velocidades desenvolvidas, dependem do vetor peso e estão relacionadas à espessura da camada, à densidade da suspensão e à inclinação do terreno (SAKANO et al., 2021). Além disso, entende-se a viscosidade como uma resistência do fluido ao escoamento (PILEGGI et al., 2000) e relacionada à mobilidade e à dissipação de energia na suspensão (DAMINELI et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2000), e que influencia na distância atingida pelo movimento de massa. Por fim, o material tem sua parada relacionada a uma tensão de escoamento dinâmica, após as perdas de energia durante o movimento. Entretanto, não há a definição de tipos e geometrias de ensaios que sejam condizentes com o escoamento do fluxo pós ruptura e que permitam a estimativa desses parâmetros.

Figura 2-14: Física simplificada do escoamento de fluxos de corrida de massa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dos fatores de influência no fluxo, temos que a velocidade do material é relacionada aos vetores solicitantes (peso) no sentido do fluxo (relacionado à espessura da camada, densidade da suspensão, inclinação e rugosidade do terreno) e à resistência ao fluxo do material (relacionado à tensão de escoamento e viscosidade) (YU; TANG; CHEN, 2020; ZHUANG; XU; XING, 2019). A mobilidade do material depende também das condições prévias da barragem, no que diz respeito à presença de água sobrenadante na barragem e na liquefação do material durante a ruptura (DAVIES,

2002; KOSSOFF et al., 2014; MORGENSTERN et al., 2016; ROBERTSON et al., 2019a).

No caso de liquefação o material assume comportamento semelhante a um fluido não newtoniano, e está associado às maiores catástrofes envolvendo barragens de rejeito no mundo (MORGENSTERN et al., 2016; PETKOVŠEK et al., 2020; PIRULLI, 2017; ROBERTSON et al., 2019a). Além disso, o material escoar em terreno natural, e portanto a topografia tem grande influência no escoamento dos rejeitos (PROCHASKA et al., 2008). A topografia também pode influenciar no histórico de cisalhamento durante o fluxo, a partir das taxas de cisalhamento alcançadas, e portanto, em materiais tixotrópicos, no comportamento reológico do material.

A dinâmica de escoamento de materiais granulares em ensaios de rampas (BASELT et al., 2021; GUO et al., 2020) durante o momento de transporte foi descrita por Sakano (2022). Observa-se que durante os primeiros instantes há um aumento da velocidade do fluxo até um valor de pico (aceleração no sentido no fluxo devido à energia potencial do sistema e das forças solicitantes serem superiores às forças resistentes), seguido de uma redução até o repouso (aceleração no sentido contrário do fluxo devido às forças resistentes superarem as solicitantes).

A espessura do escoamento também apresenta um valor de pico seguido pela redução da espessura da camada, devido à deposição parcial de materiais ao longo do fluxo ou ao fenômeno de propagação de vazões. Além disso, as velocidades de escoamento serão influenciadas pelas características topográficas do terreno e as propriedades reológicas do material. Os ensaios reológicos controlados por taxa de cisalhamento (oscilatório de varredura de deformação e ensaio de rampa de taxa de cisalhamento) conseguem simular bem a variação na velocidade de escoamento, enquanto ensaios controlados por tensão de cisalhamento (oscilatório de varredura de tensão e ensaio de rampa de tensão de cisalhamento) representam melhor a variação da espessura da camada durante o escoamento (SAKANO, 2022).

O momento de deposição corresponde ao último estágio de fluxo, em que o material desacelera até parar por não ter energia o suficiente para continuar o escoamento (SAKANO et al., 2021). Esse momento também é intrinsecamente relacionado às consequências, uma vez que o potencial de destruição é avaliado mais

costumeiramente pelo mapa de inundação da ruptura hipotética. A distância de runout – distância final atingida pelo escoamento - da corrida de massa é relacionada às características externas ao fluxo, como inclinação do canal, geometria, hidrograma da ruptura e umidade (DE HAAS et al., 2015).

Ao contrário de rupturas hipotéticas em água, em que as vazões são propagadas com volume constante, as suspensões de rejeito apresentam tensão de escoamento (necessitam de uma tensão mínima para a continuação do movimento) e possuem tendência a deposição de sedimentos durante o fluxo. Pode ser observado que no escoamento de corridas de massa de solo a espessura não é constante e diminui pela deposição do material durante o transporte (IVERSON et al., 2010). Assim, o material se deposita em uma posição final que depende de todo o histórico de cisalhamento (mobilização e transporte) e das características do material. Os ensaios de rampa de taxa de cisalhamento, rampa de tensão de escoamento e o ensaio oscilatório de varredura de tensões podem representar o momento de deposição dos rejeitos (SAKANO, 2022).

Um método comumente utilizado para a análise de resistência pós liquefação é a partir da obtenção de correlações com ensaios *in situ* (ISHIHARA, 1993; JEFFERIES; BEEN, [s.d.]; OLSON; STARK, 2002; ROBERTSON, 2010). Devido ao método de cálculo, porém, esta pode ser interpretada como uma tensão de escoamento dinâmica do material. Para sua definição, os referidos autores realizaram uma análise cinética para determinar a “resistência ao cisalhamento liquefeita” (*liquefied shear strength*), que representaria a resistência cisalhante realmente mobilizada durante a ruptura por fluxo. A  $S_{u,liq}$  pode ser retirada, a partir de simplificações, a partir da equação de equilíbrio limite para o escorregamento ao longo de uma superfície plana, conforme a equação 2-10 (OLSON; STARK, 2002).

$$S_{u,liq} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha \quad 2-10$$

Em que  $\gamma$  é o peso específico do material em fluxo,  $H$  a espessura da camada de cisalhamento e  $\alpha$  o ângulo da topografia em que ocorre o movimento.

Diversos autores propõem a determinação do  $S_{u,liq}$  a partir da correlação de ensaios de cone de penetração (CPT) e de sondagem a percussão (SPT) (JEFFERIES; BEEN, 2016; OLSON; STARK, 2002; ROBERTSON, 2010) com valores de  $S_u$  dados retro



analisados de casos de rupturas reais (OLSON; STARK, 2002; ROBERTSON, 2010). Este valor correspondente à resistência ao cisalhamento no cessamento do fluxo após a corrida de lama e pode ser reconhecida como a tensão de escoamento dinâmico da suspensão (PELLEGRINO; SCHIPPA, 2018). Porém, estes valores apresentam grande incerteza intrínseca uma vez que foram obtidos através de simplificações e retroanálises, e desconsideram as diferentes variáveis do fluxo.

Os ensaios reológicos precisam representar de forma satisfatória os diferentes estágios de fluxo. Assim, diferentes métodos de ensaio devem ser adaptados de maneira a representar esses momentos, e avaliar as variações de espessura da camada, velocidade e deformação nos materiais, para além dos ensaios de fluxo. O tipo de ensaio de fluxo realizado também deve ser avaliado, uma vez que diferentes metodologias podem resultar em diferentes resultados devido a mudanças no arranjo de partículas e na microestrutura dos materiais (SAKANO et al., 2021).

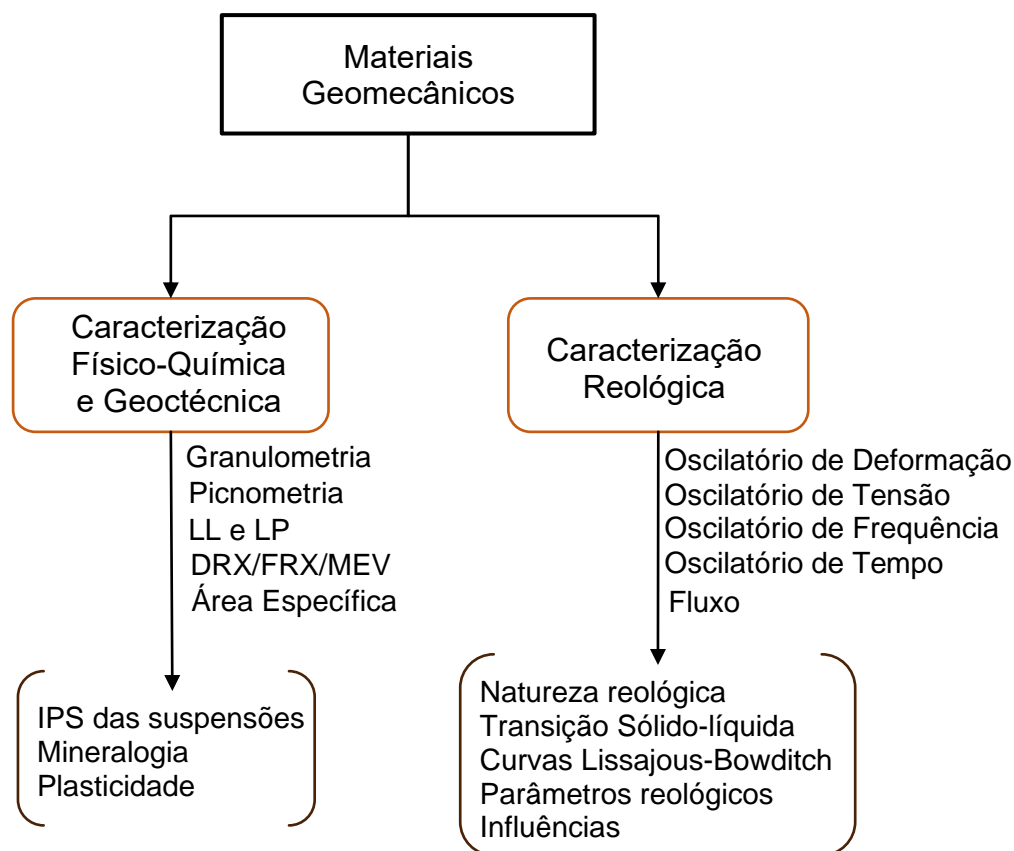
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse trabalho visa a caracterização reológica avançada de rejeitos de minério de ferro para auxiliar na compreensão do seu comportamento em rupturas de barragens de rejeitos. Para isso, então, primeiramente será realizada uma análise reológica profunda de materiais clássicos da geotecnia – uma bentonita, uma caulinita e uma amostra de rejeito de minério de ferro em granulometrias similares -, de forma a facilitar a interpretação do comportamento reológico dos rejeitos de minério de ferro no âmbito da geotecnia. Também será avaliado um rejeito em granulometria total retirado do processamento mineral, e que teria por finalidade a deposição em pilha.

A caracterização dos materiais será realizada na geometria de placas paralelas a partir de ensaios oscilatórios de tensão, deformação, frequência e tempo e ensaios de fluxo. Os ensaios de fluxo serão utilizados para a determinação da tensão de escoamento e da viscosidade e a determinação do modelo constitutivo que melhor descreva o evento de *dam-break*. Para a determinação dos parâmetros reológicos, serão utilizados ensaios na geometria placa-placa.

Assim, pretende-se compreender a interação entre suas diferentes partículas e seu comportamento reológico. A partir desses diferentes materiais, intenta-se mimetizar o comportamento do rejeito de minério de ferro para calibrar modelos de ruptura hipotética desses materiais. A Figura 3-1 apresenta, então, um resumo da metodologia desenvolvida.

Figura 3-1: Fluxograma da metodologia de trabalho



Fonte: Elaborado pela autora.

Esse capítulo é dividido conforme os ensaios realizados e não a ordem de execução, para evitar repetição. O seguida, no item 3.1 é apresentada a metodologia de caracterização físico-química que foi realizada em todos os materiais utilizados, assim como nas faixas granulométricas dos rejeitos de minério de ferro. O item 3.2 apresenta o estudo da natureza reológica dos materiais.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS PARTÍCULAS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados quatro materiais de comportamento reológico diverso, para a verificação de suas características físico-químicas em seu comportamento reológico. Foram utilizadas bentonita malha 325 e caulim malha 325 compradas na Brasilminas, em granulometrias de mesma faixa. Além disso, foi utilizado um rejeito de minério de ferro em fração fina retirado da superfície de uma barragem de rejeitos depositado por aterro hidráulico. Possivelmente, a granulometria muito fina indica se tratar de uma lâmina de finos depositada em sedimentação mais

lenta. Por fim, foi utilizado um rejeito de minério de ferro provido da mesma mina, em granulometria total, retirado diretamente do processamento mineral.

O estudo proposto procura avaliar a influência das características físicas e químicas dos materiais estudados – bentonita, caulinita e rejeitos de minério de ferro - nos seus parâmetros reológicos, de maneira a melhor compreender e descrever o comportamento desses materiais em fluxo. Além disso, será avaliada a relação entre a reologia desses materiais e algumas propriedades geotécnicas. A caracterização desses materiais, então, visa o detalhamento de suas partículas quanto à sua mineralogia, morfologia e tamanho das partículas, fatores que influenciam no fluxo.

A granulometria do material foi realizada por difração de raios laser com faixa de detecção de 0,1-350  $\mu\text{m}$  (Helos, Sympatec). A preparação das amostras foi realizada com a dispersão em hetametáfosfato de sódio (125 mL/45,7g/cm<sup>3</sup> por 12h) e por ultrassom (2 minutos) para desaglomeração e deaeração. Foram feitas 3 medidas de 10 segundos cada.

A densidade real dos grãos ( $\rho_s$ ) foi determinado por picnometria de gás Hélio (Accupyc II 1340, Micromeritics). Para isso, uma massa conhecida de material teve seu volume verdadeiro determinado a partir da variação de pressão de gás entre um recipiente de referência e o recipiente com a amostra. O cálculo da densidade desconsidera o volume dos poros abertos (WEBB, 2001).

Para a determinação da mineralogia dos materiais, foi realizado o acoplamento das técnicas de fluorescência de raio x e de difração de raio x. A técnica de difração de raios-X é uma técnica não destrutiva que fornece informação detalhada sobre a estrutura cristalográfica, a composição química e as propriedades físicas dos materiais (SIMA et al, 2016). Para isso, são determinados os ângulos refratados dos raios X e sua intensidade, e o espectro do material foi comparado com o banco de dados do ICDD- International Centre for Diffraction Data e PAN-ICSD- PANal.

Os DRX da bentonita e do caulim sem monocromador e com tubo de cobre foi realizado no Laboratório de Microestruturas (LME-USP), em um difratômetro RX da PANalytical, modelo Empyrean. O mesmo equipamento mas com monocromador para a análise dos rejeitos, devido a grande quantidade de elemento ferro nas amostras, no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT-USP).

Além disso, os ensaios de fluorescência de raios X foram utilizados para a determinação da composição elementar das amostras. O ensaio consiste no bombardeamento de uma amostra pulverizada por raios X policromáticos e na detecção das linhas espectrais características de cada elemento químico. Os ensaios foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

A microestrutura das partículas foi analisada com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Quanta 600 FEG da FEI com resolução de 1024x884, para determinação de forma, tamanho e textura de sua superfície. As amostras são preparadas por dispersão em ar e recobridas com filme de platina na Coater MED-020 da Bal-tec.

O MEV irradia um feixe de elétrons primários na superfície das partículas amostradas e, como resultado, obtém-se a emissão diferentes tipos de radiação, como elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-x característico, elétrons de Auger e fótons (VALENCIA, 2017). Para a análise da topografia das amostras foram analisados os elétrons secundários.

Atrelada à técnica de microscopia de varredura, foi utilizada a espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS). Com ela, é possível conhecer a composição química em um ponto, área ou linha, gerando um *dotmap* utilizado nessa pesquisa para o conhecimento da composição química e na discussão da mineralogia dos materiais. A determinação química é realizada a partir da interpretação da energia de transição de elétrons entre níveis de energia, que é característica do elemento químico, causado pela interação entre o feixe de elétrons incidente e o átomo (ZANCHETTA, 2021).

A área específica dos grãos também foi determinada para a caracterização dos materiais, com o equipamento Belsorp Max da Bel Japan. A preparação das amostras foi realizada no Belprep-VacII, a uma temperatura de 105 °C e vácuo de  $10^{-2}$  kPa por 16 horas. A área superficial específica (ASE) foi determinada segundo o método BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938) (Belsorp-Max, Bel Japan), a partir da adsorção física de moléculas de gás hélio sobre a superfície do solo.

A densidade real dos grãos foi determinada pelo método da picnometria de adsorção de gás Hélio, com o equipamento AccuPyc II 1340, da Micromeritics. Nesse método,

o material seco em estufa (100°C/24h) tem seu volume verdadeiro determinado baseado na variação de pressão de gás hélio entre um recipiente de referência e a amostra.

Por fim, os índices físicos e de estado do material foram determinados de acordo com os métodos normatizados pela ABNT. Esses ensaios foram realizados acoplados com os ensaios de reometria. Assim, além da granulometria, foram determinados o limite de liquidez (NBR 6459/1984) e o limite de plasticidade (NBR 7180/1984), e o índice de plasticidade das amostras. Além disso, para cada amostra ensaiada, o teor de umidade (NBR 6457/1986) foi determinado para verificação.

A partir da multiplicação da área superficial específica (ASE) e da densidade dos grãos é determinada a área superficial volumétrica (VSA) das partículas. Esta medida permite a comparação das áreas superficiais para materiais com densidades muito diferentes, como é o caso entre os rejeitos e as argilas.

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para estudar o comportamento reológico das suspensões de materiais estudadas – bentonita, caulim e rejeitos –, então, foram realizadas misturas de pó de material puro em água. As misturas foram realizadas com 50g de material seco, com a adição da água deionizada no peso correspondente à umidade pré-determinada em um misturador de alta energia SpeedMixer da FlackTek, a uma rotação de 1500 rpm por 2 minutos.

A umidade e a concentração volumétrica das diferentes suspensões são apresentadas na Tabela 3-1. A umidade foi definida para cada amostra, e foi misturada com o material seco em umidade higroscópica. A umidade apresentada é a umidade seca, igual à razão da massa de água por massa de sólidos da mistura.

Tabela 3-1: Umidade e teor de sólidos volumétrico das suspensões estudadas.

Material	Teor	Amostra				
		01	02	03	04	05
Bentonita	w* (%)	80	100	124	141	158
	$\Phi^{**}$ (%)	32,9	28,2	24,0	21,8	19,9
Caulim	w* (%)	64	68	85	100	-
	$\Phi^{**}$ (%)	37,4	36,0	31,0	27,6	-
Ferro Finos	w* (%)	36	40	44	48	52
	$\Phi^{**}$ (%)	43,1	40,6	38,3	36,3	34,4
Ferro Totais	w* (%)	28	30	32	36	40
	$\Phi^{**}$ (%)	52,4	50,6	49,0	46,1	43,5

\* umidade (massa de água por massa de sólidos)

\*\*teor volumétrico de sólidos (volume de sólidos por volume total)

Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento reológico dos diferentes materiais está relacionado às interações entre as partículas, ligada às suas propriedades físicas (densidade, VSA e granulometria) (Rojas-Ramírez, 2019). Para avaliar estes parâmetros e comparar o comportamento reológico dos diferentes materiais, então, foi determinada a distância média de separação das partículas (IPS). Além de propriedades físicas, porém, o comportamento reológico ainda é influenciado pelas características químicas e mineralógicas, como a densidade de carga e a capacidade de troca catiônica, não levados em conta por essa metodologia.

O IPS foi determinado para cada suspensão a partir da granulometria, da ASE (determinado no BET) e da densidade das partículas de cada material. A porosidade na condição máxima de empacotamento ( $P_{of}$ ) de cada material foi considerada constante e igual a 40%, a porosidade teórica para partículas esféricas. O IPS foi determinado pelos métodos de De Larrard (1999) e Funk & Dinger (1994).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS SUSPENSÕES

Para a determinação experimental das propriedades reológicas dos materiais, ou a medição de seus valores de tensão e deformação ao longo do tempo, existem diversas técnicas definidas como reometria ou viscosimetria. A geometria placa-placa foi utilizada para a avaliação da microestrutura dos materiais e para a mimetização dos rejeitos selecionados nos momentos reológicos envolvidos no escoamento de

rejeitos pós ruptura de barragens. Foi utilizado um reômetro rotacional (HAAKE MARS 60, ThermoFischer Scientific), com geometria de placas paralelas com diâmetro de 35mm e distância entre as placas de 1mm. A granulometria de todos os materiais é pelo menos 10x menor que a distância do *gap*.

Visando a minimização do efeito de escorregamento das paredes e assim garantir a validade das medições, foram utilizadas lixas na geometria e na base. Por fim, para evitar perda de umidade para o ambiente, foi utilizado um *solvent trap*.

Os ensaios reológicos propostos, então, pretendem avaliar diferentes propriedades viscoelásticas das suspensões, sendo as mais comuns para modelagens de *dam break* a tensão de escoamento e viscosidade. Para esses parâmetros, foram realizados ensaios rotacionais de fluxo. Além disso, para avaliar a influência microestrutura dos materiais, foi realizado ensaios oscilatórios. O protocolo adotado para cada ensaio e as variáveis envolvidas é apresentada a seguir.

Os corpos de prova para ensaio foram moldados de maneira similar ao método adotado no ensaio de *Squeeze Flow*. Primeiramente, um gabarito com diâmetro interno igual à geometria placa-placa (35mm) e com altura de 1,1 mm acima da base da geometria placa-placa (0,1 mm acima do *gap*). O material foi depositado sem colocar muita força no gabarito, e o excesso foi arrasado. O procedimento de squeeze-flow do material entre as placas paralelas proposto Cardoso (CARDOSO et al., 2015), e foi utilizado para diminuir a heterogeneidade das amostras.

Como as corridas de massa envolvem material pós-ruptura, que pode perder sua estrutura antes ou durante a movimentação. Por simplificação, considerou-se que ele perca toda a sua estrutura antes do início do fluxo. Portanto foi proposta a utilização de protocolo de pré-cisalhamento anterior aos ensaios para garantir histórico de cisalhamento semelhante e a reprodutibilidade em todas as amostras (SAKANO, 2022). Para isso, as amostras foram submetidas a uma taxa de cisalhamento constante de  $10s^{-1}$  por um período de 60s, seguido por processo de repouso por 60s. Percebeu-se, porém, a limitação do uso deste método.

O pré-cisalhamento proposto pôde ser utilizado de maneira consistente apenas com a bentonita, gerando dificuldade de uso nos. A alta velocidade do pré-cisalhamento utilizada causou a saída lateral nas duas suspensões de caulim mais próximas ao



limite de plasticidade – mais concentradas ( $w = 55\%$  e  $60\%$ ). Isso resultou na diminuição da tensão de escoamento. A tentativa de utilizar velocidades de pré-cisalhamento menores garantiu a integridade das amostras dentro da geometria placa-placa, porém alterou os resultados dos ensaios – diminuindo a tensão de escoamento e gerando resultados inconsistentes com a relação entre as propriedades reológicas e a concentração volumétrica. Por isso, essas duas umidades foram descartadas, e optou-se por ter um pré-cisalhamento semelhante à bentonita.

Além disso, não foi possível se utilizar o método de pré-cisalhamento para os ensaios em rejeitos de minério de ferro, grosso ou fino, uma vez que esse impedia a reprodutibilidade dos ensaios. Verificou-se, porém, que o método de *squeeze flow* com o gabarito preparado apresenta repetibilidade satisfatória das medidas reológicas dos materiais.

Foi realizada a caracterização reológica avançada dos materiais para determinação de uma impressão digital dos materiais. Primeiramente, então, realizado um ensaio de varredura de tensão (i), com uma varredura de oscilação crescente até uma tensão máxima específica, dependente da suspensão. A partir do ensaio de varredura de tensão (i) foram definidas as tensões de cisalhamento utilizadas nos ensaios de varredura de frequência (iii). Assim, foram definidas três tensões para a realização desses ensaios, garantindo a realização de testes das amostras em regime linear (SAOS) e não-linear (MAOS e LAOS). Essas mesmas tensões foram utilizadas nos ensaios de varredura de tempo (iv).

Os ensaios oscilatórios foram, então, realizados nos seguintes protocolos: i) varredura de tensão com frequência de 1Hz clássico e *roundtrip*; ii) varredura de deformação com variação de amplitude (0,1 a 10%) e frequência de oscilação (0,1, 1 e 10 Hz); e iii) varredura de frequência; e iv) varredura de tempo com frequência de 1Hz.

Em seguida, foi realizada a determinação dos parâmetros reológicos clássicos do material a partir do ensaio de fluxo. O ensaio de fluxo com rampa de taxa de cisalhamento clássico consiste na aplicação de uma rampa de aceleração seguida de uma rampa de desaceleração, com durações definidas. A partir dessa variação, é possível traçar a curva de escoamento, que pode ser aproximada a modelos

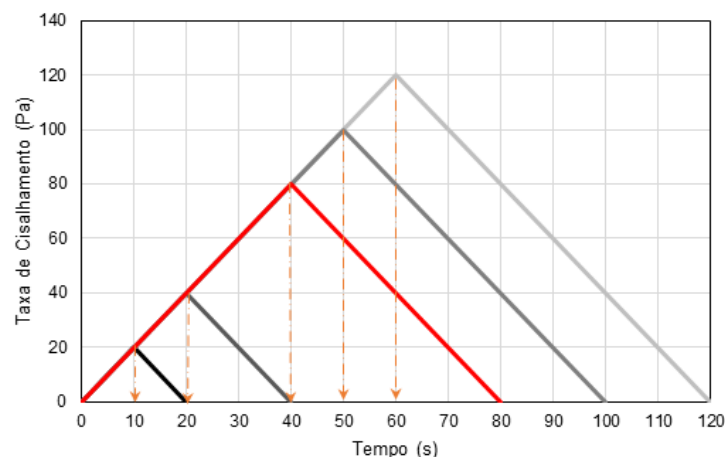
reológicos para de obter a viscosidade, tensão de escoamento e primeira e segunda diferenças de tensões normais ( $N_1$  e  $N_2$ ) (VALENCIA, 2017).

Simplificando o fluxo do escoamento após a ruptura de uma barragem de rejeitos, podemos definir um perfil de velocidade triangular, com velocidades desenvolvidas conforme as características do material e terreno. Neste trabalho, foram realizados somente ensaios controlados por taxa de cisalhamento por simplificação e pela maior facilidade de encontrar modelos matemáticos que definem o fluxo.

Em um ensaio de fluxo controlado por taxa de cisalhamento, então, as rampas crescente e decrescente representam em especial o momento de transporte e consequente deposição do material. Assim, a parte crescente da rampa ilustra o momento de aceleração do material até velocidade de pico, e a parte decrescente o momento de desaceleração do material até o seu repouso.

Para avaliação de diferentes velocidades máximas desenvolvidas em casos de rupturas de barragens, foram exploradas diferentes velocidades máximas atingidas pelo material (de  $20 \text{ s}^{-1}$ ,  $40 \text{ s}^{-1}$ ,  $80 \text{ s}^{-1}$ ,  $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $120 \text{ s}^{-1}$ ). As rampas de aceleração e desaceleração dos materiais foram lineares, e com aceleração constante de  $2 \text{ s}^{-1}$ . O protocolo de referência foi definido como taxa de cisalhamento máxima de  $80 \text{ s}^{-1}$ , com tempo de aceleração e de desaceleração de 40s cada. A Figura 3-2 apresenta os protocolos de fluxo utilizados.

Figura 3-2: Rampa com taxa máxima de cisalhamento diferente e gradiente constante.



Fonte: elaborado pela autora

A Tabela 3-2 resume todos os protocolos avaliados para descrever os momentos reológicos estudados (M – Mobilização, T – Transporte e D – Deposição) e as variáveis controladas.

Tabela 3-2: Resumo dos protocolos adotados, apontando a variável controlada e o momento reológico descrito (Mobilização – M, Transporte – T e Deposição – D).

Ensaio	Variáveis controladas	M	T	D
Oscilatório de deformação	Deformação e frequência	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Oscilatório de tensão	Tensão de cisalhamento e frequência	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Oscilatório de frequência	Tensão de cisalhamento		<input checked="" type="checkbox"/>	
Oscilatório de tempo	Tensão de cisalhamento, frequência e tempo		<input checked="" type="checkbox"/>	
Ensaio de Fluxo – Rampa de Taxa de Cisalhamento	Taxa de cisalhamento e Tempo		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonte: Elaborado pela autora.

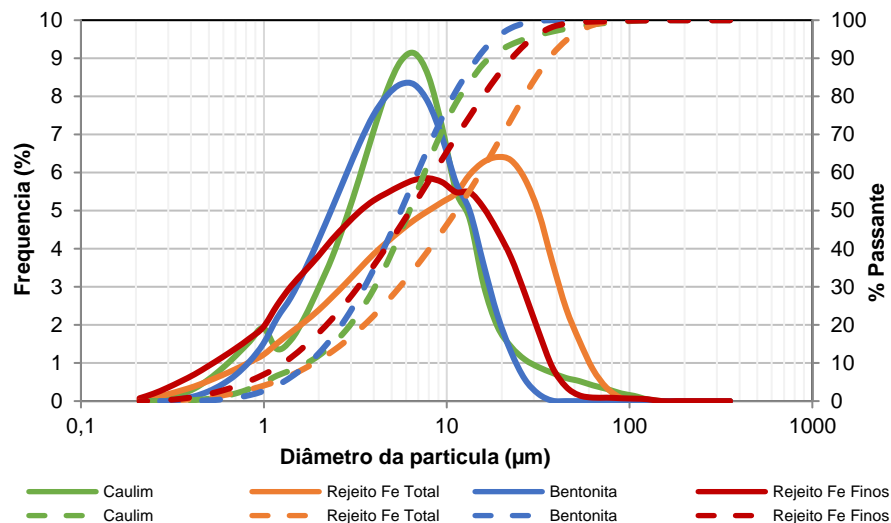
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES

#### 4.1.1 Caracterização dos solos pelo sistema SUCS

A Figura 4-1 apresenta o resultado da granulometria a laser dos quatro materiais estudados: bentonita, caulim e rejeito de minério de ferro fino em granulometria fina e granulometria total. Destaca-se que os três materiais apresentam granulometrias similares, predominantemente fina e distribuída na faixa de 1-30  $\mu\text{m}$ .

Figura 4-1: Distribuição granulométrica dos materiais estudados: caulim, bentonita e rejeitos finos de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os limites de liquidez e plasticidade, o peso específico dos sólidos e a área superficial específica dos materiais são resumidos na Tabela 4-1. Apesar da similaridade granulométrica entre os materiais, é possível observar uma grande diferença de comportamento reológico – medido indiretamente pelos índices de consistência do material.

Pode ser observada a relação da presença de argilominerais (relacionada com a capacidade de troca catiônica dos materiais) e a área específica, dos materiais com o Limite de Liquidez, conforme indicado por Massad (2012). Essa relação não é diretamente observada nos rejeitos, uma vez que estes não apresentam argilominerais e forças eletrostáticas menores que as argilas, porém ainda assim o

rejeito com maior VSA apresenta alguma plasticidade possivelmente devido à sua área específica. Todos os materiais apresentam fatores de forma bastante elevados, bastante distantes de esferas teóricas, em especial a bentonita e os ferros finos.

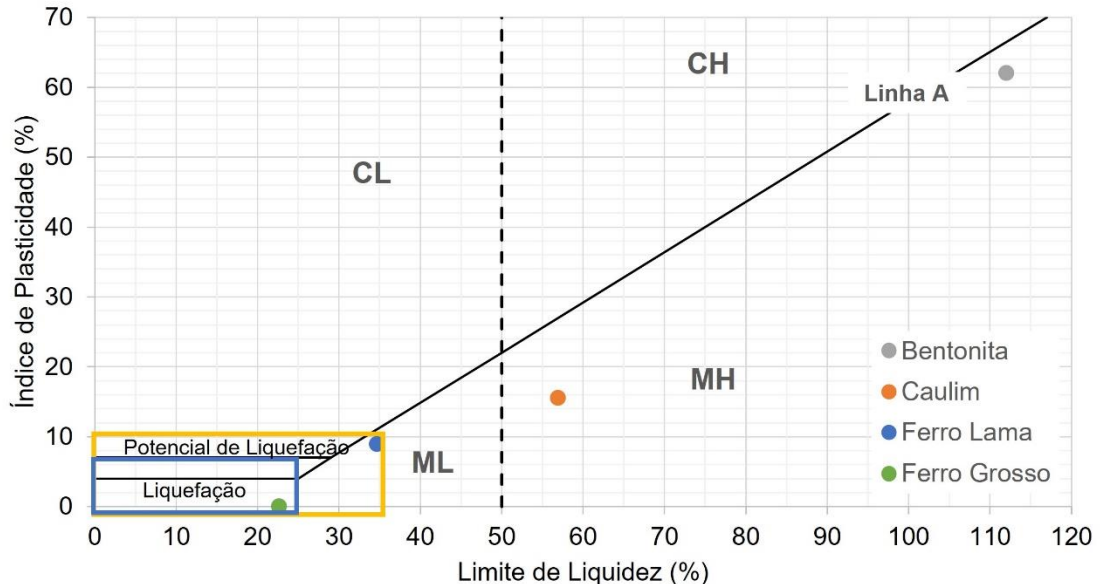
Tabela 4-1: Parâmetros de caracterização física dos materiais secos: densidade, área superficial específica, limite de liquidez, limite de liquidez em concentração volumétrica e índice de plasticidade.

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	ASE (m <sup>2</sup> /g)	Área Superficial Mesoporos	VSA (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	Fator de Forma	LL (%)	$\phi_{LL}^*$ (%)	IP (%)
Bentonita	2,55	79,1	40,1	201,1	124,5	112	25,9	62
Caulim	2,62	11,3	11,5	28,5	17,9	57	40,1	16
Ferro Lama	3,66	26,8	21,2	77,5	58,8	35	43,8	9
Ferro Total	3,25	11,6	11,2	36,1	18,4	NP	NP	NP

\* Limite de Liquidez convertido para Concentração Volumétrica

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4-2: Classificação dos materiais pela carta de plasticidade de Casagrande. ML = silte de baixa plasticidade; MH = silte de alta plasticidade; CL = argila de baixa plasticidade; CH = silte de alta plasticidade.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-2 apresenta a classificação dos materiais a partir da Carta de Plasticidade de Casagrande. O Caulim, apresenta uma característica intermediária como um silte plástico, e a Bentonita, apresenta características de um silte muito plástico. Nota-se que as duas argilas utilizadas são argilas industriais e, portanto, não tiveram a sua formação pedológica natural e foram, ao invés disso, moída para atingir a

granulometria especificada, o que explica o comportamento menos plástico desses materiais quando comparados a argilas naturais. O minério de ferro grosso não apresenta plasticidade, e é susceptível a liquefação (MANDHOUR, 2020), e o minério de ferro lamas apresenta baixa plasticidade, e é possivelmente susceptível a liquefação, e ambos são classificados como Siltes não Plásticos.

#### 4.1.2 Mineralogia dos materiais estudados

A partir da interpretação dos ensaios de DRx e FRx, é possível estimar os principais minerais presentes nos materiais estudados. Os principais elementos químicos, obtidos a partir da técnica de fluorescência de Raios-x, são apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Resultados da Fluorescência de Raios -X dos Materiais.

Composição Química	Bentonita	Caulim	Rejeito de Ferro Fino	Rejeito Ferro Grosso
SiO <sub>2</sub>	46,5	53,1	15,4	41,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,8	44,0	10,0	10,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,0	1,2	71,9	46,3
Na <sub>2</sub> O	9,4	0,1	0,1	-
MgO	3,8	0,2	0,4	0,2
Cl	6,8	0,1	tr	tr
K <sub>2</sub> O	2,1	0,6	0,1	0,1
CaO	2,5	0,1	tr	tr

Fonte: Elaborado pela autora.

A bentonita apresenta uma quantidade de cátions de troca elevada, indicando uma complexidade maior na composição química dos seus argilominerais. Apenas disso, indica-se a presença de esmectitas sódica, de ferro, cálcicas, além de illita e quartzo. A quantidade de argilominerais com maior capacidade de trocas catiônicas dão a esse material alta plasticidade, com LL de 112% e IP de 62%. O material apresenta área específica mais elevada quando comparada aos outros, com 78m<sup>2</sup>/g, porém bem abaixo de montmorilonitas de alta atividade da literatura, que podem chegar a ordem de 1000 m<sup>2</sup>/g (LAMBE; WHITMAN, 1968).

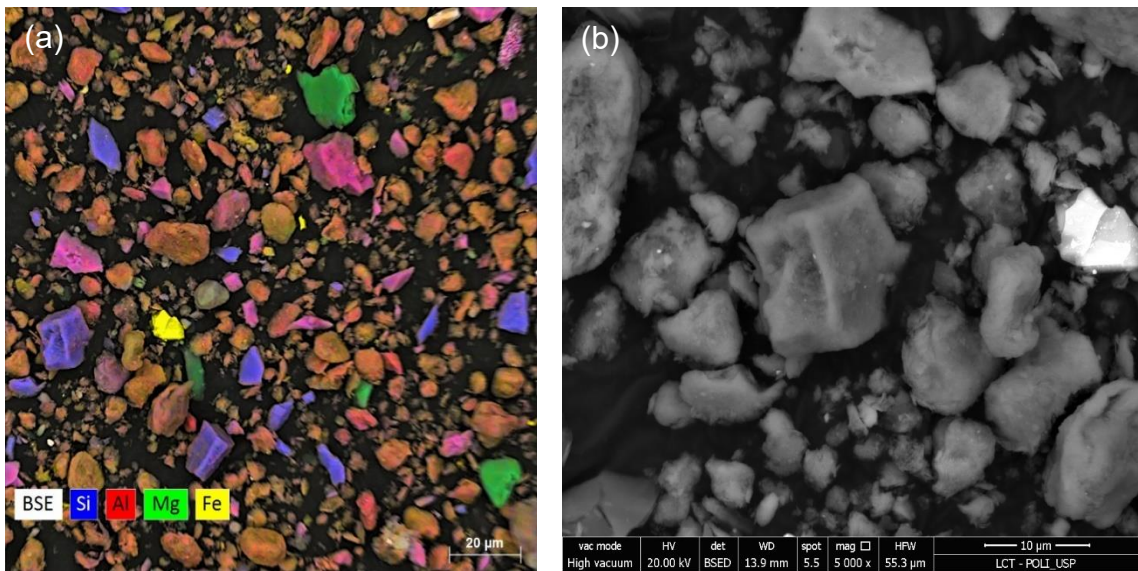
Observa-se que o Caulim é composto em mais de 90% por minerais do subgrupo da caulinita, o que também é concordante com o peso específico observado (2,62 g/cm<sup>3</sup>) e pela área específica do material (11,19 m<sup>2</sup>/g), além de ser uma argila com menor

plasticidade. O rejeito de minério de ferro fino possui cerca de 70% de óxidos de ferro, com maioria em goetita, o que explica seu peso específico de  $3,66 \text{ g/cm}^3$ . Além disso, o rejeito fino é composto em cerca de 10% de quartzo e cerca de 10% de caulinita, que em conjunto com a granulometria e outros minerais em menores porcentagem fornecem a baixa plasticidade para o material (IP=9%).

O rejeito de minério de ferro total possui granulometria um pouco mais grossa que os outros materiais, porém com composição química bastante similar aos finos de ferro. Porém, é observada uma quantidade maior de quartzo (cerca de 30%), porém ainda com bastante óxido de ferro (cerca de 40%, com predominância de goetita) e cerca de 10% de caulinita, além de outros minerais traços. Essa composição também está de acordo com a falta de plasticidade do material, e seu peso específico elevado ( $3,25 \text{ g/cm}^3$ ).

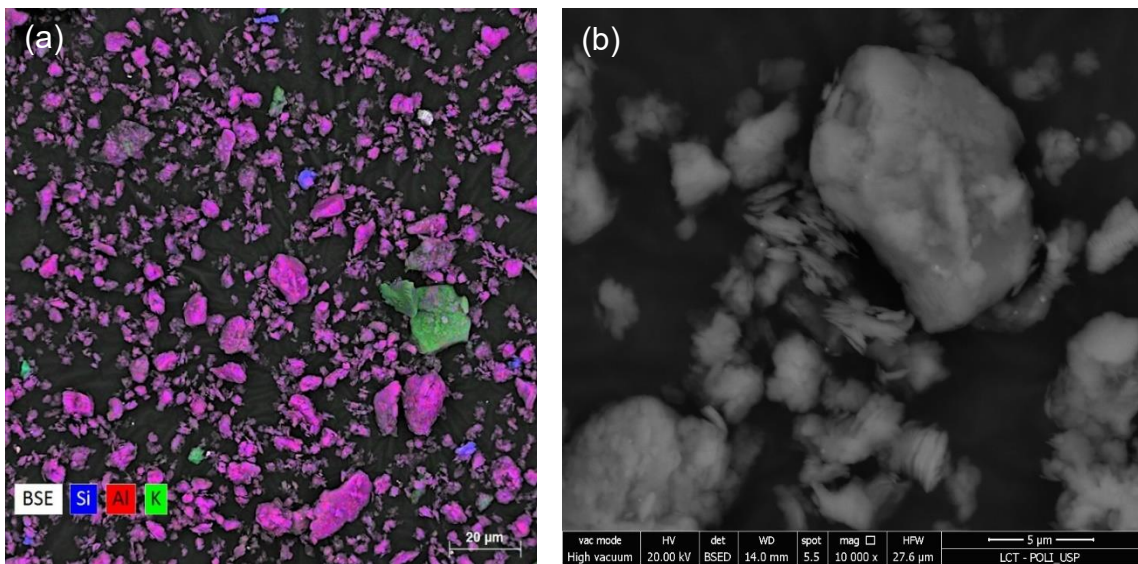
A Figura 4-3 apresenta as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura da bentonita. Em (a), é apresentado o *dotmap* obtido a partir do EDS, demonstrando a diversidade de elementos químicos nas partículas. Observa-se, porém, a predominância de elementos químicos presentes na composição de argilominerais do grupo esmectita (alumínio, magnésio e ferro), além de partículas de quartzo e de caulinita (sílica e alumínio). Os resultados químicos estão de acordo com os resultados anteriores o FRX e do DRX. Observa-se na Figura 4-3 (b) um detalhe da morfologia de alguns grãos. Observa-se a presença de finos aglomerados em partículas maiores, além da presença de partículas muito finas e lamelares agrupadas.

Figura 4-3: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da bentonita; a) *dotmap* da composição química da bentonita; b) detalhe morfológico de partículas de bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4-4: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do caulim; a) *dotmap* da composição química do caulim; b) detalhe morfológico de partículas de caulim.



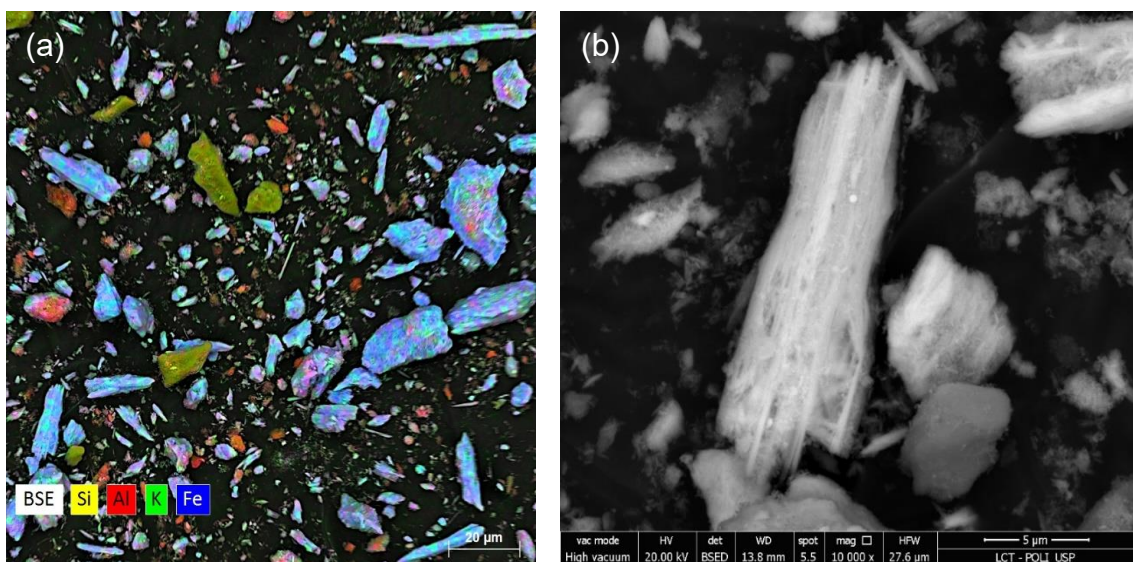
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-4 apresenta as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura do caulim. Em (a), é apresentado o *dotmap* obtido a partir do EDS, demonstrando a predominância mineralógica da caulinita no material, além de partículas de quartzo. Os resultados químicos estão de acordo com os resultados anteriores o FRX e do DRX.. Observa-se na Figura 4-4 (b) um detalhe da morfologia de alguns grãos. Como na bentonita, observa-se a presença de partículas laminares de argilominerais aglomeradas ou sobrepondo partículas maiores.



A Figura 4-5 apresenta as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura do rejeito de minério de ferro em granulometria fina. Os resultados químicos estão de acordo com os resultados anteriores o FRX e do DRX. Em (a), é apresentado o *dotmap* obtido a partir do EDS, demonstrando a predominância mineralógica de minerais que apresentam ferro, provavelmente a goetita, e quartzo. Observa-se na Figura 4-5 (b) um detalhe da morfologia de um grão com bastante ferro. Observa-se a grande porosidade e característica de morfologia de espinhos na partícula.

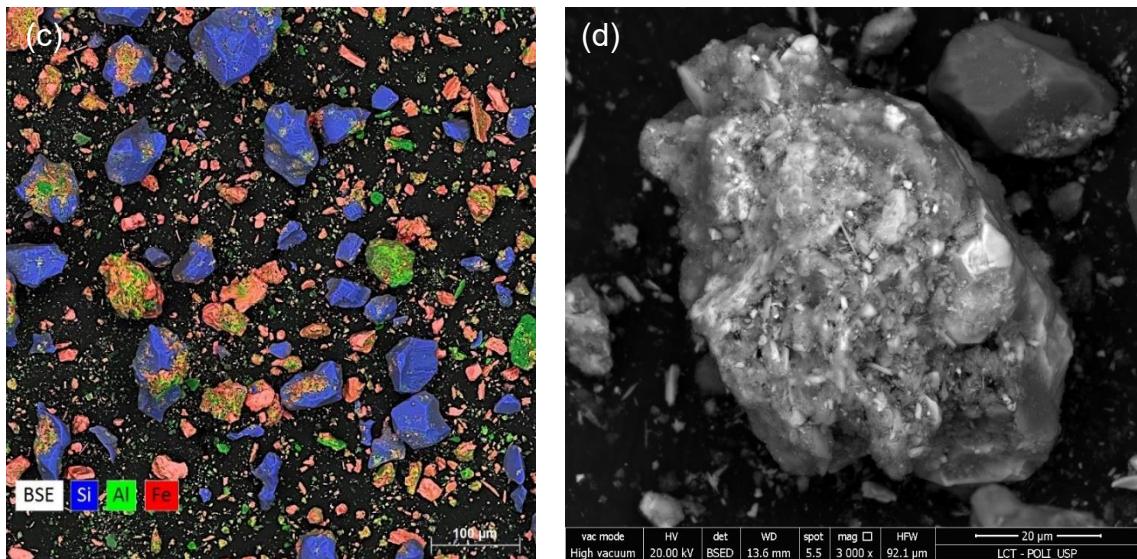
Figura 4-5: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do rejeito de minério de ferro em granulometria fina; a) *dotmap* da composição química do rejeito; b) detalhe morfológico de partículas de rejeito.



Fonte: Elaborado pela autora.

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** apresenta as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura do rejeito de minério de ferro em granulometria total. Os resultados químicos estão de acordo com os resultados anteriores o FRX e do DRX. Em (a), é apresentado o *dotmap* obtido a partir do EDS, demonstrando a predominância mineralógica de quartzos e minerais com ferro, provavelmente goetita, com caulinitas aglomeradas. Observa-se na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** (b) um detalhe da morfologia de um grão com bastante ferro e caulinita. Observa-se a grande porosidade da partícula, e a presença de material, provavelmente caulinita, sobreposto na partícula.

Figura 4-6: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do rejeito de minério de ferro em granulometria total; a) *dotmap* da composição química do rejeito; b) detalhe morfológico de partículas de rejeito.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1.3 Distância média de separação das partículas (IPS) das suspensões

O IPS foi determinado para cada suspensão a partir da granulometria, da ASE (determinado no BET) e da densidade das partículas de cada material, apresentadas na Figura 4-1 e na Tabela 4-1, respectivamente. Destaca-se a limitação da utilização de IPS para materiais finos, devido à dificuldade de determinação do  $P_{of}$  dos materiais, porém este ainda foi utilizado para a comparação, devido à inclusão da área específica de cada material em seu cálculo.

Observa-se que por definição, o valor de IPS é inversamente proporcional à ASE, ao  $\phi$  e à  $P_{of}$ . Observa-se grande diferença entre a área superficial volumétrica das partículas dos materiais, com a bentonita apresentando VSA quase 10x maior que o caulim, e até 5x maior que o minério de ferro. Assim, a distância entre as partículas da bentonita é bem menor que nos outros materiais, apesar da menor concentração volumétrica, devido ao maior fator de forma das partículas. Os IPS apresentados são bem baixos, devido à granulometria fina dos materiais utilizados.

Tabela 4-3: Cálculo da distância entre partículas IPS por diferentes autores.

Material	$\phi$ (%)	Funk & Dinger (1994)		De Larrard (1999)	
		P <sub>of</sub> (%)	IPS ( $\mu\text{m}$ )	P <sub>of</sub> (%)	IPS ( $\mu\text{m}$ )
Bentonita	32,9%	19,0%	0,018	25,9%	0,017
	28,2%	19,0%	0,023	25,9%	0,022
	24,0%	19,0%	0,029	25,9%	0,028
	21,8%	19,0%	0,033	25,9%	0,032
	19,9%	19,0%	0,038	25,9%	0,037
Caulim	41,00%	17,7%	0,086	26,8%	0,076
	38,9%	17,7%	0,095	26,8%	0,085
	37,4%	17,7%	0,103	26,8%	0,092
	36,0%	17,7%	0,11	26,8%	0,099
	31,0%	17,7%	0,141	26,8%	0,131
	27,6%	17,7%	0,169	26,8%	0,158
Ferro Lama	43,2%	12,4%	0,03	22,8%	0,026
	40,6%	12,4%	0,034	22,8%	0,03
	38,3%	12,4%	0,038	22,8%	0,034
	36,3%	12,4%	0,042	22,8%	0,038
	34,5%	12,4%	0,045	22,8%	0,042
Ferro Totais	52,3%	10,9%	0,044	21,9%	0,035
	50,6%	10,9%	0,047	21,9%	0,039
	48,9%	10,9%	0,051	21,9%	0,042
	46,0%	10,9%	0,058	21,9%	0,049
	43,4%	10,9%	0,065	21,9%	0,057

Apesar de apresentarem granulometrias similares, a distância média entre as partículas definida pelo IPS é bastante diferente entre os materiais. Esta chega a ser dez vezes maior na bentonita que no caulim, e bastante baixo quando comparado a valores de IPS de microfillers da literatura (Damineli, 2016). Deve ser observado, porém, que o fator de forma dos materiais é muito elevado, indicando geometria muito diferente da esfera teórica utilizada para a determinação do IPS, o que pode acarretar erros no cálculo. Além disso, o método utilizado para a determinação da porosidade de empacotamento apresenta limitações para materiais finos, em especial

argilominerais devido à variação da forma em relação a esferas e as cargas superficiais.

## 4.2 AVALIAÇÃO DO PROTOCOLO DE PRÉ-CISALHAMENTO

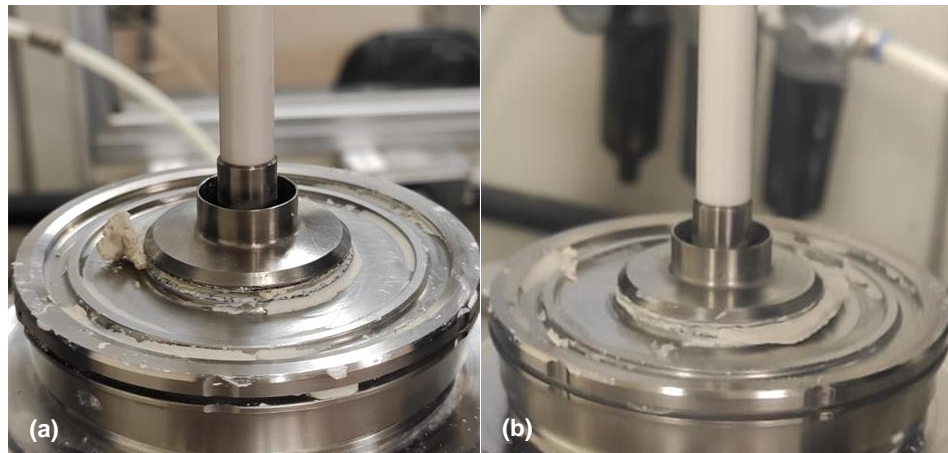
Nesse item, são apresentados os resultados e discussões da avaliação do uso do protocolo de pré-cisalhamento. O pré-cisalhamento pretende garantir os ensaios sejam realizados em amostras com um mesmo histórico de cisalhamento, e assim, garantir a repetibilidade dos ensaios (SAKANO, 2022; BLASIO, 2011). Porém, foi observado que isso não aconteceu em todas as amostras.

Em específico, este item avalia os casos em que seu uso gerou inconsistências no ensaio, os possíveis motivos, e como o pré-cisalhamento foi adaptado devido a esses resultados. Conclui-se que o mesmo protocolo de pré-cisalhamento não pode ser utilizado de uma mesma forma para todos os materiais geomecânicos. O ensaio de Stress Sweep foi utilizado para a avaliação de repetibilidade e qualidade dos resultados, tendo em vista que foi o primeiro ensaio realizado em todos os materiais durante a realização desse trabalho.

### 4.2.1 Repetibilidade de Ensaio Oscilatórios de Tensão do Caulim

Observa-se que o protocolo de pré-cisalhamento ( $10\text{s}^{-1}$  por 60s) não é adequado para todas as concentrações das suspensões de caulim. Pode-se observar que o material concentrado saiu do *gap* entre as placas, conforme ilustrado nas fotos de final de pré-cisalhamento apresentado na Figura 4-7, o que vai contra as hipóteses de cálculo para a geometria. A saída de material durante o cisalhamento em sentido único a altas taxas pôde ser observada para as duas suspensões mais concentradas, de 41,0% e de 38,9%. Ainda assim, foi analisada a repetibilidade dos ensaios de stress sweep realizados com esse pré-cisalhamento, além da utilização de outros protocolos de pré-cisalhamento.

Figura 4-7: Registro fotográfico do protocolo de pré-cisalhamento de amostras de caulim em (a) concentração volumétrica de 41%; e (b) concentração volumétrica de 39%.

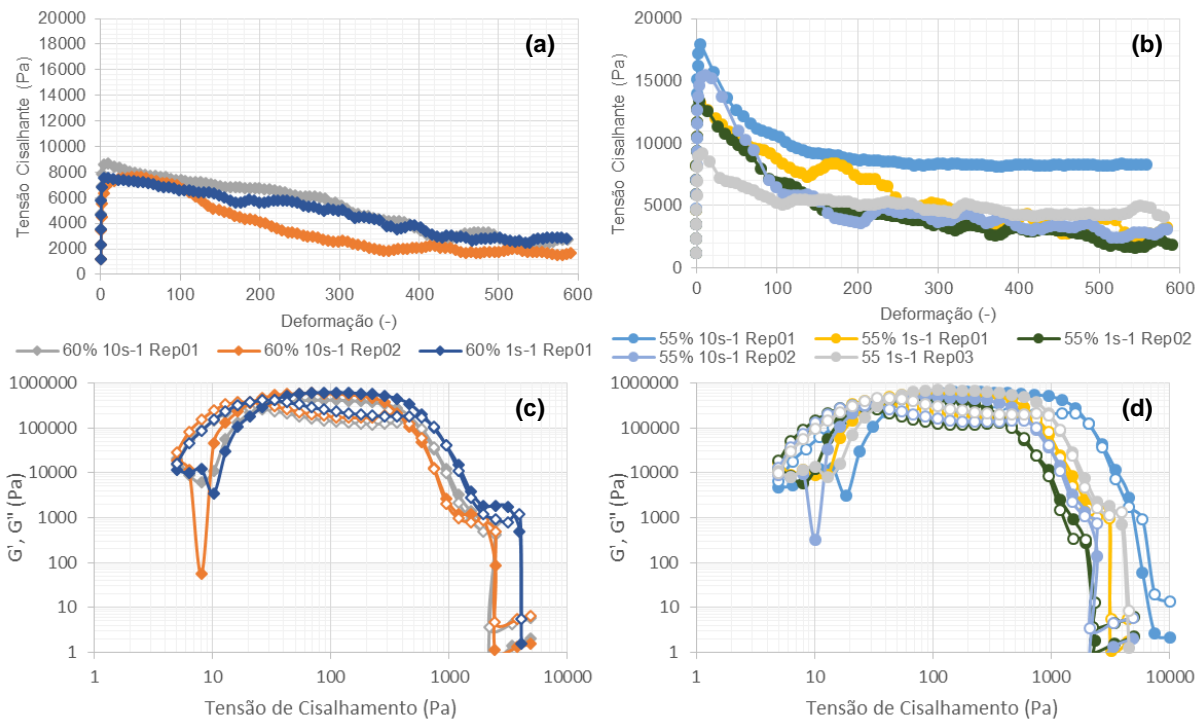


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-8 apresenta o resultado dos protocolos de pré-cisalhamento das suspensões mais concentradas de Caulim (concentração volumétrica de 41,0% e de 38,9%), assim como os ensaios oscilatórios de tensão. Foram realizados, para cada suspensão, uma duplicata do ensaio com pré-cisalhamento de taxa  $10\text{s}^{-1}$  para cada uma das suspensões, sendo, porém sendo observado o mesmo problema de saída de material e grande diferença entre os ensaios. Com a realização dos ensaios concentrados com taxas de  $1\text{s}^{-1}$  não foi observada saída do material da geometria. Por isso, seguiu-se com a avaliação da a repetibilidade dos ensaios para a concentração de 41,0%, abaixo do limite de liquidez, por triplicata. Notou-se, porém, grande variabilidade dos resultados de tensão de escoamento determinada para o ensaio oscilatório de tensões.

Em todos os ensaios, para todas as umidades, percebe-se que a tensão de escoamento obtida no final do protocolo de pré-cisalhamento é proporcional à tensão de escoamento do oscilatório de tensões. Por isso, é essencial que os materiais tenham, após o término do protocolo de pré-cisalhamento, uma tensão amolgada constante e igual em todas as suspensões.

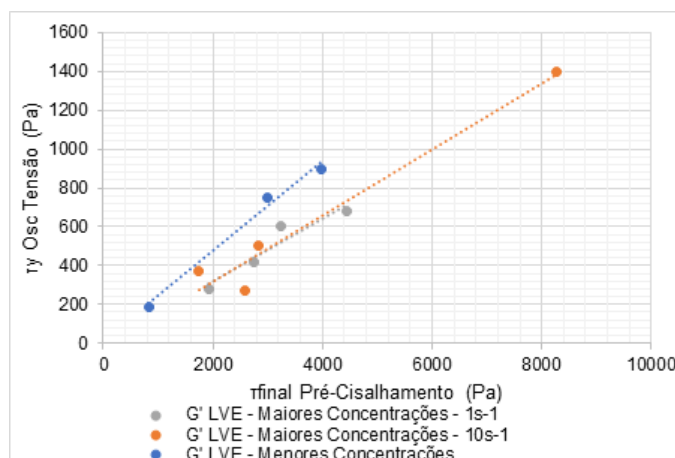
Figura 4-8: Resultados de ensaios de verificação de repetibilidade em suspensões de caulim com alto teor de sólidos (a) pré-cisalhamento em concentração de 41%; (b) pré-cisalhamento em concentração de 39%; (c) oscilatório de tensões em concentração de 41%; e (d) oscilatório de tensões em concentração de 39%.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-9 apresenta a relação obtida entre a tensão de cisalhante média amolgada do protocolo de pré-cisalhamento e a tensão de escoamento do ensaio oscilatório de tensão, independente da concentração volumétrica do material. Portanto, é necessário que seja encontrado um histórico de cisalhamento semelhante e que permita a repetibilidade desses materiais.

Figura 4-9: Comparação da relação entre a tensão de escoamento obtida no final do protocolo de pré-cisalhamento e a tensão de escoamento obtida no ensaio oscilatório de tensões.



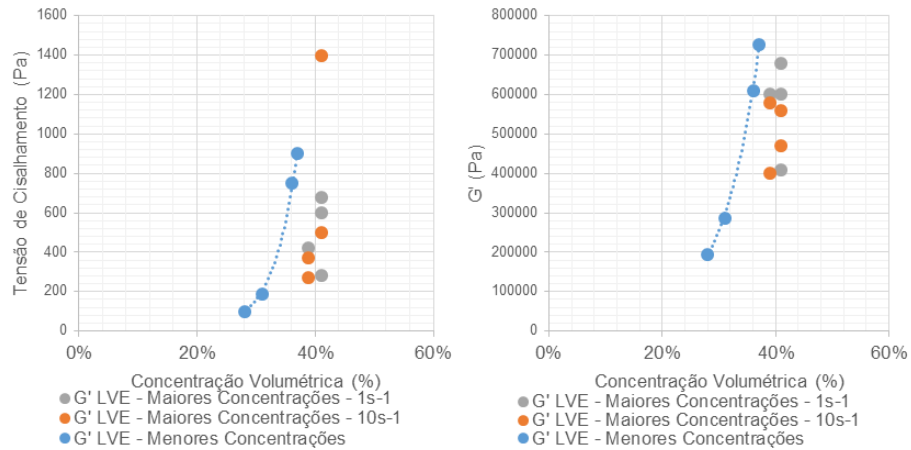
Fonte: Elaborado pela autora.

As inconsistências dos resultados de concentrações maiores ficam evidente quando comparamos os resultados das suspensões mais concentradas (39% e 41%) com as quatro suspensões menos concentradas (37,4%, 36,0%, 31,0%, 27,6%), apresentado na Figura 4-10. Observa-se, primeiro, a grande variabilidade nos resultados das amostras mais concentradas. Além disso, as suspensões não obedecem a relação de aumento dos valores de  $G'$ ,  $G''$  e tensão de escoamento com o aumento da concentração, conforme esperado.

Portanto, o protocolo de pré-cisalhamento causou inconsistências nos resultados das nas duas suspensões mais concentradas, tanto devido à saída de material entre as placas paralelas quanto devido a quebras da estrutura interna na geometria. Observa-se, pelo estudo do pré-cisalhamento do caulim, as duas propriedades do material. Primeiramente, a tendência das suspensões de caulim concentradas de saírem radialmente da geometria placa-placa para maiores taxas de cisalhamento. Além disso, observa-se a influência do protocolo de pré-cisalhamento no comportamento deste material. A influência do histórico de cisalhamento no comportamento de materiais geomecânicos será discutido novamente mais adiante, nas observações sobre os ensaios de fluxo.

Foi então estudada se o fator determinante para este comportamento seria somente as altas taxas de cisalhamento e a conseqüentemente saída de material da geometria. Portanto, foi estudada a realização de ensaios das suspensões de caulim de 41,0% e de 38,9% foram analisadas usando um pré-cisalhamento de  $1\text{s}^{-1}$  por 600s, mantendo assim a deformação final constante. Observa-se, porém, que a diferença no histórico de cisalhamento impossibilita a comparação dos resultados do caulim, possivelmente devido à alta tixotropia das suspensões de caulim a baixas concentrações. A grande variabilidade também impede a sua interpretação conforme uma linha de tendência. Assim, optou-se a continuação dos ensaios de caulim somente para as concentrações menores e a manutenção do protocolo de pré-cisalhamento.

Figura 4-10: Comparação da relação entre a concentração volumétrica os ensaios oscilatórios de tensão para as menores concentrações (28%, 31%, 36% e 37%) e as maiores concentrações (39% e 41%) com diferentes protocolos de pré-cisalhamento ( $10s^{-1}/60s$  e  $10s^{-1}/600s$ ) com (a) a tensão de escoamento do ensaio oscilatório de tensões e (b) o módulo de armazenamento obtido na região linear.



Fonte: Elaborado pela autora.

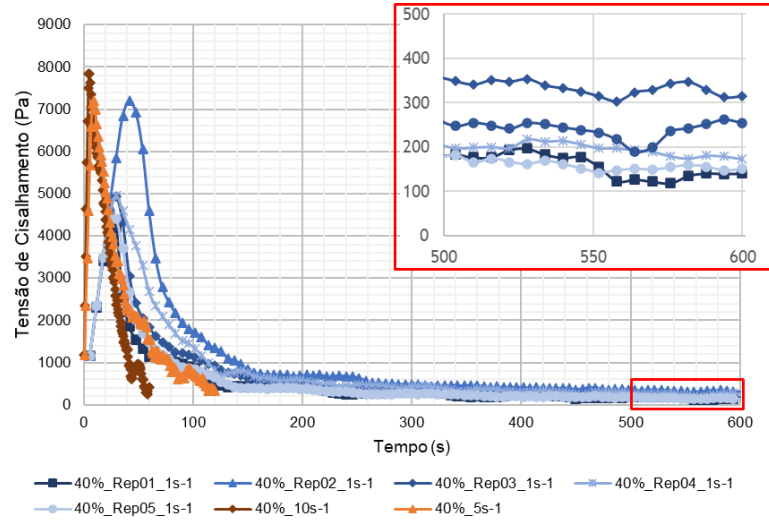
#### 4.2.2 Repetibilidade de Ensaio Oscilatórios de Tensão de Rejeito de Minério de Ferro em Granulometria Fina

Os testes de pré-cisalhamento nos rejeitos de minério de ferro finos foram realizados para uma suspensão mais concentrada (com  $\Phi=40\%$ ) e uma menos concentrada (com  $\Phi=34\%$ ), para avaliar se a concentração volumétrica teria relação com esse comportamento. Todos os ensaios foram realizados com frequência de 1Hz.

A Figura 4-11 apresenta o resultado das leituras de tensões de cisalhamento do protocolo de pré-cisalhamento do ferro fino com concentração volumétrica de 40%. Primeiramente, nota-se que as tensões de cisalhamento do ensaio de cisalhamento a taxa constante de  $10s^{-1}$  durante 60s, o protocolo a princípio proposto, não se encontrava ainda numa região de fluxo permanente, isso é, com tensão de cisalhamento estável, e por isso esse protocolo de ensaio foi considerado insuficiente. Portanto, o tempo de pré-cisalhamento foi aumentado, e a taxa foi proporcionalmente diminuída para manter a deformação final constante nas amostras. Porém, o mesmo pôde ser observado para o resultado das tensões de cisalhamento da amostra pré-cisalhada a  $5s^{-1}$  por 120 s. Para a taxa constante de  $1s^{-1}$ , pode-se considerar que as amostras já se encontravam em um platô, ou seja em regime permanente, e que, portanto, em histórico de cisalhamento e características similares.

Figura 4-11: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino  $\Phi = 40\%$  - tensões de cisalhamento na fase de pré-cisalhamento

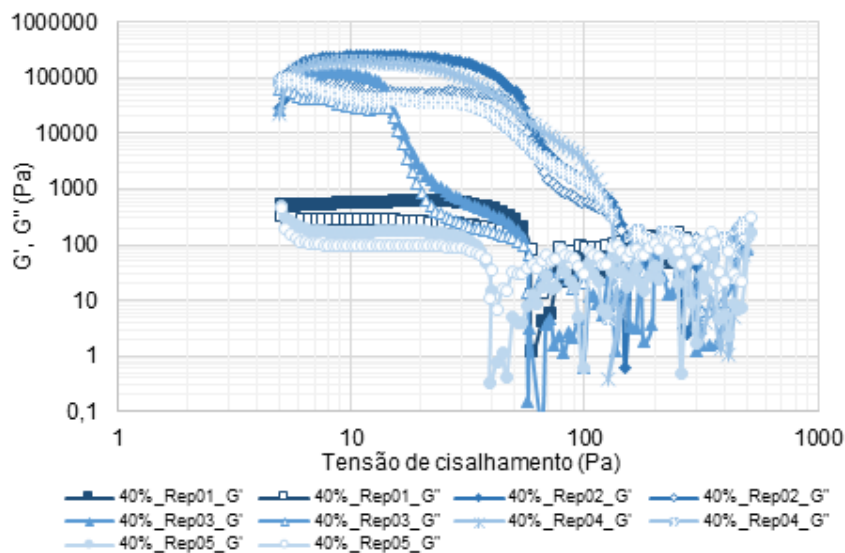




Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-12 apresenta os testes de repetibilidade do rejeito de minério de ferro fino com pré-cisalhamento de  $1\text{ s}^{-1}$  por 600s. O material não apresentou nenhuma consistência nos resultados, com variabilidades na ordem de grandeza em  $G'$ ,  $G''$  e na tensão de escoamento. Além disso, foram observados comportamentos bastante diversos durante o ensaio para as cinco amostras, com o formato das curvas sendo bastante diferentes.

Figura 4-12: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com pré-cisalhamento de  $1\text{ s}^{-1}$  com  $\Phi = 40\%$ .



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados dos valores determinados os valores da tensão de cisalhamento máxima e amolgada obtidas no protocolo de pré-cisalhamento, e da tensão de escoamento e da  $G'$  e  $G''$  na LVE do protocolo de oscilatório de tensão. A

partir dos dados determinados pelo ensaio, foi possível calcular a média e desvio padrão para os valores determinados para os ensaios realizados sem molde e com pré-cisalhamento, para a verificação da repetibilidade estatística dos ensaios. A partir desses, foram determinados os coeficientes de variação para a avaliação da dispersão de cada parâmetro em relação ao valor médio.

É observado que a variabilidade da tensão de escoamento obtida pelo protocolo de pré-cisalhamento possui tem média de 5.160 Pa, com uma variabilidade de 20%. A tensão de cisalhamento constante obtida no final do pré-adensamento era em média 234 Pa, com um CoV de 30%, ainda maior que a tensão de escoamento estática. Os resultados do oscilatório de tensão, por fim, demonstram CoV de tensão de escoamento de cerca de 40%, e  $G'$  e  $G''$  na ordem de 85%, considerados inaceitáveis para o estudo objetivado. Assim, percebe-se que a utilização do protocolo de pré-cisalhamento não garante a repetibilidade nos ensaios de rejeito de minério de ferro para maiores concentrações, o que era sua função inicial.

Tabela 4-4: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos com  $\Phi = 40\%$  com protocolo de pré-cisalhamento.

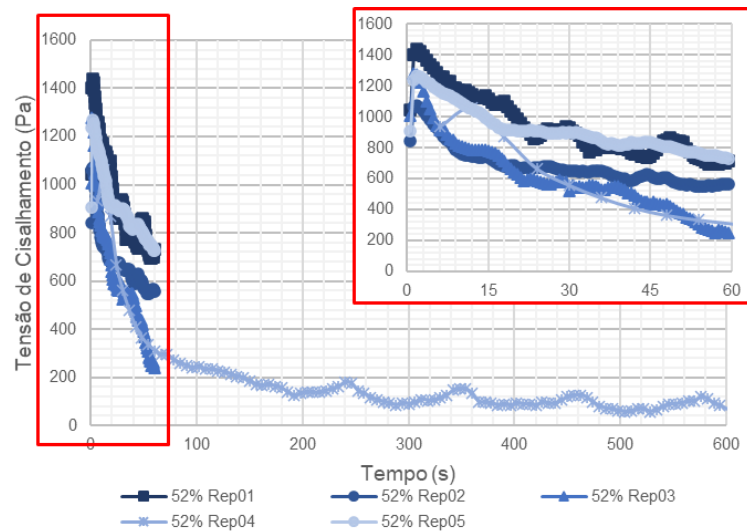
Amostra	Pré-Cisalhamento		Ensaio Oscilatório		
	$\tau_y$	$\tau_{final}$	$\tau_y$	$G' \text{ LVE}$	$G'' \text{ LVE}$
1	4.281	157	50	550	350
2	7.193	353	40	200.000	60.000
3	4.930	218	12	100.000	40.000
4	4.956	262	28	200.000	40.000
5	4.432	182	33	170	100
Média	5.158	234	33	100.144	28.090
Desv. Padrão	1.052	69	13	89.282	23.895
CoV	20%	30%	39%	89%	85%

Fonte: Elaborado pela autora.

O teste de repetibilidade dos ensaios foi, então, repetido com os as amostras de 52%, para a verificação da repetibilidade para o caso de suspensões menos concentradas. Por isso, foram propostos ensaios de pré-cisalhamento na taxa de  $10s^{-1}$  por 60s, como estabelecido para os outros materiais, apresentados na Figura 4-13. Nesse caso, percebe-se que não há saída de material da geometria (e, portanto, falha em atender as suposições de ensaio) para as concentrações menores. Porém, percebe-se que o

material aparenta atingir um platô no final do ensaio, porém com alta variabilidade de um ensaio para o outro, e independente da tensão de cisalhamento inicial. A partir da realização de pré-cisalhamento a taxa menor ( $1 \text{ s}^{-1}$  por 600s), percebe-se que o material não atingiu um valor constante.

Figura 4-13: Resultado do protocolo de pré-cisalhamento do rejeito de minério de ferro em granulometria fina com  $\Phi = 34\%$ .

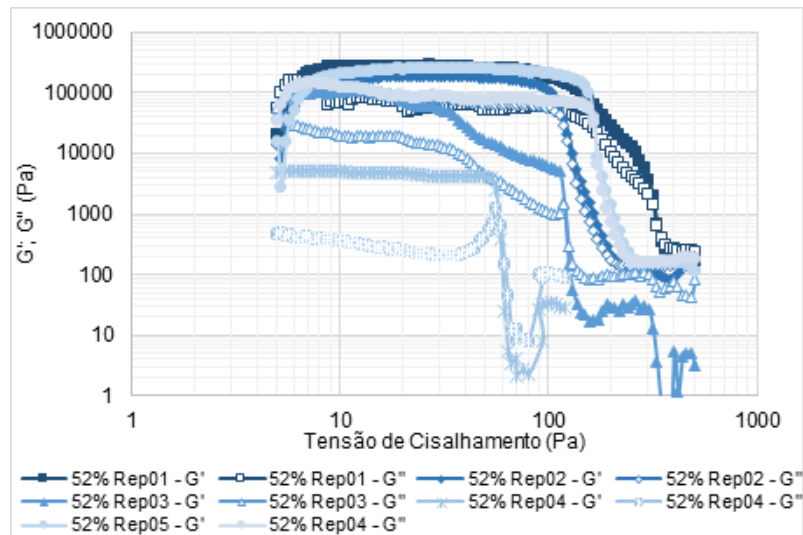


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-14 apresenta os ensaios oscilatórios de tensão do rejeito de minério de ferro fino com concentração volumétrica de 34%. Quanto aos resultados dos ensaios oscilatórios de tensão, nota-se uma elevada variabilidade da tensão de escoamento e da inclinação da reta de MAOS na transição  $\tau_y$ , e em um dos ensaios  $G'$  e  $G''$  também ficaram bastante baixos. Além disso, nota-se que a tensão de cisalhamento no final do pré-cisalhamento está relacionada à tensão de escoamento obtida pelo ensaio oscilatório de tensões.

A Tabela 4-5 apresenta os resultados dos valores de tensão de cisalhamento máxima e amolgada obtidas no protocolo de pré-cisalhamento, e da tensão de escoamento e da  $G'$  e  $G''$  na LVE do protocolo de oscilatório de tensão para a amostra de  $\Phi = 34\%$ . A partir dos dados determinados pelo ensaio, foi possível calcular a média e desvio padrão para os valores determinados para os ensaios e os coeficientes de variação para a avaliação da dispersão de cada parâmetro em relação ao valor médio.

Figura 4-14: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com diferentes taxas de pré-cisalhamento –  $\Phi = 34\%$ .



Fonte: Elaborado pela autora.

É observado que a variabilidade da tensão de escoamento obtida pelo protocolo de pré-cisalhamento possui uma média de 1224 Pa, com uma variabilidade de 12%. A tensão de cisalhamento constante obtida no final do pré-cisalhamento era em média 622 Pa, valor acima do obtido para a amostra mais concentrada, e possui um CoV de 39%, superior à tensão de escoamento estática. Os resultados do oscilatório de tensão, por fim, demonstram CoV de tensão de escoamento de cerca de 26%, e  $G'$  e  $G''$  superiores a 60%, considerados inaceitáveis para o estudo objetivado. Assim, percebe-se que a utilização do protocolo de pré-cisalhamento não garante a repetibilidade nos ensaios de rejeito de minério de ferro para menores concentrações.

Tabela 4-5: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos de umidade com  $\Phi = 34\%$  com protocolo de pré-cisalhamento.

Amostra	Pré-Cisalhamento				Stress Sweep		
	Cisalhamento	Cisalhamento	Ty Pré Cisalhamento	T Final Pré-Cisalhamento	Tensão de Escoamento	G' Platô	G'' Platô
1	10 s-1	60s	1440	737	110	280000	70000
2	10 s-1	60s	1073	683	100	180000	80000
3	10 s-1	60s	1278	603	90	100000	20000
5	10 s-1	60s	1060	177	53	4500	300
6	1 s-1	600s	1268	912	130	240000	80000
		Média	1224	622	97	160900	50060
		Desv. Padrão	142	245	25	98971	33377
		CoV	12%	39%	26%	62%	67%

Fonte: Elaborado pela autora.

A proposta do uso do protocolo de pré-cisalhamento era a imposição de um histórico de tensões semelhante nas amostras e garantir a repetibilidade dos ensaios. Assim, o protocolo proposto para o pré-cisalhamento não é satisfatório para a realização de ensaios nos rejeitos de minério de ferro.

Porém, ainda é necessário garantir a repetibilidade dos ensaios em amostras de rejeito de minério de ferro fino. Foi observado, porém, que o uso do gabarito permitiu a repetibilidade das amostras mesmo sem a realização de um pré-cisalhamento. Isso porque os corpos de prova foram moldados de maneira similar e, portanto, apresentaram características físicas similares.

O gabarito foi projetado com altura reduzida o suficiente para evitar que durante a compressão da placa superior da geometria haja separação de fases, fator mais importante em suspensões menos concentradas, ou que sejam necessárias tensões normais acima do limite de força do reômetro, nas suspensões concentradas que possuem atrito entre os grãos elevados. Porém, o gabarito possui altura suficiente para garantir o contato entre a superfície superior da amostra e a lixa.

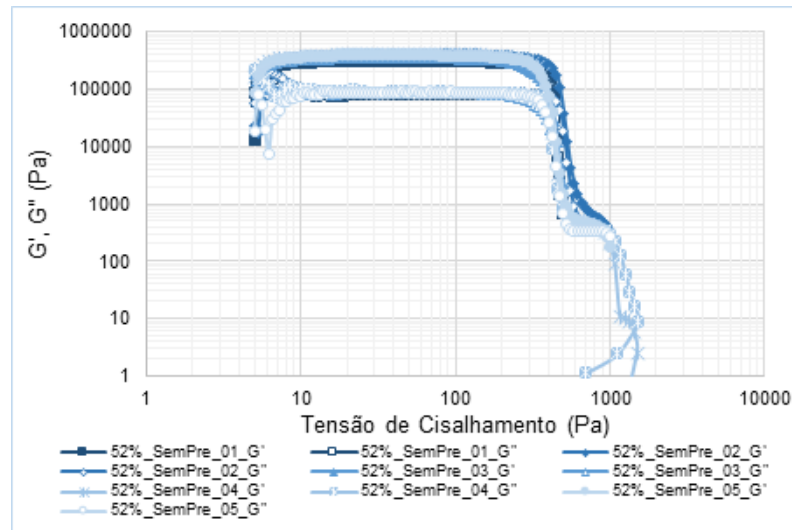
Para garantir a qualidade das amostras com o gabarito, é necessário colocar o material com cuidado, sem excesso de força ou vibrações que possam desestabilizar o material. A retirada do gabarito deve ser feita devagar e sem danificar as amostras. Por fim, a geometria deve ser limpa com o máximo de cuidado para garantir que não haja deformações no corpo de prova antes de se dar início ao ensaio.

O uso do gabarito, porém, impede a recriação das características de um material que já se encontra em fluxo. Ao contrário, é avaliada uma amostra que possui um histórico de cisalhamento sem nenhuma deformação, e o rejeito no estado inicial da amostra. Porém, considera-se que a amostra foi depositada de maneira a se garantir o menor adensamento possível das partículas.

Para a realização do teste de repetibilidade foi utilizada a suspensão de minério de ferro fino com concentração volumétrica de 34%, considerada como apresentando uma moldagem mais difícil devido à sua consistência mais líquida. A Figura 4-15 apresenta os resultados dos ensaios de Stress Sweep de cinco amostras de rejeito de minério de ferro fino realizadas sem o protocolo de pré-cisalhamento, somente com

a moldagem conforme proposto. Percebe-se a grande semelhança entre o formato dos gráficos para todas as cinco amostras.

Figura 4-15: Resultados do teste de repetibilidade dos ensaios de Stress Sweep do rejeito de minério de ferro fino com diferentes taxas de pré-cisalhamento –  $\Phi = 34\%$ .



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4-6 apresenta os resultados dos valores determinados para  $G'$  e  $G''$  na LVE, e da tensão de escoamento nos ensaios de teste de repetibilidade. A partir dos dados determinados pelo ensaio, foi possível calcular a média e desvio padrão para os valores determinados para os ensaios. A partir desses, foram determinados os coeficientes de variação para a avaliação da dispersão de cada parâmetro em relação ao valor médio. É observado que o parâmetro com maior variação é o  $G'$ , com um CoV de 10%, valor esse considerado bastante razoável tendo em vista o processo de moldagem e os outros erros envolvidos nos ensaios. Portanto, determina-se que a realização de ensaios sem pré-cisalhamento moldados com o gabarito apresentou acurácia satisfatória, e pode ser usado nos ensaios de reometria dos rejeitos de minério de ferro fino. Assim, o protocolo de pré-cisalhamento não foi utilizado para o rejeito de minério de ferro.

Tabela 4-6: Avaliação estatística da repetibilidade dos ensaios oscilatórios de tensão dos rejeitos finos de umidade com  $\Phi = 34\%$  sem protocolo de pré-cisalhamento e com gabarito.

Amostra	$G'$ Platô	$G''$ Platô	Tensão de Escoamento
1	290.000	80.000	420
2	380.000	90.000	440
3	340.000	85.000	380

4	390.000	90.000	370
5	380.000	90.000	400
Média	356.000	87.000	400
Desv. Padrão	37.202	4.000	26
CoV	10%	5%	6%

Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS MATERIAIS GEOMECÂNICOS PUROS

A caracterização reológica dos materiais visa reproduzir os momentos reológicos que ocorrem durante a ruptura das barragens de rejeito. Com isso, pretende-se compreender a influência da microestrutura do material (granulometria, forma das partículas, forças eletrostáticas, dentre outros) e o seu comportamento durante o evento de ruptura de barragem de rejeito.

#### 4.3.1 Oscilatório de deformação

O ensaio oscilatório de deformação pretende avaliar a relação entre as deformações, as taxas de deformação e o comportamento reológico dos materiais. Conforme proposto, esse tipo de ensaio pode se correlacionar ao momento reológico da mobilização de rejeito durante os instantes iniciais da ruptura de uma barragem. Nesse, a frequência de oscilação pode ser relacionada à velocidade das deformações que ocorrem durante a suposta falha. Assim, para frequências mais altas, a velocidade das deformações é mais alta e as deformações críticas são alcançadas em intervalos de tempo menores. Por isso, foram realizados ensaios em três frequências de oscilação (0,1Hz, 1Hz e 10Hz), com varredura de deformações de 0,0001 a 10. Para compreender o comportamento dos diferentes materiais, os ensaios foram repetidos com bentonita, caulim e os rejeitos de minério de ferro em granulometria fina e total.

Em todos os ensaios, independente do material e da concentração de solos ou frequência, observa-se similaridades nos gráficos resultantes do Strain Sweep. O início do ensaio apresenta  $G'$  e  $G''$  aproximadamente lineares e paralelos, no que corresponde à região de viscoelasticidade linear do material. Nesta região, em todos os ensaios realizados, o  $G'$  apresentou valores maiores que  $G''$ , indicando que as suspensões apresentam comportamento mais próximo ao elástico. Além disso,

observa-se tendência de diminuição da tensão de escoamento, e de  $G'$  e  $G''$  à medida que se diminui o teor de sólidos da amostra, para uma mesma tensão de cisalhamento e frequência de oscilação. Porém, observa-se diferença no formato dos perfis em cada material.

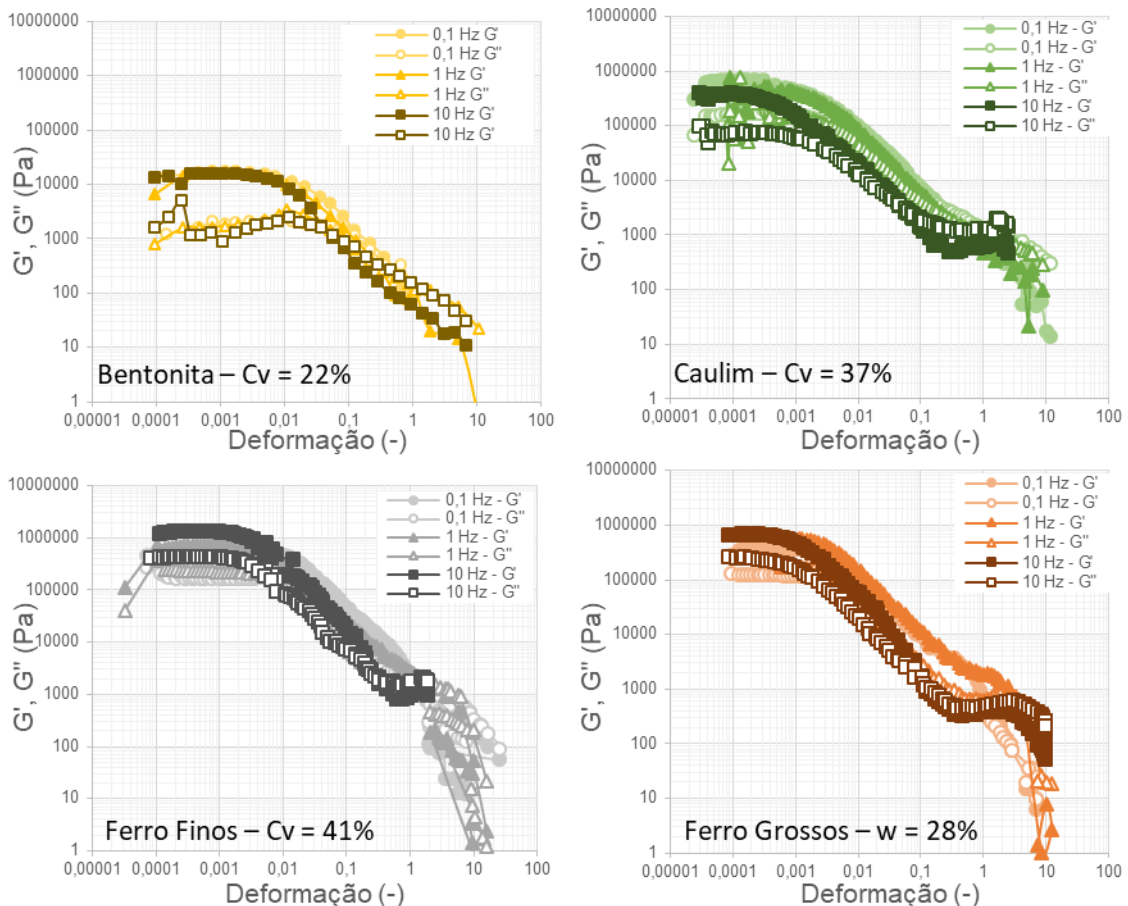
A Figura 4-16 apresenta um exemplo de ensaio de cada um dos três materiais com consistências similares e com índices de liquidez próximos a 0,5 ( $IL_{ben} = 0,47$ ;  $IL_{caulim} = 0,44$ ;  $IL_{FeFino} = 0,56$ ; Minério de ferro grosso na menor concentração) para a avaliação dos perfis dos materiais. Apesar das altas similaridades, observa-se uma leve diferença nos perfis observados. Primeiramente, observa-se que a bentonita não apresenta o segundo platô característico para a região LAOS nas deformações estabelecidas, sendo observada a continuação da queda de  $G'$  e  $G''$ . Os outros três materiais apresentam perfis mais similares e chegam a um platô em LAOS. O caulim, porém, apresenta uma mudança de comportamento de linear para o MAOS mais suave que os dois rejeitos.

A partir desses gráficos, é possível determinar a deformação crítica dos materiais graficamente, conforme apresentado na Figura 2-9, que consiste na deformação correspondente ao ponto determinado a partir da intersecção da reta horizontal aproximada de  $G'$  na região de viscoelasticidade linear e da reta de tendência do  $G'$  abaixo da deformação crítica. Após as deformações críticas serem ultrapassadas, o valor de  $G'$  e  $G''$  diminuem, uma vez que a tensão de escoamento foi superada. A tensão de escoamento pode ser determinada, para ensaios de varredura de deformação, a partir da multiplicação entre a deformação crítica e o módulo de cisalhamento elástico  $G'$  (SCHULTZ; STRUBLE, 1993).

Observa-se uma tendência de diminuição da tensão de escoamento e de  $G'$ ,  $G''$  na parte elástica com a diminuição do teor de sólidos da amostra, para uma mesma frequência de oscilação. Observamos que as deformações críticas da bentonita estão entre 0,01 e 0,03, mais de uma ordem de grandeza superior às deformações críticas do caulim (entre 0,001 e 0,003) e de duas a vinte vezes a do rejeito fino (de 0,0005 a 0,01) e do rejeito total (0,0003 e 0,0009).



Figura 4-16: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de deformação para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz) e faixa de deformação de 0,00001 a 10.



Fonte: Elaborado pela autora.

A influência da frequência no comportamento é bastante dependente do material. Não é observada uma correlação entre a frequência e a tensão efetiva ou o  $G'$  para as suspensões de bentonita. Para o Caulim, a tensão de escoamento similar para as frequências baixas (0,1 Hz e 1 Hz) e diminui bastante a altas frequências (10 Hz).

Para os rejeitos finos, em um mesmo teor de sólidos, porém, a tensão de escoamento e a deformação crítica diminuem com o aumento da frequência, porém o módulo de cisalhamento elástico aumenta com a frequência. Nota-se que a tensão de escoamento diminui em torno de 50% para menores umidades, com exceção do teor de 34% que diminui em somente 20%. A deformação crítica, porém, diminui em até 80% para as menores umidades e em 40% para a suspensão de 34%. O módulo de

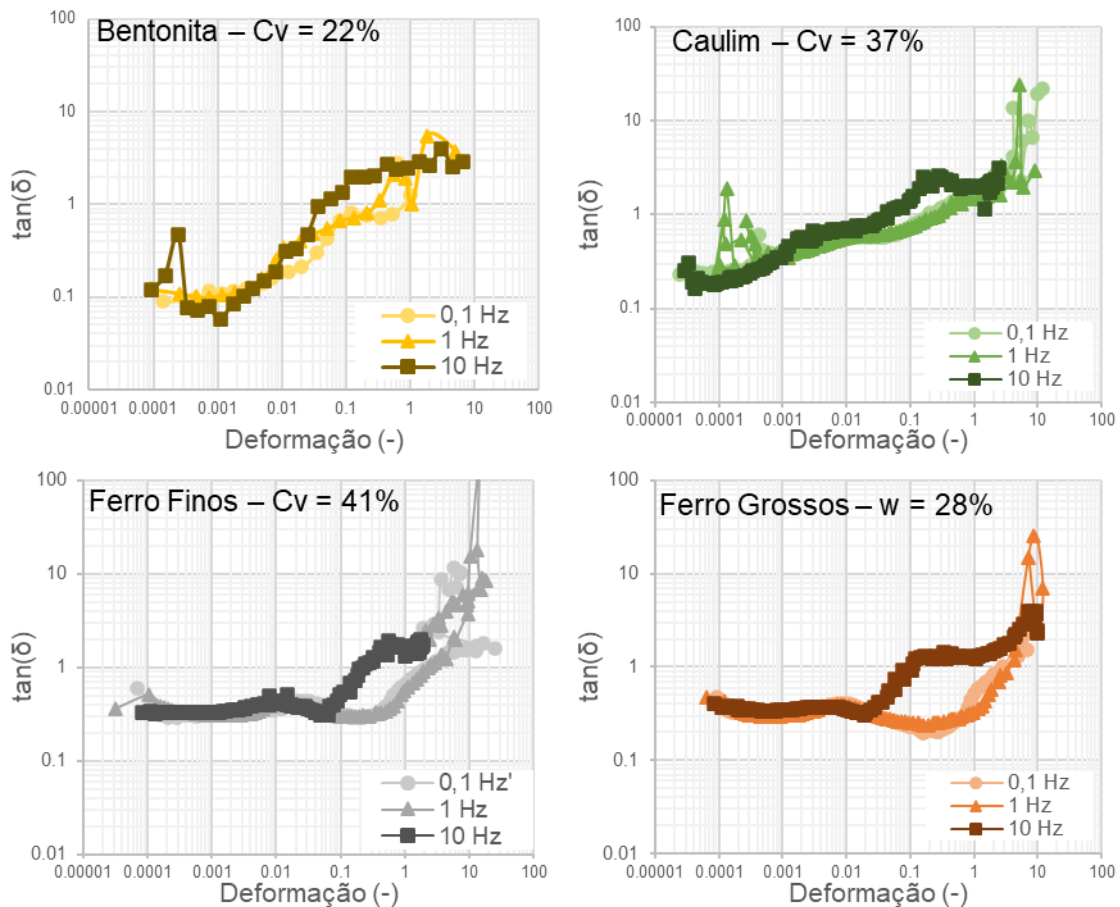
elasticidade, ao contrário, aumenta mais para as menores umidades, variando entre 1,4 para a concentração de 34% para 3,3 para a concentração de 43%. Assim, o aumento da frequência aparenta tornar o rejeito de minério de ferro mais frágil.

Para os rejeitos totais em um mesmo teor de sólidos a tensão de escoamento e a deformação crítica também diminuem e  $G'$  no LVE aumenta com o aumento da frequência. Nota-se uma diminuição da tensão de escoamento em cerca de 10%, e da deformação crítica em cerca de 40%. O módulo de armazenamento  $G'$  na região linear, por sua vez, aumenta entre 20-100%. Os maiores aumentos são observados nos maiores aumentos referentes aos maiores teores de sólidos.

Outra variável analisada para a compreensão do comportamento do material nesse ensaio é a razão entre  $G'$  e  $G''$ , denominada tangente de delta ( $\tan(\delta)$ ). Quando o valor de  $G''$  supera  $G'$  ( $G'' > G'$ ), o material é entendido como apresentando comportamento mais viscoso e, portanto, mais semelhante a líquidos, e a tangente de delta é maior que 1.

Um exemplo dos perfis de ensaio da relação entre a deformação oscilatória imposta no ensaio e a  $\tan(\delta)$  de cada um dos três materiais com consistências similares de acordo com os limites de atterberg ( $IL_{ben} = 0,47$ ;  $IL_{caulim} = 0,44$ ;  $IL_{FeFino} = 0,56$ ; Minério de ferro grosso na menor concentração), são apresentados na Figura 4-17. Apesar das altas similaridades, observa-se uma leve diferença nos perfis observados. Primeiramente, observa-se novamente um comportamento diferenciado da bentonita, que apresenta um platô inicial na região linear e depois tem tendência crescente. O caulim, por sua vez, apresenta uma região de  $\tan(\delta)$  crescente após a LVE, seguido de um segundo platô com  $\tan(\delta)$  em cerca de 0,6. Os dois rejeitos porém apresentam um perfil bastante diferenciado, com um platô inicial bem extenso, seguido de um crescimento seguido de decréscimo para baixos  $\tan(\delta)$ , para somente então ter um crescimento real que leva à mudança de comportamento do material.

Figura 4-17: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de deformação para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz) e faixa de deformação de 0,00001 a 10.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.3.2 Oscilatório de tensão

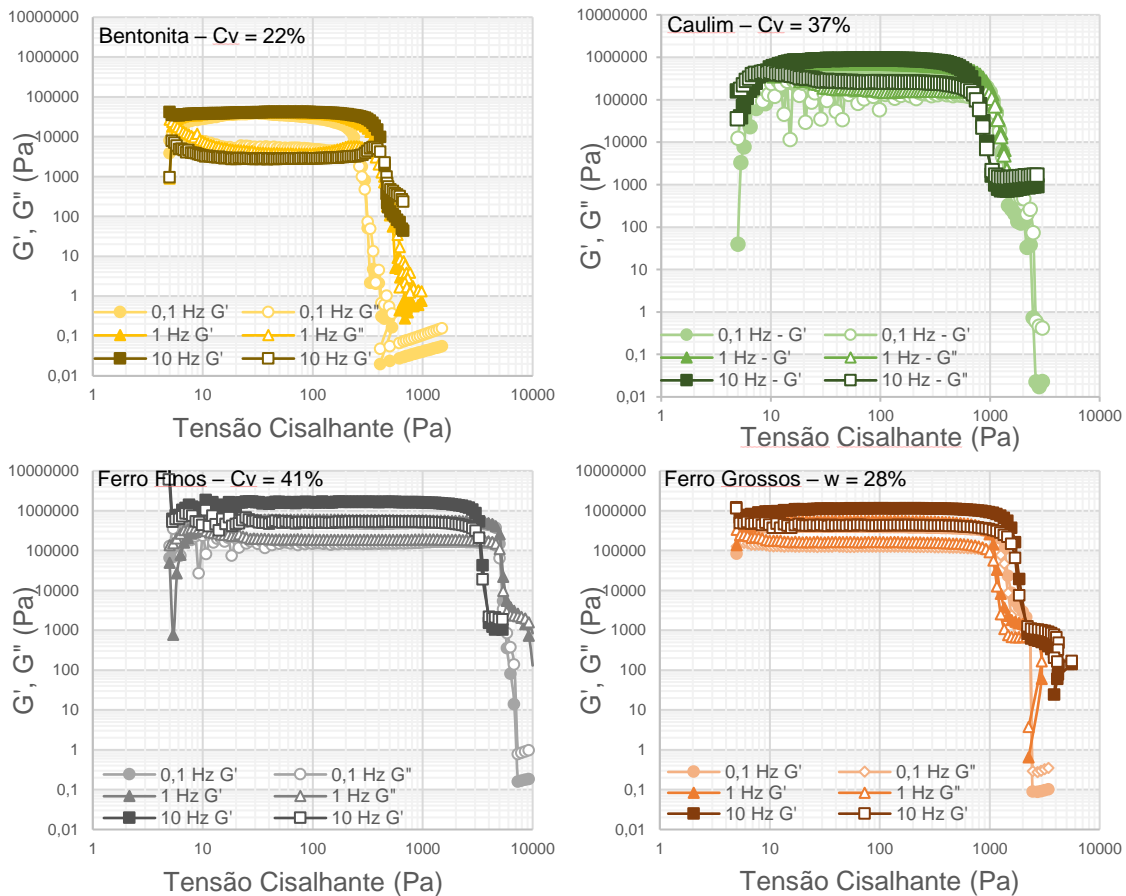
O ensaio oscilatório de tensão pretende avaliar a relação entre as tensões de cisalhamento no material, permitindo a avaliação das conseqüentes deformações e taxas de deformação, no comportamento reológico dos materiais. Conforme proposto, esse tipo de ensaio pode se correlacionar ao momento reológico da mobilização de rejeito, antes de ser ultrapassada uma tensão de escoamento, e o momento de transporte do material. Nesse, a frequência de oscilação pode ser relacionada à velocidade das deformações que ocorrem durante a suposta falha. Assim, para frequências mais altas, as tensões de escoamento são alcançadas em intervalos de tempo menores e a velocidade das deformações (que são proporcionais às tensões) são mais altas. Por isso, foram realizados ensaios em três frequências de oscilação (0,1Hz, 1Hz e 10Hz), com varredura de deformações de 0,0001 a 10. Para

compreender o comportamento dos diferentes materiais, os ensaios foram repetidos com bentonita, caulim e os rejeitos de minério de ferro em granulometria fina e total.

A Figura 4-18 apresenta um exemplo de ensaio de cada um dos três materiais com consistências similares de acordo com os limites de atterberg ( $IL_{ben} = 0,47$ ;  $IL_{caulim} = 0,44$ ;  $IL_{FeFino} = 0,56$ ; Minério de ferro grosso na menor concentração) para a avaliação dos perfis dos materiais. Apesar das altas similaridades, observa-se uma leve diferença nos perfis observados. Primeiramente, observa-se que a bentonita no oscilatório de tensões também não apresenta o segundo platô (característico da região LAOS) bem definido, sendo observada a continuação da queda de  $G'$  e  $G''$  até o que possivelmente é a ruptura total da microestrutura. Os outros três materiais apresentam perfis mais similares e chegam a um platô em LAOS. O caulim novamente apresenta queda de  $G'$  e  $G''$  comparativamente mais suave que os dois rejeitos. O perfil dos rejeitos ainda apresenta, após o segundo platô de  $G'$  e  $G''$ , um declínio dos valores no que pode indicar uma nova mudança na microestrutura dos materiais.

Os resultados apresentaram perfis similares para todas as suspensões de todos os materiais, com variações devido às concentrações volumétricas e a frequência de oscilação. O aumento de umidade reduziu a tensão de escoamento, assim como os valores de  $G'$  e  $G''$ , em todos os materiais. Nota-se falha na aquisição de dados do equipamento para tensões muito baixas, resultando em alguns erros de medida no início do ensaio. A partir disso, verifica-se que  $G'$  e  $G''$  são paralelos e aproximadamente constantes na região correspondente à região de viscoelasticidade linear, com  $G' > G''$ . A partir de um determinado instante, em que se atinge a tensão de escoamento do material, os valores de  $G'$  e  $G''$  passam a diminuir a uma taxa aproximadamente constante. É possível, então, estimar a tensão de escoamento desses materiais graficamente a partir da interseção entre a linha horizontal criada pelo platô de  $G'$  e a linha de tendência dos valores de  $G'$  abaixo do escoamento (DINKGREVE et al., 2016).

Figura 4-18: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de tensões para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a tensão de cisalhamento superar a tensão de escoamento,  $G'$  e  $G''$  diminuem drasticamente e, a partir de certo instante,  $G''$  supera  $G'$ , e o material passa a apresentar características mais similares a líquidos. A relação entre  $G'$  e  $G''$  pode ser avaliada pela  $\tan(\delta)$ , apresentado na Figura 4-19. Primeiramente, nota-se que a aquisição de dados antes de 10 Pa foi inadequada e, assim, apenas após essa tensão de cisalhamento é possível realizar a análise do comportamento reológico do material.

Nota-se que a concentração das suspensões de bentonita tem grande influência na relação entre a tensão cisalhante e o delta. Além disso, observa-se uma variação muito abrupta para o delta após a tensão de escoamento ser atingida. Para esse material, portanto, é observado uma primeira região de comportamento sólido, seguido de uma quebra abrupta da estrutura entre a sua transição sólido líquida. Nessa primeira fase, observa-se que o valor de delta é um pouco menor para as frequências mais altas, em todas as suspensões, para até se atingir a tensão de

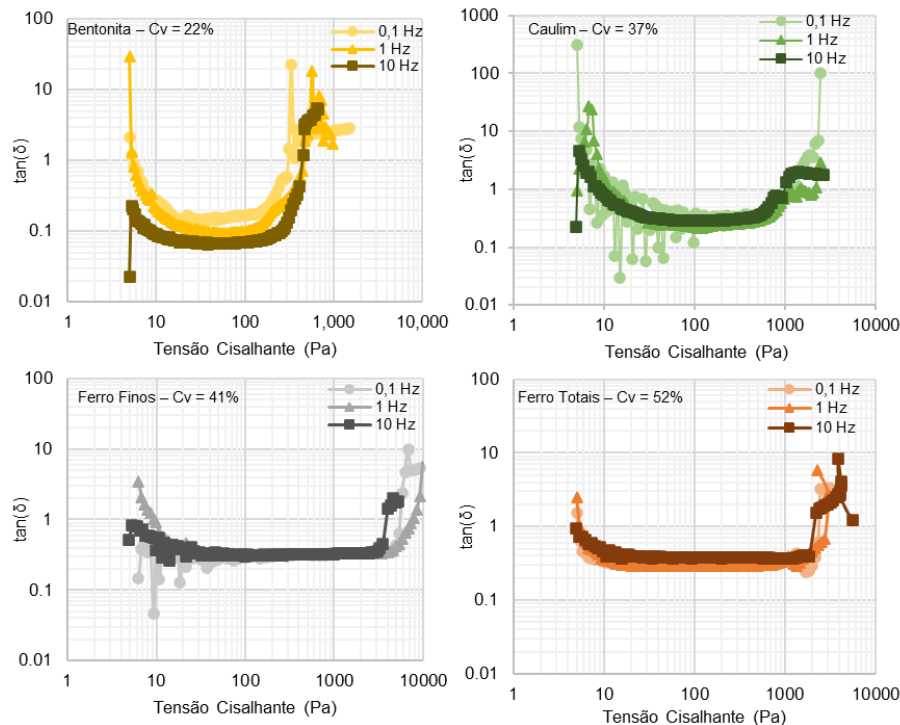
escoamento. Após essa quebra, os valores muito elevados da tangente de delta das suspensões mais concentradas pode indicar a fratura do material dentro da geometria, observada após o ensaio. Para maiores umidades, porém, o material aparente apresentar uma terceira fase, com taxas de variação de delta mais baixas.

Para o caulim, a concentração da suspensão e a frequência do ensaio ainda tem ainda grande influência na relação entre a tensão cisalhante e o delta. Primeiramente, o delta apresenta valor aproximadamente constante durante o LVE, seguido de uma variação após a tensão de escoamento ser atingida. Essa transição, porém, aparenta ser mais abrupta para maiores umidades, assim como a taxa de aumento do delta após a ruptura de cada amostra. Essa variação indica a maior fragilidade de ruptura para as suspensões menos úmidas. Essa mesma relação também pode ser observada com o aumento da frequência do ensaio. Nota-se que a mudança abrupta de delta após a tensão de escoamento pode indicar a fratura do material da geometria, devido ao comportamento plástico dessas suspensões concentradas.

Para o rejeito de minério de ferro fino, nota-se que a concentração da suspensão tem grande influência na relação entre a tensão cisalhante e o delta. Além disso, observa-se uma variação de delta após a tensão de escoamento ainda mais abrupta que a observada para a bentonita, com uma transição abrupta de sólido para líquido. Nota-se que o valor em que tangente de delta é igual a 1 das suspensões mais concentradas pode indicar a fratura do material dentro da geometria, observada após o ensaio.

Um exemplo dos perfis de ensaio da relação entre a tensão oscilatória imposta no ensaio e a  $\tan(\delta)$  de cada um dos três materiais com consistências similares de acordo com os limites de atterberg ( $IL_{ben} = 0,47$ ;  $IL_{caulim} = 0,44$ ;  $IL_{FeFino} = 0,56$ ; Minério de ferro grosso na menor concentração), são apresentados na Figura 4-19. Os perfis de  $\tan(\delta)$  do oscilatório de tensões de todos os materiais são bastante similares, sendo somente observado que a transição dos ensaios do caulim e da bentonita são menos abruptos que os dos dois rejeitos de minério de ferro.

Figura 4-19: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de tensão para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - nas diferentes frequências (0,1, 1 e 10Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

O ensaio de varredura de tensões pode ser dividido em três partes. Primeiro, observa-se uma região linear, com  $G'$  e  $G''$  aproximadamente constantes, definida como *Small Amplitude Oscillatory Stress* (SAOS). A segunda região, definida pela redução de  $G'$  e  $G''$ , é definida como *Medium Amplitude Oscillatory Stress* (MAOS). E por fim, a última região, quando existente, apresenta uma estabilização dos níveis de  $G'$  e  $G''$  e é definida como *Large Amplitude Oscillatory Stress* (LAOS). A região SAOS é linear e as regiões SAOS e MAOS são não lineares.

Assim, a partir dos resultados dos ensaios de varredura de tensões das suspensões de bentonita com frequência de 1 Hz, foram definidas as tensões em cada região (SAOS, MAOS e LAOS) apresentadas na Tabela 4-7, e será utilizada nos ensaios oscilatórios de varredura de frequência e de tempo. Para facilitar comparações, a tensão SAOS foi definida abaixo da tensão de escoamento, de forma que pudesse ser a mesma para todas as suspensões. Além disso, buscou-se utilizar tensões MAOS e LAOS comparáveis às outras suspensões, de modo que o MAOS de uma suspensão seja comparável ao LAOS da suspensão com teor de sólidos imediatamente inferior.

Tabela 4-7: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de bentonita.

$\Phi$	SAOS	MAOS	LAOS
33%	20	2600	4000
28%	20	1300	2600
24%	20	450	1300
22%	20	450	1300
20%	20	180	450

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados dos ensaios de varredura de tensões com frequência de 1 Hz, foi definida uma tensão de cada região (SAOS, MAOS e LAOS) para as suspensões de caulim, conforme a Tabela 4-8.

Tabela 4-8: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de caulim.

$\Phi$	SAOS	MAOS	LAOS
37%	80	1200	2500
36%	80	600	1200
31%	80	250	600
28%	30	150	250

Fonte: Elaborado pela autora.

As tensões definidas para o rejeito de minério de ferro fino são apresentadas na Tabela 4-9, e serão utilizadas nos ensaios oscilatórios de varredura de frequência e de tempo. Para facilitar comparações, a tensão SAOS foi definida abaixo da tensão de escoamento, e quando possível as tensões MAOS e LAOS foram definidas de modo que fossem comparáveis às outras suspensões.



Tabela 4-9: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina.

$\Phi$	SAOS	MAOS	LAOS
43%	100	6000	*
40%	100	6000	*
38%	100	2600	6000
36%	100	900	1200
34%	100	500	600

\*Limitação de torque do reômetro

Fonte: Elaborada pela autora.

As tensões definidas para o rejeito de minério de ferro em granulometria total serão utilizadas nos ensaios oscilatórios de varredura de frequência e de tempo. Para facilitar comparações, a tensão SAOS foi definida abaixo da tensão de escoamento, e quando possível as tensões MAOS e LAOS foram definidas de modo que fossem comparáveis às outras suspensões.

Tabela 4-10: Tensões correspondentes aos ensaios de frequência e tempo no SAOS, MAOS e LAOS para as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total.

$\Phi$	SAOS	MAOS	LAOS
52%	10	1300	2000
51%	10	700	1300
49%	10	250	700
46%	10	100	250
44%	10	50	100

\*Limitação de torque do reômetro

Fonte: Elaborada pela autora.

### 4.3.3 Oscilatório de Frequência

Os ensaios oscilatórios de varredura de frequência são relacionados a mudança da velocidade do escoamento (relacionado à frequência do ensaio) para materiais com espessura constante (o vetor peso da camada está relacionado às tensões de cisalhamento no ensaio). A Figura 4-20 apresenta a resposta de  $G'$  e  $G''$  e a Figura

4-21 apresenta a resposta de  $\tan(\delta)$  ao aumento da frequência  $f$  para os quatro materiais.

Os ensaios oscilatórios de frequência foram realizados com tensão fixada (de maneira que uma se encontre no SAOS, uma no MAOS e uma no LAOS para concentração volumétrica de cada material estudado conforme indicado no item 3.2), com frequência variando de 0,1 Hz a 10 Hz. Essa faixa corresponde à faixa de velocidade radial entre 0,02 m/s a 2,2 m/s, dentro da faixa esperada para corridas de massa (0,1 a 20 m/s). Devido às dificuldades do equipamento na manutenção das tensões de cisalhamento constantes das suspensões mais concentradas em frequências mais elevadas, os pontos de ensaio exibidos foram limitados a erros não maiores que 10% na tensão de cisalhamento inicialmente proposta para garantir as premissas de ensaio.

A mudança de  $G'$  e  $G''$  com o aumento da frequência para as suspensões de bentonita, caulim, rejeito de minério de ferro fino e rejeito de minério de ferro total para os três níveis de tensões de cisalhamento (SAOS, MAOS e LAOS) é apresentada na Figura. A mudança de  $\tan(\delta)$  com a frequência, apresentada na Figura, indica as variações do comportamento do material com o aumento das frequências nos três níveis de tensões.

Observa-se que o aumento da frequência influencia pouco no  $G'$  e diminui o  $G''$  da bentonita, porém aumenta. Para os outros materiais, o aumento da frequência aumenta  $G'$  e  $G''$  em proporções semelhantes. A região de médias amplitudes pode apresentar um comportamento mais transicional, a depender das tensões aplicadas. Ainda assim, em geral os materiais apresentam na região de médias amplitudes comportamento intermediário. No caso do rejeito de minério de ferro total isto não foi observado em algumas suspensões, o que deve ser indicativo de algum erro da preparação dessas amostras.

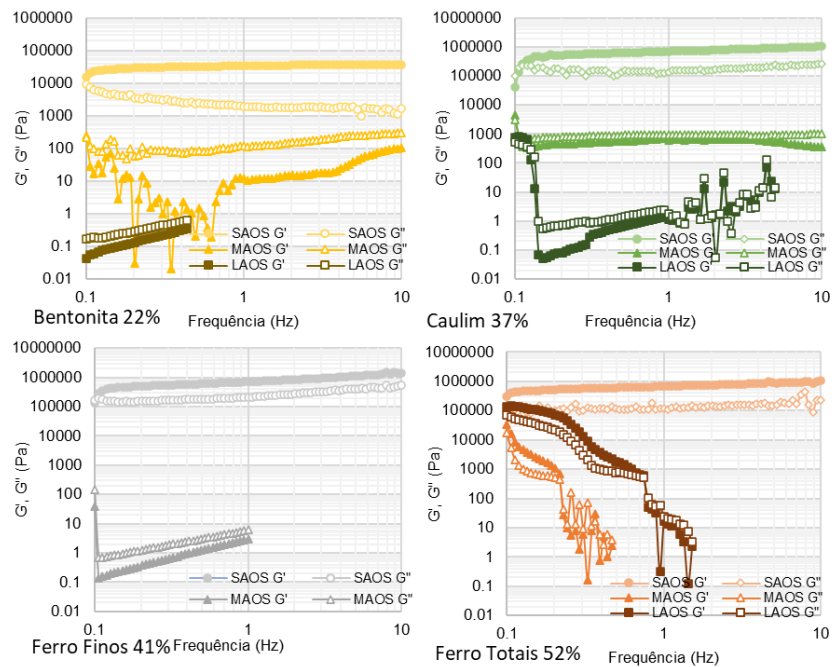
Em grandes amplitudes, após a quebra total da microestrutura dos materiais, o aumento da frequência esta tende ao crescimento, o que pode indicar problemas na realização do ensaio. A diminuição da concentração causa diminuição de  $G'$  e  $G''$  em pequenas amplitudes em todos os materiais. Para maiores amplitudes não necessariamente isso acontece, talvez devido ao desenvolvimento de fraturas nas suspensões de maiores concentrações em maiores deformações.

Porém, ainda assim, pode-se observar nas suspensões de bentonita uma leve tendência de aumento de  $G'$  e de diminuição de  $G''$ , e conseqüentemente uma diminuição da tangente de delta. As suspensões de caulim e de rejeitos finos, por sua vez, tem um aumento percentual maior de  $G'$  e ao mesmo tempo um aumento de  $G''$  com o aumento da frequência, com uma maior estabilização dos valores de tangente de delta. Os rejeitos de minério de ferro grossos aparentam ter uma relação intermediária, com as suspensões de maiores concentrações tendo aumento de  $G'$  e  $G''$  e constância de  $\tan(\delta)$ , e as menores concentrações tendo aumento de  $G'$  com diminuição de  $G''$  e de  $\tan(\delta)$ .

O aumento da frequência gera uma diminuição no valor de  $\tan(\delta)$  em todos os ensaios na região SAOS da bentonita, porém afeta pouco os outros materiais. Conforme esperado, estes valores estão todos abaixo de 1, indicando comportamento mais elástico.

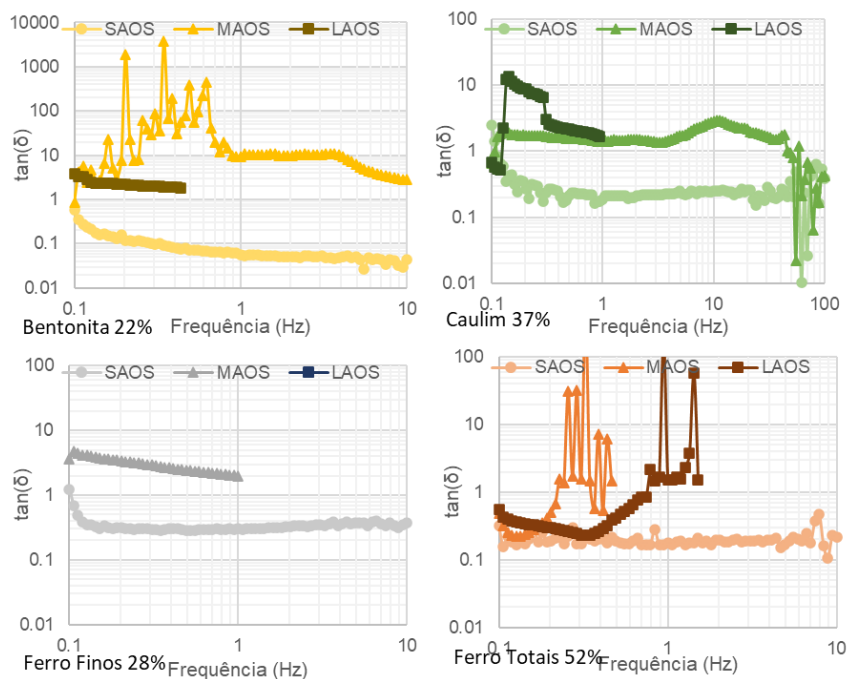
Na região MAOS, o aumento das frequências causa inicialmente uma quebra na estrutura das partículas, que faz com que o  $G''$  se torne maior que o  $G'$  e  $\tan(\delta)$  fica maior que 1. Após essa quebra inicial, observa-se aumento das características viscosas do material e que  $G'$  e  $G''$  tentem a um aumento com a frequência de ensaio mais substancial que no SAOS. Por fim, na região LAOS,  $G''$  está maior que  $G'$  no começo do ensaio, e esses dois aumentam, assim como o valor de  $\tan(\delta)$ , com o aumento da frequência do ensaio.

Figura 4-20: Exemplo da resposta do ensaio oscilatório de frequência para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - com amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4-21: Exemplo da resposta da tangente de delta no ensaio oscilatório de frequência para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita (Cv=22%); caulim (Cv=37%), rejeito fino (Cv=41%) e rejeito grosso (w=28%) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS.



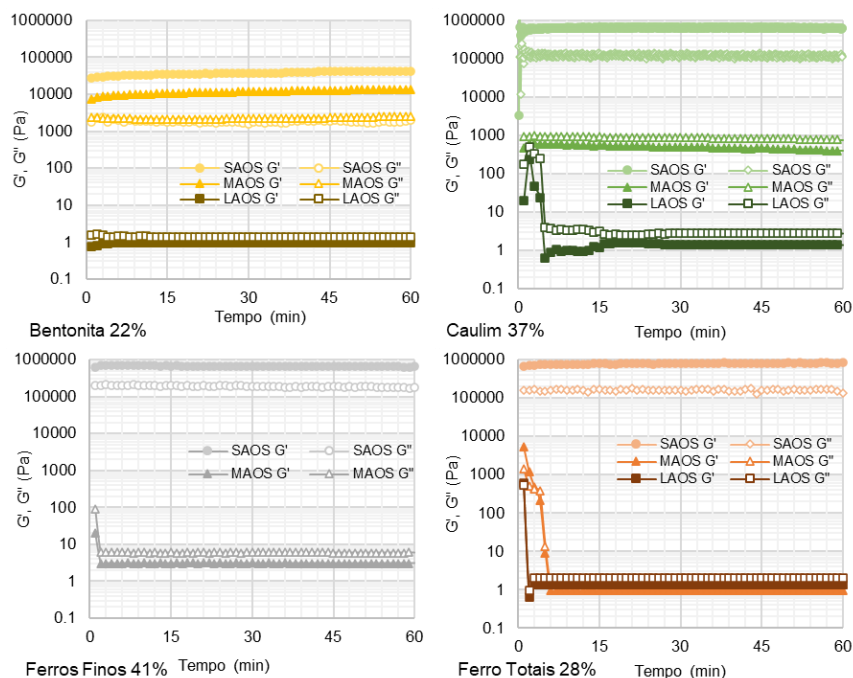
Fonte: Elaborada pela autora.

#### 4.3.4 Oscilatório de Tempo

Os ensaios oscilatórios de varredura de tempo avaliam possíveis mudanças durante o tempo no escoamento de uma camada de espessura constante (o vetor peso da camada está relacionado às tensões de cisalhamento no ensaio). Os ensaios foram realizados com tensão fixada (de maneira que uma se encontre no SAOS, uma no MAOS e uma no LAOS para concentração volumétrica de cada material estudado conforme indicado no item 3.2), até um tempo máximo de corrida de massa considerado de uma hora.

A evolução dos parâmetros  $G'$  e  $G''$  indicam possíveis mudanças de comportamento dos materiais ao longo do tempo, podendo ser desenvolvidas características mais viscoelásticas ou viscoplásticas. As argilas e os rejeitos estudados nesse trabalho são materiais não reativos, portanto, quaisquer variações temporais observadas devem-se ao fluxo do material. A Figura 4-22 apresenta a evolução de  $G'$  e  $G''$  em função do tempo nas condições de SAOS, MAOS e LAOS para suspensões típicas de bentonita, caulim, e rejeito de minério de ferro fino e total.

Figura 4-22: Exemplo da evolução do  $G'$  e  $G''$  em função do tempo para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para todos os materiais observa-se a baixa influência do tempo de cisalhamento oscilatório no comportamento do material em todas as suspensões no SAOS, com  $G''$  constante e apenas um aumento pequeno em  $G'$  ao longo do tempo. A bentonita apresenta um aumento um pouco maior quando comparado aos outros materiais, porém ainda insignificante. Além disso, observa-se que a bentonita apresenta módulos de armazenamento e de perda menores em pequenas tensões quando comparados aos outros materiais.

A região de amplitudes médias corresponde a uma região de transição. Assim, dependendo das tensões aplicadas, a suspensão pode apresentar  $G' > G''$  ou  $G'' > G'$ . Além disso, pode acontecer a quebra da estrutura no início do fluxo em MAOS, e conseqüentemente haver uma mudança nos módulos cisalhantes da suspensão. A região de amplitudes largas também apresenta mudança elevada no início do movimento, seguido a uma estabilização.

Os ensaios oscilatórios de tempo dos quatro materiais, em todas as amplitudes de tensões aplicadas, tendem à estabilidade, ou ao que se pode interpretar como um fluxo permanente. Em geral, os valores de módulo de armazenamento e perda do fluxo permanente em SAOS é superior ao em MAOS que é superior ao em LAOS.

As suspensões na região de LAOS também apresentam propriedades constantes ao longo do tempo, com  $G''$  maior que  $G'$  e tangente de delta constantes e superiores a um, com alguma variação nos primeiros cinco minutos antes de ser atingido um estado permanente no material. Os ensaios na região MAOS são os que apresentam maior variação ao longo do tempo, devido a uma demora maior a atingir um estado de fluxo permanente no material.

Para todos os materiais observa-se a baixa influência do tempo de cisalhamento oscilatório na tangente de delta medida para cada material, conforme Figura 4-23. O rejeito de minério de ferro fino, o rejeito de minério de ferro total e o caulim não apresenta variação nas características reológicas ao longo do tempo em pequenas amplitudes.

A bentonita é o único material que não apresenta valores de tangente de delta constantes, mas sim que variam em torno de 0,05-0,1 e descresem levemente com o tempo, apresentando valores menores para as umidades maiores. O pequeno

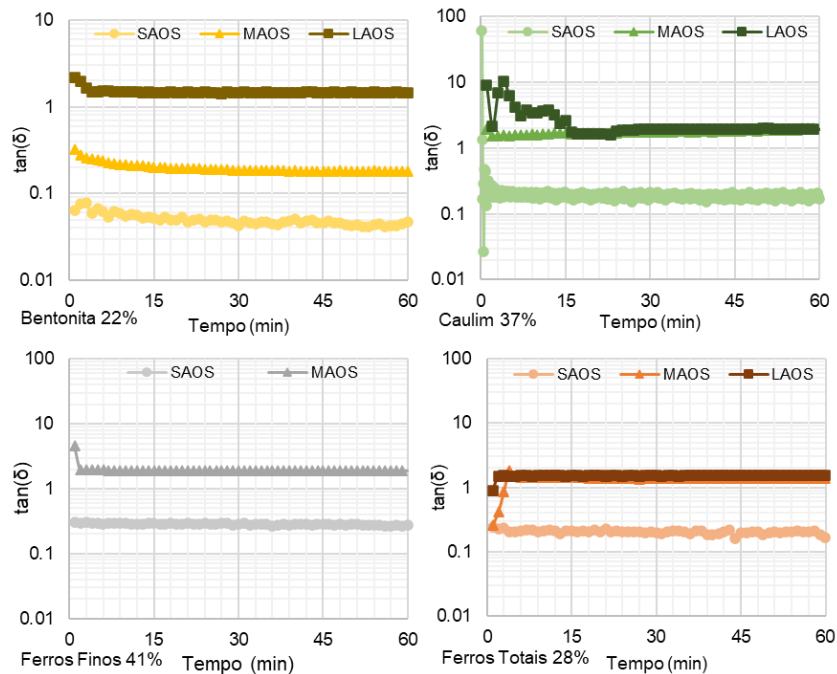
aumento da rigidez deste material ao longo do tempo pode ter sido influenciado pela perda de água para o meio ambiente, que pode ter acontecido em pequena quantidade mesmo com o uso do *solvent trap*. Porém, uma vez que este comportamento não foi observado nos outros materiais, entende-se como sendo algo específico da bentonita. Assim, entende-se que a bentonita apresentou um comportamento mais elástico à medida que o ensaio se desenvolveu, aumentando  $G'$  com  $G''$  constante. Porém, esta diminuição ainda pode ser desconsiderada para a avaliação do fluxo deste material neste espaço de tempo de uma hora.

O comportamento das suspensões nas regiões de médias e grandes amplitudes também tem a tendência de estabilização. Em geral, observa-se comportamento mais elástico  $\tan(\delta) < 1$  para os ensaios realizados na região de SAOS e comportamento mais viscoso  $\tan(\delta) > 1$  para os ensaios realizados na região de LAOS. Na região MAOS, por sua vez, o valor estabilizado de  $\tan(\delta)$  depende das tensões aplicadas e do material, podendo ser mais elástica ou mais viscosa.

A bentonita tem início em comportamento mais próximo ao elástico e valores de tangente de delta que descessem levemente com o tempo. Esta pequena variação, indicando uma alteração leve na microestrutura ao longo do movimento, também foi observada no caulim. Assim, considera-se que o tempo de escoamento destes materiais influenciam pouco nos parâmetros reológicos observados no fluxo e, portanto, a utilização de modelos que não levam em conta o tempo são apropriados.

Os rejeitos estudados não apresentaram mudança lenta e gradual tal qual as observadas nas argilas. Quando foi observada alteração, esta aconteceu no início do fluxo, e a partir de dez minutos o material entra em regime permanente. Pelos ensaios de tempo, em tensões de cisalhamento elevadas, a estrutura do rejeito se altera completamente e os parâmetros reológicos se tornam muito baixos. Esta alteração foi percebida e é interpretada como a quebra da microestrutura dos rejeitos devido a segregação/separação de fases durante a deformação do material. Isto indicaria que o material se altera e segrega bastante no início no movimento, e depois continuaria como uma suspensão muito mais aquosa. É possível ainda que para tensões de cisalhamento muito elevadas a geometria do ensaio não seja apropriada, que haja saída do material da geometria durante o movimento que altere as condições de cálculo do ensaio.

Figura 4-23: Exemplo de  $\tan(\delta)$  em função do tempo para os diferentes materiais geomecânicos em mesmos índices de consistência suspensões – bentonita ( $C_v=22\%$ ); caulim ( $C_v=37\%$ ), rejeito fino ( $C_v=41\%$ ) e rejeito grosso ( $w=28\%$ ) - amplitude de oscilação controlada pela tensão de cisalhamento nas condições de SAOS, MAOS e LAOS.



Fonte: Elaborada pela autora.

#### 4.4 COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DE TENSÃO E DE DEFORMAÇÃO

A correlação de Pearson pode ser utilizada para compreender a influência de diferentes parâmetros nas propriedades reológicas dos materiais. Para isso, foi avaliada a influência de parâmetros considerados de entrada nos ensaios: concentração volumétrica ( $\phi$ ), correlacionada ao estado inicial do material, e a frequência ( $f$ ), relacionado às velocidades iniciais do movimento e taxas de cisalhamento atingidas durante o fluxo. O logaritmo da frequência foi testado para verificar a possibilidade de uma correlação não linear.

Foram escolhidos parâmetros de interesse para a análise do desenvolvimento do fluxo ao longo do escoamento. Para a avaliação das condições pré-mobilização e início do fluxo, foi avaliada a deformabilidade do material pelo módulo de armazenamento ( $G'$ ), a resistência do material ao fluxo pela tensão de escoamento ( $\tau_y$ ), além da deformação crítica em que ocorre a tensão de escoamento ( $\delta_{crit}$ ). Para avaliar o comportamento reológico ao longo do escoamento, foram avaliadas a tensão de



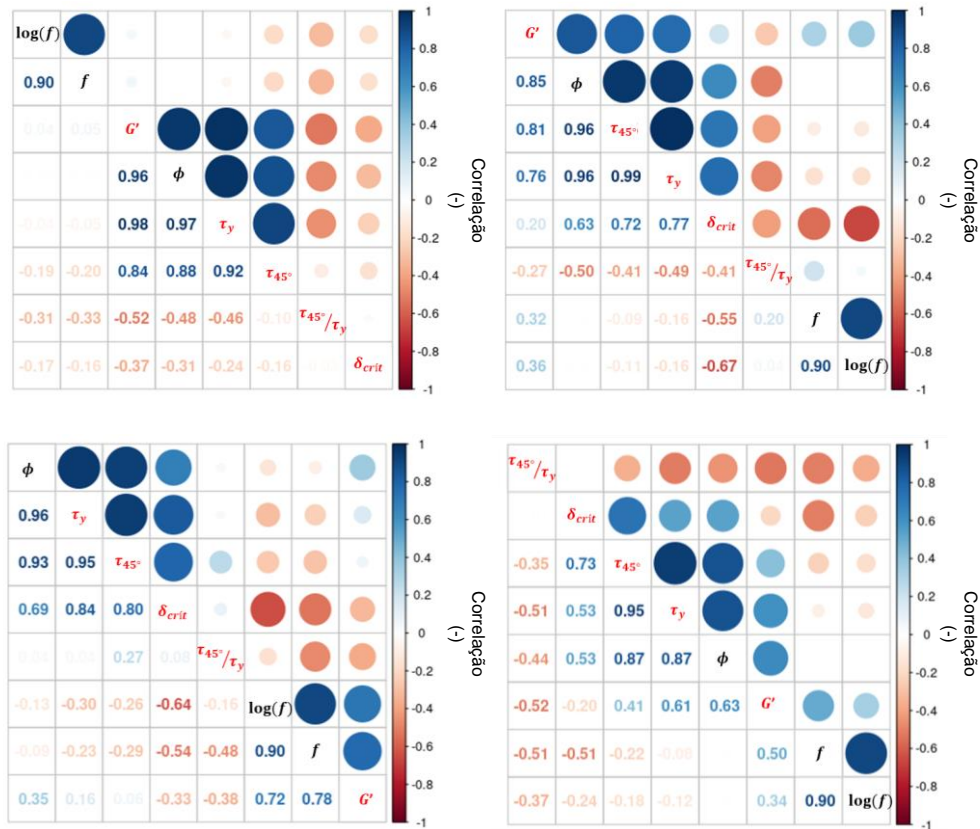
cisalhamento na transição sólido-líquido ( $\tau_{45^\circ}$ ) e a deformação em que ocorre a transição sólido-líquida ( $\delta_{45^\circ}$ ).

Uma correlação de Pearson positiva indica a variável medida tende a aumentar quando a de ensaio aumenta, e uma negativa que a variável medida tende a diminuir quando a outra aumenta. São consideradas altas correlações acima de 0,7. Além disso, a correlação estatística entre as variáveis foi avaliada pela ANOVA de duas vias, frequência e concentração volumétrica, com p-valor < 0,05 demonstrando confiança estatística de que a variável analisada explique a variação na média dos parâmetros de resultado do ensaio.

A Figura 4-24 apresenta a correlação de Pearson entre os parâmetros de entrada (em preto) e de saída (em vermelho) dos ensaios oscilatórios de deformação para os quatro materiais: a) bentonita; b) caulim; c) rejeitos finos; e d) rejeitos totais.

A análise de correlação dos ensaios oscilatórios de oscilação da bentonita demonstram que a alta correlação positiva de  $G'$  na LVE com a concentração volumétrica (p-valor<0,001). A tensão de escoamento e a tensão na transição sólido-líquida também apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (com p-valor < 0,001). A deformação crítica não apresenta correlação conclusiva com a concentração volumétrica, com p-valor=0,6. Não pode ser observada a influência da frequência em nenhum dos parâmetros analisados, com p-valor>0,05 em todos os casos.

Figura 4-24: Análise estatística de covariância entre os parâmetros o ensaio oscilatório de deformação (a) da bentonita; (b) do caulim; (c) do rejeito fino; e (d) dos rejeitos totais. Nos gráficos, frequência ( $f$ ) e concentração volumétrica ( $\phi$ ) com os resultados obtidos para módulo de armazenamento ( $G'$ ) tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) e tensão de cisalhamento na transição sólido-líquido ( $\tau_{45^\circ}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise de correlação dos ensaios oscilatórios de deformação do caulim demonstra que correlação alta positiva de  $G'$  na LVE com a concentração volumétrica (p-valor<0,001), sem influência da frequência. A tensão de escoamento e a tensão na transição sólido-líquida também apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (com p-valor < 0,001), e correlação inconclusiva com a frequência, porém o p-valor<0,05 indica confiança estatística. A deformação crítica e a deformação de transição não apresentam correlação positiva alta com a concentração volumétrica, com p-valor>0,6. Esses parâmetros ainda apresentam correlação negativa alta com a frequência, com p-valor<0,05.

A análise de correlação dos ensaios oscilatórios de deformação do rejeito de ferro fino demonstra que correlação positiva, porém inconclusiva de  $G'$  na LVE com a concentração volumétrica (p-valor<0,01), porém correlação positiva alta com a frequência (p-valor<0,001). A tensão de escoamento e a tensão na transição sólido-

líquida também apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (p-valor<0,001), e correlação inconclusiva com a frequência, porém com p-valor<0,05 em  $\tau_y$  indicando a confiança estatística com esse parâmetro. A deformação crítica e a deformação de transição apresentam correlação negativa com o logaritmo da frequência (p-valor<0,05). A deformação crítica ainda apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (p-valor<0,001).

A análise de correlação dos ensaios oscilatórios de deformação do rejeito de ferro totais demonstra que correlação positiva, porém inconclusiva de  $G'$  na LVE com a concentração volumétrica (p-valor<0,001), porém correlação positiva inconclusiva com a frequência, apesar do p-valor=0,02 demonstrar a influência da frequência na variação da média. A tensão de escoamento e a tensão na transição sólido-líquida também apresentam correlação positiva alta com a concentração volumétrica (p-valor<0,001). Essas, porém não aparentam correlação com a frequência e apresentam p-valor>0,05. A deformação crítica apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (p-valor<0,001), sem relação aparente com a frequência. A deformação de transição, por sua vez, apresenta correlação negativa alta com o logaritmo da frequência (p-valor<0,05).

Portanto, nota-se comportamentos bastante diferentes dos três materiais no que diz respeito à influência da concentração volumétrica e da frequência nos ensaios oscilatórios de deformação. Destaca-se, porém, que a não validade das correlações estatísticas os altos p-valores podem estar relacionados ao número estatisticamente baixo de medidas. Ainda assim, é possível perceber algumas relações.

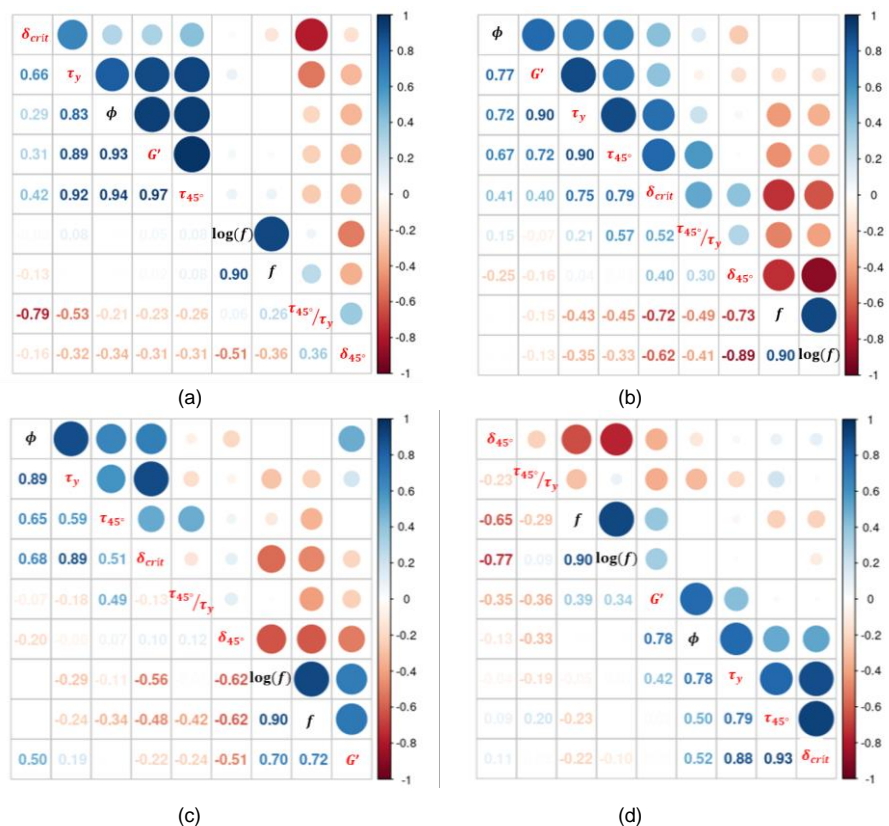
No material plástico (bentonita) a frequência não influencia no comportamento e a deformação crítica independe inclusive da concentração volumétrica. Em compensação, os materiais siltosos são afetados em sua deformação crítica pela frequência, em maior ou menor escala. O módulo de armazenamento ( $G'$ ) e a tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) é influenciado positivamente em todos os materiais pela concentração volumétrica.

O aumento da quantidade de água resulta em distanciamento entre as partículas, o que causa a diminuição do contato entre os grãos e das forças eletrostáticas. Por isso, diminui a tensão de escoamento e a deformabilidade dos materiais. Para os materiais

com menos plasticidade, esse aumento da umidade também causa a diminuição da deformação crítica e torna o material mais frágil, ou seja, que se rompe em níveis de deformação menores.

A Figura 4-25 apresenta a correlação de Pearson entre os parâmetros de entrada (em preto) e de saída (em vermelho) dos ensaios oscilatórios de tensão para os quatro materiais: a) bentonita; b) caulim; c) rejeitos finos; e d) rejeitos totais.

Figura 4-25: Análise estatística de covariância entre os parâmetros o ensaio oscilatório de tensão (a) da bentonita; (b) do caulim; (c) do rejeito fino; e (d) dos rejeitos totais. Nos gráficos, frequência ( $f$ ) e concentração volumétrica ( $\phi$ ) com os resultados obtidos para módulo de armazenamento ( $G'$ ) tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) e tensão de cisalhamento na transição sólido-líquido ( $\tau_{45^\circ}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos ensaios de bentonita, assim como os ensaios de correlação, demonstram que  $G'$  na LVE não é influenciada pela frequência do ensaio, porém apresenta uma correlação positiva alta com a concentração volumétrica, e com p-valor  $< 0,001$ . A tensão escoamento também apresenta correlação positiva alta somente com a concentração volumétrica (com p-valor  $< 0,001$ ). E a deformação crítica aparenta uma tendência de correlação negativa baixa e p-valor  $> 0,1$ , portanto inconclusiva, com o aumento de  $\phi$ .

A análise de correlação dos ensaios oscilatórios de tensão do caulim demonstra que a alta correlação positiva de  $G'$  na LVE com a concentração volumétrica ( $p$ -valor $<0,001$ ) e uma correlação positiva baixa e estatisticamente inconclusiva com a frequência ( $p$ -valor =  $0,006$ ). A tensão de escoamento também apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica (com  $p$ -valor  $< 0,001$ ), e não apresenta relação estatística conclusiva com a frequência ( $p$ -valor= $0,08$ ). A deformação crítica apresenta correlação positiva com a concentração volumétrica ( $p$ -valor $<0,001$ ) e uma correlação negativa alta com a frequência ( $p$ -valor $<0,05$ ) indicando a influência de  $f$  na deformação em que ocorre a ruptura da amostra.

Os resultados dos ensaios de rejeito de minério de ferro fino, assim como os ensaios de correlação, demonstram que  $G'$  na LVE tem apresenta correlação positiva, porém inconclusiva, com a concentração volumétrica, porém o  $p$ -valor $<0,05$  indica a influência de  $\phi$  no módulo. O rejeito fino, porém, apresenta uma de  $G'$  positiva alta com a frequência ( $p$ -valor $<0,001$ ). A tensão escoamento apresentam correlação positiva alta com concentração volumétrica (com  $p$ -valor  $< 0,001$ ), e apresentam uma correlação negativa, porém inconclusiva com o logaritmo da frequência, apesar de apresentar  $p$ -value= $0,06$ . A deformação crítica apresenta correlação positiva alta com a concentração volumétrica ( $p$ -valor $<0,001$ ) e uma correlação negativa baixa, que com  $p$ -valor $<0,05$  indicam a influência da frequência na deformação em que ocorre a ruptura da amostra.

Os resultados dos ensaios de rejeito de minério de ferro totais, assim como os ensaios de correlação, demonstram que  $G'$  na LVE tem apresenta correlação positiva, porém não alta, com a concentração volumétrica e com a frequência de oscilação. Porém o  $p$ -valor= $0,003$  e o  $p$ -valor= $0,01$ , respectivamente, indica que  $\phi$  e  $f$  influenciam no módulo de armazenamento, mas que a correlação linear estimada não era satisfatória para a quantidade de ensaios analisadas. A tensão escoamento apresenta correlação positiva alta com concentração volumétrica (com  $p$ -valor  $< 0,001$ ), porém não apresentam uma correlação com a frequência e  $p$ -valor $>0,1$ . Porém, a razão entre a tensão de escoamento e a tensão de cisalhamento de transição, apresenta correlação positiva com a frequência, com  $p$ -valor= $0,035$ , indicando a confiança estatística. A deformação crítica apresenta correlação positiva baixa com a concentração volumétrica (com  $p$ -valor= $0,02$ ) e uma correlação negativa baixa com a frequência

(com p-valor=0,02), que indicam a influência da concentração e da frequência na deformação em que ocorre a ruptura da amostra.

Assim, observa-se que os materiais respondem de maneiras diferentes a variações de frequência e concentração. Estatisticamente, porém, a não validade das relações ou os altos p-valores podem estar relacionados ao número relativamente baixo número de testes realizados. Ainda assim, é possível perceber algumas relações, semelhantes às observadas no ensaio oscilatório de tensão.

No material plástico (bentonita) a frequência não influencia no comportamento e a deformação crítica independe inclusive da concentração volumétrica. Em compensação, os materiais não-plásticos são afetados em sua deformação crítica pela frequência, em maior ou menor escala. O módulo de armazenamento ( $G'$ ) e a tensão de escoamento ( $\tau_y$ ) é influenciado positivamente em todos os materiais pela concentração volumétrica.

O aumento da frequência diminui a deformação crítica e a deformação em que ocorre a ruptura e a mudança de fase. Como não é observada a diminuição das tensões nos ensaios. Assim, o aumento da frequência causa aumento da fragilidade das suspensões siltosas estudadas. A relação com a frequência é maior em ensaios controlados por tensão que por deformação.

Além disso, os ferros grossos não apresentam relação entre a tensão de escoamento e a frequência. Os ferros finos diminuem a tensão de escoamento com o aumento da frequência, mas essa relação é mais forte para menores umidades. O aumento das taxas de cisalhamento aumenta a lubrificação entre as partículas.

As diferenças entre os comportamentos podem estar relacionadas aos efeitos de fatores como o tamanho e a forma das partículas individuais, e a formação de aglomerados em suspensão.

#### 4.5 ENSAIOS DE FLUXO

Foram assuntos de estudos anteriores a avaliação da influência do teor de água na suspensão (BOGER, 2013; CHÁCARA; OLIVEIRA FILHO, 2021; COUSSOT, 1997; PULLUM; BOGER; SOFRA, 2018; SAKANO, 2022) e do protocolo utilizado no ensaio

de fluxo (SAKANO, 2022). Porém, é importante avaliar o comportamento reológico de diferentes materiais ao fluxo, e a influência de fatores tais quais a velocidade máxima do fluxo em caso de rupturas de barragens e os tempos de aceleração e desaceleração da massa rompida, relacionados á topografia. Por isso, nessa seção os quatro materiais estudados (bentonita, caulim, rejeito de minério de ferro fino e rejeito de minério de ferro total) serão avaliados de acordo com a influência da taxa máxima de cisalhamento.

Os resultados dos ensaios de fluxo são divididos em dois ciclos. O primeiro ciclo foi utilizado para a determinação da tensão de escoamento estática ( $\tau$ ) de cada materiais, e representaria a tensão de cisalhamento necessária para o início do fluxo no caso de uma ruptura. Esta é estimada pelo valor de pico próxima à taxa de cisalhamento zero, considerando-se que abaixo desse valor o material não irá fluir e, portanto, apresentará comportamento elástico. A tensão de escoamento estática definida pela geometria placa-placa não se propões a representar diretamente o desenvolvimento nenhum tipo de solicitação de ruptura de barragem de rejeitos, porém indica uma característica importante no comportamento reológico desses materiais.

Após a ruptura da massa de solo, foi imposto no material um comportamento de aumento seguido da diminuição da taxa de cisalhamento, em dois ciclos. Esse comportamento força uma situação que não necessariamente é natural em eventos de ruptura de material liquefeito, em que em que a taxa de cisalhamento, usada como variável controlada, é quem comanda o escoamento. No caso do movimento da massa pós colapso, pode ser discutido que é a componente da força resultante paralela à topografia que gera a aceleração do movimento. Essa simplificação, porém, foi usada devido à utilização dos parâmetros reológicos obtidos em ensaios de fluxo para o uso de modelos reológicos.

Neste item, o comportamento reológico durante o fluxo será avaliado de duas maneiras. Primeiramente, serão apresentadas duas curvas de fluxo de cada material, para a avaliação de possíveis comportamentos e mudanças da microestrutura durante o escoamento pós ruptura. O modelo reológico mais adequados para a descrição do fluxo de cada material também é avaliado. Em seguida, será realizada a avaliação estatística do comportamento reológico dos materiais para diferentes protocolos de fluxo a partir da tixotropia e dos parâmetros reológicos calculados.

#### 4.5.1 Avaliação do comportamento de materiais durante o fluxo

Neste item, serão discutidas as características das curvas de fluxo dos diferentes materiais estudados. Serão avaliadas as diferenças entre os comportamentos reológicos de forma semi-quantitativa, de modo a se estudar a influência da microestrutura desses materiais no seu comportamento reológico. Para isso, serão estudados, para cada suspensão, duas curvas de fluxo com taxas máximas de cisalhamento diferentes, porém mesma aceleração das rampas. Para garantir melhor comparação entre as diferentes suspensões, a curva de fluxo até a taxa de  $80 \text{ s}^{-1}$  foi estabelecida como protocolo de referência, e em seguida foi escolhida outra curva considerada de interesse para a suspensão. As taxas de cisalhamento atingidas encontram-se na faixa observada em corridas de detritos naturais (SAKANO, 2022).

A Figura 4-26 apresenta o resultado do ensaio de fluxo para as cinco suspensões de bentonita estudadas (33%, 28%, 24%, 22% e 19%). Em todas as suspensões, é observada uma tensão de escoamento estática, seguido de um decréscimo da tensão de cisalhamento até se atingir a curva de fluxo. As curvas de fluxo se assemelham bem a retas, e apresentam inclinações baixas com viscosidades aparentes mais baixas quando comparada aos outros materiais. A tensão de escoamento é observada mesmo após a realização do protocolo de pré-cisalhamento, indicando a reestruturação parcial da microestrutura durante o período de descanso das amostras.

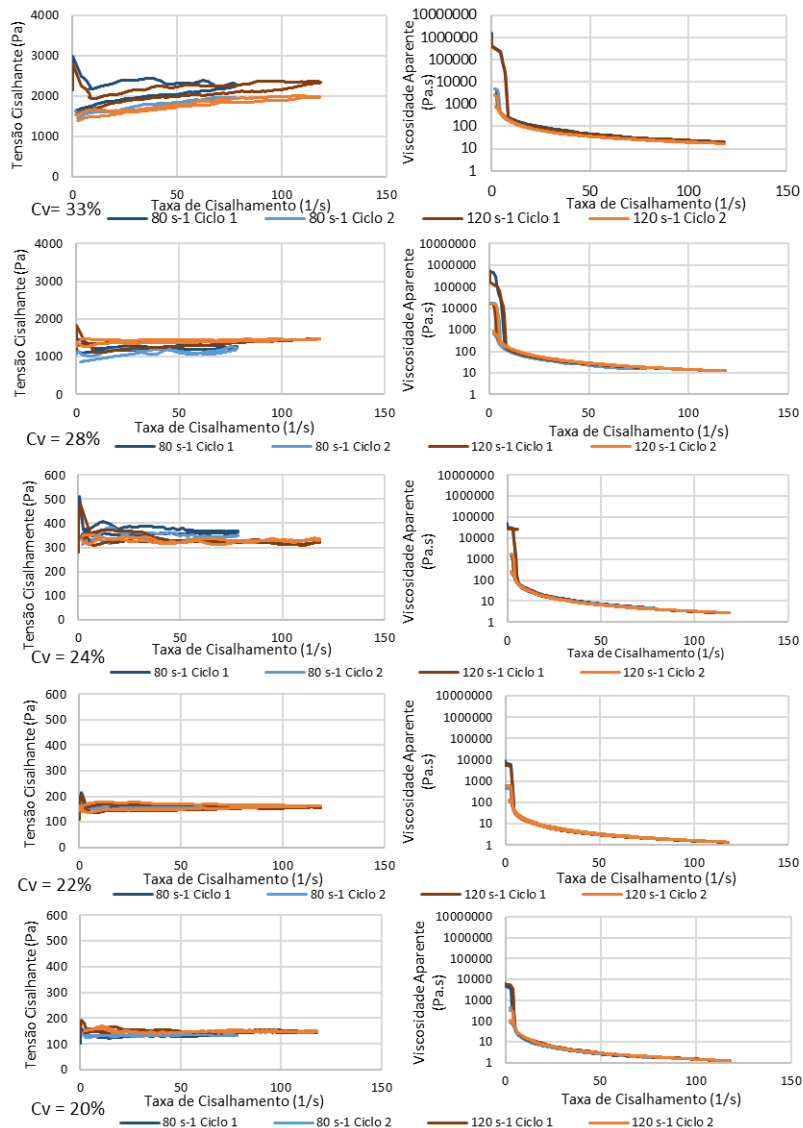
Após a superação da tensão de escoamento, a suspensão começa a fluir. Para as duas suspensões mais concentradas, observa-se que a curva de fluxo apresenta uma inclinação comparativamente maior, e é observada tixotropia positiva, isto é, perda de resistência na alteração da microestrutura durante o fluxo. Para as suspensões menos concentradas, o efeito do tempo da suspensão diminui. Em alguns casos, é observada uma tixotropia negativa, em que após a tensão de escoamento o material apresenta uma desestruturação extrema que volta se reestruturas durante o fluxo. Nos exemplos estudados, este fenômeno parece acontecer em concentrações maiores e para materiais levados a maiores taxas.

O nível de tensões de cisalhamento e da viscosidade aparente sofrem redução com a diminuição da concentração volumétrica do material, uma vez que ocorre a maior dispersão das partículas na água. Porém observa-se que com o aumento das



concentrações a curva se torna cada vez menos inclinada, indicando a diminuição da viscosidade do material.

Figura 4-26: Ensaio de Fluxo da bentonita. Comparação entre o fluxo usado como referência (até 80s<sup>-1</sup>) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até 120 s<sup>-1</sup>).



Fonte: Elaborada pela autora.

A tensão de escoamento em uma ruptura de barragem pode ser compreendida como uma resistência a grandes rearranjos devido à microestrutura e o imbricamento entre as partículas. O fluxo desestrutura o material, e causa uma diminuição abrupta na viscosidade. Esse comportamento é típico de fluidos com tensão de escoamento reais (COUSSOT, 20020, e pode ser observado na suspensão de bentonita e em todos os materiais subsequentes.

Após o colapso da estrutura, porém, o material pode parar a curta distância ou escoar abruptamente. Durante a ruptura da massa, então, observa-se que os fluidos apresentam viscosidades muito elevadas, e que após a desestruturação do material (na superação de uma tensão crítica), o material apresenta uma queda abrupta na viscosidade e inicia o fluxo. Assim, entende-se que o material apresenta uma bifurcação no comportamento reológico, que caso esteja abaixo dessa tensão crítica – ou taxa de cisalhamento crítico – tem tendência a paralisação do movimento, e caso contrário tem tendência a fluidização e escoamento rápido liquefeito (COUSSOT, 2002). Apesar disso, as suspensões de bentonita apresentam pouca desestruturação após o início do fluxo, indicando uma maior facilidade de retorno à condição estática.

A Figura 4-27 apresenta o resultado do ensaio de fluxo para as quatro suspensões de caulim estudadas (37%, 36%, 31% e 28%). Em todas as suspensões, é observada uma tensão de escoamento estática, seguido de um decréscimo da tensão de cisalhamento até se atingir a curva de fluxo. A diferença entre a tensão de escoamento estática e a curva base fica menor para concentrações maiores. Esta tensão de escoamento é observada mesmo após a realização do protocolo de pré-cisalhamento, indicando a reestruturação parcial da microestrutura durante o período de descanso das amostras.

Para as duas suspensões mais concentradas, é possível se observar que para as taxas mais elevadas, atingidas no protocolo de referência, apresentam uma quebra grande da microestrutura do material, demonstrada pela grande tixotropia dos ciclos de fluxo. Esta quebra é observada apenas conforme se atingem taxas de cisalhamento maiores, sendo observada a repetibilidade entre o primeiro e o segundo ciclo e a tixotropia baixa quando a taxa de cisalhamento é limitada, para a suspensão de 37% a  $20 \text{ s}^{-1}$  e para a suspensão de 36% a  $40 \text{ s}^{-1}$ . Após a quebra da estrutura, o material apresenta viscosidade aparente baixa, e a curva de fluxo se torna bastante reta. Para as suspensões de 31% e 28%, a quebra da microestrutura (demonstrada pela tixotropia) não acontece para o protocolo de referência. Somente na suspensão de 31% é observada a tixotropia no segundo ciclo de cisalhamento, indicando um possível rearranjo da microestrutura devido a tempos de escoamento mais longos.

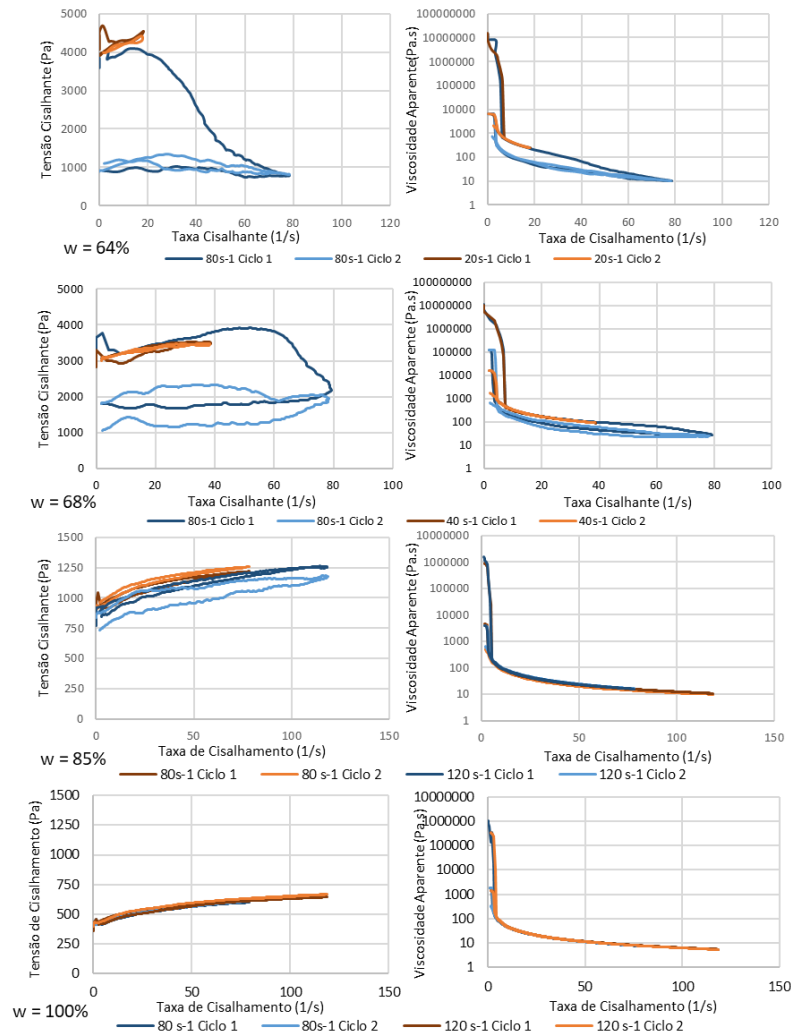
Vale-se destacar que a limitação as taxas de cisalhamento a  $20 \text{ s}^{-1}$  pode ser o suficiente para englobar diversos eventos de *Debris Flow* brasileiros. As diversas

descrições dos eventos de corridas de massa observados em Caraguatatuba (1967), na Serra do Mar, obtiveram valores de velocidade normalizadas da ordem de  $10 \text{ s}^{-1}$ . Assim, é importante a avaliação prévia das taxas de cisalhamento do evento antes da determinação das taxas de cisalhamento máximas dos ensaios de reologia dos materiais.

A tixotropia observada pela alteração da microestrutura do caulim durante o cisalhamento a taxas muito elevadas também pode ser observado nos resultados da viscosidade aparente. Para as suspensões e ensaios em que não há alteração da microestrutura durante o cisalhamento, a viscosidade é bastante similar em ambos os ciclos na rampa de aceleração e desaceleração. Além disso, a queda abrupta da viscosidade no início do ensaio, após ser ultrapassada a tensão de escoamento, indica o efeito avalanche observado em materiais com tensão de escoamento (COUSSOT et al, 2002).

Os resultados observados pelo caulim podem ser ainda extrapolados para possíveis observações de campo desse material. Primeiramente, o efeito avalanche observado indica que, dependendo da solicitação, o material poderia não fluir, porém a partir de solicitações maiores poderia liquefazer e escoar. Além disso, a tixotropia das concentrações maiores indica que o material, após ruptura e consequente alteração da microestrutura, não retorna às condições iniciais. Portanto, a perda grande de resistência durante o fluxo pode ser determinante nas grandes distâncias percorridas pós colapso. Assim, é observada que a velocidade de saída do material, ligada à aceleração de saída, pode influenciar em seu comportamento e na dificuldade de reestruturação do material após o início do fluxo.

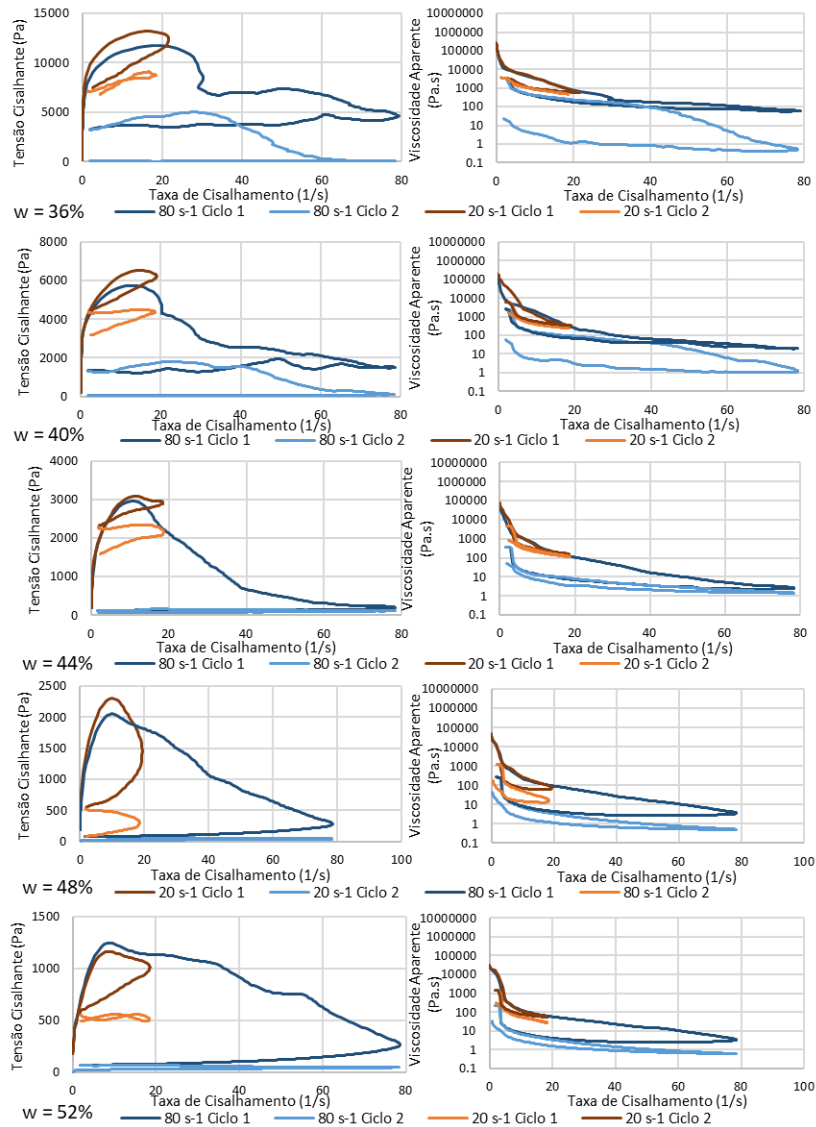
Figura 4-27: Ensaios de Fluxo do Caulim. Comparação entre o fluxo usado como referência (até 80s<sup>-1</sup>) e um ensaio de fluxo de interesse (variável por concentração da suspensão)



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 4-28 apresenta os resultados do ensaio de fluxo para as cinco suspensões de rejeito de minério de ferro fino estudadas (43%, 41%, 38%, 36% e 34%). Nas suspensões de rejeito de ferro não foi observada a presença de uma tensão de escoamento estática, apesar de não ter sido realizado o pré-cisalhamento. Isto porque o material não apresenta um valor de pico de tensões em taxas de cisalhamento próximas a zero. Ao contrário, o pico ocorre a taxas mais elevadas, a partir do qual é observado um decréscimo drástico das tensões medidas durante o ensaio. As faixas de tensões e de viscosidade aparente obtidas no primeiro ciclo são mais elevadas para maiores concentrações, porém ao final do segundo ciclo estas são similares e aparentemente independentes da concentração volumétrica do material.

Figura 4-28: Ensaios de Fluxo do rejeito de minério de ferro de granulometria fina. Comparação entre o fluxo usado como referência (até 80s<sup>-1</sup>) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até 20 s<sup>-1</sup>).



Fonte: Elaborada pela autora.

Os rejeitos em granulometria mais fina apresentam uma tixotropia bastante elevada, e que está presente independente das taxas de cisalhamento máxima à que o material foi levado. O cisalhamento ao longo do tempo causa desestruturação do material em fluxo, para as concentrações apresentadas. Em geral, porém, a tendência é que a desestruturação ao final do primeiro ciclo seja maior para ensaios de concentração menores ou levados a taxas de cisalhamento mais elevados. Para os ciclos até 80 s<sup>-1</sup>, observamos uma tixotropia em ambos os ciclos até para as concentrações maiores, (43% e 41%). Para as três concentrações menores, a alteração da microestrutura só acontece de maneira marcante no primeiro ciclo. A tixotropia continua grande no segundo ciclo, quando o material só vai até 20 s<sup>-1</sup>.

A desaglomeração total do material, obtida após o segundo ciclo do minério de ferro para o protocolo até  $80 \text{ s}^{-1}$  leva a tensões escoamento na ordem de 50 Pa e viscosidade aparente na ordem de 1 Pa.s, independente da concentração avaliada. Os valores encontrados são bastante baixos quando comparados parâmetros obtidos pela retroanálise em casos de rupturas históricas de rejeitos (JEYAPALAN; DUNCAN; SEED, 1983a).

A Figura 4-29 apresenta os resultados do ensaio de fluxo para as cinco suspensões de rejeito de minério totais estudadas (52%, 51%, 49%, 46% e 44%). Nessas suspensões o comportamento reológico em muito se assemelha aos rejeitos em fração fina, sendo também difícil apontar uma tensão de escoamento estática para o material. Não há um pico de tensões a taxas de cisalhamento muito próximas de zero, conforme foi visualizado na bentonita, e as tensões de cisalhamento crescem até taxas de  $5 \text{ s}^{-1}$  aproximadamente, a partir do qual tendem a decer. Os níveis de tensões obtidos durante todo o ensaio são maiores para as maiores concentrações.

Esses rejeitos apresentam tixotropia bastante elevada, independente das taxas de cisalhamento máximas a que o material foi levado. Assim, entende-se que o cisalhamento ao longo do tempo também causa alteração da microestrutura dos rejeitos totais, de maneira similar à descrita para os rejeitos finos, possivelmente devido a desaglomeração ou separação de fases.

A desaglomeração total dos rejeitos totais, obtida após o segundo ciclo de cisalhamento para o protocolo até  $80 \text{ s}^{-1}$  leva a tensões de escoamento de 50-500 Pa, e viscosidade aparente de 1-10 Pa.s. Os valores obtidos são bastante baixos quando comparados a valores típicos encontrados apresentados na literatura para rejeitos diversos, de 920-7200 Pa e 96-4800 Pa.s (JEYAPALAN; DUNCAN; SEED, 1983b); ou de retroanálises da ruptura de Brumadinho nos softwares MIKE e no HEC-RAS, com tensão de escoamento entre 750-1000 Pa e viscosidade de Bingham de 30-100 Pa.s (LUMBROSO, 2021; GIBSON, 2022); ou em retroanálise no Software RASH3D, com tensão de escoamento 50 Pa e viscosidade de Bingham de 250 Pa.s (MACEDO, 2020).

Os valores obtidos por retroanálise apresentam bastante divergência entre si, devido ao tipo de modelagem numérica, e aos parâmetros assumidos, assim devem ser

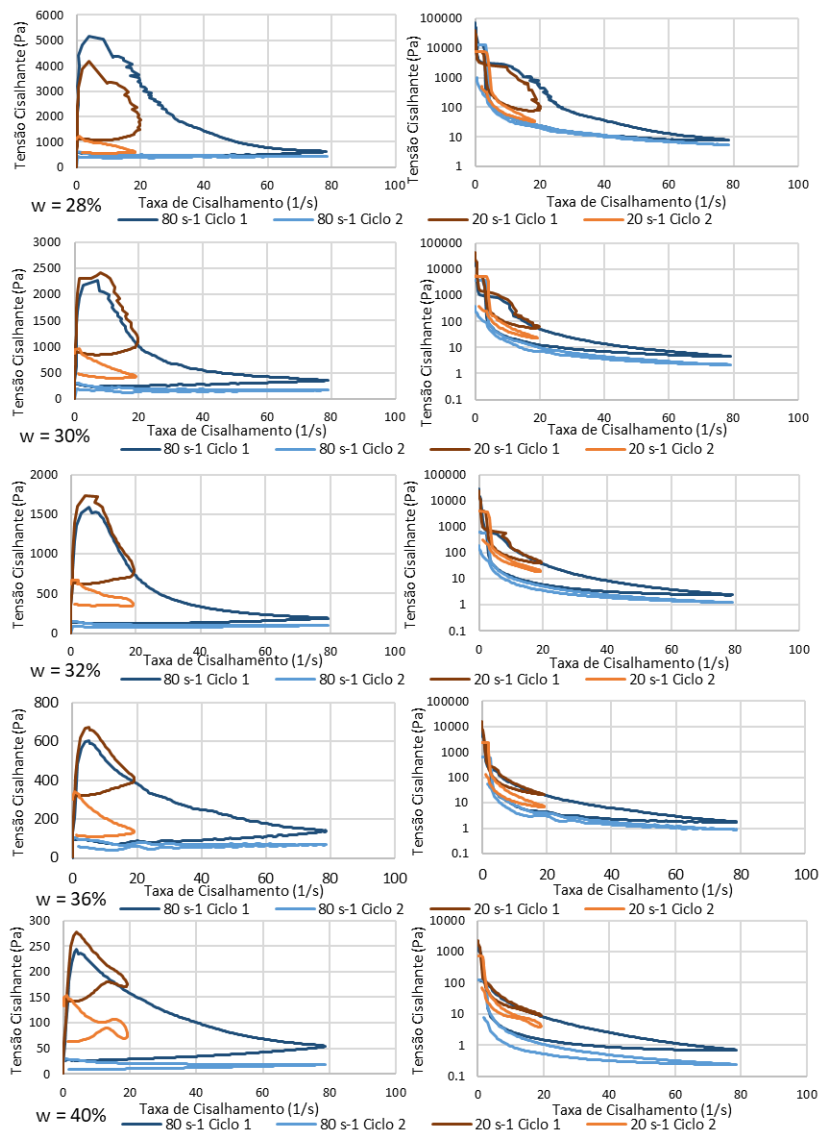
usados para avaliação dos resultados com cautela. A diferença de valores também pode ser dada a diferença de geometria de ensaio e as tensões normais no material durante o escoamento do material rompido. Ainda assim, entende-se que o segundo ciclo de fluxo dos ensaios do rejeito não foi representativos do comportamento desses materiais no caso de uma ruptura hipotética de barragem.

A diminuição das tensões de cisalhamento observada nos dois rejeitos pode indicar dois fenômenos diversos no fluxo de barragens de rejeitos. Primeiramente, a desaglomeração da microestrutura dos materiais em fluxo homogêneo durante o ensaio. Em campo, esta situação indicaria a perda de resistência ao fluxo durante o escoamento e, conseqüentemente, a dificuldade da massa rompida de parar. Além disso, devido às características de alta densidade dos grãos e pouca plasticidade, é possível que tenha ocorrido a separação de fases durante o fluxo do ensaio. Em um caso de ruptura de barragens, isto indicaria a deposição de parcela do material por sedimentação, e a continuação de uma onda de material mais aquoso.

Os fenômenos observados durante os ensaios dos diferentes materiais podem demonstrar a limitação da geometria de placas paralelas nesses ensaios. As suspensões mais viscosas (com viscosidade aparente inicial de 1000 Pa.s) de caulim apresentam limitação em taxas de cisalhamento, típica da geometria (MACOSKO, 1994). Além da quebra da estrutura dos materiais, é possível que ocorra a tendência de saída de materiais pelas laterais. O mesmo problema não foi observado nas amostras de bentonita e nas suspensões menos concentradas de caulim, que apresentavam viscosidades iniciais na ordem de 100 Pa.s.

A sedimentação observada no placa-placa também demonstra os problemas dos ensaios utilizados, devido a limitação da geometria ou problemas da programação de ensaio. Os ensaios de rejeitos de ferro fino e total pode ter sido influenciada pela deformação não homogênea durante os ensaios. Seria difícil propor a diminuição das taxas máximas dos ensaios, devido à necessidade de utilização de ensaios com taxas de cisalhamento até cerca de  $100 \text{ s}^{-1}$ , a faixa dos fluxos de corridas de massa e barragens de rejeito. Assim, é necessário pesquisar a aplicação de outras geometrias de ensaio para o uso nesses materiais.

Figura 4-29: Ensaios de Fluxo do rejeito de minério de ferro em granulometria total. Comparação entre o fluxo usado como referência (até 80s<sup>-1</sup>) e um ensaio de fluxo de interesse (nesse caso, até 20 s<sup>-1</sup>).



Fonte: Elaborada pela autora.

A tixotropia dos rejeitos finos e totais pode ser observada também devido à diminuição da viscosidade aparente ao longo do tempo durante o fluxo. A viscosidade é uma medida da resistência do material ao fluxo e das perdas de energia durante o escoamento. Assim, a desestruturação dos rejeitos pelo fluxo, que diminui a viscosidade, o que no caso do movimento de massa indicaria a aceleração da massa. Assim, há a dificuldade de parada do material após o início do movimento, que só ocorreria para espessuras mínimas do material. Efeito similar foi observado nas suspensões mais concentradas do caulim.



A tixotropia também é bastante importante na interpretação do comportamento, apesar de ser pouco usada na modelagem desses eventos. Essa pode ser observada devido ao cisalhamento a taxas elevadas como no caulim, ou a deformação em si como nos rejeitos. No primeiro caso, em particular, pode não ser necessária a consideração da tixotropia desde que as taxas de cisalhamento máximas estimadas para os eventos estejam abaixo das taxas de cisalhamento que as suspensões suportam sem perder a microestrutura.

Para o caso de análise de tensão de resistência ao cisalhamento  $Su_{LIQ}$ , os resultados podem demonstrar que o contrário também pode ser verdadeiro. Utilizar valores de tensão de escoamento obtidas após a parada do material para estimativa de estados do material a deformações pequenas também pode ser desnecessariamente conservador e não apresentar um sentido físico, uma vez que o material não retorna às condições iniciais do fluxo. Além disso, as condições de parada do material estão bastante ligadas à conservação de energia durante o escoamento, e a dissipação de energia causada por, entre outros, a viscosidade intrínseca do material. Assim, é importante estudos mais aprofundados no que tange ao comportamento tixotrópico de materiais durante corridas de massa.

#### 4.5.2 Avaliação dos parâmetros reológicos obtidos por ensaios de fluxo

Os resultados dos ensaios de fluxo podem ser divididos em dois ciclos, com uma rampa de aceleração e uma rampa de desaceleração cada. A tensão de escoamento estática ( $\tau$ ), caso presente, foi estimada a partir do valor de tensão de cisalhamento de pico próximo à taxa de cisalhamento zero. Entende-se que esta corresponde ao comportamento no movimento inicial, anterior ao qual o material não irá fluir e apresenta comportamento elástico. Os parâmetros reológicos foram estimados a partir da rampa de desaceleração do segundo ciclo. Este leva a resultados mais conservadores, em especial nas suspensões que apresentaram grande tixotropia.

A partir dos ensaios realizados foram obtidos os seguintes parâmetros reológicos obtidos: a tensão de escoamento estática ( $\tau_y$ ), a área de histerese obtida em cada um dos dois ciclos de cisalhamento, e os parâmetros reológicos obtidos pela modelagem matemática da curva de fluxo. Foi utilizado somente o modelo reológico de Bingham e assim foi obtida a tensão de escoamento dinâmica ( $\tau_y$ ) e a viscosidade de Bingham

( $\mu_p$ ). Esse estudo limitou-se ao modelo reológico de Bingham por este ser o mais simples e ter apresentados valores de  $r^2$  satisfatórios e semelhantes, e até maiores, àqueles obtidos pelo modelo de Herschel-Bulkley. As tabelas com os parâmetros reológicos e os resultados das análises dos dois modelos são apresentadas em anexo.

Os rejeitos de minério de ferro em granulometria fina e total não apresentaram uma tensão de escoamento estática típica bem definida, conforme ilustrado no item anterior. Porém, foi definido o pico de tensão observado pelo material antes da queda por tixotropia como um equivalente da tensão de escoamento. Este valor foi aproximado para permitir a comparação de ordem de grandeza das tensões entre as suspensões, porém não tem valor de tensão de escoamento.

A tensão de escoamento estática obtida no primeiro ciclo da aceleração e os parâmetros reológicos do modelo de Bingham no segundo ciclo da desaceleração para os ensaios de fluxo são apresentados na Tabela 4-11. A relação entre as tensões de escoamento estática e dinâmica e a viscosidade de Bingham com a concentração volumétrica é apresentada na Figura 4-30. A tensão de escoamento estática dos materiais, assim como a tensão de escoamento obtida para os ensaios oscilatórios de tensão e de deformação, é dependente da concentração por uma relação exponencial. Além disso, ela tende a um infinito a concentrações volumétricas diferentes entre si, e conforme as características da suspensão.

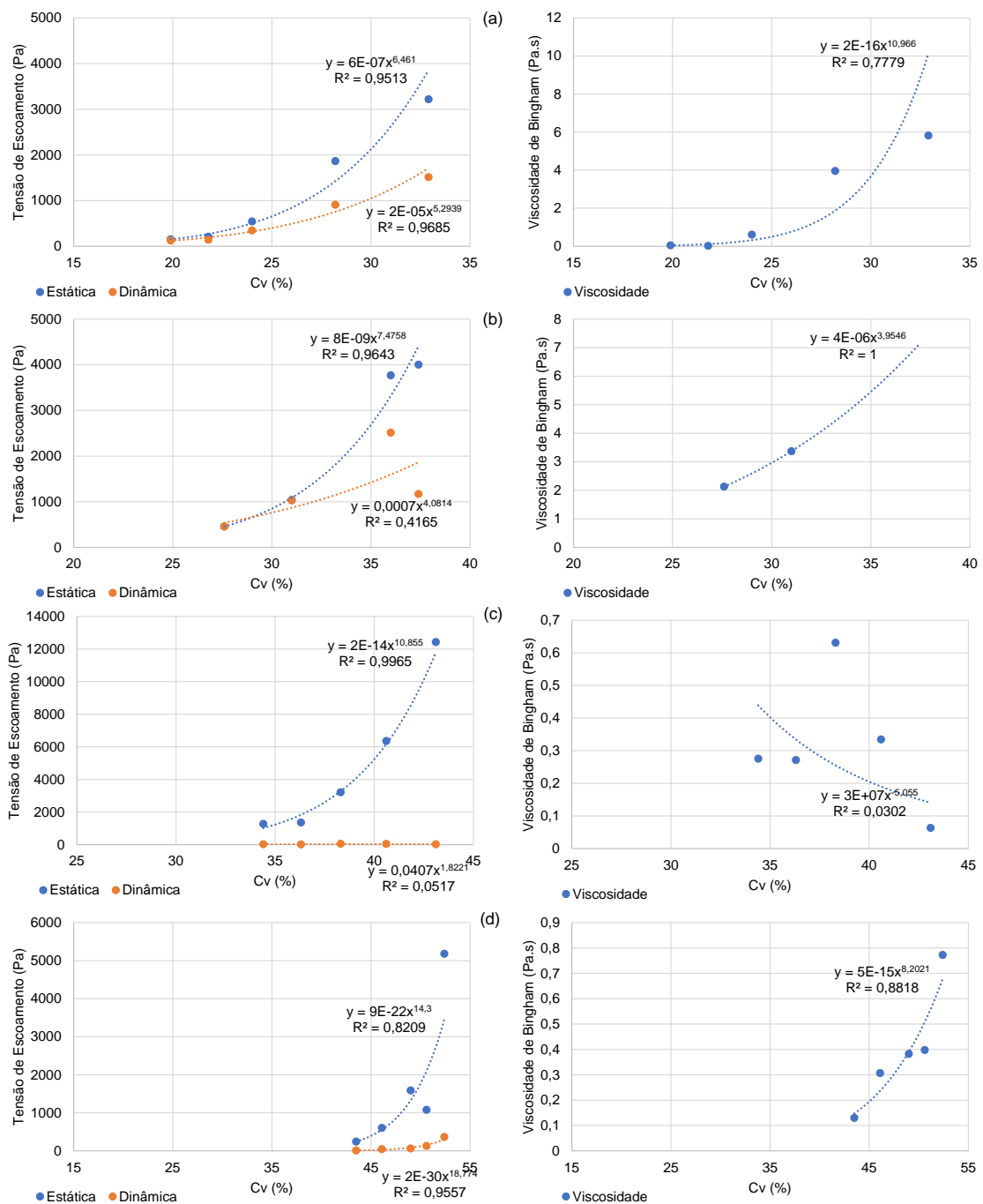
A tensão de escoamento dinâmica dos materiais, porém, apresenta uma variabilidade muito grande. Os valores obtidos para a tensão de escoamento da bentonita estão na próximos aos obtidos por tensão de escoamento estática, na ordem de apesar da maior variabilidade dos resultados. A variabilidade, porém, é bastante acentuada nas suspensões de caulim a concentrações elevadas (37 e 36%), e em todas as suspensões de rejeitos de minério de ferro. Estas mesmas suspensões apresentam tixotropia elevadas, conforme discutido no item anterior. A viscosidade plástica dos rejeitos também apresenta grande variabilidade, devido às diferenças entre a desestruturação dos materiais durante o fluxo.

Tabela 4-11: Resumo dos parâmetros reológicos obtidos.

Material	Cv (%)	$\tau_y$	Bingham		
			$\tau$	$\mu$	R <sup>2</sup>
Bentonita	32,9	3225,2	1520,2	5,8337	0,91
	28,2	1871,7	914,6	3,9678	0,76
	24,0	547,7	352,1	0,6246	0,71
	21,8	214,8	148,0	0,0328	0,73
	19,9	157,6	132,5	0,0577	0,12
Caulim	37,4	4010,0	1171,4	-5,0743	0,65
	36,0	3772,7	2519,7	-7,4053	0,74
	31,0	1042,5	1028,6	3,3734	0,89
	27,6	459,6	458,3	2,1308	0,91
Ferro Finos	43,1	12434,8	25,7	0,0632	0,18
	40,6	6365,8	48,0	0,3346	0,53
	38,3	3216,0	58,5	0,6314	0,96
	36,3	1361,4	16,5	0,2716	0,98
	34,4	1275,6	25,5	0,2754	0,99
Ferro Finos	52,4	5179,6	365,9	0,7726	0,71
	50,6	1077,7	129,0	0,3975	0,55
	49,0	1586,3	62,7	0,3825	0,93
	46,1	602,3	43,5	0,3064	0,79
	43,5	242,9	7,6	0,1299	0,99

Só é observada uma relação entre a viscosidade e a concentração para as suspensões de bentonita, sendo isso também por causa das perdas da microestrutura dos materiais durante o fluxo. A grande tixotropia dos rejeitos, portanto, pode ser um empecilho na definição de parâmetros reológicos para a modelagem de rupturas de barragens de rejeitos. Os valores de  $r^2$  obtidos nas relações explicitam a variabilidade dos parâmetros obtidos.

Figura 4-30: Relação entre a tensão de escoamento estática, a tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade de Bingham com a concentração volumétrica para (a) bentonita; (b) caulim; (c) rejeito de ferro fino; e (d) rejeito de ferro total.



Fonte: Elaborada pela autora.

Sobre a variabilidade dos resultados obtidos para os rejeitos, é possível observar a heterocedasticidade da regressão realizada. Isto é, observa-se que a variância do modelo, tanto da tensão de escoamento dinâmica quanto para a viscosidade, cresce com a concentração volumétrica das suspensões. Além disso, observa-se maior perda dos parâmetros reológicos no terceiro ciclo devido às taxas finais de deformação.

Assim, entende-se a necessidade da utilização de modelos reológicos que considerem a tixotropia da suspensão.

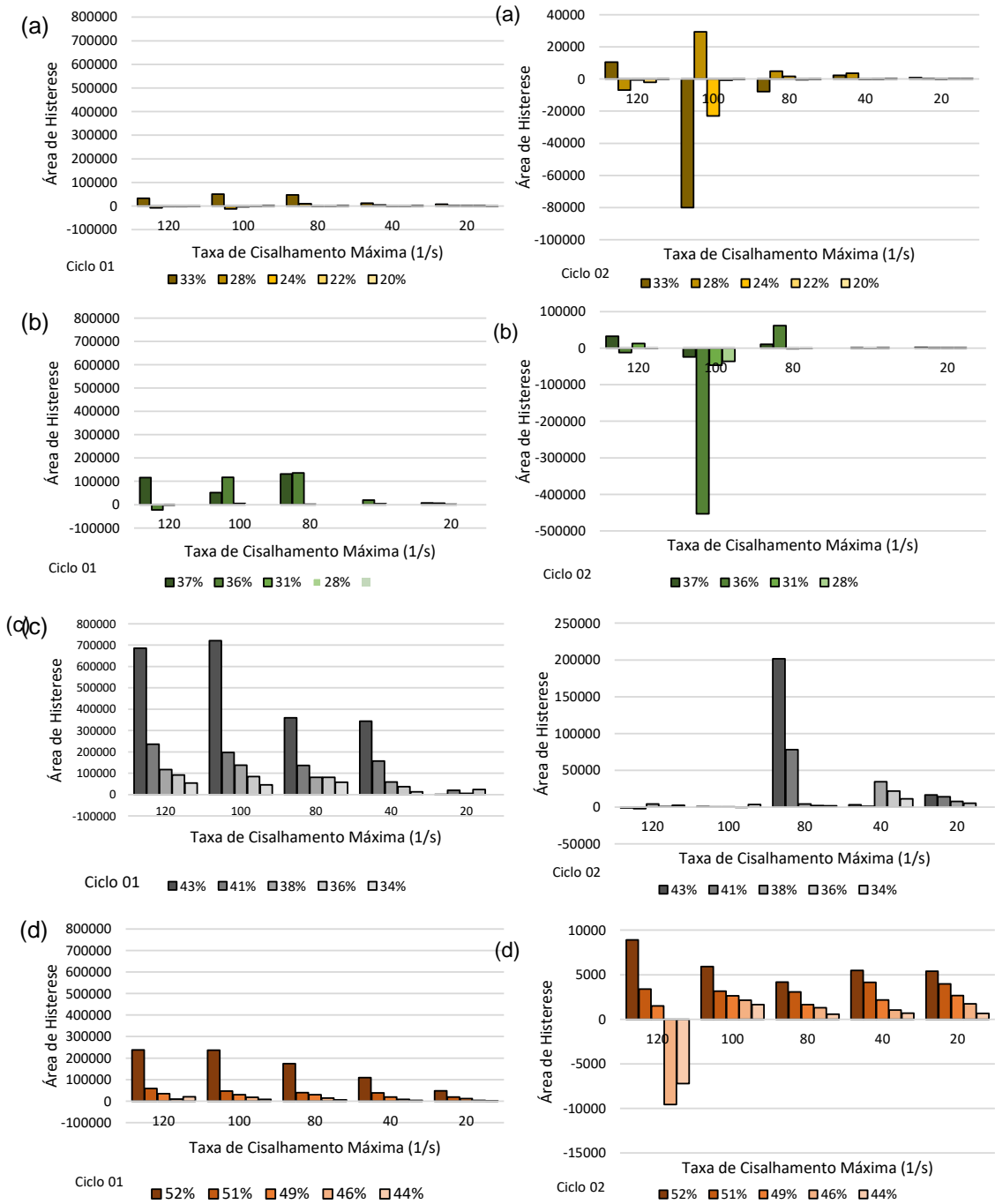
A média dos valores observados de tensão de escoamento do modelo para as concentrações mais elevadas de rejeitos foi entre 100-500 Pa, intervalo consistente com valores encontrados na literatura para rupturas de barragens de rejeitos entre 50-1000 Pa (JEYAPALAN; DUNCAN; SEED, 1983b; MACEDO, 2020; LUMBROSO, 2021; GIBSON, 2022). Porém, a grande dispersão dos resultados, considerando uma mesma concentração, dificulta o uso destes ensaios para a definição de parâmetros de escoamento para rupturas de barragens de rejeitos.

A média dos valores observados de viscosidade dos rejeitos (entre 0,2-20 Pa.s) são relativamente baixos quando comparados a valores obtidos a partir da retroanálise de rupturas de barragens, em que podem ser encontrado valores entre 30 e 4800 Pa.s (JEYAPALAN; DUNCAN; SEED, 1983b; MACEDO, 2020; LUMBROSO, 2021; GIBSON, 2022). Foi, porém, observada uma grande variabilidade dos parâmetros para uma mesma concentração volumétrica.

A tixotropia pode ser avaliada a partir da área de histerese entre os ciclos de cisalhamento durante o ensaio de fluxo, e é apresentada para os quatro materiais, em cada um dos ciclos, na Figura 4-31. Observa-se a baixa tixotropia da bentonita quando comparada aos outros materiais, o que explica a maior consistência nos resultados de parâmetros de ensaios observados.

A tixotropia do caulim difere-se da dos rejeitos, no sentido que só é observada nas maiores concentrações e a elevadas taxas de cisalhamento, que quebram a estrutura, conforme observado nos perfis do item. Assim, é possível estimar os valores dos parâmetros reológicos dos materiais homogêneos desconsiderando os resultados de materiais de elevada tixotropia. Porém, dependendo das concentrações de suspensão e das taxas de cisalhamento atingidas durante o fluxo, é importante a consideração dessa tixotropia, seja incrementando-a no modelo ou sendo conservador e admitindo os valores após a completa destruição da microestrutura.

Figura 4-31: Área de histerese das suspensões de (a) bentonita; (b) caulim; (c) rejeitos finos; e (d) rejeitos totais, nos Ciclos 01 e 02.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para o caso dos rejeitos, por outro lado, a área de histerese no primeiro ciclo é proporcional à taxa de cisalhamento máxima atingida e inversamente proporcional à concentração. Além disso, foi observada histerese proporcional no segundo ciclo dos ensaios de rejeitos de minério de ferro grossos. A histerese observada nos rejeitos, porém, aparentam estar relacionadas a efeitos de sedimentação e separação de

fases. A área de histerese também é maior em suspensões mais concentradas devido às maiores tensões de cisalhamento atingidas.

Os resultados dos ensaios de reometria dos rejeitos demonstram a dificuldade de se modelar o comportamento reológico destes materiais sem a utilização de modelos que considera a sua tixotropia. Considerando a hipótese que essas alterações sejam por segregação, uma alternativa seria tentar trocar a geometria para uma que garanta a mistura ao longo do ensaio. Outra alternativa mais comumente utilizada, é usar os valores mais conservadores obtidos, sabendo da sua limitação e da superestimação das consequências da ruptura.

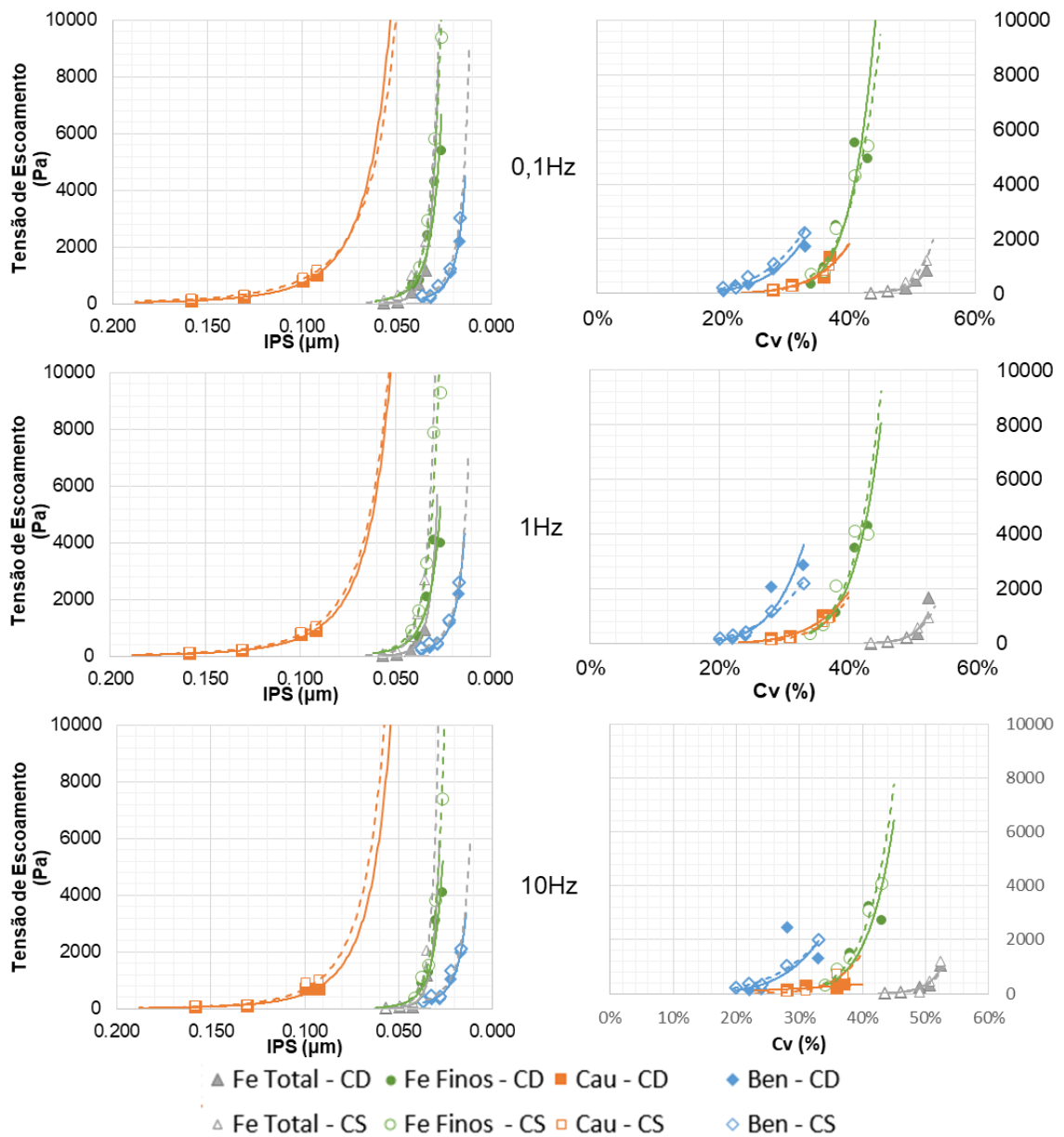
Além disso, a existência de tixotropia durante o escoamento desses materiais dificulta na utilização de valores obtidos pós ruptura para a estimativa de parâmetros do material estático. Isto é, a utilização do ângulo de repouso pós rupturas por liquefação de areias para a determinação dos parâmetros de resistência residual, ou liquefeitos, é muito conservadora e não representam bem uma situação do material parado. Caso o material tenha alcançado altas taxas de cisalhamento, as condições de arranjo microestrutural das partículas ou de separação de fases devido ao movimento pode ser bastante elevada, e resultar em resistências de parada muito abaixo das resistências do início do escoamento.

#### 4.6 COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DO IPS

Considerando a influência dos parâmetros de concentração volumétrica, tamanho e distribuição granulométrica das partículas e do máximo empacotamento no comportamento reológico de suspensões concentradas, os resultados obtidos foram avaliados pelo modelo de IPS. Este modelo é utilizado para avaliar a mobilidade espacial das partículas e, portanto, é mais adequado para a análise da viscosidade em materiais granulares, com baixa influência de forças elétricas.

A Figura 4-32 apresenta a relação entre a tensão de escoamento estática, medida pelos ensaios oscilatórios de tensão e de deformação, e o IPS, comparada com a relação entre a tensão de escoamento estática e a concentração volumétrica, para os quatro materiais.

Figura 4-32: Comparação entre a relação entre tensão de escoamento estática e IPS/concentração volumétrica para as frequências de (a) 0,1 Hz; (b) 1 Hz; e (c) 10 Hz. Em que CD = ensaio oscilatório de deformações e CS = ensaio oscilatório de tensões. O eixo do IPS foi invertido para interpretação.

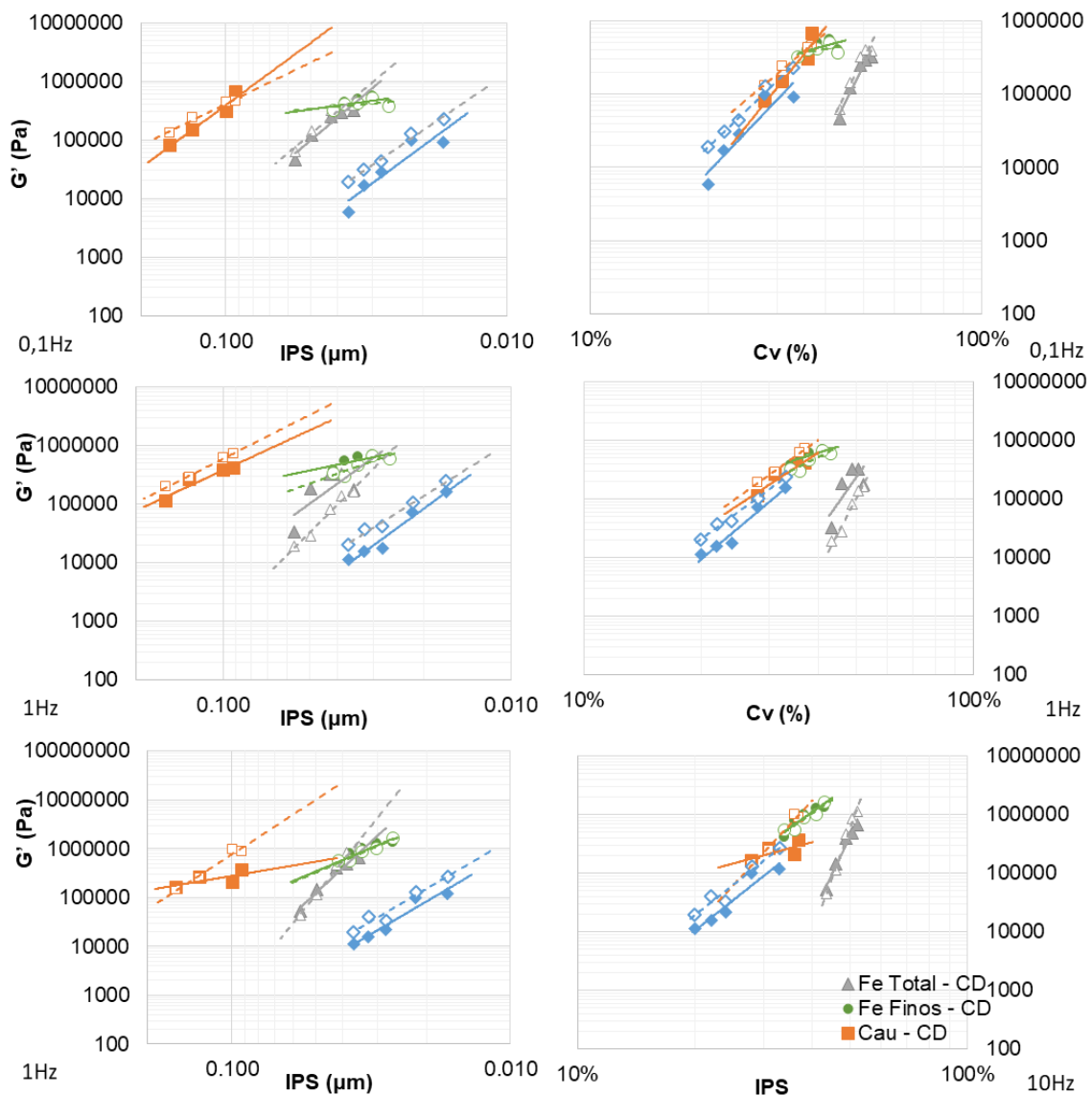


Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 4-33 apresenta a relação entre  $G'$ ;  $G''$  e o IPS, medida no platô do ensaio, comparando essa com a relação entre  $G'$  na região linear e a concentração volumétrica, para os quatro materiais. Nas imagens, apresentados os resultados obtidos para os ensaios oscilatórios de deformações (CD) e ensaios oscilatórios de tensões (CS). O eixo do IPS está invertido para facilitar a comparação com a concentração volumétrica.



Figura 4-33: Comparação entre a relação entre  $G'$  no SAOS e IPS/concentração volumétrica para as frequências de (a) 0,1 Hz; (b) 1 Hz; e (c) 10 Hz. Em que CD = ensaio oscilatório de deformações e CS = ensaio oscilatório de tensões. O eixo do IPS foi invertido para interpretação.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados interpretados a partir do uso do IPS permitem uma comparação do comportamento reológico dos rejeitos de minério de ferro finos e totais nos ensaios oscilatórios de tensão e de deformação. Essa comparação ainda reforça o uso do gabarito e da metodologia de preparação das amostras na repetibilidade dos ensaios.

Quando comparado com a concentração volumétrica, o caulim se confunde e se aproxima aos rejeitos finos para a tensão de escoamento, e o  $G'$  dos três materiais finos também aparentam uma tendência única. Assim, entende-se que o IPS poderia ser usado para a comparação do comportamento reológico de materiais não plásticos.

A realização de pré-cisalhamento no caulim e na bentonita pode ser responsável por parte da variação do comportamento desses materiais em relação aos rejeitos.

Os resultados apresentados demonstram que a maior proximidade entre as partículas, correspondente a menores IPS, resultam em maior dificuldade para o início do movimento, ou em uma maior tensão de escoamento. Além disso, maiores IPS indicam maiores módulos de armazenamento ( $G'$ ) dos materiais, tanto em oscilatórios de deformação quanto de tensão. Além disso, observa-se que as linhas de tendência do minério de ferro fino e totais são similares, e uma única linha de tendência pode ser utilizada para a determinação de  $G'$  e  $\phi'$  dos ensaios oscilatórios.

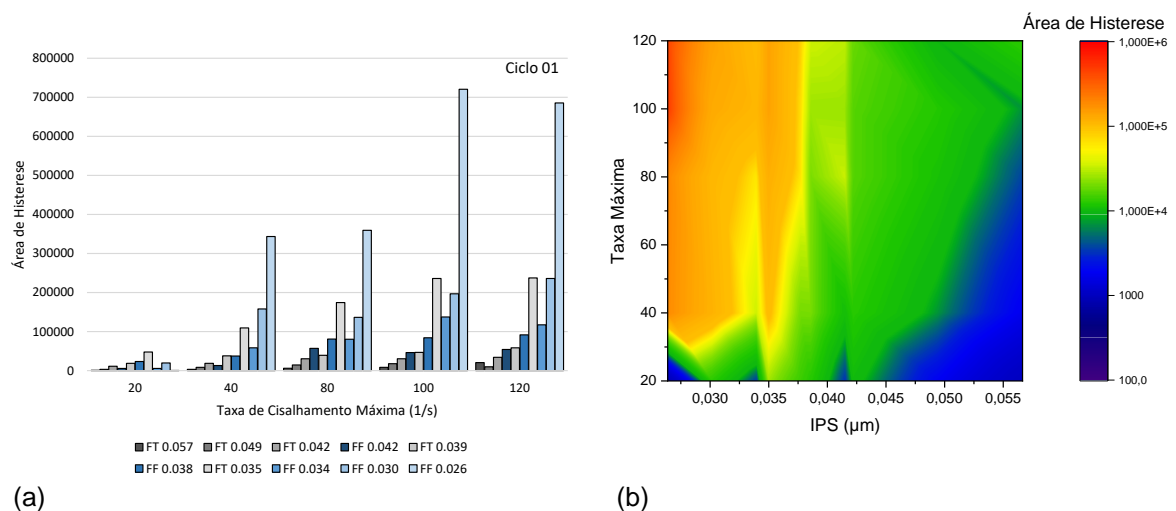
O mesmo IPS pode ser utilizado para a avaliação dos ensaios de fluxo dos materiais. Os resultados obtidos a partir da avaliação da relação entre a tensão de escoamento estática e dinâmica e a viscosidade com o IPS é apresentada na Figura. Para melhor análise dos dados, foram retirados os valores obtidos nas suspensões de caulim em que foi observada tixotropia, o que impedia a comparação direta com os resultados sem quebra da microestrutura. Nos rejeitos, como todas as suspensões apresentaram tixotropia, os resultados ainda foram avaliados para todas as suspensões.

Observa-se que a tensão de escoamento estática dos três materiais de granulometria fina (bentonita, caulim e rejeito de ferro fino) apresenta tendências semelhantes quando é considerada somente a concentração volumétrica, apesar das diferentes características das partículas. O uso do IPS, porém, permite a comparação direta entre os dois rejeitos de minério de ferro, apesar das diferentes tensões obtidas. Essa observação pode ser relevante quando são observadas limitações devido à granulometria mais elevada de alguns rejeitos de minério de ferro.

A utilização do IPS facilita a comparação direta dos resultados obtidos para os rejeitos de minério de ferro finos e totais de tensão de escoamento dinâmica e da viscosidade. Porém, a alta tixotropia dos rejeitos dificulta a comparação dos materiais a partir desses parâmetros puros. É observado que o comportamento das suspensões é influenciado por fatores além das características físicas dos materiais, portanto para a comparação com o caulim e a bentonita é importante conhecer as forças elétricas atuando na superfície das partículas.

Nota-se, ainda, a influência da tixotropia no comportamento reológico dos rejeitos de minério de ferro. Isso é ainda mais visível na Figura 4-34 (a), apresentada abaixo, com a histerese do primeiro ciclo e total do rejeito fino (FF) e do rejeito total (FT), e a Figura 4-34 (b), um mapa de superfície que relaciona o IPS das duas suspensões, as taxas de cisalhamento aplicadas e a área de histerese.

Figura 4-34: Avaliação da histerese das suspensões de rejeitos finos e totais pelo IPS das suspensões.



Fonte: Elaborada pela autora.

As características químicas e mineralógicas obtidas pelos materiais, além do comportamento reológico estimado pelos limites de Atterbergh, identifica a diferença e atividade (entendida no conceito da Mecânica dos Solos) entre os materiais. Assim, o comportamento reológico dos dois rejeitos, materiais muito pouco plásticos, é controlado por parâmetros físicos, não havendo alteração química e mineralógica o suficiente das partículas para alterar a tendência de comportamento.

O uso da distância entre partículas na mobilidade do escoamento no comportamento reológico entre os argilominerais estudados e os rejeitos é limitado, uma vez que estes apresentam outras variáveis como o potencial elétrico das partículas. Porém, foi possível uma comparação direta entre os resultados de rejeitos em granulometria mais fina para a análise, considerando os valores de IPS na obtenção dos parâmetros dos rejeitos reais. A utilização desse parâmetro, então, pode ser interessante para a reconstituição dos rejeitos em granulometria grosseira em escalas limitadas pelo *gap* da geometria. Isso é especialmente necessário tendo em vista os valores maiores de tensão de escoamento estática obtida para a granulometria mais fina.

#### 4.7 AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDA DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DE DEFORMAÇÕES E DE TENSÕES

A transição de comportamento das suspensões de sólidos para líquidos dos ensaios oscilatórios pode ser avaliada pela  $\tan(\delta)$ . Considera-se que materiais com característica predominantemente de sólido  $\tan(\delta) < 1$  e materiais predominantemente líquidos  $\tan(\delta) > 1$ . Nesse item, a transição sólido-líquida dos materiais é estudada e comparada em relação ao IPS de cada material, a partir dos resultados obtidos pelo modelo de empacotamento de De Larrard (1999).

A transição de comportamento das suspensões de sólidos para líquidos dos ensaios oscilatórios pode ser avaliada pela  $\tan(\delta)$ . Considera-se que materiais com característica predominantemente de sólido  $\tan(\delta) < 1$  e materiais predominantemente líquidos  $\tan(\delta) > 1$ . Após a LVE, as suspensões apresentam um crescimento no valor de  $\tan(\delta)$  até um segundo valor, que diminui com o aumento da frequência. Em seguida, observa-se um crescimento seguido de uma ruptura repentina para as suspensões de bentonita para 0,1Hz, e um crescimento para as outras frequências até atingir valores de  $\tan(\delta)$  na faixa de 5. Observa-se que a taxa de crescimento dessas tensões parece apresentar pouca variação com a concentração de sólidos, porém aumentar com a frequência do ensaio. Os exemplos para esse comportamento foram apresentados nos itens 4.3.1 e 4.3.2. Nesse item, porém, a transição de fase será analisada somente pela tensão de cisalhamento momentânea medida pelo reômetro, independentemente do tipo controle do ensaio.

Os perfis de  $\tan(\delta)$  dos oscilatórios de tensão e de deformação diferem-se bastante entre si, apesar de algumas similaridades. Para todos os ensaios, e apresentam um platô inicial na região elástica que diminui com o aumento da umidade. Após a tensão de escoamento, o material se altera de maneira muito abrupta para os ensaios controlados por tensão, devido à natureza da aplicação das solicitações do ensaio. Por sua vez, os ensaios controlados por deformações apresentam uma mudança mais gradual. Observa-se ainda a presença de um platô, anterior à mudança de fase, para o caulim. Os rejeitos de minério de ferro, tanto totais quanto finos, apresentam um perfil similar, com indicação de mudança após a tensão de escoamento, porém seguida de um segundo platô no  $\tan(\delta)$ , antes de seu crescimento e conseqüentemente a mudança de fase. Em relação às tensões observadas no ensaio

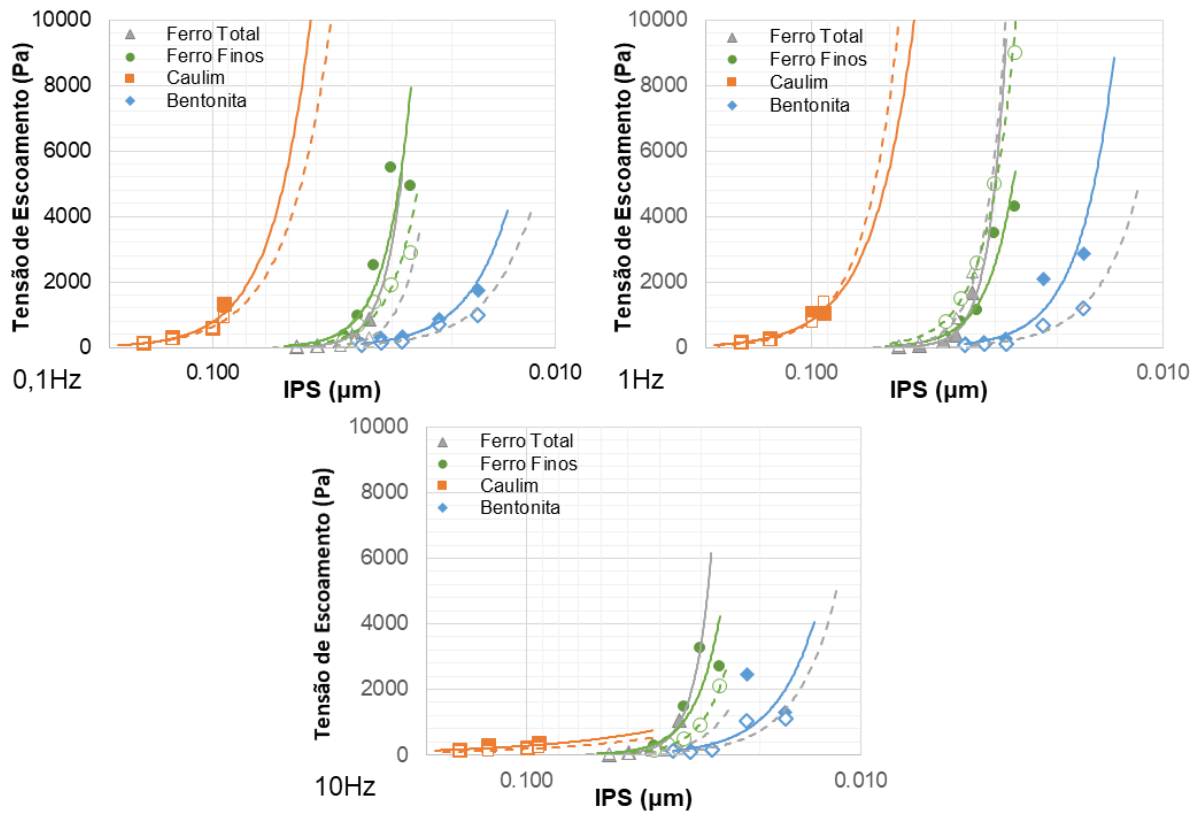
de oscitório de deformações, percebe-se que em geral os materiais apresentaram perda de resistência após se exceder a tensão de escoamento.

Conforme as observações da correlação de Pearson para os ensaios oscilatórios de deformação e de tensão, respectivamente nas Figura 4-24 e Figura 4-25, a tensão em que ocorre a transição de sólido para líquido tem uma correlação alta somente com a concentração volumétrica em todos os materiais. Porém, a deformação em que ocorre a mudança de fase nos materiais menos plásticos – os dois rejeitos e o caulim - tem correlação bastante alta só com a frequência. Assim, o aumento da velocidade de cisalhamento aparenta tornar o material mais frágil.

A tensão de escoamento refere-se à tensão de cisalhamento mínima para iniciar o escoamento, e foi apresentada para o oscilatório de deformação e tensão respectivamente nos itens 4.3.1 e 4.3.2. Nas imagens, esta está representada como a linha cheia. Outra tensão de cisalhamento de interesse é a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido ( $\tan(\delta)=1$ ), e foi definida para os dois ensaios a partir dos dados adquiridos pelo reômetro. Nas figuras, esta é representada pela linha tracejada. A relação entre os valores dessas duas tensões de cisalhamento, consideradas de interesse, e o IPS das suspensões dos ensaios oscilatórios de deformação são apresentados na Figura 4-35.

Nota-se primeiramente que o uso do IPS é bastante válido para os rejeitos de minério de ferro, uma vez que se pode considerar que os dois materiais apresentam relação exponencial similar entre o IPS e a tensão de escoamento e de transição. Além disso, observa-se que a relação exponencial entre as tensões de escoamento e de transição para todos os materiais.

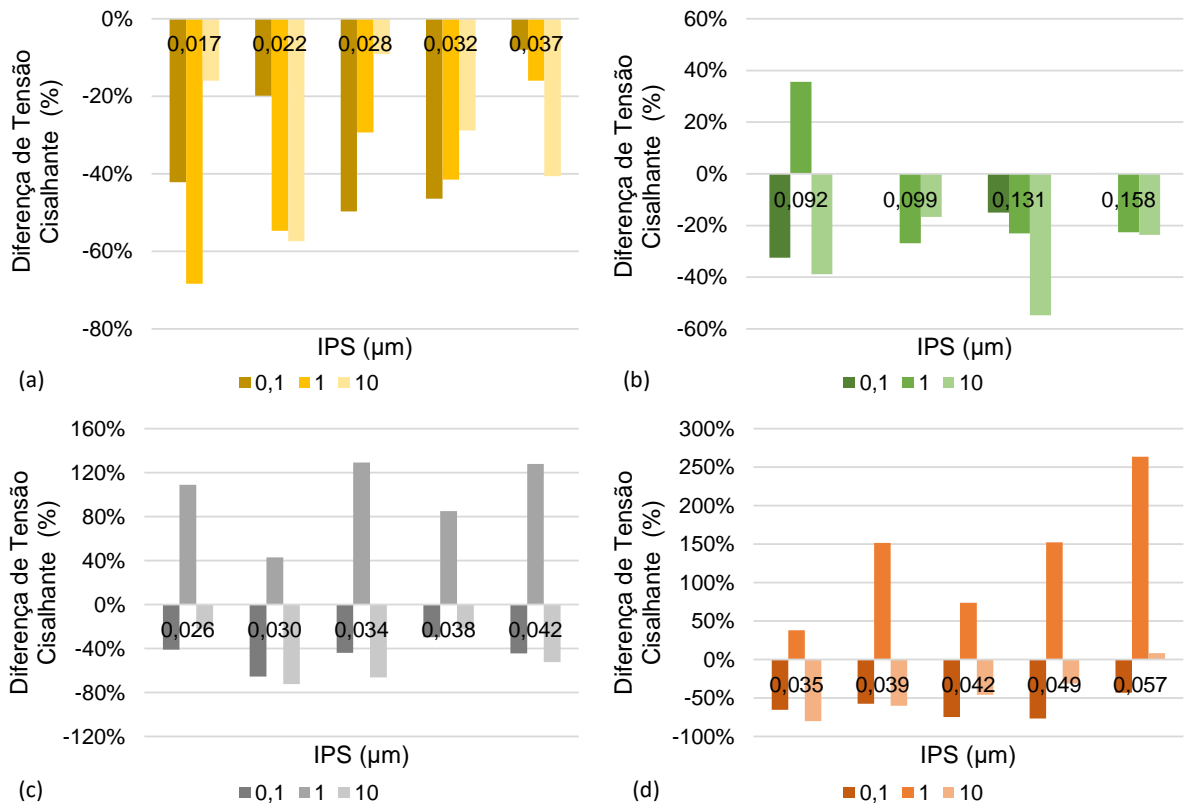
Figura 4-35: Avaliação da relação entre a tensão de escoamento (linha sólida) e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido (linha tracejada) com a concentração volumétrica, para as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz) dos ensaios oscilatórios de deformação.



Fonte: Elaborada pela autora.

Pelos resultados dos ensaios de deformação, observamos que acontece uma perda de resistência após a tensão de escoamento, enquanto o valor de delta aumenta, conforme apresentado na Figura 4-36. Assim a tensão de cisalhamento no momento de  $\tan(\delta)=1$  é inferior à tensão de escoamento. Esses resultados indicam que para essas suspensões, ocorre perda de resistência do material durante o aumento das deformações. Essa perda de resistência, sem tendência bem definida, indica uma quebra da microestrutura das suspensões durante a execução do ensaio. Porém, observa-se o aumento da tensão de cisalhamento pós tensão de escoamento somente para as frequências de 1 Hz do rejeito de minério de ferro totais e em fração fina.

Figura 4-36: Avaliação da diferença da tensão cisalhante medida no ensaio oscilatório de deformação entre a tensão de escoamento e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido para (a) bentonita; (b) caulim; (c) rejeito de minério de ferro fino; e (d) rejeito de minério de ferro totais, para as diferentes concentrações volumétricas e as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz).

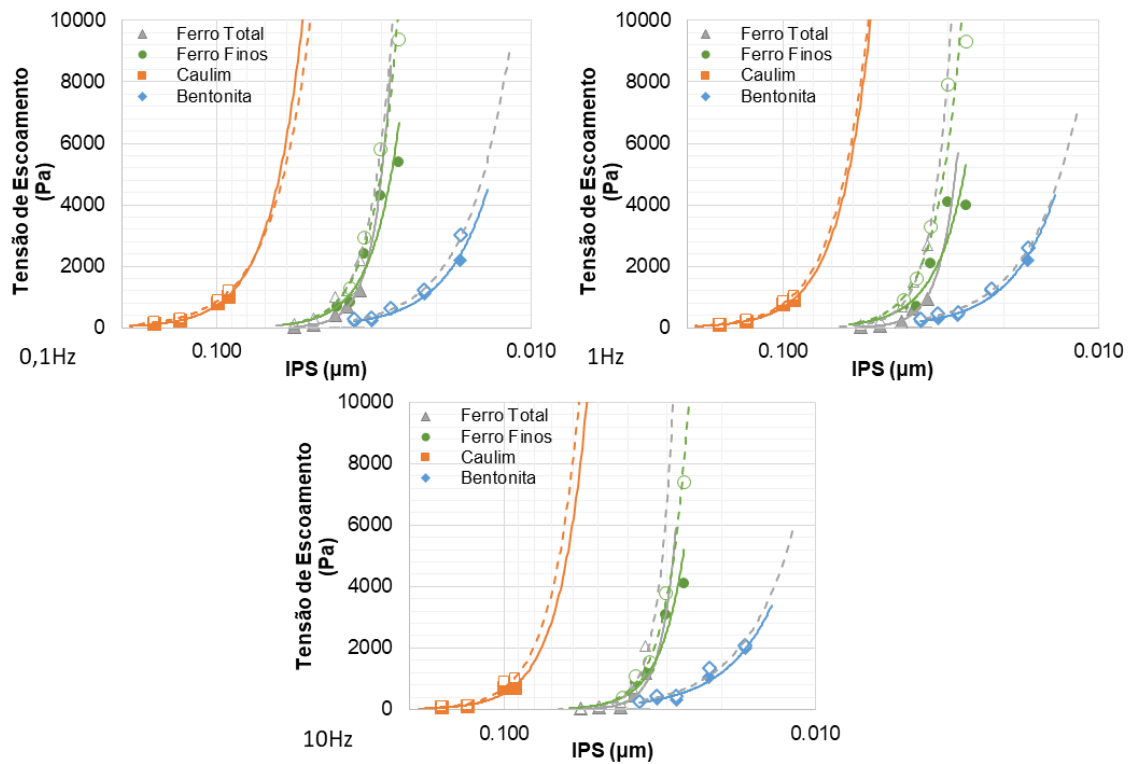


Fonte: Elaborada pela autora.

A tensão de escoamento obtida a partir do ensaio de oscilatório de tensões é bastante similar à calculada a partir dos resultados do oscilatório de deformações, apesar da diferença de tipo de solicitação e determinação da tensão de escoamento. A relação exponencial entre o IPS e as tensões de escoamento e de transição para todos os materiais, apresentada na Figura 4-37.

Para o ensaio oscilatório de tensão, devido ao aumento das tensões imposto no tipo de ensaio, a tensão de cisalhamento de mudança de característica é superior à tensão de escoamento. Nesses ensaios, a transição entre a ruptura da microestrutura na tensão de escoamento e a mudança nas características determinantes do fluxo acontece quase instantaneamente, com uma diferença de menos de 30%, para o caulim e para a bentonita. A diferença para o caso dos rejeitos de minério de ferro finos, por sua vez, varia de 30-160%, e os rejeitos totais de 50-300%, sendo, porém, novamente observada uma tendência de aumento maior para os ensaios de 1Hz quando comparados aos de 10Hz e de 0,1Hz.

Figura 4-37: Avaliação da relação entre a tensão de escoamento (linha sólida) e a tensão referente à mudança entre as características sólido e líquido (linha tracejada) com a concentração volumétrica, para as três frequências estudadas (0,1; 1 e 10 Hz) dos ensaios oscilatórios de tensão.



Fonte: Elaborada pela autora.

As Figuras Figura 4-38 e Figura 4-39 apresentam uma comparação direta dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de tensão (CS) e de deformação (CD), para as duas argilas e os dois rejeitos, respectivamente. Os parâmetros definidos para a comparação foram o módulo de armazenamento na região elástica ( $G'$ ), a tensão de escoamento ( $\tau_y$ ), a tensão de cisalhamento na transição ( $\tau_{45}$ ) e a deformação em que ocorre a tensão de escoamento ( $\delta$ ).

É possível observar que os valores de  $G'$  obtidos nos ensaios oscilatórios de deformação são em geral são de duas a cinco vezes menores que nos de tensão das argilas. Nos rejeitos, porém, essa diferença do módulo de cisalhamento na região elástica não foi observada.

Os valores de tensão de escoamento obtidos por ensaios oscilatórios de tensão e de deformação para uma mesma suspensão, apresentam divergências para todos os materiais estudados. As diferenças observadas são esperadas devido ao modo indireto de determinação da tensão de escoamento nos ensaios oscilatórios de deformação. Assim, considera-se que os valores obtidos para os ensaios controlados



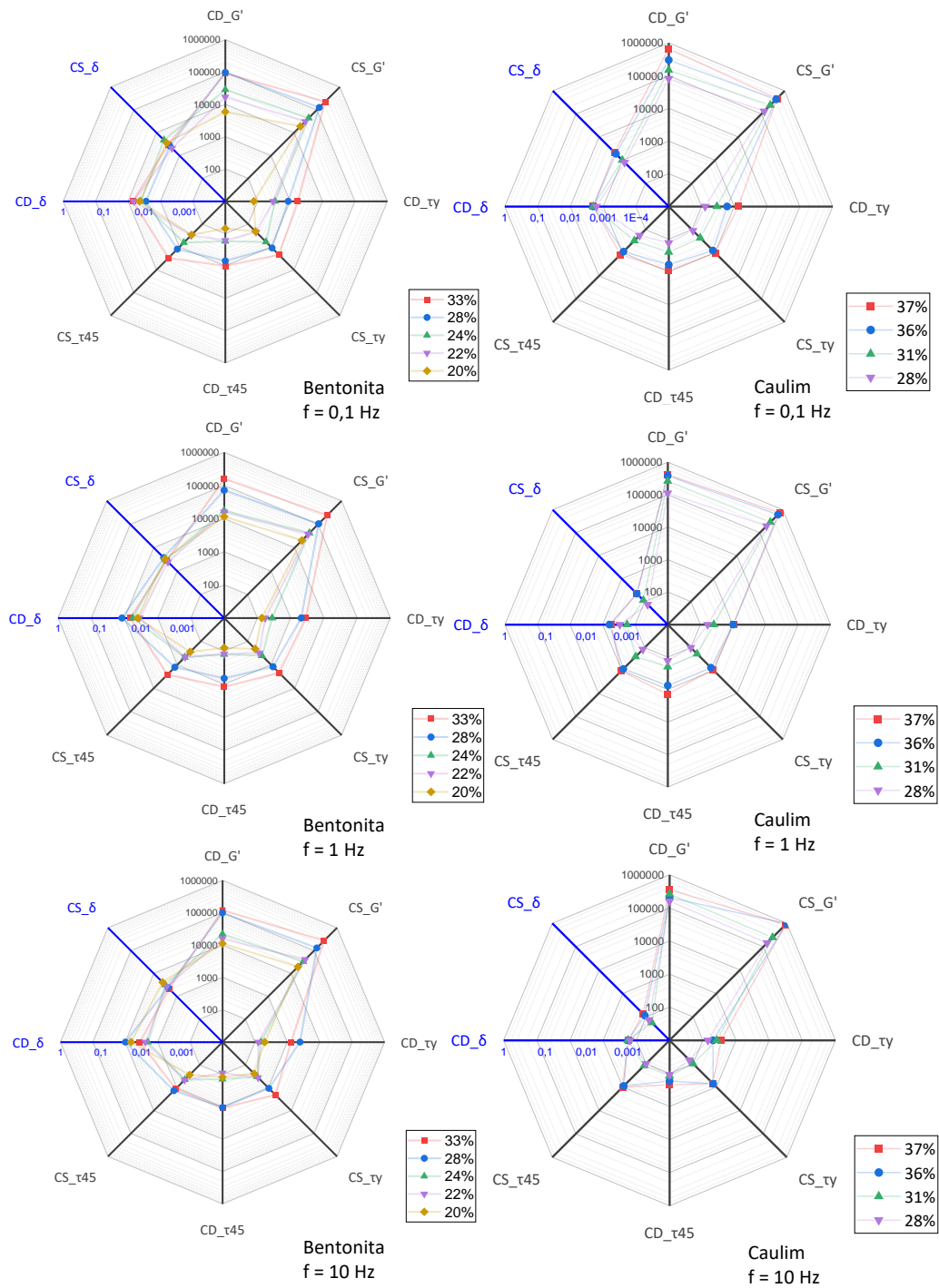
por deformação são menos acurados que aqueles obtidos por tensões. Os valores de tensão de escoamento obtidas pelos dois ensaios são considerados, porém, similares o suficiente para a aplicação em modelagens de escoamento de corridas de massa.

As deformações críticas, em que ocorre a tensão de cisalhamento, são em geral maiores nos ensaios oscilatórios de tensão que nos de deformação. Como no caso da tensão de escoamento, essa diferença pode estar relacionada à maneira indireta de se calcular esse parâmetro nos ensaios controlados pela tensão. Considera-se então que os ensaios controlados por deformação apresentam valores mais acurados.

Os valores de tensão em que ocorre a mudança de sólido para líquido é semelhante nos dois tipos de ensaio somente para a bentonita. Nos outros materiais, porém, essa relação está bastante relacionada à frequência do ensaio e a sua influência na microestrutura dos materiais. No caulim e nos rejeitos de minério de ferro finos, os ensaios a frequência de 10 Hz apresentaram valores de tensão de cisalhamento bem menores nos ensaios de deformação que nos de tensão. No caso dos rejeitos totais, essa grande diferença também foi observada nos ensaios a 0,1 Hz.

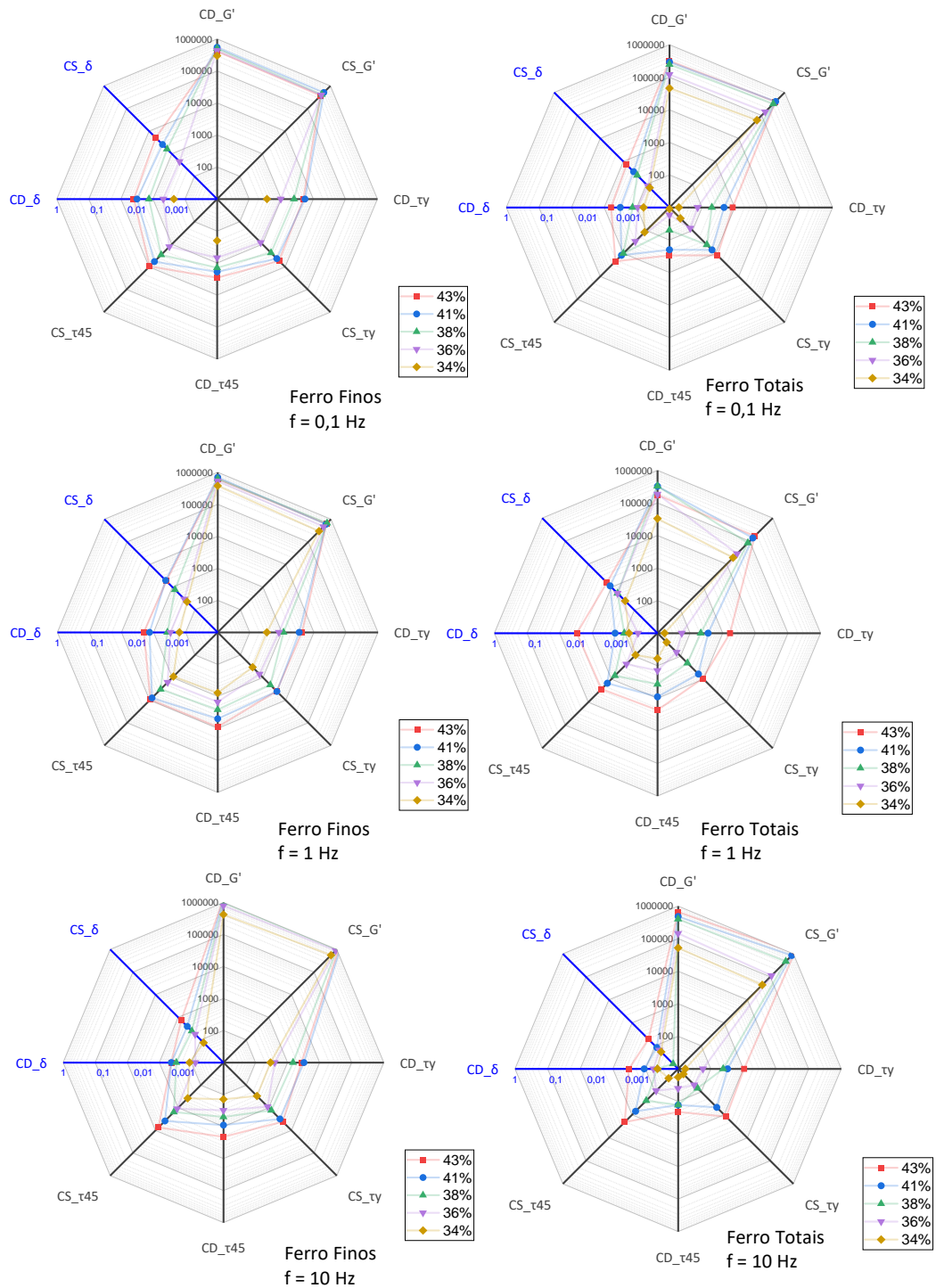
Neste caso, devido à característica do ensaio controlado por deformações, este representa melhor o comportamento de um material em escoamento, por medir a ocorrência de perda de tensão cisalhante durante o ensaio. Em ensaios controlados por tensão, por sua vez, a elevação das tensões de cisalhamento após a tensão de escoamento se dá com incrementos de deformação bastante elevados. Nos dois casos, entende-se que o material apresenta uma perda grande da resistência ao movimento após a tensão de escoamento.

Figura 4-38: Comparação direta dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de tensão (CS) e de deformação (CD) para as duas argilas, caulim e bentonita, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4-39: Comparação direta dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de tensão (CS) e de deformação (CD) para os dois rejeitos de minério de ferro, finos e totais, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os dois ensaios utilizados, o oscilatório de deformações e de tensões, apresentam diferenças quanto aos parâmetros retirados para cada suspensão, ligadas à variável controlada pelo ensaio. As diferenças entre os parâmetros obtidos na deformabilidade do material parado e na tensão de escoamento são de pouca influência na modelagem de corridas de massa. Porém, considera-se que os ensaios oscilatórios de deformação definem melhor o comportamento dos materiais após o início do movimento em corridas de massa.

É importante ressaltar que os parâmetros reológicos obtidos são mais sensíveis às concentrações volumétricas nas suspensões concentradas apresentadas que ao tipo de ensaio. Sabe-se a dificuldade de determinação de uma concentração volumétrica que represente de maneira satisfatória o reservatório como um todo. Assim, pode ser considerados que diferenças obtidas devido ao método de controle dos ensaios oscilatórios seja insignificante em comparação a outras fontes de erros dos modelos de *dam break*.

#### 4.8 EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES VISCOPLÁSTICAS NO ENSAIO DE OSCILATÓRIO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

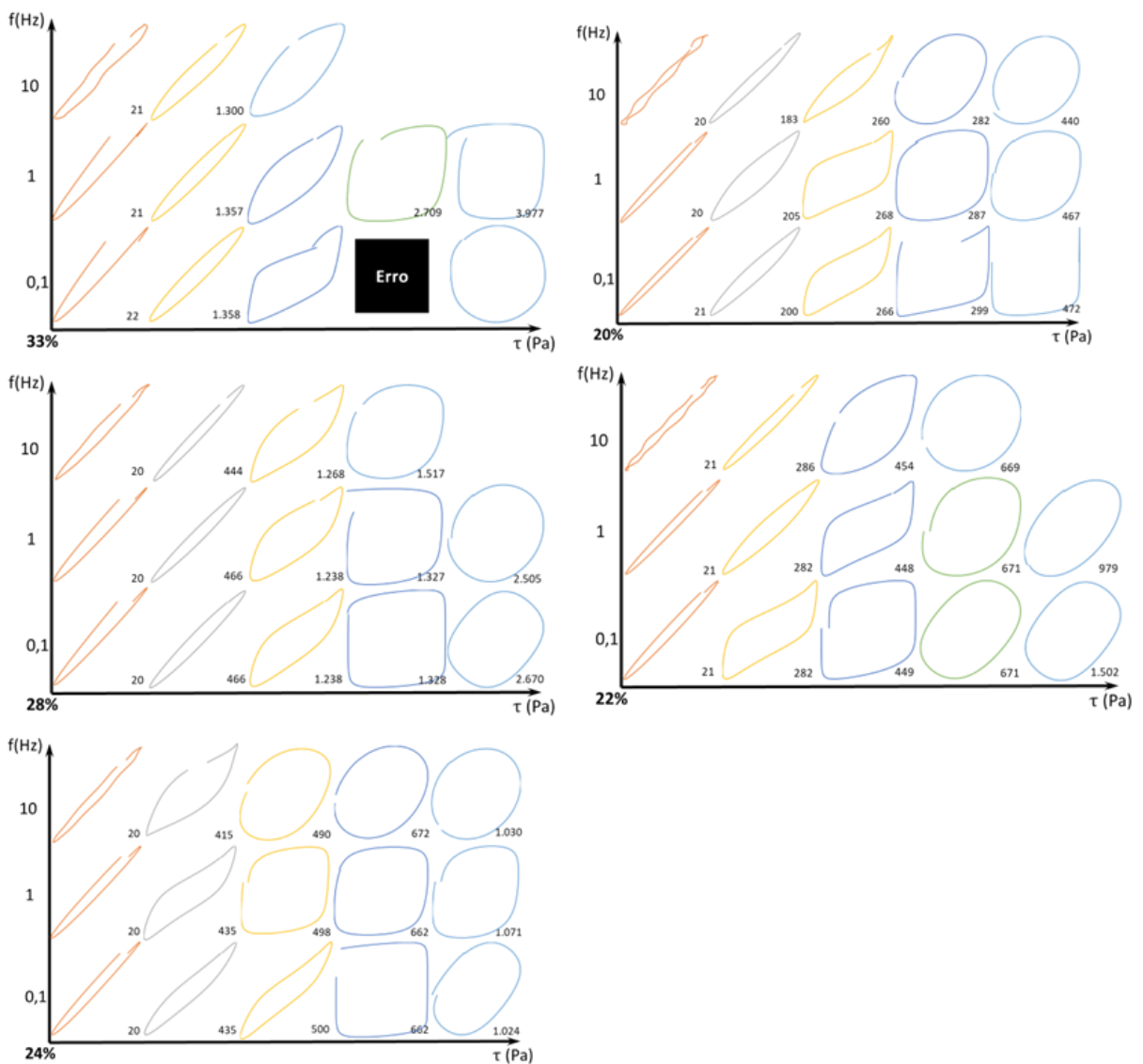
O protocolo de ensaio oscilatório de tensão consiste no aumento da amplitude de tensão com frequência controlada. A partir desse ensaio, foram definidos pontos de interesse nas regiões SAOS, MAOS e LAOS para cada amostra em três frequências de oscilação (0,1, 1 e 10 Hz). As tensões foram definidas conforme a geometria das curvas de Lissajous-Bowditch (LB), para melhor ilustrar a variabilidade de comportamento do material.

O diagrama de Pipkin apresentado na Figura 4-40 permite visualizar a evolução das curvas de LB e a transição de comportamento das suspensões de bentonita nos ensaios oscilatórios de tensão. O nível de tensões dos ensaios, e das mudanças de fase, são fortemente ligados à concentração volumétrica da suspensão, diminuindo as tensões de escoamento e de mudança de fase com o aumento do teor de sólidos.

No início, o material apresenta perfil próximo a uma elipse na região linear, que independe da frequência e do teor de sólidos. Com o crescimento das tensões aplicadas, o material tem tendência a não linearidade, e se tornam mais circular

(viscoso) ou plástico (quadrado). Observa-se na bentonita um comportamento plástico nas maiores concentrações, e uma quebra da microestrutura e, possivelmente quebra da amostra pelas grandes tensões de cisalhamento. Considerando uma mesma concentração, observa-se que as curvas Lissajous-Bodwich dos ensaios realizados a maiores frequências são mais circulares, apresentando, portanto, comportamento mais viscoso. Isso ocorre apesar da evolução da  $\tan(\delta)$  da bentonita ter pouca influência da frequência.

Figura 4-40: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de bentonita.



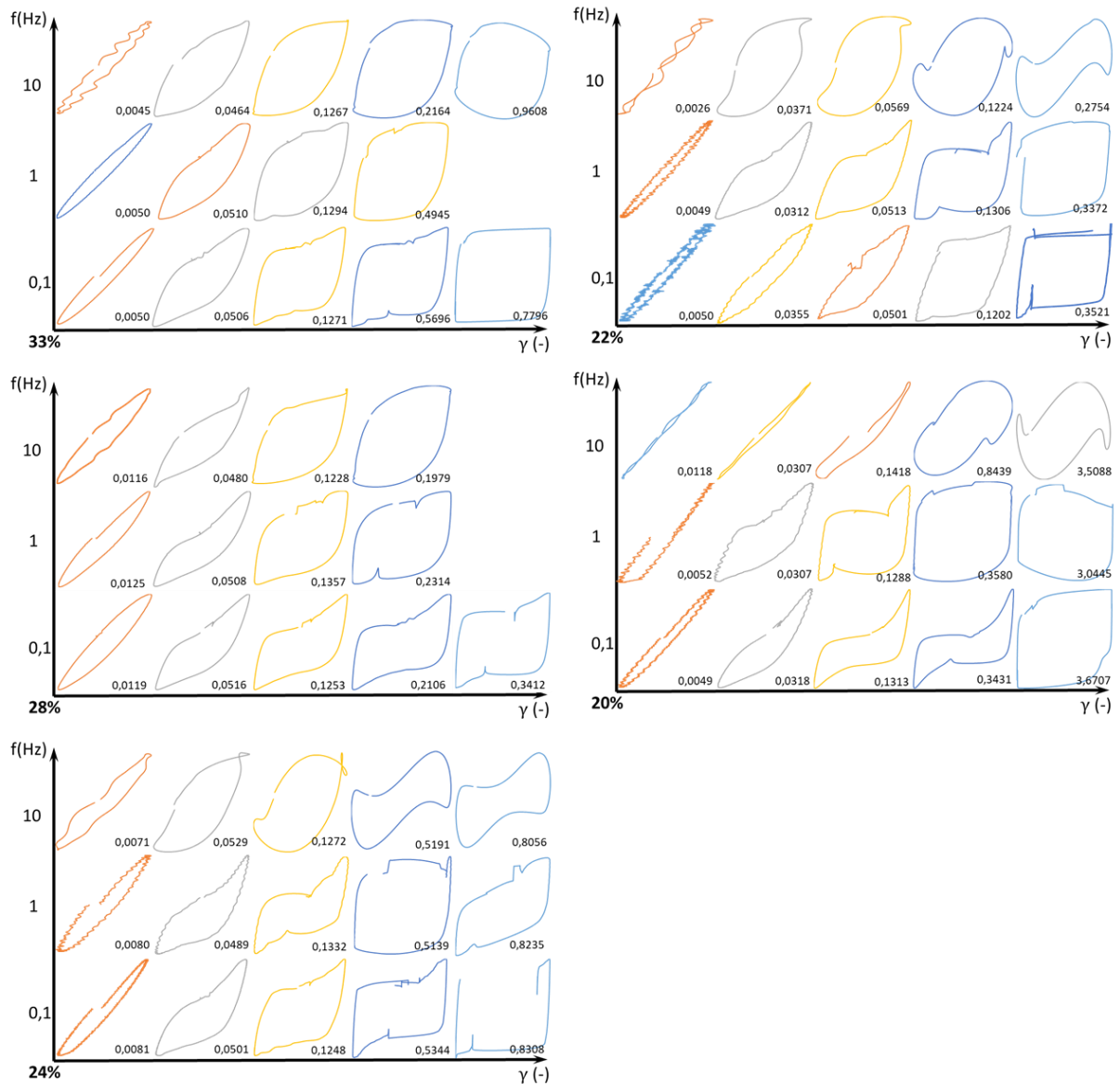
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-41 apresenta os diagramas de Pipkin para os ensaios oscilatórios de deformação da bentonita. O perfil dos materiais obtido pelo ensaio controlado por deformações é bastante diferente dos controlados por tensão. Além disso, observa-

se uma dificuldade do equipamento em realizar o controle por deformação do ensaio, resultando em curvas com pequenas inconsistências e ondulações, para todos os materiais que serão analisados. O nível de deformações dos ensaios, e das mudanças de fase, é similar para todas as concentrações. Porém, uma vez que os módulos de cisalhamento são fortemente ligados à concentração volumétrica da suspensão, as tensões de escoamento e de mudança de fase diminuem com o aumento do teor de sólidos.

Assim como nos ensaios controlados por tensão, o apresenta perfil próximo a uma elipse na região linear, independente da concentração de sólidos e da frequência. Com o crescimento das deformações aplicadas, o comportamento do material se afasta da elasticidade, porém de maneira menos abrupta quando o controle é realizado por tensões. Observa-se, primeiramente, o alargamento gradual da elipse e a formação de retas horizontais ou verticais paralelas nas extremidades. Pode-se entender este comportamento como *strain-stiffening*, ou seja, com o aumento da envoltória de plastificação do material com o aumento das deformações. Este comportamento pode ser observado no ensaio de tensões, mas em uma região muito menor, devido à característica do comportamento plástico. Após uma deformação, então, o material apresenta um comportamento mais visco-plástico, sendo mais plástico (quadrado) para maiores concentrações e menores frequências e mais viscoso (circular) para menores concentrações e maiores frequências.

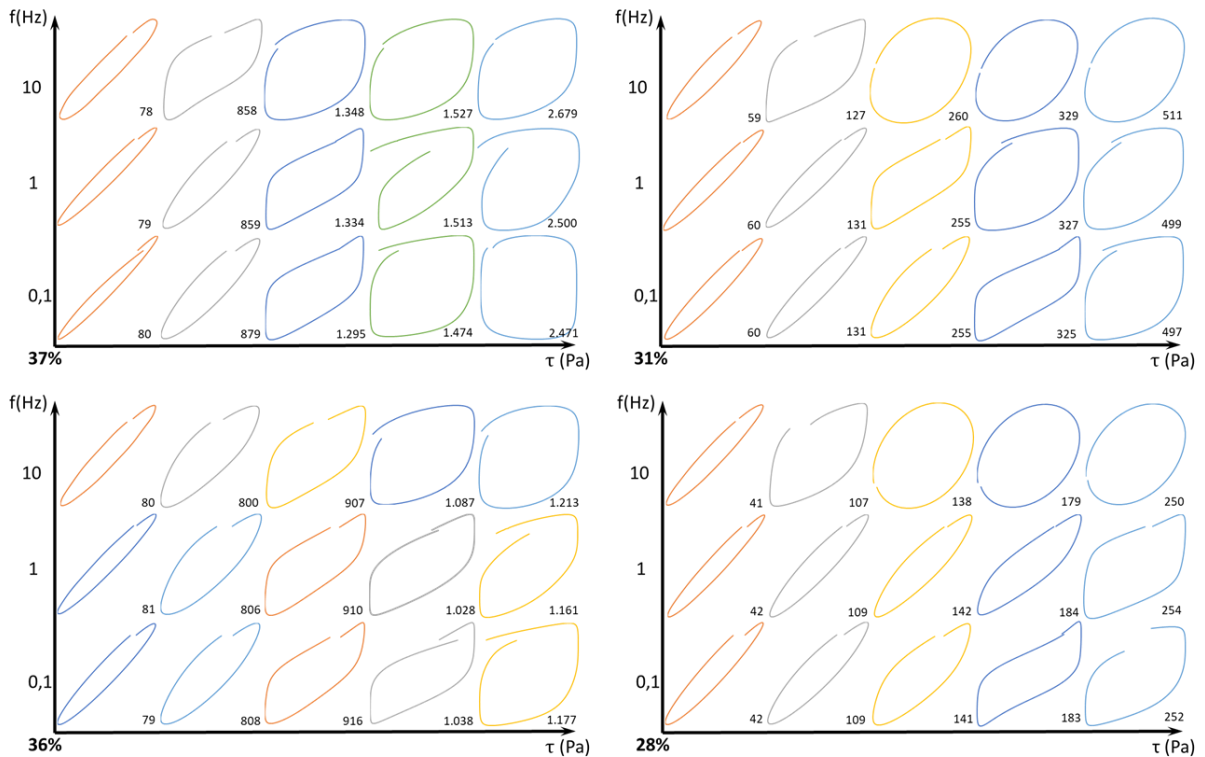
Figura 4-41: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformações em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

O diagrama de Pipkin apresentado na Figura 4-43 permite visualizar a evolução das curvas de LB e a transição de comportamento das suspensões de caulim nos ensaios oscilatórios de tensão. O nível de tensões dos ensaios, e das mudanças de fase, são fortemente ligados à concentração volumétrica da suspensão, diminuindo as tensões de escoamento e de mudança de fase com o aumento do teor de sólidos.

Figura 4-42: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de caulim.

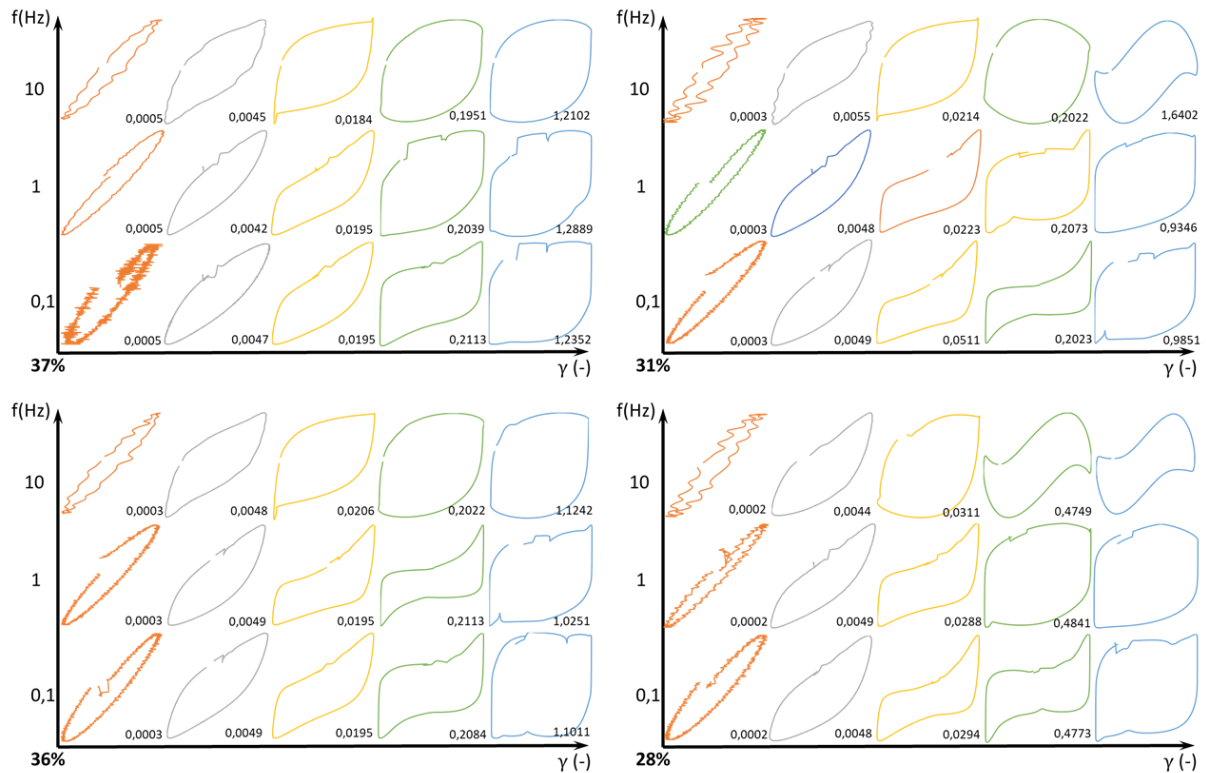


Fonte: Elaborado pela autora.

No início, este material também apresenta perfil elipsoide na região linear, que independe da frequência e do teor de sólidos. Com o crescimento das tensões aplicadas, as curvas tornam-se transformadas, de maneira mais gradativa que na bentonita, na mais circular (viscoso) ou plástica (quadrado). Observa-se rupturas mais plásticas do material para as maiores concentrações volumétricas e menores frequências, com uma característica de aumento da região de plastificação (*strain-stiffening*) mais gradual. O comportamento viscoso é mais nítido para menores teores de sólidos e maiores frequências. Para a frequência maior, ainda se observa que a mudança de fase ocorre de maneira mais abrupta, menos gradual, e o comportamento de *strain stiffening* é quase imperceptível.



Figura 4-43: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de caulim.



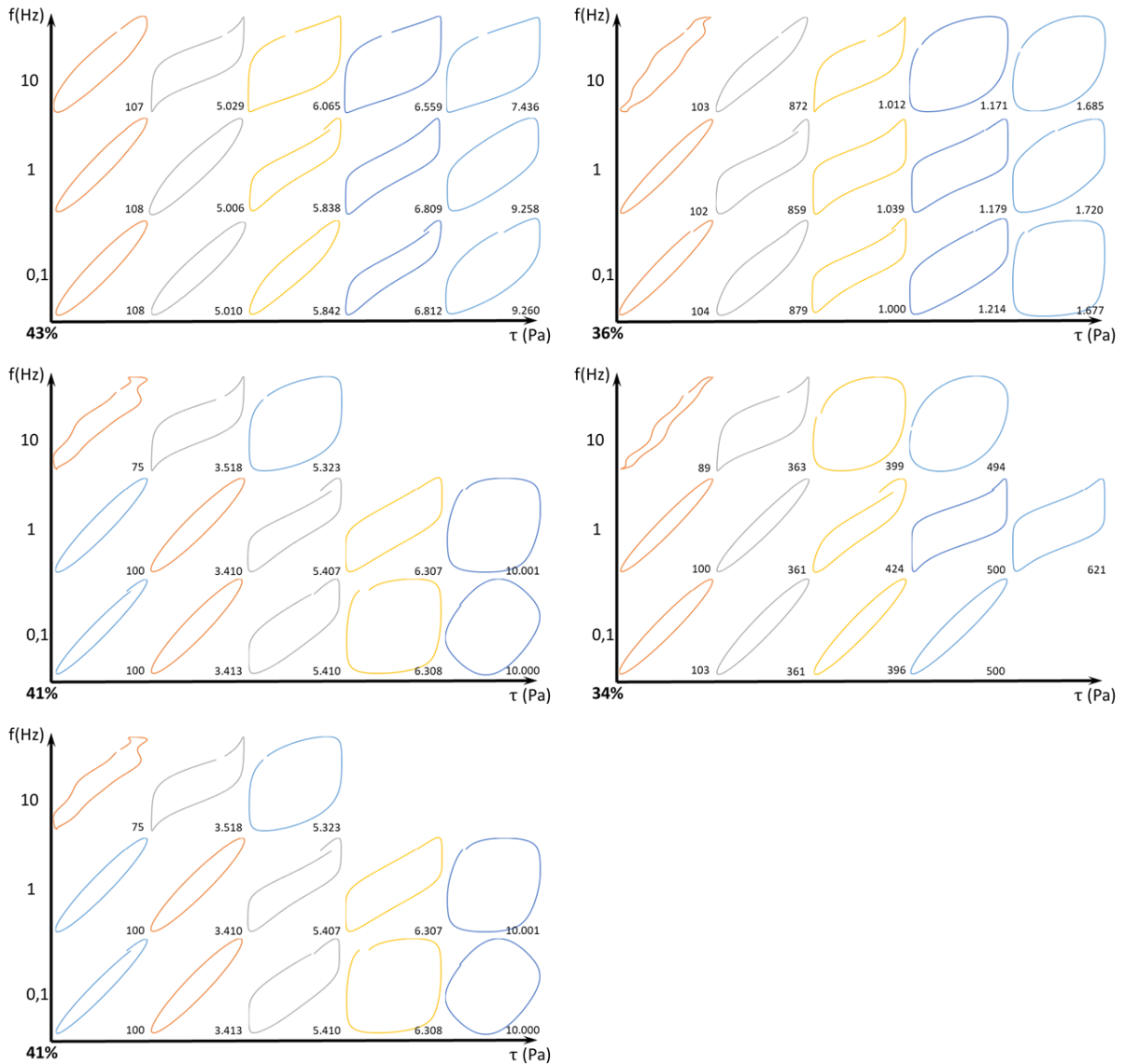
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-43 apresenta os diagramas de Pipkin para os ensaios oscilatórios de deformação do caulim. Novamente, o perfil obtido é bastante diferente dos ensaios controlados por tensão. O nível de deformações das suspensões é similar para todas as suspensões, porém é observada a diminuição das tensões devido à diminuição de  $G'$  e  $G''$ . A evolução do perfil das curvas na região linear é uma elipse, que se alarga gradativamente em um comportamento de *strain-stiffening*, mais presente em menores frequências e maiores teores de sólidos. Em um nível maior de deformações, o material apresenta um comportamento mais visco-plástico, sendo mais quadrado (plástico) para maiores concentrações e menores frequências e mais circular (viscoso) para menores concentrações e maiores frequências. A forma das curvas do caulim aparentam maior sensibilidade à frequência do que da bentonita.

O diagrama de Pipkin apresentado na Figura 4-44 permite visualizar a evolução das curvas de LB e a transição de comportamento do rejeito de minério de ferro em granulometria fina no ensaio oscilatório de tensões. Para os rejeitos finos, o nível de tensões dos ensaios, e das mudanças de fase, são fortemente ligados à concentração

volumétrica da suspensão, diminuindo as tensões de escoamento e de mudança de fase com o aumento do teor de sólidos.

Figura 4-44: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro fino.



Fonte: Elaborado pela autora.

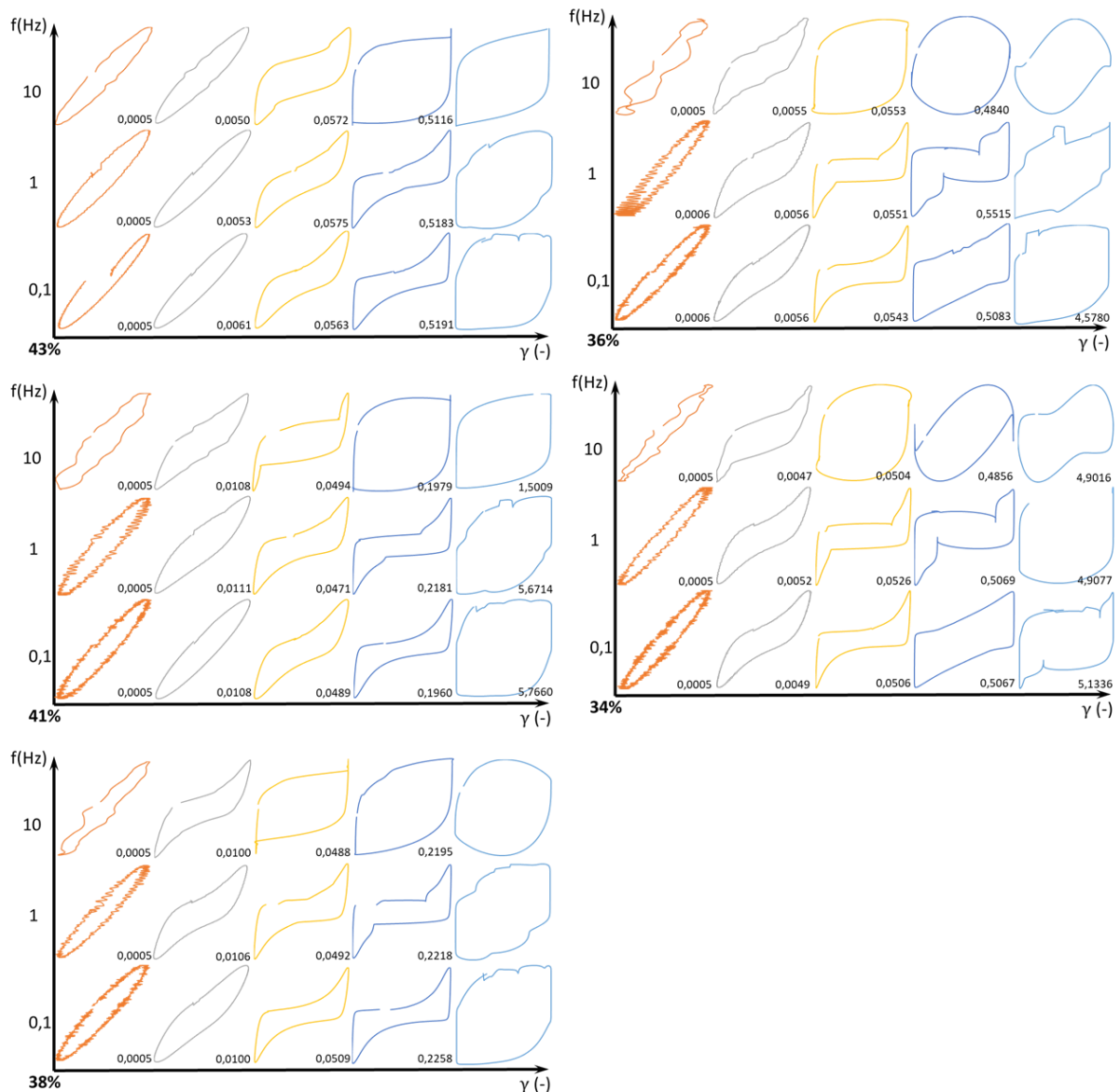
No início, o material apresenta perfil elipsoide na região linear, que independe da frequência e do teor de sólidos. Em seguida, a elipse aumenta de área, com um comportamento bastante elasto-plástico. Isto é, observa-se que não ocorre o retorno da deformação após cessada a força. A deformação só ocorre com a aplicação de novas tensões. Assim, entende-se que o material sofreu plastificação para estas

tensões mais elevadas. Com o crescimento das tensões aplicadas, as curvas tornam de maneira geral mais plástica (quadrado) e um pouco circular (viscoso). O material apresenta rupturas mais plásticas do material para as maiores concentrações volumétricas e menores frequências, e o comportamento viscoso aumentando para menores teores de sólidos e maiores frequências.

A Figura 4-45 apresenta os diagramas de Pipkin para os ensaios oscilatórios de deformação do rejeito de minério de ferro em granulometria fina. O perfil é bastante diferente aos ensaios controlados por tensão, especialmente no comportamento de plastificação do material. O nível de deformações das suspensões diminui com a diminuição da concentração volumétrica, ao contrário das duas argilas. Ainda é observada a diminuição das tensões em geral, devido à diminuição de  $G'$  e  $G''$ .

A evolução do perfil das curvas na região linear é uma elipse, que se alarga gradativamente à medida que a envoltória de plastificação do material é ultrapassada. Assim, observa-se que a deformação do material, na área plastificada, ocorre sem a mudança de tensões. Em seguida, conforme as deformações aumentam, as tensões aumentam gradativamente e de maneira próxima da linear, onde entende-se que ocorre o aumento da envoltória de plastificação. Em seguida, as deformações na direção contrária volta a ocorrer de maneira plástica, até uma nova área de plastificação do material. Este comportamento é bastante claro nas menores frequências em todas as suspensões. Para as frequências de 10 Hz, porém, observa-se uma região muito menor de plastificação, e um comportamento mais viscoso (com as curvas mais circulares) a medida em que ocorre o aumento das deformações oscilatórias.

Figura 4-45: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro fino.



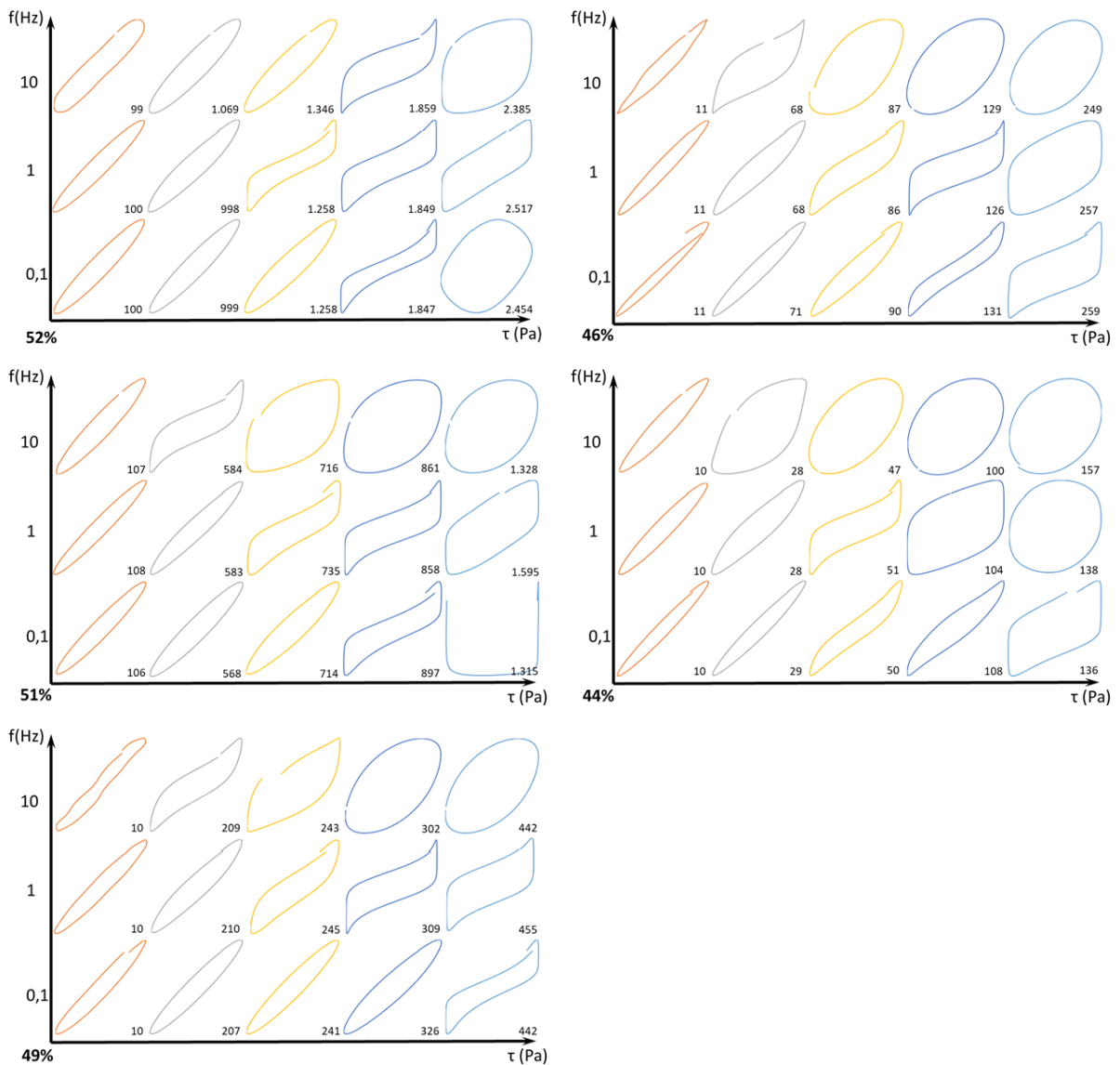
Fonte: Elaborado pela autora.

O rejeito de minério de ferro total, novamente, tem um comportamento que em muito se assemelha a sua fração mais fina. O diagrama de Pipkin apresentado na Figura 4-46 permite visualizar a evolução das curvas de LB e a transição de comportamento desse material do ensaio oscilatório de tensões. Assim como para os rejeitos finos, o nível de tensões dos ensaios diminui com a diminuição do teor de sólidos.

A evolução do perfil das curvas na região linear também é uma elipse que se alarga gradativamente a medida o material sofre plastificação. Em seguida, para as menores frequências e menores concentrações, o material se plastifica até a curva se tornar

quadrada. Em geral, o aumento de frequências causa aumento do comportamento viscoso do material, com curvas mais circulares.

Figura 4-46: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de tensão em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total.

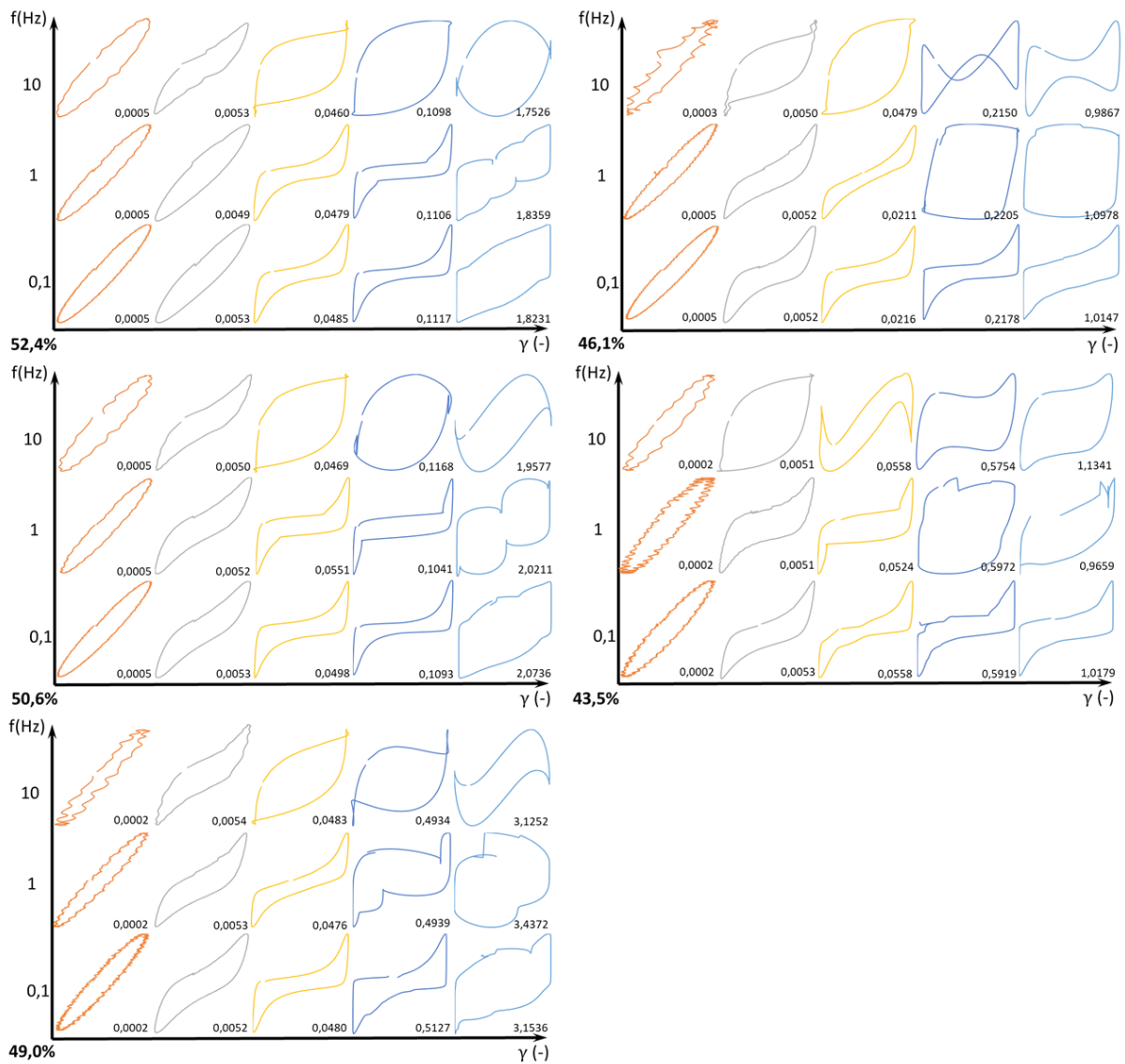


Fonte: Elaborado pela autora.

O diagrama de Pipkin apresentado na Figura 4-47 permite visualizar a evolução das curvas de LB e a transição de comportamento desse material do ensaio oscilatório de deformações. Assim como para os rejeitos finos, o nível de deformações das suspensões e tensões em geral, devido á diminuição de  $G'$  e  $G''$ , diminuem com a diminuição do teor de sólidos.

A evolução do perfil das curvas na região linear também é uma elipse que se alarga gradativamente a medida o material sofre plastificação, sem aumento no nível de tensões. A plastificação é menos presente em maiores frequências, onde é observado um comportamento mais viscoso.

Figura 4-47: Diagrama Pipkin referente ao ensaio oscilatório de deformação em diferentes frequências de oscilação para todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total.

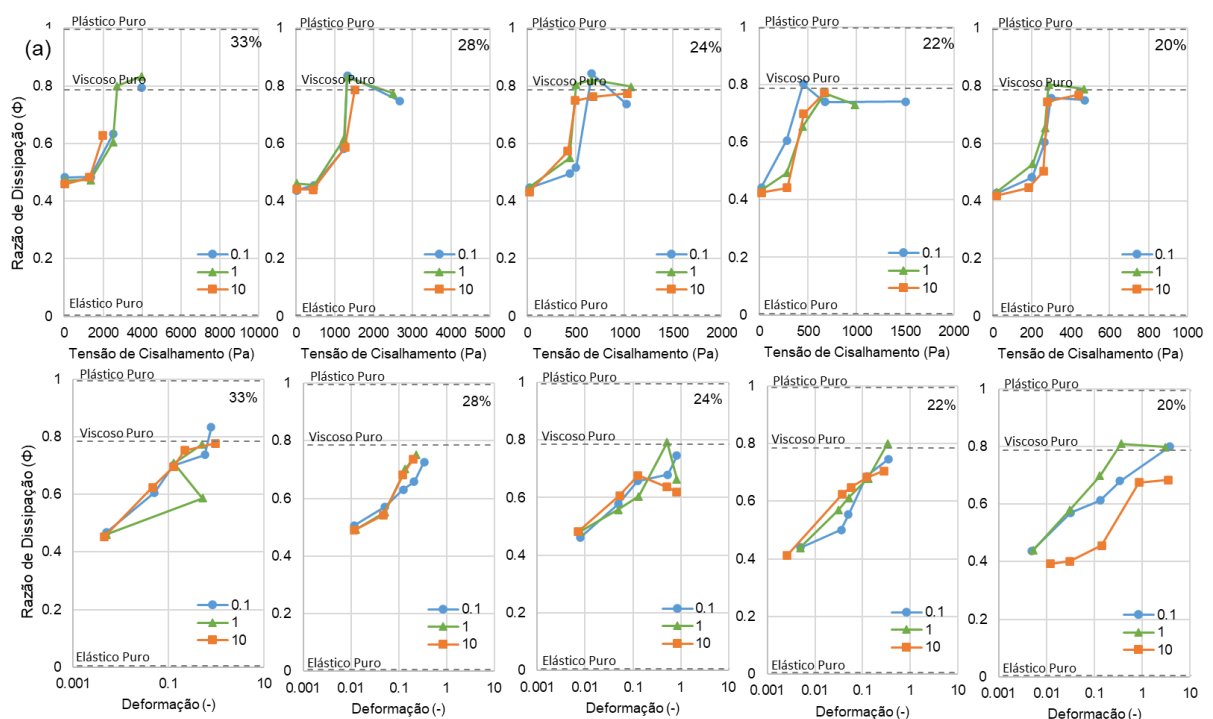


Fonte: Elaborado pela autora.

É possível avaliar o comportamento do material em um ciclo através da energia dissipada, representada pela área dentro da curva, e comparando com a energia que seria dissipada em um plástico perfeito (EWOLDT et al., 2010). A razão de dissipação ( $\Phi$ ), então, corresponde à razão entre a energia dissipada no ciclo e a energia de um plástico perfeito.

A Figura 4-48 apresenta os valores de  $\Phi$  obtidos em cada suspensão de bentonita para as diferentes frequências de ensaio estudadas, sendo em (a) apresentados os ensaios oscilatórios de tensão e (b) ensaios oscilatórios de deformação. As linhas tracejadas indicam o comportamento idealizado de materiais elásticos, viscosos e plásticos puros. Conforme observado nos diagramas de Pipkin da bentonita, o aumento do teor de água diminui os níveis de tensões dos ensaios, mas pouco é alterado nos ensaios de deformação.

Figura 4-48: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de bentonita. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pela autora.

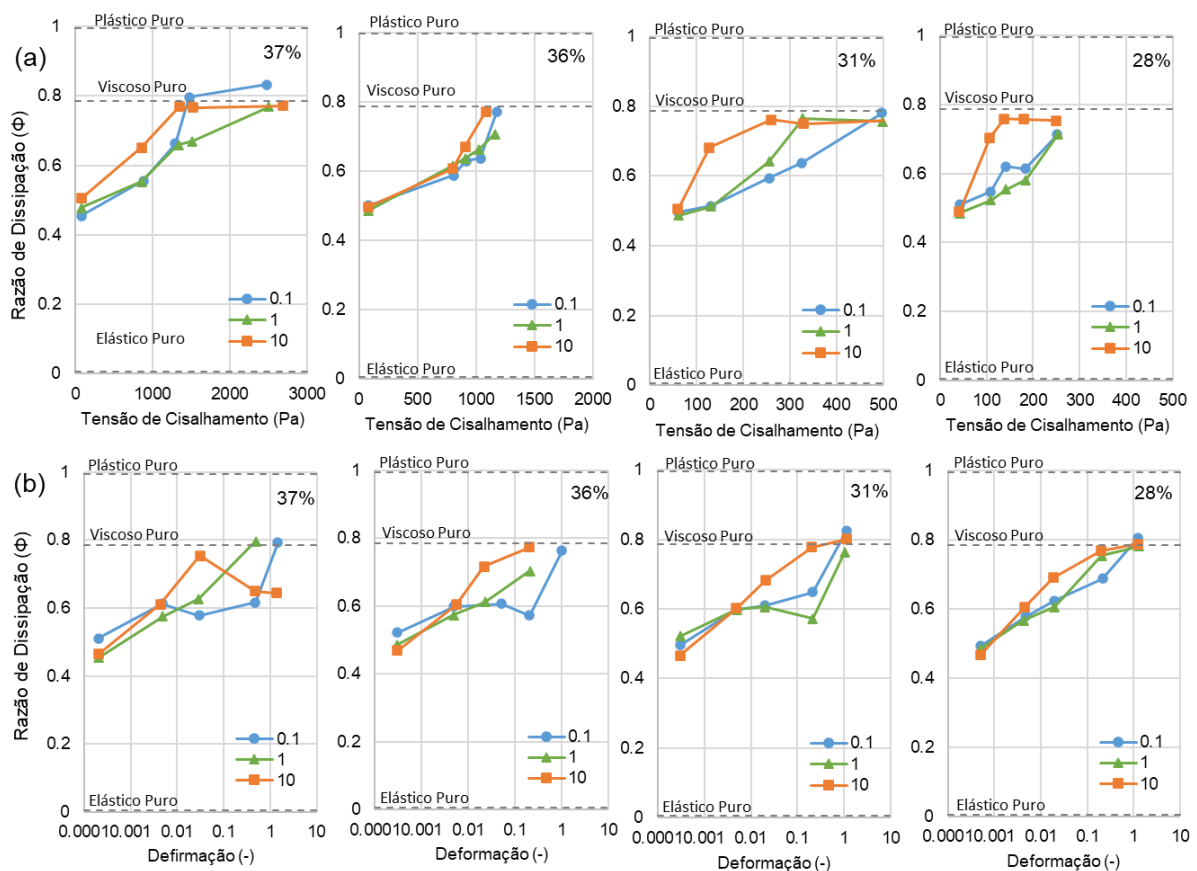
Na região linear elástica, independente da frequência de oscilação, do tipo de controle do ensaio. O aumento da concentração volumétrica diminui um pouco a razão de dissipação na região linear, entre 0,45-0,4. O aumento da tensão ou da deformação causa mudança de comportamento no material, demonstrado tanto pelo aumento da energia dissipada (Figura 4-48) quanto pelo aumento dos valores de tangente de delta.

As curvas de LB aumentam de área na região de transição, indicando um comportamento mais viscoplástico, atingindo um valor máximo em 0,8, o que indicaria um comportamento viscoso puro. Porém, nota-se que a forma da geometria

não necessariamente indica comportamento viscoso. Em geral, observa-se comportamentos visco-plásticos em diferentes formatos, que podem ser mais arredondados (viscosos) ou retangulares (plásticos). Assim, a razão de dissipação não pode ser usada sozinha para a definição de comportamentos típicos de materiais.

A Figura 4-49 apresenta os valores de razão de dissipação ( $\Phi$ ) obtidos para as suspensões de caulim em diferentes, sendo em (a) apresentados os ensaios oscilatórios de tensão e (b) ensaios oscilatórios de deformação. Observa-se similaridade de valores de  $\Phi$  obtidos pelos ensaios de tensão e deformação, com valores próximos a 0,5. O aumento de tensões e deformações causam aumento no comportamento do material, observado também pela variação na energia dissipada. Conforme observado nos diagramas de Pipkin do Caulim, o aumento do teor de água diminui os níveis de tensões dos ensaios, mas pouco é alterado nos ensaios de deformação.

Figura 4-49: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de caulim. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pela autora.



As áreas das curvas de LB aumentam a medida que o comportamento do material se afasta de um comportamento elástico, indicando comportamentos mais visco-plásticos. A área das curvas também tem tendência de ser maior para as frequências de 10Hz, e apesar das diferenças pouco pode ser concluído para a comparação de 0,1Hz e 1Hz.

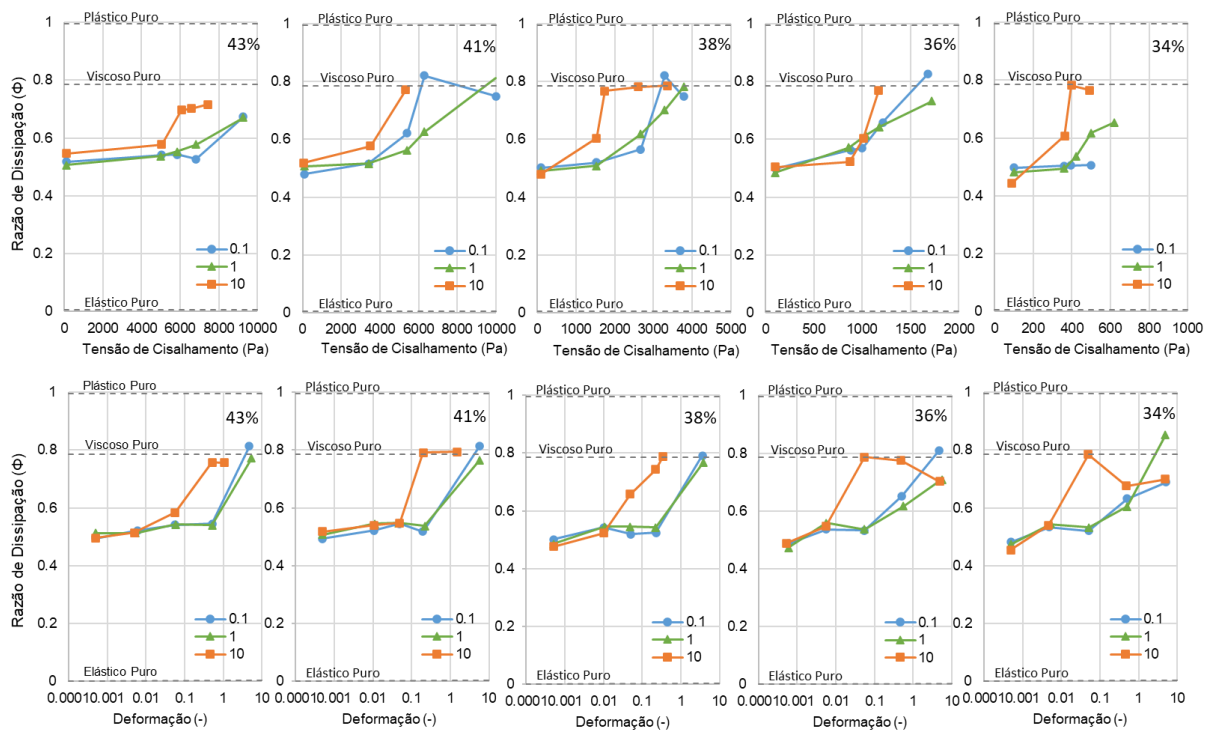
O limite de razão de dissipação das suspensões de caulim foi de 0,8, próximo a um material viscoso puro. Porém, as curvas de LB apresentaram comportamentos mais com áreas intermediárias entre comportamento elástico e plástico. O material aparenta ser mais viscoso para as frequências maiores.

A Figura 4-50 apresenta os valores de razão de dissipação obtidos nas suspensões de rejeito em granulometria fina nas frequências de ensaio estudadas. Na região linear elástica, o valor de  $\Phi$  fica bastante próximo a 0,5 independentemente do tipo de ensaio, da frequência e da concentração. Os níveis de tensões de mudança de comportamento são menores quanto menor a concentração volumétrica, porém as deformações são aproximadamente constantes.

Assim como nos outros materiais, o aumento da tensão e da deformação causa mudança de comportamento no material, demonstrado pelo aumento da energia dissipada (Figura 4-50) e pelo aumento da tangente de delta.

Como observado pelo diagrama de Pipkin, o aumento do teor de água gera curvas com áreas maiores. Além disso, a área da curva de LB também é sensível ao aumento da frequência de ensaio após o SAOS, de uma maneira ainda mais evidente que para o caso do caulim. As áreas para frequência de 10 Hz aumenta muito mais rápido quando comparado ao comportamento das frequências de 0,1 Hz e 1 Hz. Isso condiz com as observações dos diagramas de Pipkin, que em maiores frequências o material tem uma região de plastificação reduzida e apresenta comportamento mais viscoso. O limite de razão de dissipação das suspensões de rejeito fino foi novamente de 0,8, teoricamente um material viscoso puro. Porém, as curvas de LB apresentaram comportamentos mais com áreas intermediárias entre comportamento elástico e plástico para as menores frequências, e de viscoso para a frequência maior.

Figura 4-50: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4-51 apresenta os valores de razão de dissipação obtido nos ensaios oscilatórios de tensão e deformação em granulometria total nas frequências de ensaio estudadas. Na região linear elástica,  $\Phi$  fica bastante próximo a 0,5 independentemente do tipo de ensaio, da frequência e da concentração, assim como para os rejeitos finos. Como é comum a todos os materiais, os níveis de tensões de mudança de comportamento são menores quanto menor a concentração volumétrica, porém as deformações são aproximadamente constantes.

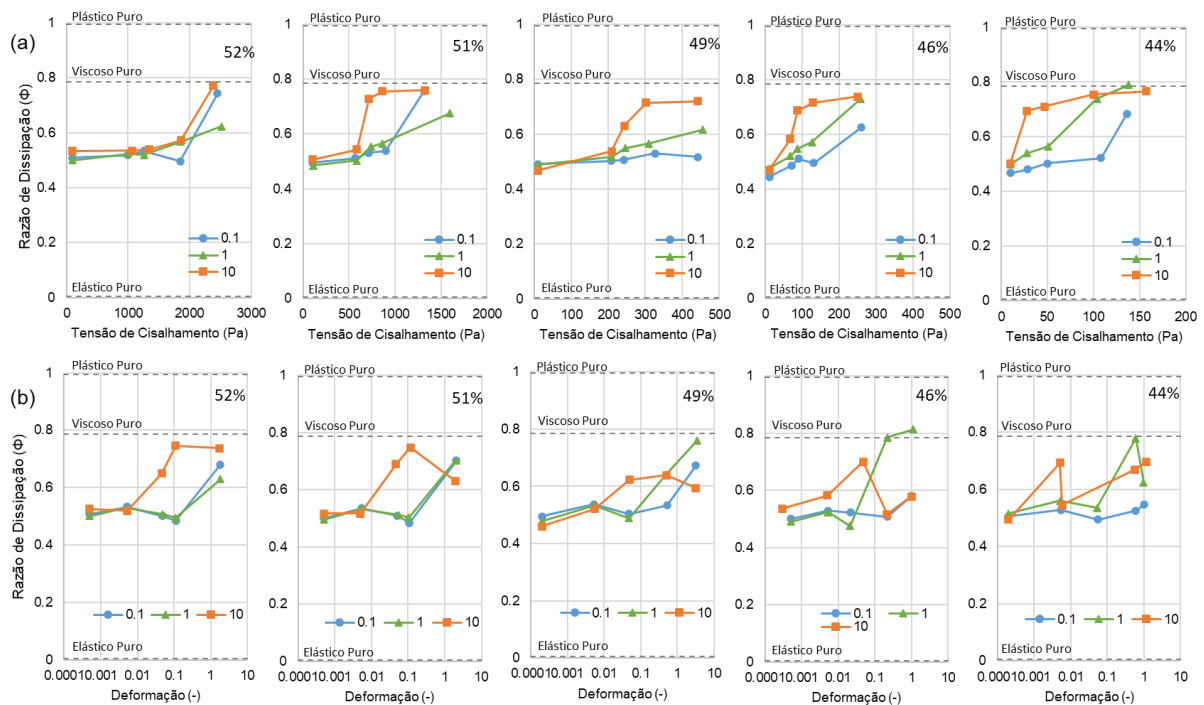
Como apresentado no diagrama de Pipkin, o aumento do teor de água e o aumento da tensão e da deformação gera mudança no comportamento do material, com curvas com áreas maiores. Além disso, após ultrapassada a tensão de escoamento, a frequência influencia na dissipação de energia no material.

As razões de dissipação de energia na região intermediária, nos dois materiais de rejeito, não apresentam aumento após a tensão de escoamento. Isso porque o material apresenta um comportamento de *strain-stiffening*, em que a geometria da curva se afasta bastante de uma elipse, porém a área ainda é baixa (abaixo de 0,55).

Portanto, a dissipação sozinha não pode ser utilizada para a determinação do comportamento do material.

As dissipações nos ensaios oscilatórios de deformação apresentam algumas inconsistências para os ensaios de 10 Hz em deformações maiores. Os diagramas de Pipkin apresentado na Figura 4-47 demonstram curvas de comportamento peculiar. Devido à dificuldade de controle de deformações do reômetro, é possível que essas curvas não sejam representativas do comportamento do material e, portanto, a energia de dissipação também não é representativa.

Figura 4-51: Razão de dissipação de energia de acordo com a evolução do ensaio oscilatório de tensão de todas as suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina. As tensões encontram-se em escala linear e as deformações em escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.9 INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE REOLOGIA NOS MOMENTOS REOLÓGICOS DE CORRIDAS DE MASSA

A análise do comportamento reológico por ensaios oscilatórios pode ser essencial para a compreensão do fluxo dos materiais geomecânicos, em especial os rejeitos. Isso porque os rejeitos, sendo materiais com densidade dos grãos muito elevadas e interação entre as partículas reduzida, apresentam grande tendência a segregação e separação de fases durante os ensaios de fluxo.

Os regimes de fluxo dos ensaios oscilatórios são bastante diferentes de quando realizados ensaios de fluxo. Nestes, as deformações são em sentido constante e as taxas aplicadas são controladas e crescem de maneira constante, de maneira semelhante ao escoamento em corridas de massa. Assim, temos uma situação em que o material é cisalhado em apenas uma direção, sofrendo alterações em sentido único que alteram bastante a microestrutura de materiais tixotrópicos.

Apesar da alteração do regime de fluxo dentro de cada amplitude de oscilação, é possível retirar desses ensaios informações valiosas para a interpretação do comportamento reológico dos diferentes materiais. A comparação dos resultados é possível a partir de simplificações do entendimento do fluxo. Essa comparação, porém, é melhor realizada desde que ambos os ensaios sejam controlados por variáveis semelhantes, isso é, a velocidade das deformações no material.

Os resultados dos ensaios oscilatórios e de fluxo para as suspensões estudadas, assim como o estudo de parâmetros retirados destes, foi apresentado nos itens 4.2 e 4.6. As Figuras Figura 4-53 e Figura 4-53 apresentam a comparação dos resultados observados nos ensaios oscilatórios de deformação (item 4.3.1) e os ensaios de fluxo (item 4.4) das duas argilas e dos dois rejeitos, respectivamente. Nessas imagens, os ensaios oscilatórios de deformação são apresentados pela sigla CD, e os ensaios de fluxo são divididos pelo primeiro ciclo na aceleração (C1) e segundo ciclo na desaceleração (C2). A pseudo-viscosidade aparente dos ensaios oscilatórios foram calculadas a partir da razão entre as tensões de cisalhamento medidas nas taxas de cisalhamento máximas do ciclo (equação 2-9).

As tensões de escoamento estática obtidas pelos ensaios de fluxo, no primeiro ciclo, são menores nos ensaios oscilatórios do que no primeiro ciclo de fluxo. Essa diferença é ainda maior para os materiais menos plásticos a maiores frequências. Esse parâmetro, porém, tem importância na mobilização inicial do material para o início do fluxo.

As viscosidades aparentes foram comparadas tanto a uma taxa de  $1 \text{ s}^{-1}$  quanto a de  $10 \text{ s}^{-1}$ . Os valores obtidos no primeiro ciclo de aceleração do cisalhamento (C1) foram maiores que os observados no segundo ciclo de desaceleração (C2) e nos oscilatórios de deformação (CD). Em especial, os valores obtidos em C1 para uma taxa de  $1 \text{ s}^{-1}$

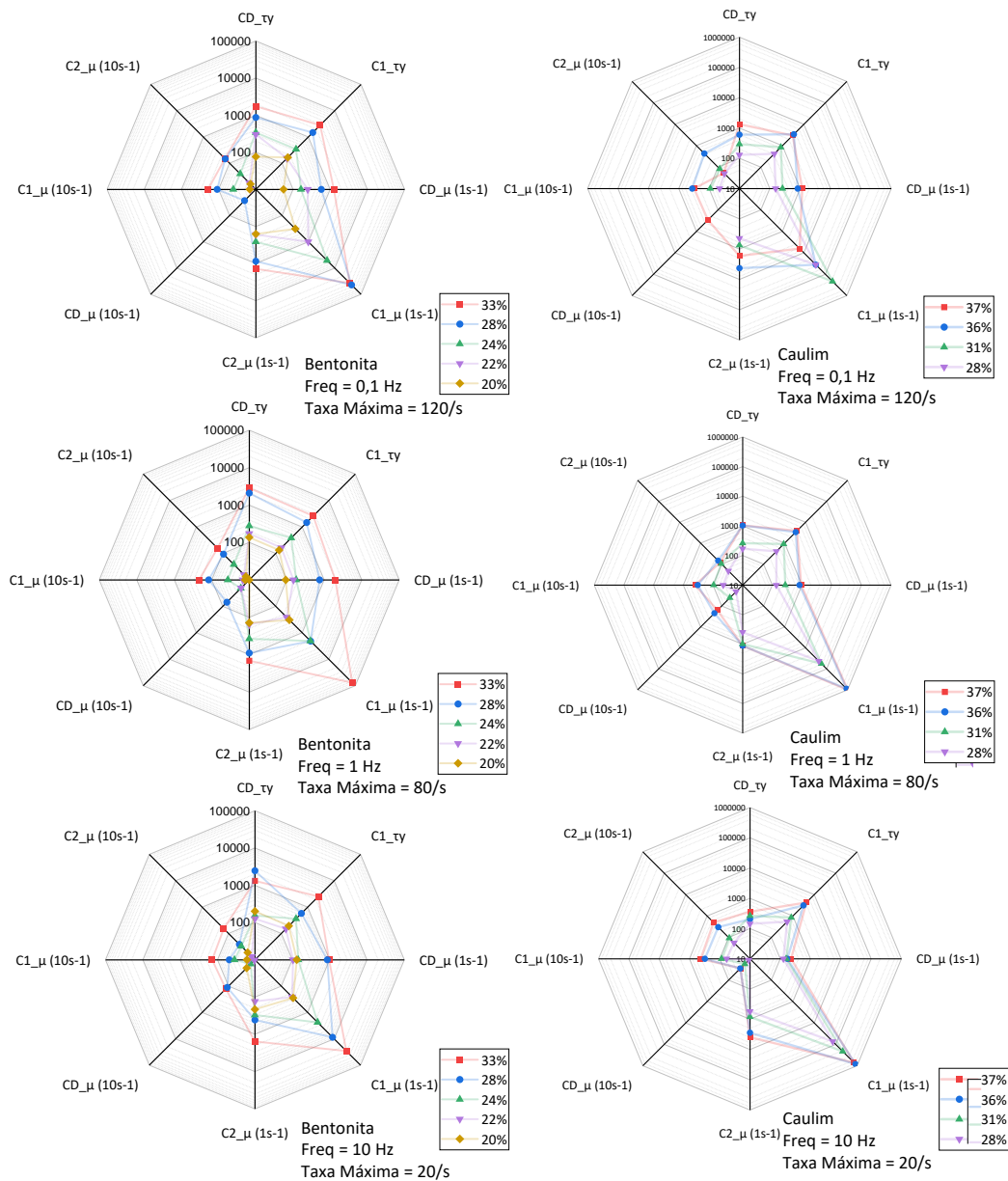
são muito elevados, devido à proximidade da tensão de escoamento nesses ensaios. Por isso, a comparação desses ensaios a baixas taxas é imprecisa. As viscosidades aparentes em  $10 \text{ s}^{-1}$  foram bem inferiores ao segundo ciclo quando comparado ao primeiro ciclo, no caso dos materiais que apresentaram menor desestruturação durante o fluxo.

As viscosidades aparentes obtidas a partir dos ensaios oscilatórios de são bastante similares aos obtidos pelos ensaios de fluxo no primeiro ciclo a  $1 \text{ s}^{-1}$  e a ambos os ciclos a  $10 \text{ s}^{-1}$  nas suspensões de bentonita a todas as taxas máximas e frequências e para os ensaios de caulim a 0,1 e 1 Hz. Essa equiparação pode ser compreendida uma vez que a viscosidade é uma propriedade intrínseca do material, ligada aos fenômenos de perda de energia durante o fluxo.

Os ensaios realizados a frequências maiores no caulim apresentaram viscosidades aparentes inferiores, o que indica a sensibilidade do escoamento a essa frequência. As viscosidades aparentes do caulim ainda sofrem alterações a taxas máximas do ciclo superiores devido à desestruturação do material.

Os rejeitos de minério de ferro, tanto em granulometria fina quanto total, apresentaram comportamento durante o fluxo de um grande aumento inicial das tensões cisalhantes, seguido de uma queda bastante acentuada durante a sua desestruturação. Devido à grande influência das deformações monotônicas no comportamento reológico, considera-se impossibilitando a comparação das viscosidades aparentes dos materiais nesses ensaios devido aos tempos de cisalhamento diferentes. Ainda assim, considera-se que as viscosidades aparentes obtidas pelos ensaios oscilatórios podem representar o comportamento dos materiais em escoamento.

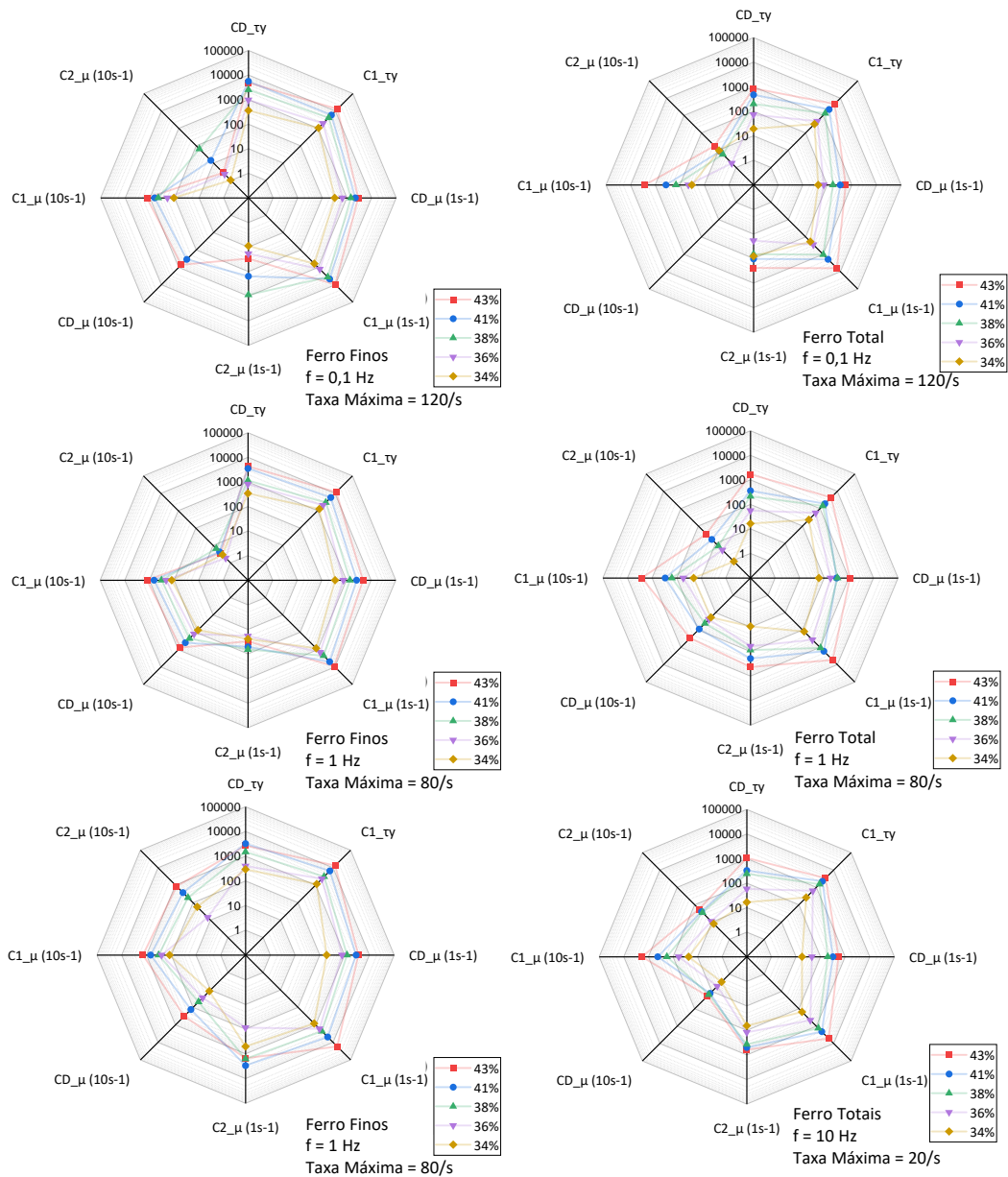
Figura 4-52: Comparação direta da tensão de escoamento estática e da viscosidade aparente obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de deformação (CD) e os ensaios de fluxo no primeiro ciclo na aceleração (C1) e segundo ciclo na desaceleração (C2) para as duas argilas, caulim e bentonita, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.



Fonte: Elaborado pela autora.

As viscosidades aparentes dos rejeitos de minério de ferro são bastante menores em C2 quando comparados a C1, em todos os ensaios avaliados. Além disso, os resultados obtidos por CD são próximos ao primeiro ciclo, e apresentam menores perdas do que quando observado o segundo ciclo. Destaca-se, porém, a sensibilidade das viscosidades aparentes à frequência em que ocorre o ensaio, e a necessidade de se avaliar o fenômeno em campo a que este pode se referir.

Figura 4-53: Comparação direta da tensão de escoamento estática e da viscosidade aparente obtidos a partir dos ensaios oscilatórios de deformação (CD) e os ensaios de fluxo no primeiro ciclo na aceleração (C1) e segundo ciclo na desaceleração (C2) para os dois rejeitos, finos e totais, com as frequências de 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.



Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença obtida quando comparado os diferentes ensaios pode ser de menor importância quando comparado às diversas imprecisões dos modelos. Em especial, há a grande incerteza quanto à concentração volumétrica das suspensões antes do início do movimento, o em suspensões concentradas influem em uma grande incerteza dos parâmetros reológicos. Ressalta-se a necessidade de avaliação quanto

à sensibilidade dos modelos numéricos utilizados para a determinação de eventos de *dam break* antes da conclusão de que os métodos são igualmente aceitáveis.

A simplificação utilizada para a determinação de uma pseudo-viscosidade aparente não tem um significado reológico direto. Porém, podem ser suficientemente útil para a obtenção de parâmetros, considerando as várias limitações das incertezas discutidas ou dos outros métodos ultimamente utilizados. São estes, em geral, a retroanálise de eventos que já ocorreram e com pouco controle para a obtenção de parâmetros, ou a utilização da curva mais conservadora obtida após as perdas dos ensaios convencionais de fluxo. Considera-se também a baixa probabilidade de ocorrência destes eventos e as diversas fontes de incertezas relacionadas ao seu desenvolvimento inicial, incluindo a concentração volumétrica representativa.

Foi observada, ainda, uma grande variação nos dados obtidos para rupturas de barragens de rejeitos. Considerando-se a sensibilidade em geral observada nos modelos aos parâmetros, são aceitáveis erros na ordem de grandeza da viscosidade, porém erros menores na tensão de escoamento do material. Antes de ser tomada qualquer decisão, porém, é necessária a avaliação da sensibilidade pontualmente em cada modelo que será utilizado e as possíveis consequências observadas.



## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudadas suspensões de três materiais de granulometria similar e comportamento reológicos (plasticidade) diferentes – bentonita, caulim e rejeito de minério de ferro com granulometria fina – e de um rejeito de minério e ferro de granulometria total. Os ensaios realizados permitiram uma caracterização parcial da natureza reológica dos três materiais estudados.

Dentre os materiais analisados, três apresentaram granulometria bastante similar – o rejeito fino, o caulim e a bentonita. Porém, os três materiais apresentam comportamentos reológicos bastante distintos, indicados pelos limites de atterberg. A bentonita apresentou comportamento plástica, enquanto o rejeito fino apresentou comportamento não plástico e o caulim um comportamento intermediário. O rejeito total apresentou uma granulometria mais grosseira quando comparada aos demais materiais, e comportamento não plástico.

O pré-cisalhamento garante que o histórico de cisalhamento de todas as amostras seja igual. Porém, para materiais tixotrópicos, com muita alteração da microestrutura durante o cisalhamento, o protocolo de 10s-1 por 60s não garantiu a repetibilidade dos ensaios. Em suspensões mais concentradas de caulim, observou-se a saída de material durante o fluxo, o que impossibilitou a interpretação correta do ensaio, além das alterações da quebra da microestrutura do caulim. Nos rejeitos, observa-se que a segregação e a sedimentação ocorrida durante o fluxo impossibilitou a repetibilidade dos ensaios. Além disso, a aplicação de um pré-cisalhamento nessas amostras pode alterar demais as condições da amostra antes do início do fluxo.

Dentre as variáveis utilizada, considera-se que as concentrações são as que mais afetam o comportamento reológico dos materiais. Porém, é imprescindível a utilização de geometrias de ensaios de reometria que representem o comportamento dos materiais.

Analisando os resultados oscilatórios de deformação e de tensão a partir do momento em que a tensão de escoamento é observada uma mudança abrupta das tensões de cisalhamento. Além disso, observamos a mudança brusca do comportamento de elástico para líquido dos rejeitos, materiais com menores valores de LL e LP, quando comparados

às argilas. Os materiais siltosos ainda apresentam sensibilidade à frequência dos ensaios. As análises de LB validam a mudança abrupta de comportamento dos materiais, e a maior fragilidade dos materiais não-plásticos quando solicitados a altas frequências. Assim, solicitações extremamente rápidas, ou cíclicas, aumentam a fragilidade dos materiais siltosos não-plásticos ao início do fluxo e podem acarretar tensões de cisalhamento menores.

Considera-se que os ensaios oscilatórios de frequência, ao menos quando controlados pela tensão de cisalhamento, tiveram pouco a acrescentar na interpretação dos movimentos de massa. Os ensaios oscilatórios de tempo, apesar de ter pouco a acrescentar diretamente, indicaram a estabilidade dos quatro materiais e a tendência a se atingir deformabilidades constantes ao longo do tempo de escoamento, desde que as outras variáveis permaneçam constantes.

A interpretação dos ensaios de fluxo de rampa de taxa de cisalhamento é mais direta quando comparada aos outros ensaios. Foi possível a modelagem do comportamento reológico das suspensões, sendo o modelo de Bingham suficientemente representativo do fluxo dos materiais. Porém, observou-se tixotropia, tendência de desestruturação das suspensões mais concentradas de caulim e a separação das suspensões de rejeitos.

Neste caso, perdemos informações sobre as características do material homogêneo e obtemos resultados extremamente conservadores, além de com baixa repetibilidade. Observa-se a dificuldade da retirada de parâmetros de ensaio de fluxo na geometria estudada, e a conseqüente impossibilidade de realização de modelagem a partir dos ensaios apresentados. Assim, observa-se a necessidade de se utilizar outras geometrias para a avaliação dos parâmetros reológicos dos rejeitos estudado.

Uma maneira de compreender a influência da concentração é a partir da consideração da distância entre partículas. O uso do IPS auxiliou na comparação do comportamento dos rejeitos de minério de ferro nas duas granulometrias estudadas, tendo uso limitado na compreensão do comportamento reológico dos argilominerais estudados. Este parâmetro é inclusive importante na compreensão da desestruturação dos materiais em fluxo. A utilização desse parâmetro, então, pode ser interessante para a reconstituição dos rejeitos em granulometria grosseira em escalas limitadas por *gap*

de geometrias. Isso é especialmente necessário tendo em vista os valores maiores de tensão de escoamento estática obtida para a granulometria mais fina.

Lembra-se, porém, que as conclusões observadas são limitadas à geometria e ao *gap* de ensaio utilizado. Assim, não é possível sua aplicação direta a eventos de rupturas de barragens de rejeitos de maneira precisa sem antes ser realizada uma análise das características específicas do escoamento em rampa de grandes quantidades de massa com velocidades elevadas.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

ABNT. Abnr Nbr 10004. [S. l.], p. 71, 2004.

ABOU, Bérengère; BONN, Daniel; MEUNIER, J. Nonlinear rheology of Laponite suspensions under an external drive. *J. Rheol*, [S. l.], v. 979, n. 47, 2003.

ADIANSYAH, Joni Safaat; ROSANO, Michele; VINK, Sue; KEIR, Greg; STOKES, Jason R. Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 133, p. 5–17, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.100.

ADIGUZEL, Deniz; BASCETIN, Atac. The investigation of effect of particle size distribution on flow behavior of paste tailings. *Journal of Environmental Management*, [S. l.], v. 243, n. May, p. 393–401, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.039.

ALBERTA, Government Of. Alberta Dam and Canal Safety Directive. [s.l: s.n.].

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.

ANCOLD. Guidelines on tailings dams: planning, design, construction, operation and closure. . 2012, May, p. 34 p.

ANCOLD, Australian National Committee on Large Dams. Guidelines on Risk Assessment. Sydney, NSW, Australia: ANCOLD, 2003.

ANDREOTTI, Bruno; FORTERRE, Yoel; POULIQUEN, Olivier. Granular Media - Between Fluid and Solid. [s.l.] : Cambridge University Press, 2013.

ANM. RESOLUÇÃO Nº 32, DE 11 DE MAIO DE 2020. . 2020.

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.

AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings Dam Failures: A review of the Last one Hundrer Years. *Geotechnical News*, [S. l.], n. Tailings Dam, p. 1–4, 2010.

BAECHER, Gregory B. Uncertainty in dam safety risk analysis. *Georisk*, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 92–108, 2016. DOI: 10.1080/17499518.2015.1102293.

BAECHER, Gregory B.; CHRISTIAN, John T. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1198/tech.2005.s838.

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.

BAKKER, C. W.; MEYER, C. J.; DEGLON, D. A. Numerical modelling of non-Newtonian slurry in a mechanical flotation cell. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 22, n. 11, p. 944–950, 2009. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.016.

BARNES, Howard Anthony; NGUYEN, Quoc Dzuy. Rotating vane rheometry-a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, [S. l.], v. 98, n. 1, p. 1–14, 2001. DOI: 10.1016/S0377-0257(01)00095-7.

BASELT, Ivo; QUEIROZ DE OLIVEIRA, Gustavo; FISCHER, Jan Thomas; PUDASAINI, Shiva P. Evolution of stony debris flows in laboratory experiments. *Geomorphology*, [S. l.], v. 372, p. 107431, 2021. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107431.

BESSO, C.; DE CAMPOS, T. M. P. On the evaluation of yield stress of soils for debris flow analysis. *E3S Web of Conferences* 92, 05002. 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/20199205002.

BHUIYAN, Imteaz; AZAM, Shahid; KHALED, Shifullah; LANDINE, Patrick. Geotechnical behavior of uranium mill tailings from Saskatchewan, Canada. *International Journal of Mining Science and Technology*, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 369–375, 2016. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.02.001.

BIN, Yu; HUILIN, Zhao; COUSSOT, Philippe; LAIGLE, Dominique; ARATTANO, Massimo; DEGANUTTI, Andrea; MARCHI, Lorenzo. Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, [S. l.], v. 126, n. 2, p. 158–159, 2002. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:2(158).

BOGER, David V. Rheology and the resource industries. *Chemical Engineering Science*, [S. l.], v. 64, n. 22, p. 4525–4536, 2009. DOI: 10.1016/j.ces.2009.03.007.

BOWKER, Lindsay; CHAMBERS, David. In the Dark Shadow of the Supercycle Tailings Failure Risk & Public Liability Reach All Time Highs. *Environments*, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 75, 2017. DOI: 10.3390/environments4040075.

BOWKER, Lindsay Newland; CHAMBERS, David M. The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures. [S. l.], p. 1–56, 2015.

BUSSIE, 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.

CAROTENUTO, Claudia; MEROLA, Maria C.; ÁLVAREZ-ROMERO, Marta; COPPOLA, Elio; MINALE, Mario. Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [S. l.], v. 466, p. 57–65, 2015. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.037.

CDA. Technical bulletin: Tailings Dam Breach Analyses. Ottawa, Canada. DOI: 10.1201/9780429319778-313.

CHÁCARA, Débora Magalhães. Reologia de depósitos de rejeitos espessados de minério de ferro para estudos de dam break. [S. l.], p. 152, 2020.

CHEN, Dandan; JIANG, Xuguang; LV, Shuai; LV, Guojun; MA, Zengyi; YAN, Jianhua; YU, Xuehai; LIAO, Haiyan; ZHAO, Hua. Rheological properties and stability of lignite washery tailing suspensions. *Fuel*, [S. l.], v. 141, p. 214–221, 2015. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.10.067.

CHO, Kwang Soo; HYUN, Kyu; AHN, Kyung Hyun; LEE, Seung Jong. A geometrical interpretation of large amplitude oscillatory shear response. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 49, n. 3, p. 747–758, 2005. DOI: 10.1122/1.1895801.

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.

CONCHA LARRAURI, Paulina; LALL, Upmanu. Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout. *Environments*, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 28, 2018. DOI: 10.3390/environments5020028.

COUSSOT, P. Bingham's heritage. *Rheologica Acta*, [S. l.], v. 56, n. 3, p. 163–176, 2017. DOI: 10.1007/s00397-016-0983-y.

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.

COUSSOT, P.; LEONOV, A. I.; PIAU, J. M. Rheological modelling and peculiar properties of some debris flows. *Erosion, debris flows and environment in mountain regions. Proc. international symposium, Chengdu, 1992*, [S. l.], n. 209, p. 207–216, 1992.

COUSSOT, Philippe; PIAU, Jean-Michel. A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 105–124, 1995. DOI: 10.1122/1.550693.

CZIBULYA, Zsuzsanna; TOMBÁ CZ, Etelka; SZEGI, Tamas; MICHÉ LI, 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.

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.

DAVIES, Michael P. Tailings impoundment failures are geotechnical engineers listening? *Geotechnical News*, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 31, 2002.

DE ALBA, Pedro; BALLESTERO, Thomas P. Residual strength after liquefaction: A rheological approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, [S. l.], v. 26, n. 2-4 SPEC. ISS., p. 143–151, 2006. DOI: 10.1016/j.soildyn.2005.02.011.

DE CAMPOS, T. M., GALINDO, M. S. V., Evaluation of the viscosity of tropical soils for debris flow analysis: a new approach, *Géotechnique*, 2016, 66:7, 533–545. DOI: 10.1680/jgeot.15.P.080

DE HAAS, Tjalling; BRAAT, Lisanne; LEUVEN, Jasper R. F. W.; LOKHORST, Ivar R.; KLEINHANS, Maarten G. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, [S. l.], v. 120, n. 9, p. 1949–1972, 2015. DOI: 10.1002/2015JF003525.

DE PAIVA, Camilla Adriane; DA FONSECA SANTIAGO, Aníbal; DO PRADO FILHO, José Francisco. Content analysis of dam break studies for tailings dams with high damage potential in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: technical weaknesses and proposals for improvements. *Natural Hazards*, [S. l.], v. 104, n. 2, p. 1141–1156, 2020. DOI: 10.1007/s11069-020-04254-8.

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.

DIAS, Neemias Almeida. Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional. Dissertação de Mestrado. Departamento

DINKGREVE, Maureen; PAREDES, José; DENN, Morton M.; BONN, Daniel. On different ways of measuring “the” yield stress. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, [S. l.], v. 238, p. 233–241, 2016. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2016.11.001.

DNPM, Portaria; DE, D. E. X. X. D. E. Xxxx; REGIMENTAL, Estrutura; NACIONAL, Sistema; SNISB, Barragens-. Considerando que compete ao DNPM, no âmbito de suas atribuições, fiscalizar as atividades de pesquisa e lavra para o aproveitamento mineral e as estruturas decorrentes destas atividades, incluindo Barragens de Mineração, em face dos títulos minerários con. [S. l.], v. V, 2017.

DOLZ, M.; GONZÁLEZ, F.; DELEGIDO, J.; HERNÁNDEZ, M. J.; PELLICER, J. A Time-Dependent Expression for Thixotropic Areas. *Application to Aerosil 200 Hydrogels*. , 2000.

DÖRR, Aaron; SADIKI, Amsini; MEHDIZADEH, Amirfarhang. A discrete model for the apparent viscosity of polydisperse suspensions including maximum packing fraction. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 743–765, 2013. DOI: 10.1122/1.4795746.

DOS SANTOS, Ricardo Neves Correia; CALDEIRA, Laura Maria Mello Saraiva; SERRA, João Paulo Bilé. FMEA of a tailings dam. *Georisk*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 89–104, 2012. DOI: 10.1080/17499518.2011.615751.

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.

ENGELS, J.; MCPHAIL, G. I.; JAMETT, R.; PAVISSICH, C. Evaluation of the Behaviour of High Density Tailings Deposition – CODELCO Pilot Plant. South African Institute of Mining and Metallurgy, [S. l.], n. February, 2011.

ESPÓSITO, Terezinha Jesus. Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, [S. l.], p. 363, 2000.

ETTEHADI, Ali; TEZCAN, Meltem; ALTUN, Gursat. Rheological behavior of water-clay suspensions under large amplitude oscillatory shear. *Rheologica Acta*, [S. l.], v. 59, n. 9, p. 665–683, 2020. DOI: 10.1007/s00397-020-01221-9.

ETTEHADI, Ali; ÜLKER, Ceylan; ALTUN, Gürşat. Nonlinear viscoelastic rheological behavior of bentonite and sepiolite drilling fluids under large amplitude oscillatory shear. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, [S. l.], v. 208, n. July 2021, 2022. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109210.

EWOLDT, Randy H.; HOSOI, A. E.; MCKINLEY, Gareth H. New measures for characterizing nonlinear viscoelasticity in large amplitude oscillatory shear. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 52, n. 6, p. 1427–1458, 2008. DOI: 10.1122/1.2970095.

FAITLI, József; GOMBKÖT, Imre. Some technical aspects of the rheological properties of high concentration fine suspensions to avoid environmental disasters. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 129–137, 2015. DOI: 10.3846/16486897.2015.1021698.

FEAM-MG, Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais. Termo de Referência para a Entrega de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens. [S. l.], p. 1–20, 2020.

FITTON, T. G.; CHRYSS, A. G.; BHATTACHARYA, S. N. Tailings beach slope prediction: A new rheological method. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 181–202, 2006. DOI: 10.1080/13895260500533030.

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.

FORNES, Petter; BIHS, Hans; THAKUR, Vikas; NORDAL, Steinar. Implementation of Non-Newtonian Rheology for Debris Flow Simulation With Reef3D. [S. l.], v. 6865, n. 1, p. 1090–1097, 2017.

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.

GAO, Jinglong; FOURIE, Andy. Using the flume test for yield stress measurement of thickened tailings. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 81, p. 116–127, 2015. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.07.013.

GAWU, S. K. Y.; FOURIE, A. B. Assessment of the modified slump test as a measure of the yield stress of high-density thickened tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, [S. l.], v. 41, n. 1, p. 39–47, 2004. DOI: 10.1139/t03-071.



GHAHRAMANI, Negar; MITCHELL, Andrew; RANA, Nahyan; MCDUGALL, Scott; EVANS, Stephen; TAKE, Andy. Tailings-flow runout analysis: Examining the applicability of a semi-physical area–volume relationship using a novel database. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, [S. l.], n. July, p. 1–23, 2020. DOI: 10.5194/nhess-2020-199.

GHARIB, Nima; BHARATHAN, Bhargav; AMIRI, Leyla; MCGUINNESS, Maureen; HASSANI, Ferri P.; SASMITO, Agus P. Flow characteristics and wear prediction of Herschel-Bulkley non-Newtonian paste backfill in pipe elbows. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, [S. l.], v. 95, n. 6, p. 1181–1191, 2017. DOI: 10.1002/cjce.22749.

GILDEH, Hossein Kheirkhah; HALLIDAY, Alexandra; ARENAS, Alfredo; ZHANG, Hua. Tailings Dam Breach Analysis: A Review of Methods, Practices, and Uncertainties. *Mine Water and the Environment*, [S. l.], n. Cda 2013, 2020. DOI: 10.1007/s10230-020-00718-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00718-2>.

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.

GUO, Jian; YI, Shujian; YIN, Yanzhou; CUI, Yifei; QIN, Mingyue; LI, Tonglu; WANG, Chenyang. The effect of topography on landslide kinematics: a case study of the Jichang town landslide in Guizhou, China. *Landslides*, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 959–973, 2020. DOI: 10.1007/s10346-019-01339-9.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. The use of nomenclature in dispersion science and technology. *NIST Special Publication*, [S. l.], v. 960, n. January 2001, p. 76, 2001.

HAN, Guoqi; WANG, Deguan. Numerical Modeling of Anhui Debris Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, [S. l.], v. 122, n. 5, p. 262–265, 2002. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1996)122:5(262).

HANCK, Cristoph; ARNOLD, Martin; GERBER, Alexander; SCHMELZER, Martin. Introduction to programming Econometrics with R. [s.l: s.n.].

HENRIQUEZ, Julio; SIMMS, Paul. Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 128–139, 2009. DOI: 10.1016/j.mineng.2008.05.010.

HUANG, Xin; GARCÍA, Marcelo H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. *Journal of Fluid Mechanics*, [S. l.], v. 374, p. 305–333, 1998. DOI: 10.1017/S0022112098002845.

HYUN, Kyu; WILHELM, Manfred; KLEIN, Christopher O.; CHO, Kwang Soo; NAM, Jung Gun; AHN, Kyung Hyun; LEE, Seung Jong; EWOLDT, Randy H.; MCKINLEY, Gareth H. A review of nonlinear oscillatory shear tests: Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS). *Progress in Polymer Science (Oxford)*, [S. l.], v. 36, n. 12, p. 1697–1753, 2011. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2011.02.002.

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.

ISHIHARA, K. Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, *[S. l.]*, v. 43, n. 3, p. 351–451, 1993. DOI: 10.1680/geot.1993.43.3.351.

IVERSON, Richard M.; LOGAN, Matthew; LAHUSEN, Richard G.; BERTI, Matteo. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research*, *[S. l.]*, v. 115, n. F3, 2010. DOI: 10.1029/2009jf001514.

JEFFERIES, Mike; BEEN, Ken. *Soil Liquefaction A Critical State Approach*. 2nd. ed. [s.l: s.n.].

JEONG, Sueng Won. The effect of grain size on the viscosity and yield stress of fine-grained sediments. *Journal of Mountain Science*, *[S. l.]*, v. 11, n. 1, p. 31–40, 2014. DOI: 10.1007/s11629-013-2661-1.

JEONG, Sueng Won. Shear rate-dependent rheological properties of mine tailings: Determination of dynamic and static yield stresses. *Applied Sciences (Switzerland)*, *[S. l.]*, v. 9, n. 22, 2019. DOI: 10.3390/app9224744.

JEONG, Sueng Won; LOCAT, Jacques; LEROUÉIL, Serge; MALET, Jean-Philippe. Rheological properties of fine-grained sediment: the roles of texture and mineralogy. *Canadian Geotechnical Journal*, *[S. l.]*, v. 47, n. 10, p. 1085–1100, 2010. DOI: 10.1139/t10-012.

JEYAPALAN, Jey K.; DUNCAN, J. Michael; SEED, H. Bolton. Investigation of Flow Failures of Tailings Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, *[S. l.]*, v. 109, n. 2, p. 172–189, 1983. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1983)109:2(172).

JING, Xiaofei; CHEN, Yulong; XIE, Dan; WILLIAMS, David J.; WU, Shangwei; WANG, Wensong; YIN, Tianwei. The effect of grain size on the hydrodynamics of mudflow surge from a tailings dam-break. *Applied Sciences (Switzerland)*, *[S. l.]*, v. 9, n. 12, 2019. DOI: 10.3390/app9122474.

KATE GURNON, A.; WAGNER, Norman J. Large amplitude oscillatory shear (LAOS) measurements to obtain constitutive equation model parameters: Giesekus model of banding and nonbanding wormlike micelles. *Journal of Rheology*, *[S. l.]*, v. 56, n. 2, p. 333–351, 2012. DOI: 10.1122/1.3684751.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, *[S. l.]*, v. 51, p. 229–245, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.

KUGGE, C.; VANDERHOEK, N.; BOUSFIELD, D. W. Oscillatory shear response of moisture barrier coatings containing clay of different shape factor. *Journal of Colloid and Interface Science*, *[S. l.]*, v. 358, n. 1, p. 25–31, 2011. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.02.051.

KUMAR, Shivesh; RAO, B. Hanumantha. Rheological properties of bauxite residue: the role of tailings gradation and solids concentration. *Innovative Infrastructure Solutions*, [S. l.], v. 7, n. 1, 2022. DOI: 10.1007/s41062-021-00691-x.

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.

LAMBE, William; WHITMAN, Robert V. *Soil Mechanics*. [s.l: s.n.].

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.

LAZARIM, Thais Perez; DE SOUZA JÚNIOR, Tennison Freire; TEIXEIRA, Sidnei Helder Cardoso; MOHSENI, Ana Paula Vianna. A Method for Estimating the Area Covered by Tailings in a Dam Failure Scenario. *Geotechnical and Geological Engineering*, [S. l.], v. 0123456789, 2021. DOI: 10.1007/s10706-021-01920-x.

LEONG, Yee Kwong. Controlling the rheology of iron ore slurries and tailings with surface chemistry for enhanced beneficiation performance and output, reduced pumping cost and safer tailings storage in dam. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 166, n. September 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106874.

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.

LIN, Xiajie; LI, Yamin; LUO, Wei; XIAO, Lan; ZHANG, Zeren; ZHAO, Jinzhong; LIU, Changsheng; LI, Yulin. Leucine-activated nanohybrid biofilm for skin regeneration: Via improving cell affinity and neovascularization capacity. *Journal of Materials Chemistry B*, [S. l.], v. 8, n. 35, p. 7966–7976, 2020. DOI: 10.1039/d0tb00958j.

MACHADO, Nathália Couto. Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. [S. l.], 2017.

MACOSKO, Christopher W. *Rheology: Principles, Measurements and Applications*. [s.l: s.n.]. DOI: 10.2514/3.15201.

MAIA NETO, Francisco. Análise Dinâmica De Rompimento Em Barragem De Rejeitos. *Em: XIII COBREAP - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS*. 2006, Anais [...]. [s.l: s.n.] p. 1–37.

MARTIN, Violeta; FONTAINE, Daniel; CATHCART, Jaime. Challenges with conducting tailings dam breach studies. *Proceedings of Tailings and Mine Waste*, [S. l.], n. Cda 2014, 2015.

MASSAD, Façal. *Mecânica dos Solos Experimental*. [s.l: s.n.].

MCPHAIL, G. I.; BECERRA, M.; BARRERA, S. Important considerations in the testing of high-density tailings for beach profile prediction. *Journal of the Southern African*

Institute of Mining and Metallurgy, [S. l.], v. 112, n. 11, p. 933–938, 2012. DOI: 10.36487/acg\_rep/1263\_09\_mcphail.

MELO, Danielle Fernanda Morais De. Comportamento Reológico de Solos Sujeitos a Corridas de Lama por Liquefação Estática. [S. l.], p. 277, 2014.

MERRILL, Javier; VOISIN, Leandro; MONTENEGRO, Victor; IHLE, Christian F.; MCFARLANE, Angus. Slurry rheology prediction based on hyperspectral characterization models for minerals quantification. Minerals Engineering, [S. l.], v. 109, n. November 2016, p. 126–134, 2017. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.03.009.

MEWIS, Jan; WAGNER, Norman J. Current trends in suspension rheology. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, [S. l.], v. 157, n. 3, p. 147–150, 2009. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2008.11.004.

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.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria Nº 70.389, De 17 De Maio De 2017DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. [S. l.], p. 40, 2017.

MINISTRY OF MINING. Supreme Decree Nº 248: Guidelines for the Approval of Projects of Design, Construction, Operation and Closure o Tailings Dams (ES). Diario Oficial, [S. l.], p. 159–182, 2007.

MINISTRY OF ENERGY AND MINES OF BRITISH COLUMBIA. Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia. [s.l: s.n.].

MIZANI, S.; HE, X.; SIMMS, P. Application of lubrication theory to modeling stack geometry of high density mine tailings. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, [S. l.], v. 198, p. 59–70, 2013. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2013.03.002.

MIZANI, Shabnam; SIMMS, Paul. Method-dependent variation of yield stress in a thickened gold tailings explained using a structure based viscosity model. Minerals Engineering, [S. l.], v. 98, p. 40–48, 2016. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.07.011.

MIZANI, Shabnam; SIMMS, Paul; WILSON, Ward. Rheology for deposition control of polymer-amended oil sands tailings. Rheologica Acta, [S. l.], v. 56, n. 7–8, p. 623–634, 2017. DOI: 10.1007/s00397-017-1015-2.

MOON, N.; PARKER, M.; BOSHOF, H. J. J.; CLOHAN, D. Advances in non-Newtonian dam break studies. Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, [S. l.], n. Ancold 2012, p. 165–172, 2019.

MORGENSTERN, Norbert R. Geotechnical risk, regulation, and public policy. Soils and Rocks, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 107–129, 2018. DOI: 10.28927/SR.412107.

MORGENSTERN, Norbert R.; VICK, Steven G.; VIOTTI, Cássio B.; WATTS, Bryan D. Fundão Tailings Dam Review Panel. [s.l: s.n.].

- NADAI, A.; WAHL, A. Plasticity: A Mechanics of the Plastic State of Matter. [s.l: s.n.].
- NDLOVU, Bulelwa; FORBES, Elizaveta; FARROKHPAY, Saeed; BECKER, Megan; BRADSHAW, Dee; DEGLON, David. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 55, p. 383–389, 2014. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.06.004.
- OLCAY, R. H.; HERNANDEZ, C. A.; VALADÃO, G. E. S.; CHAVES, A. P. Production of minerals paste from phosphates sludge Producción. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, [S. l.], v. 28, p. 335–345, 2020.
- 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: s.n.].
- OLSON, Scott M.; STARK, Timothy D. Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 629–647, 2002. DOI: 10.1139/t02-001.
- OLSON, Scott M.; STARK, Timothy D. Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [S. l.], v. 129, n. 8, p. 727–737, 2003. a. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:8(727).
- OLSON, Scott M.; STARK, Timothy D. Use of laboratory data to confirm yield and liquefied strength ratio concepts. *Canadian Geotechnical Journal*, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 1164–1184, 2003. b. DOI: 10.1139/t03-058.
- OSORIO, Christian Anthony Hernández; ARAÚJO, Armando Corrêa De; VALADÃO, George Eduardo Sales. Estudo De Características De Algumas Pastas Minerais. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 50–55, 2008. DOI: 10.4322/tmm.00403009.
- PAINEAU, Erwan; MICHOT, Laurent J.; BIHANNIC, Isabelle; BARAVIAN, Christophe. Aqueous suspensions of natural swelling clay minerals. 2. Rheological characterization. *Langmuir*, [S. l.], v. 27, n. 12, p. 7806–7819, 2011. DOI: 10.1021/la2001267.
- PARRA, P. C.; LASMAR, N. T. Ruptura da barragem de rejeitos da mina do fernandinho. *Em: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO 1987, Anais [...]*. [s.l: s.n.] p. 423–444.
- PARRA, P. C.; RAMOS, J. V. Ruptura, recuperação e estabilização da barragem de rejeitos da mina do Pico São Luiz. *Em: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO 1987, Anais [...]*. [s.l: s.n.] p. 445–462.
- 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.

PELLEGRINO, Anna Maria; SCHIPPA, Leonardo. A laboratory experience on the effect of grains concentration and coarse sediment on the rheology of natural debris-flows. *Environmental Earth Sciences*, [S. l.], v. 77, n. 22, p. 1–13, 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7934-0.

PETKOVŠEK, Gregor; HASSAN, Mohamed Ahmed Ali Mohamed; LUMBROSO, Darren; ROCA COLLELL, Marta. A Two-Fluid Simulation of Tailings Dam Breaching. *Mine Water and the Environment*, [S. l.], n. 0123456789, 2020. DOI: 10.1007/s10230-020-00717-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00717-3>.

PHILIPPOFF, W. Vibrational Measurements with Large Amplitudes. *Transactions of the Society of Rheology*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 317–334, 1966. DOI: 10.1122/1.549049.

PHILLIPS, Christopher J.; DAVIES, Timothy R. H. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 101–110, 1991. DOI: 10.1016/0169-555X(91)90022-3.

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.

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.

PIRULLI, M. Tailings Dam Post-Failure Flow Dynamics : Analysis of the Rheological Behaviour. *JTC1 Workshop on Advances in Landslide Understanding*, [S. l.], n. July 1985, p. 24–27, 2017.

POTANIN, Andrei. Thixotropy and rheopexy of aggregated dispersions with wetting polymer. *Journal of Rheology*, [S. l.], v. 48, n. 6, p. 1279–1293, 2004. DOI: 10.1122/1.1807844.

PROCHASKA, Adam B.; SANTI, Paul M.; HIGGINS, Jerry D.; CANNON, Susan H. A study of methods to estimate debris flow velocity. *Landslides*, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 431–444, 2008. DOI: 10.1007/s10346-008-0137-0.

PULLUM, Lionel; BOGER, David V.; SOFRA, Fiona. Hydraulic Mineral Waste Transport and Storage. *Annual Review of Fluid Mechanics*, [S. l.], v. 50, n. 1, p. 157–185, 2017. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122316-045027.

RAKSHITH, Shetty; ZHANG, Xiao; COUSSOT, Philippe; SINGH, D. N. Complex-Fluid Approach for Determining Rheological Characteristics of Fine-Grained Soils and Clay Minerals. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [S. l.], v. 30, n. 12, p. 04018322, 2018. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002543.

REYES, Cristian; ÁLVAREZ, Matías; IHLE, Christian F.; CONTRERAS, Matías; KRACHT, Willy. The influence of seawater on magnetite tailing rheology. *Minerals Engineering*, [S. l.], v. 131, n. July 2018, p. 363–369, 2019. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.037.

RIBEIRO, Vinícius Queiroga Fortes. Proposta de metodologia para avaliação de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, [S. l.], p. 291, 2015.

RICO, M., BENITO, G., DÍEZ-HERRERO, A. Floods from tailings dam failures. [S. l.], 2007.

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.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials, [S. l.], v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008. a. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.050.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials, [S. l.], v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008. b. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.050.

ROBERTSON, P. K. Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [S. l.], v. 136, n. 6, p. 842–853, 2010. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000286.

ROBERTSON, Peter K.; MELO, Lucas De; WILLIAMS, David J.; WILSON, G. Ward. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I Expert Panel : [s.l: s.n.].

ROBERTSON, Peter K.; MELO, Lucas De; WILLIAMS, David J.; WILSON, G. Ward. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I Expert Panel : [s.l: s.n.].

ROGERS, Simon A.; ERWIN, Brian M.; VLASSOPOULOS, Dimitris; CLOITRE, Michel. A sequence of physical processes determined and quantified in LAOS: Application to a yield stress fluid. Journal of Rheology, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 435–458, 2011. DOI: 10.1122/1.3544591.

SAKANO, Victor Keniti. Métodos Avançados para a Avaliação da Natureza Reológica de Suspensões Concentradas Aplicados ao Escoamento pós Colapso de Barragens de Rejeitos. 2022. [S. l.], 2022.

SAKANO, Victor Keniti; HALABI, Ana Luiza; BRASILEIRO, Gabriel Carpinelli Perozzi; FUTAI, Marcos Massao; PILEGGI, Rafael Giuliano. EVALUATION OF DIFFERENT FLOW PROTOCOL TO ESTIMATE RHEOLOGICAL PROPERTIES FOR A DAM BREAK ANALYSIS. [S. l.], 2021.

SÁNCHEZ-PERALTA, John A.; BELTRÁN-RODRÍGUEZ, Lorena N.; TRUJILLO-VELA, Mario G.; LARRAHONDO, Joan M. Flows of Liquefied Filtered Tailings: Laboratory-Scale Physical and Numerical Modeling. International Journal of Civil Engineering, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 393–404, 2020. DOI: 10.1007/s40999-019-00482-7.

SARSBY, Robert. Environmental geotechnics. *Environmental geotechnics*, [S. l.], 2013. DOI: 10.1680/eg.27527.

SASSA, Kyoji; FUKUOKA, Hiroshi; WANG, Gonghui; ISHIKAWA, Naohide. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides*, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 7–19, 2004. DOI: 10.1007/s10346-003-0004-y.

SCOTTO DI SANTOLO, S.; PELLEGRINO, A. M.; EVANGELISTA, A.; COUSSOT, P. Rheological behaviour of reconstituted pyroclastic debris flow. *Geotechnique*, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 19–27, 2012. DOI: 10.1680/geot.10.P.005.

SENAPATI, P. K.; MISHRA, B. K. Deposition slope of thickened copper tailings. *Bulk Solids Handling*, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 80–85, 2010.

SENAPATI, Pradipta Kumar; MISHRA, Barada Kanta. Feasibility Studies on Pipeline Disposal of Concentrated Copper Tailings Slurry for Waste Minimization. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, [S. l.], v. 98, n. 3, p. 277–283, 2017. DOI: 10.1007/s40032-016-0309-y.

SHAKEEL, Ahmad; KIRICHEK, Alex; CHASSAGNE, Claire. Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions. *Applied Clay Science*, [S. l.], v. 211, n. June, p. 106206, 2021. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106206.

SIMON, Dragana; GRABINSKY, Murray. Apparent yield stress measurement in cemented paste backfill. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 231–256, 2013. DOI: 10.1080/17480930.2012.680754.

SOFRÁ, Fiona; BOGER, David V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*, [S. l.], v. 86, n. 3, p. 319–330, 2002. DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00225-X.

SOUZA, Tension Freire; TEIXEIRA, Sidnei Helder Cardoso. Simulation of tailings release in dam break scenarios using physical models. *Revista Escola de Minas*, [S. l.], v. 72, n. 3, p. 385–393, 2019. DOI: 10.1590/0370-44672018720098.

STEFFE, James F. *Rheological Methods in*. [s.l: s.n.]. v. 23 Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0260877494900906>.

TALMON, Arno M.; VAN KESTEREN, Walther G. M.; SITTONI, Luca; HEDBLUM, Eric P. Shear cell tests for quantification of tailings segregation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, [S. l.], v. 92, n. 2, p. 362–373, 2014. DOI: 10.1002/cjce.21856.

TEE, T. T.; DEALY, J. M. Nonlinear Viscoelasticity of Polymer Melts. *Trans Soc Rheol*, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 595–615, 1975. DOI: 10.1122/1.549387.

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.

TRAMPUS, Bruna Camara. *Mining*. [S. l.], v. 72, n. 2, p. 301–306, 2019.



VALENCIA, Gabriela Araújo. Estudo das características de dispersão de suspensões de carbonato de cálcio. São Paulo. 2017. [S. l.], 2017.

WANG, Xiaoguang; WEI, Zuoan; LI, Quanguai; CHEN, Yulong. Experimental research on the rheological properties of tailings and its effect factors. *Environmental Science and Pollution Research*, [S. l.], v. 25, n. 35, p. 35738–35747, 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-3481-1.

WHIPPLE, Kelin X.; THE, Source; MARCH, No; WHIPPLE, Kelin X. Open - Channel Flow of Bingham Fluids : Applications in Debris - Flow Research Published by : The University of Chicago Press Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/10.1086/515916> Open-Channel Flow of Bingham Fluids : Applications. [S. l.], v. 105, n. 2, p. 243–262, 2016.

WHITMAN, Robert V. the Seventeenth Terzaghi Lecture. *J. Geotech. Engrg*, [S. l.], v. 110, n. 2, p. 143–188, 1984.

WICKLAND, Benjamin E.; WILSON, G. Ward; WIJEWICKREME, Dharma; KLEIN, Bern. Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, [S. l.], v. 43, n. 9, p. 928–945, 2006. DOI: 10.1139/T06-058.

WU, Aixiang; WANG, Yong; WANG, Hongjiang. Estimation model for yield stress of fresh uncemented thickened tailings: Coupled effects of true solid density, bulk density, and solid concentration. *International Journal of Mineral Processing*, [S. l.], v. 143, p. 117–124, 2015. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.09.010.

WU, Teng; QIN, Jie. Experimental Study of a Tailings Impoundment Dam Failure Due to Overtopping. *Mine Water and the Environment*, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 272–280, 2018. DOI: 10.1007/s10230-018-0529-x.

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.

ZHANG, Limin; PENG, Ming; CHANG, Dongsheng; XU, Yao. Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment. [s.l.], 2016. DOI: 10.1002/9781118558522.

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.

ZHUANG, Yu; XU, Qiang; XING, Aiguo. Numerical investigation of the air blast generated by the Wenjia valley rock avalanche in Mianzhu, Sichuan, China. *Landslides*, [S. l.], v. 16, n. 12, p. 2499–2508, 2019. DOI: 10.1007/s10346-019-01253-0.

## 7. ANEXOS

## ANEXO A - GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS DE REJEITO

Nos últimos anos, é observada uma tendência de aumento os impactos, de perda de vidas e socioeconômicos, relacionados ao crescimento de números de falhas de grandes barragens, resultando geralmente em eventos de grande magnitude (AZAM; LI, 2010; BOWKER; CHAMBERS, 2017). Em especial no contexto nacional, a ocorrência de duas catástrofes relacionadas à ruptura de barragens de rejeitos de minério de ferro em menos de cinco anos, da Barragem de Fundão em Mariana-MG (MORGENSTERN et al., 2016) e a ruptura da Barragem 1 da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG (ROBERTSON et al., 2019a), representaram um grande infortúnio para a geotecnia brasileira. A perda de cerca de 300 vidas humanas, além dos impactos socio-econômico-ambientais devido à deposição de milhões de metros cúbicos de rejeitos em duas importantes bacias hidrográficas nacionais demonstra a necessidade de melhor compreensão do funcionamento dessas estruturas e da avaliação do risco inerente.

Para o contexto mundial, estudos anteriores apresentaram que os riscos associados com a ruptura de barragens de rejeito ainda são superiores ao nível considerado tolerável para obras de engenharia. Azam & Li (AZAM; LI, 2010) observaram que 1,2% do inventário de 18401 minas conhecidas falharam, o que indicaria uma taxa de falhas mais de duas ordens de grandeza superior às barragens de retenção de água. A taxa de ruptura de barragens de rejeito é proporcionalmente elevada quando comparada à de barragens de água e, por isso, é bastante discutida na literatura sem, porém, serem observados resultados (MORGENSTERN, 2018).

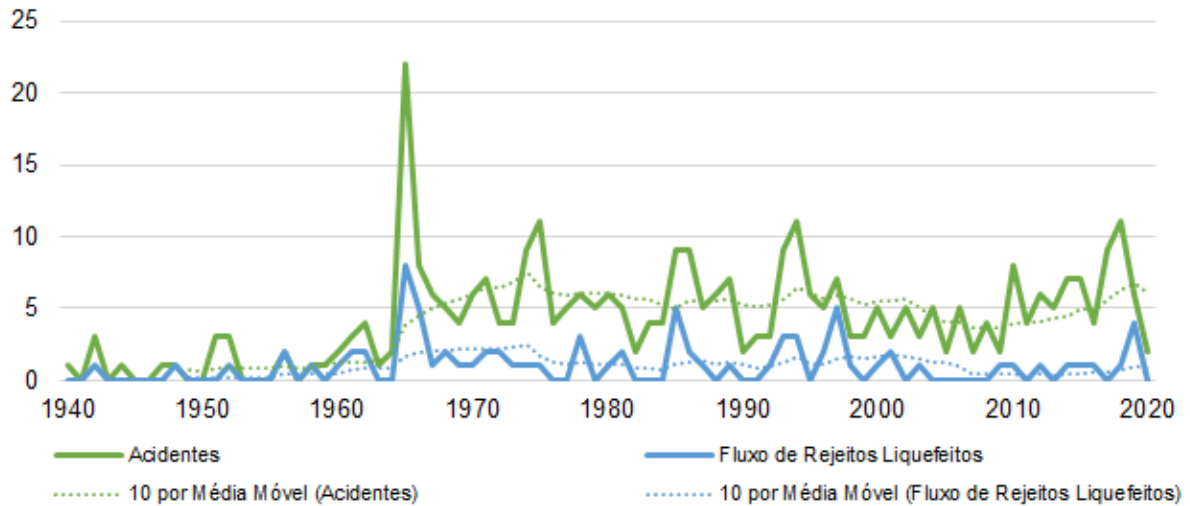
A análise estatística de 147 eventos de ruptura de barragens de rejeito na Europa realizada por Rico *et al.* (RICO et al., 2008a) observou que 25% dos acidentes ocorreram devido a causas meteorológicas, 14% por abalos sísmicos, 10% por gestão e operação, 7% por erosão interna, 6% por problemas da fundação, 6% por galgamento a 2% por subsidência de mina. Considerando os eventos mundiais, o autor observou que 85% das falhas ocorreram em barragens ativas, que 66% dessas rupturas ocorreram em estruturas alteadas a montante e que apenas 22,6% das rupturas aconteceram em grandes barragens (> 30 m). Comparando essa situação ao contexto nacional, é interessante se observar que as seis rupturas de grande

magnitude observadas (Córrego do Feijão – 2019, Fundão – 2015, Águas Claras – 2001, Pico de São Luiz – 1986 e Fernandinho – 1986) ocorreram em barragens de rejeito de ferro, e que houve fluxo de material liquefeito pós ruptura (MAIA NETO, 2006; MORGENSTERN et al., 2016; PARRA; LASMAR, 1987; PARRA; RAMOS, 1987; ROBERTSON et al., 2019b).

A compreensão do comportamento dos rejeitos pós ruptura é um fator importante para a análise de risco das estruturas de contenção de rejeitos, uma vez que está relacionado às consequências desses eventos. Esses eventos são resultados de inúmeros mecanismos de falha, e causam o derramamento de suspensões de água e rejeitos em uma grande variedade de texturas e propriedades físico-químicas (RICO, M., BENITO, G., DÍEZ-HERRERO, 2007). Em alguns dos eventos históricos de maiores consequências, pode ser observado que o material assumiu comportamento de fluidos não-Newtonianos. Porém, é observada uma carência de trabalhos que analisam o comportamento pós ruptura e a possibilidade de fluxo de rejeitos (YU; TANG; CHEN, 2020).

Para melhor compreender o risco inerente a essas estruturas, então, é possível analisar a base de dados históricos de rupturas de barragem, adaptada de Bowker & Chambers (BOWKER; CHAMBERS, 2015). Para melhor compreensão dos efeitos do comportamento reológico de materiais, os acidentes foram analisados de duas formas diferentes, como o número total de eventos e os eventos em que foi observado fluxo de rejeitos. A Figura A 1 apresenta a série histórica das rupturas de barragem observadas de 1940 até março de 2020, assim como a média móvel de 10 anos, divididas em rupturas totais e rupturas em fluxo. Destaca-se que a tendência de ambas as séries é bastante similar ao longo dos anos. Pode ser observado que o número de acidentes aumentou drasticamente na década de 60, o que coincide com o aumento do número de barragens de rejeito devido ao aumento da preocupação ambiental. As rupturas então permaneceram em uma constância entre os anos de 1970 e 2000, após o qual foi observado decréscimo nos acidentes relatados. Porém, em seguida, o número de acidentes voltou a aumentar.

Figura A 1: Série histórica de acidentes de barragens de rejeito no mundo.

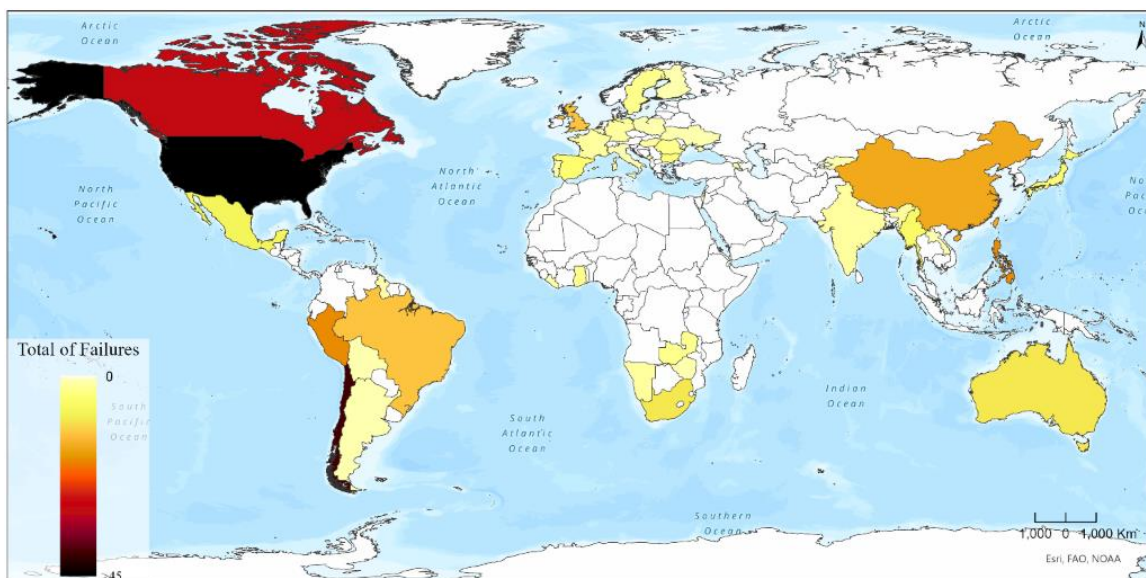


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura A 2 apresenta a distribuição geográfica das rupturas de barragens de rejeito registrados. Para a totalidade de eventos, observa-se que é o país com registro de mais rupturas é os Estados Unidos, com 114 do total de 356 acidentes (32%), seguido pelo Chile com 40 eventos (11%) e o Canadá com 30 (9%). Comparando os resultados obtidos com aqueles de Rico et al. (RICO et al., 2008a), observa-se que os Estados Unidos ainda é o país com maior número de rupturas, porém com decréscimo no número de acidentes totais (39% a 32%). Deve ser dada especial atenção, porém, ao acréscimo de rupturas no Canadá (de 3,4% para 9%). O Brasil apresentou um total de 13 rupturas de barragem de rejeitos registrada, correspondendo então a 3,6% por acidentes mundiais.

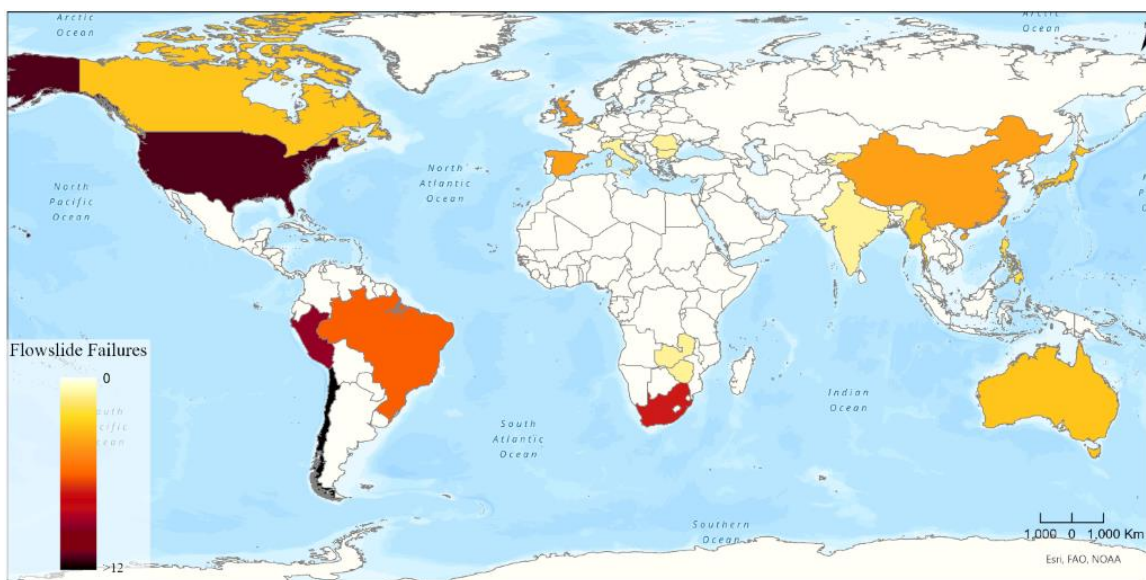
Para eventos com comportamento de fluxo pós ruptura, apresentados na Figura A 3, observamos que uma tendência diferente. O Chile é o país com maior número de casos de fluxo de material liquefeito, com 17 dos 82 acidentes (21%), o que pode ser explicado pelo histórico de rupturas por liquefação sísmica no país. Em seguida, encontra-se os Estados Unidos, com 13% dos eventos, e o Peru, com 10%. O Brasil apresentou 5 eventos registrados, na literatura, com a ocorrência de fluxo de rejeitos liquefeitos e, portanto, corresponde a 6% dos acidentes mundiais.

Figura A 2: Distribuição geográfica de acidentes de barragens de rejeitos no mundo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A 3: Distribuição geográfica de acidentes de barragens com registro de fluxo de rejeitos liquefeito.

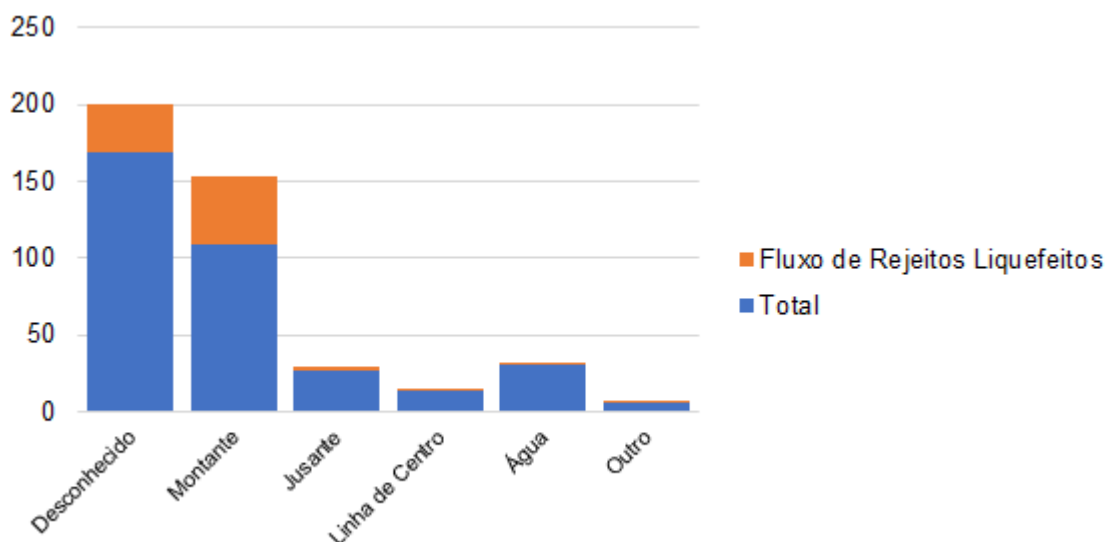


Fonte: Elaborado pela autora.

Outro fator importante na compreensão de riscos associados a barragens de rejeitos é o método de construção da estrutura, geralmente construída por alteamentos a montante, jusante ou linha de centro. A Figura A 4 apresenta a distribuição do número de acidentes pelo método de construção da estrutura, sendo discriminados ainda os acidentes em que foi observado fluxo de rejeitos liquefeitos. As barragens a montante, então, estão associadas à maioria das rupturas em que o método construtivo foi descrito (58%), como foi também observado por outros autores (CONCHA

LARRAURI; LALL, 2018; RICO et al., 2008b). Considerando apenas os eventos em que foi observado fluxo de rejeitos, o método de montante está associado a um risco ainda mais elevado, e corresponde a 88% dos acidentes com método construtivo registrado. Também é importante notar que, dos acidentes em estruturas construídas a montante, 40% apresentaram fluxo de rejeitos pós ruptura.

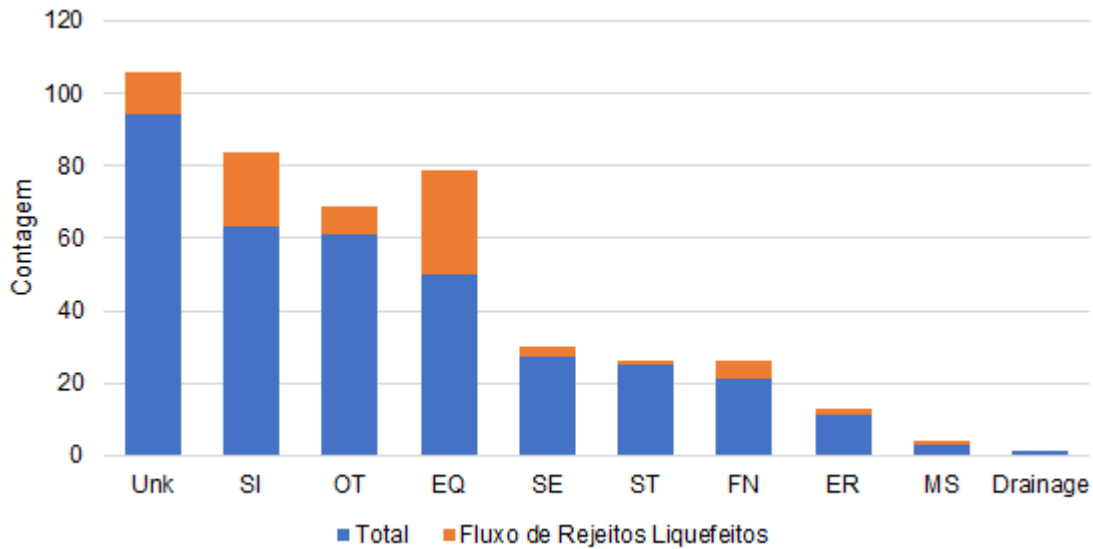
Figura A 4: Distribuição de acidentes de barragens de rejeito pelo método de construção da estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura A 5 apresenta a distribuição do número de acidentes a partir da causa definida como principal para a falha da barragem. É importante salientar que o entendimento de uma ruptura a partir de uma causa única é uma simplificação, uma vez que grandes acidentes são geralmente causados por árvores de eventos, porém é importante para o desenvolvimento de estudos. Para os eventos totais, as três principais causas conhecidas de falhas em barragens de rejeitos é Instabilidade de taludes (24%), galgamento (23%) e terremotos (19%), com a maioria das falhas tendo causa indeterminada. Para as rupturas com fluxo liquefeito, a ordem das causas é ligeiramente alterada e a principal causa é terremotos (41%), seguido por instabilidade de taludes (30%) e galgamento (10%).

Figura A 5: Distribuição de acidentes de barragens de rejeito pelo tipo de falha da estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A compreensão do comportamento dos rejeitos do reservatório pós ruptura é de grande importância para o desenvolvimento da análise de efeitos de modo de falha (*fmea failure mode effect analysis*). Assim, a análise de eventos históricos de fluxo liquefeito de rejeitos é importante para o desenvolvimento de estudos de brecha em barragens de rejeitos. Podemos observar, portanto, que as barragens construídas a montante apresentam uma maior vulnerabilidade para rupturas com fluxo, com cerca de 40% das falhas resultando em corridas de massa. Isso concorda com a maior vulnerabilidade dessas estruturas à liquefação do reservatório. Além disso, algumas causas de falha são mais prováveis de fluxo de rejeitos liquefeitos. Assim, foi observado que 58% dos eventos causados por terremotos e 33% dos eventos devido a instabilidade de taludes resultaram em corrida de massa, sendo que apenas esse fenômeno só ocorreu em 4% das falhas estruturais.

Outro aspecto importante para a análise de risco de barragens de rejeito é a avaliação se o risco associado a essas estruturas é tolerável, entendendo-se por isso um nível que a sociedade consegue tolerar para assegurar seus benefícios (ZHANG et al., 2015). A determinação da probabilidade anual de falhas baseadas em dados históricos de acidentes é uma maneira imprecisa de analisar o projeto dessas estruturas, porém é importante. Vários autores propuseram as denominadas curvas de tolerabilidade para avaliação dos riscos de estruturas, a partir da comparação da probabilidade de falhas e a consequência de acidentes (BAECHER, 2016; HUANG;



GARCÍA, 1998; WHITMAN, 1984). Essas curvas, também chamadas de curvas F-N, resumem a relação entre as frequências de falhas e o número de vidas perdidas ou o custo monetário dos acidentes. Portanto, são uma boa maneira de comparar risco associado de diferentes estruturas (BAECHER; CHRISTIAN, 2003). Whitman (WHITMAN, 1984) apresentou uma possível diretriz para a classificação do risco associado a diferentes projetos de engenharia em aceitável tolerável ou intolerável, que será utilizado nesse trabalho.

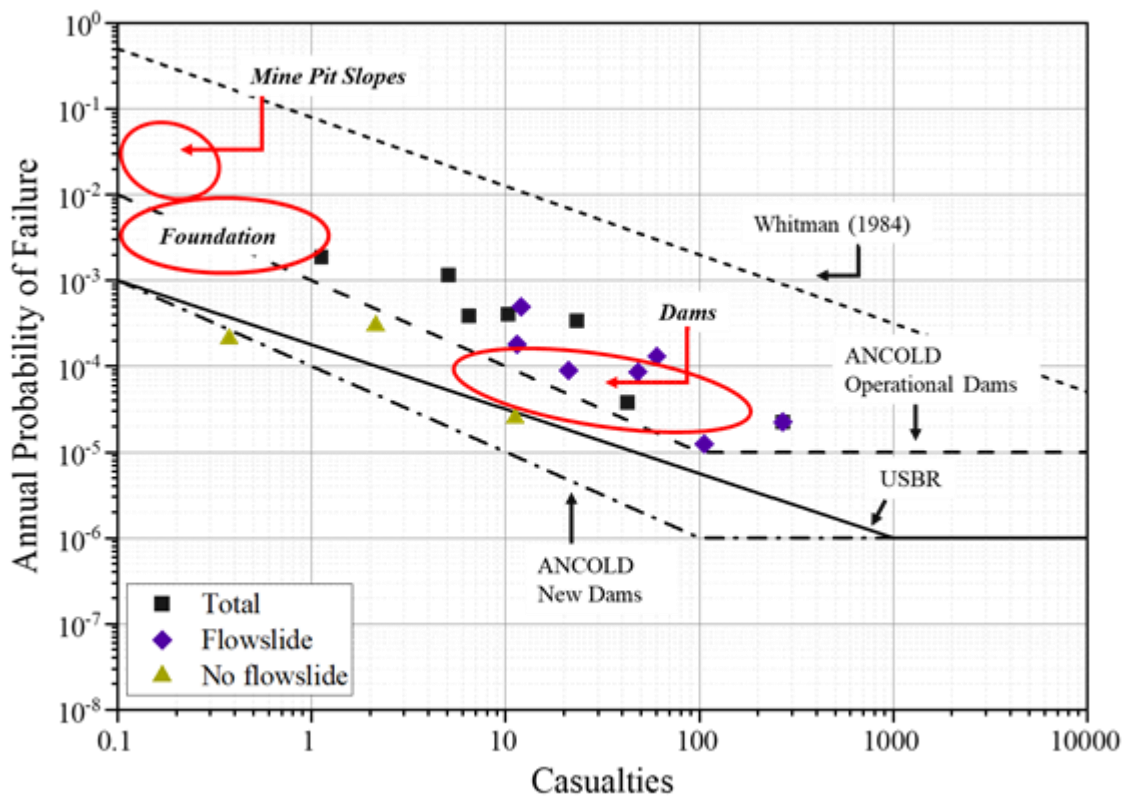
Assim, avalia-se a tolerabilidade da probabilidade anual de falha de barragens de rejeitos nos últimos 70 anos (a partir de 1950), comparando o risco encontrado pelo risco aceitável de diferentes estruturas e as diretrizes da ANCOLD (2003). Em especial, o risco nacional foi ainda comparado com os riscos de alguns dos países com mais fatalidades por barragens de rejeito – Itália, China, Chile, Austrália e Estados Unidos -, além da realidade global. Para isso, a probabilidade de falha foi calculada a partir da divisão das falhas registradas de cada país dividido pelo número de barragens de rejeito cadastrados nas respectivas agências nacionais ou segundo informações encontradas na literatura. Devido à falta de dados sobre a construção das barragens de rejeito, foi estimada uma média de 50 anos de idade de todas as estruturas, considerando que foi nos anos 1970 que começaram a se aplicar a geotecnia para problemas de deposição (MORGENSTERN et al., 2016). Como consequência foi considerada a média por evento de fatalidades. Para o número de barragens total, considera-se o número de 18401 barragens de rejeito no mundo, conforme Azam & Li (AZAM; LI, 2010). A Tabela A 1, então, apresenta os valores encontrados para o risco anual de falhas do Brasil, Chile e Estados Unidos, comparados com os acidentes totais.

Tabela A 1: Risco anual de acidentes de barragens de rejeito.

Country	Total of Dams	Source	Total		Flow		No-Flow	
			Average Loss	Failure Probability	Average Loss	Failure Probability	Average Loss	Failure Probability
Brazil	762	ANM	23	3.41E-04	60	1.31E-04	0	2.10E-04
Italy	893	ISPRA	269	2.24E-05	269	2.24E-05	1	0.0E+00
China	8000	Reuters	43	3.75E-05	106	1.25E-05	11	2.50E-05
Chile	693	SERNAGEOMIN	5	1.15E-03	12	4.91E-04	0	6.64E-04
Australia	700	*	10	4.00E-04	48	8.57E-05	0	3.14E-04
United States	1218	NID	1	1.87E-03	11	1.81E-04	0	1.69E-03
World	18401	Azam & Li (2010)	6	3.87E-04	21	8.91E-05	2	2.98E-04

Comparando esses resultados com as chamadas curvas de tolerabilidade, então, encontramos a Figura A 6. Podemos observar que as falhas de barragens de rejeito em todos os quatro casos estudados estão acima do limite de tolerabilidade de definidos em códigos mais atuais. Os dados estão de acordo com as curvas estimadas por Whitman (1984), porém, o que demonstra a diminuição da tolerância a riscos das sociedades nas últimas décadas. Devido à importância temporal dessas curvas, então, também foi avaliada a tolerabilidade dessas estruturas para a década de 2010, apresentadas na Figura A 7.

Figura A 6: Risco anual de barragens de rejeitos por tipo de ruptura observada nos 70 anos de dados.

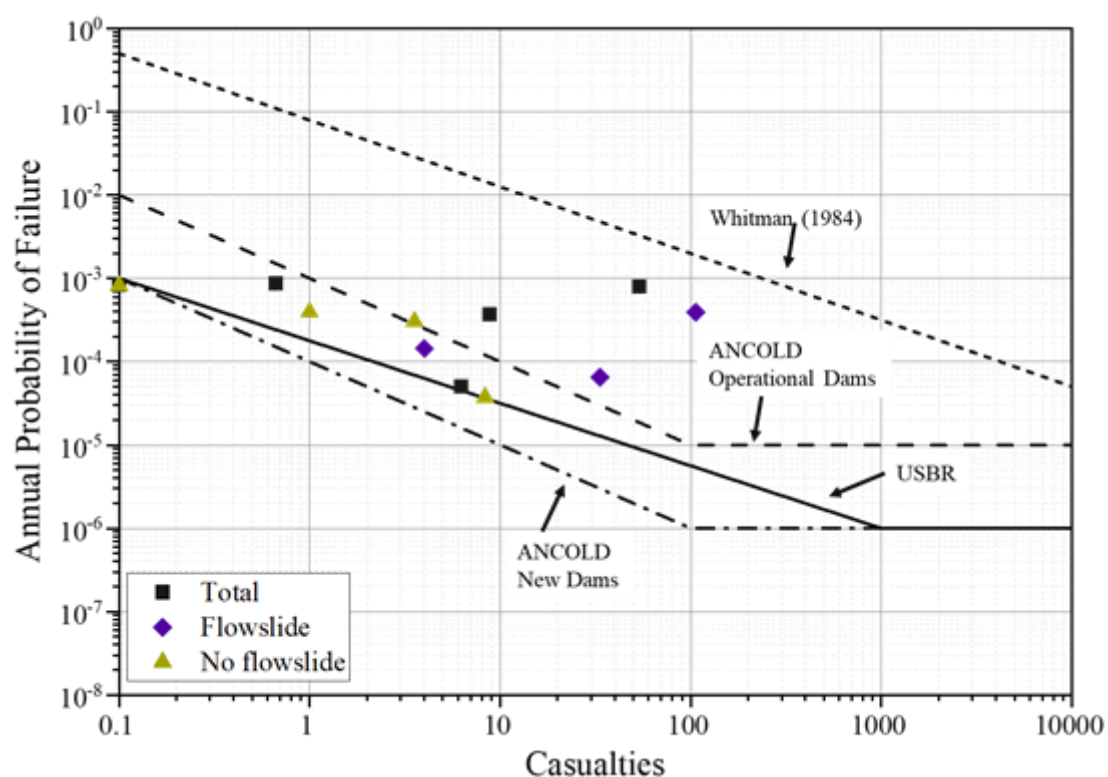


Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela A 2: Risco anual de acidentes de barragens de rejeito na década de 2010s.

Country	Total of Dams	Source	Total		Flow		No-Flow	
			Average Loss	Failure Probability	Average Loss	Failure Probability	Average Loss	Failure Probability
Brazil	762	ANM	54	7.87E-04	106	3.94E-04	1	3.94E-04
Italy	893	ISPRA	0	1.12E-06	0	1.12E-06	0	0.0E+00
China	8000	Reuters	6	5.00E-05	0	1.25E-05	8	3.75E-05
Chile	693	SERNAGEOMIN	1	8.66E-04	4	1.44E-04	0	7.22E-04
Australia	700	*	0	5.71E-04	0	1.43E-06	0	5.70E-04
United States	1218	NID	0	8.21E-04	0	8.21E-07	0	8.20E-04
World	18401	Azam & Li (2010)	9	3.70E-04	33	6.52E-05	4	3.04E-04

Figura A 7: Risco anual de barragens de rejeitos por tipo de ruptura observada na década de 2010.



Fonte: Elaborado pela autora.

É interessante notar que, na última década, o risco associado a barragens de rejeito se alterou bastante. Em geral, os países desenvolvidos estudados apresentaram um decréscimo em riscos, com Itália, Austrália e Estados Unidos não apresentando fatalidades por rupturas de rejeito. Além disso, a China e o Chile apresentam riscos abaixo do limite tolerável. Portanto, apesar dos dados globais indicarem inadequação, apenas o Brasil apresenta risco acima das curvas de tolerabilidade para barragens operacionais pela ANCOLD (2003). Pelos parâmetros da USBR, porém, todos os quatro países que apresentaram fatalidade na década de 2010s estão inadequados. Para as rupturas sem liquefação, observamos que todos os países encontram-se

abaixo da curva de tolerabilidade da ANCOLD (2003) para estruturas já construídas, e apenas o Brasil, a China e o mundo apresentam-se acima das curvas de tolerabilidade da USBR e da ANCOLD (2003) para barragens novas. Para eventos em que foi registrado fluxo de rejeitos, porém, a distribuição é similar às barragens totais, com apenas Brasil e o mundo acima da curva de tolerabilidade da ANCOLD para estruturas antigas, e o Chile acima das curvas da USBR e da ANCOLD (2003) novos projetos. Ainda é importante notar que, por incluir menos eventos na média de fatalidade, o risco associado a rupturas com fluxo é superior ao risco total. Assim, é essencial o estudo desse comportamento mais detalhadamente para o aumento da segurança associada a barragens de rejeito.

Segundo Morgenstern (MORGENSTERN, 2018) as recentes rupturas de grandes barragens de rejeitos em regiões do mundo tecnicamente avançadas, operadas por organizações de mineração experientes e projetadas com engenheiros de consultoria reconhecidos, criou uma crise em perda de confiança com essas estruturas. A partir da avaliação do risco dos das barragens de rejeito apresentados, vemos que o perigo envolvido com essas obras e seu custo-benefício devem ser melhor avaliados. É importante, então, a discussão acerca dos objetivos e prioridades da sociedade, uma vez que existe perigo inerente, porém os critérios de risco não podem se tornar inflexíveis e irrealistas (Whitman, 1984).

## A.2 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi estabelecida pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e abrange barragens de água e de mineração. A PNSB abrange barragens em que sua altura máxima (diferença entre o ponto mais baixo da fundação e a crista) igual ou maior que 15,0 m, capacidade total do reservatório igual ou maior a 3.000.000 m<sup>3</sup> e/ou que contenha resíduos perigosos conforme a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004)

As estruturas minerárias são de responsabilidade da Agência Nacional de Mineração (ANM), e, portanto, segundo a PNSB é a responsável pela fiscalização de barragens de rejeitos de mineração. Assim, a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 no DNPM (atual ANM) estabelece em seu Art. 1º

*“A sistemática de cadastramento das barragens fiscalizadas pelo DNPM, a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração são aqueles definidos nesta Portaria.” (DNPM et al., 2017)*

É importante destacar que, no âmbito da PNSB, o risco é entendido como referindo apenas às características e o estado de conservação da estrutura, sendo as consequências do evento relacionados ao seu dano potencial. Apesar de contrária a definição de risco internacionalmente aceita, é essa a definição que será usada nesse subitem.

Pode-se separar o PNSB em três grandes setores. Primeiramente, observa-se o objetivo de transparência a partir da obrigatoriedade do cadastramento e atualização das estruturas de contenção de rejeitos no Sistema Integrado de Segurança de Gestão de Barragens de Mineração (SIGSBM). Além disso, estabelece a gestão de risco a partir da utilização da matriz de classificação, que envolve a classificação de risco das estruturas e seu dano potencial associado. Por fim, obriga a implementação de sistemas de monitoramento das condições da estrutura disponíveis para as Defesas Civas, conforme o Dano Potencial Associado da barragem.

Para a classificação da barragem de rejeito quanto à Categoria de Risco, em baixo, médio ou alto, é utilizada uma matriz que consiste no somatório de fatores que consideram suas características técnicas, seu estado de conservação e o plano de segurança. Quanto às características técnicas, são fatores pontuados na matriz de classificação a sua geometria, sua vazão de projeto, seu método construtivo e sua instrumentação para monitoramento. Destaca-se que quanto ao método construtivo, a barragem pode ser construída em etapa única, ou alteada a jusante, por linha de centro ou a montante, sendo esta última considerada menos segura. Além disso, o estado de conservação da estrutura deve ser avaliado, e essa avaliação é realizada por meio de inspeções de segurança com periodicidade regulada pela lei. Essas inspeções, então, avaliam a confiabilidade das estruturas extravasoras, a percolação na barragem, as deformações e recalques no maciço e a deterioração dos taludes.

O Dano Potencial Associado (DPA) também é classificado em baixo, médio ou alto, conforme o mapa de inundação determinado. A elaboração do mapa de inundação, por estar acoplado ao estudo da reologia dos rejeitos pós ruptura, objeto desse trabalho, será tratada com maior detalhamento no subitem 0. Para a classificação, então, deve ser determinado o volume total do reservatório, assim como a existência de população dentro do mapa de inundação, e os impactos ambiental e sócio-econômico associados à ruptura. O mapa de inundação é utilizado para a construção do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), para barragens de DPA alto ou médio com ocupação humana permanente. A Figura A 8 resume a utilização do mapa de inundação para a gestão de riscos conforme inscrito na política de segurança de barragens.

Figura A 8: O mapa de inundação na gestão de riscos da política de segurança de barragens



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante destacar que o PNSB se baseia em um mapa de inundação determinado a partir de técnicas complexas, baseadas na reologia, para a determinação de possíveis danos e rotas de fuga. Porém, o plano falha na avaliação de riscos das estruturas para tomada de decisões informadas. Essa associa as consequências potenciais a suas probabilidades associadas, levando em conta fatores que afetam tanto a consequência quanto a probabilidade de ruptura (NBR ISSO/ESC 31010, 2012). Devem ser consideradas além da consequência da falha, a qualidade e quantidade de dados existentes, de maneira a indicar os indicadores de potencial de falha (ANCOLD, 2012). Assim, é possível ranquear e priorizar ações para mitigação de riscos. A classificação quanto ao risco associado no PNSB, porém, considera

apenas a geometria da estrutura e uma análise qualitativa da probabilidade de falha a partir de métodos observacionais e baseada no estado de conservação das estruturas.

#### A.2.1 Mapa de Inundação

O mapa de inundação é obtido a partir da modelagem no estudo de *dam break*, e deve delimitar as áreas potencialmente afetadas no caso da ruptura de uma barragem. A partir desse, é possível prever possíveis consequências de acidentes, o que auxilia na tomada de decisões quanto à segurança da barragem e no planejamento de planos de notificação e evacuação de áreas afetadas. A Portaria nº 70.389 (2017) indica que esse documento deve detalhar as áreas a serem inundadas, os tempos de viagem da frente de onda, possíveis impactos ambientais e locais críticos, como corpos hídricos. Além disso, o mapa de inundação deve delimitar a Zona de Auto Salvamento (ZAS), área atingida pela onda em menos de trinta minutos ou a menos de 10 km da barragem, e a Zona de Segurança Secundária (ZSS), região constante no mapa de inundação, mas além da ZAS. Nota-se que, para a ZAS, o alerta à população é responsabilidade do empreendedor, que deve instalar mecanismos de alerta e fazer treinamentos com a população.

As diretrizes para o estudo de inundação, dentro outras, foram mais recentemente alteradas pela Resolução nº 32, de 11 de Maio de 2020. Primeiramente, é exigido que o mapa de inundação seja feito para todas as barragens de mineração, para classificá-las quanto ao dano potencial associado e dar suporte ao PAEBM. Quando necessário, estruturas próximas devem ser analisadas em conjunto. Além disso, requer para a simulação que *“O deslocamento da frente de onda [...] considerando, minimamente, modelos 2D contemplando o acréscimo de materiais e sedimentos que a onda carreará em seu deslocamento [...]”* (ANM, 2020). Desse modo, compreende-se que a nova resolução exige a utilização de modelos reológicos que considerem o material liberado como uma suspensão, em que os rejeitos são carregados durante o fluxo da onda.

Nota-se que a obrigatoriedade de utilização da reologia de rejeitos pode ser uma tendência internacional. As características reológicas do material não são referenciado em legislações mais antigas, como a do Chile (MINISTRY OF MINING, 2007) British Columbia no Canadá (MINISTRY OF ENERGY AND MINES OF

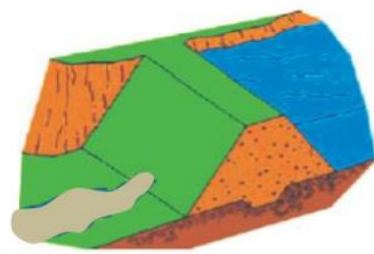
BRITISH COLUMBIA, 2008), porém já aparece nas diretrizes de Alberta no Canadá (ALBERTA, 2018). Para o caso da Austrália, o Guia em Barragens de Solos e Rejeitos da ANCOLD (ANCOLD, 2012) admite que simulações que consideram o fluxo de lama é complexo e envolve modelos mais sofisticados. Por isso, indica que a suposição conservadora de rejeitos líquidos seja a mais apropriada por questões de segurança, exceto quando justificável a consideração da suspensão, a partir de uma considerável avaliação que proporcione um cenário realista.

Para a caracterização do reservatório segundo a Resolução nº (ANM, 2020) são solicitadas caracterização geotécnica, físico-química e mineralógica do material. Destaca-se que as características de granulometria e peso específico dos sólidos e natural do material, requeridos pela legislação, são importantes para a compreensão do comportamento reológico do material em fluxo. Além disso, são requeridos ensaios para a determinação da resistência do reservatório, como o ângulo de atrito dos rejeitos e identificação de superfícies preferenciais de ruptura. O empreendedor ainda deve realizar a classificação do reservatório quanto aos resíduos armazenados (ABNT, 2004) e atualizar a sua batimetria regularmente. O tipo de ruptura é também um ponto chave para o derramamento de rejeitos em casos de acidentes. Isso porque os modos de ruptura diferem-se quanto ao tempo de desenvolvimento e o volume mobilizável, o que influencia no comportamento pós-ruptura.

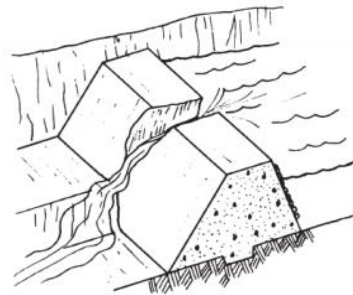
A Figura A 9 apresenta modos de ruptura globais de barragens de rejeitos de mineração, que podem acarretar vazamento do reservatório. Nota-se que os mecanismos apresentados não exaurem todas as possibilidades de falha, e alguns modos de falha podem não ser verossímeis dependendo do estágio da estrutura e de suas características. A ruptura, nos casos apresentados, pode se desenvolver progressivamente, como para o caso de erosão, ou instantaneamente, como para o caso de liquefação.

Figura A 9: Modos de ruptura globais de barragens de rejeitos.

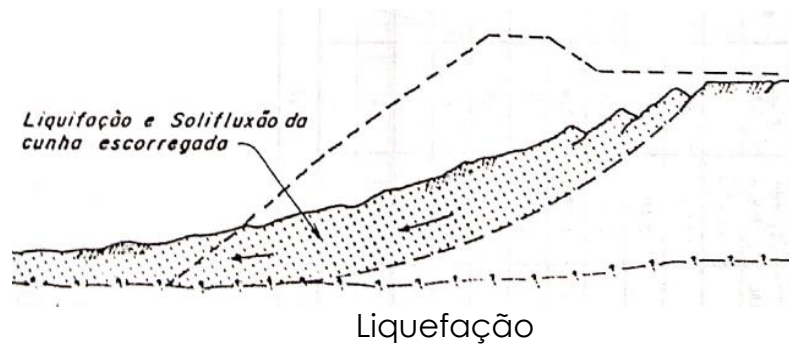




piping



Abertura de Brecha



Liquefação

Fonte: Elaborado pela autora.

Não há ainda uma metodologia definida para a realização dos estudos de ruptura considerando a diferença do comportamento reológico típico das suspensões de rejeitos para cada tipo de falha. A Resolução nº 32 (ANM, 2020) indica que o mapa de inundação deve considerar o cenário de maior dano. Para o caso de rupturas por liquefação, é indicado ainda que deve ser considerado todo o maciço e o reservatório como volume mobilizável. Para uma análise de risco mais complexa considerando o modo de ruptura e seus respectivos efeitos, é indicado a utilização do chamado *Failure Mode Effect Analysis* (FMEA) (DOS SANTOS; CALDEIRA; SERRA, 2012).

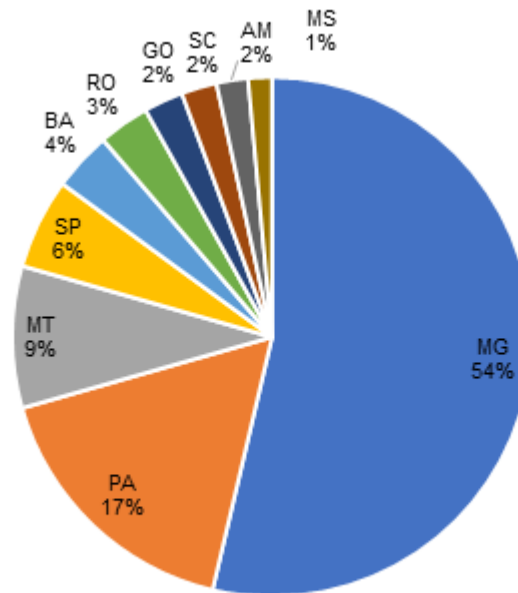
#### A.2.2 Barragens de rejeito no Brasil

Outra herança do Plano Nacional de Segurança de Barragens é o cadastramento das estruturas em um Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens (SNISB). Nesse subitem, então, são apresentadas as principais características das barragens de rejeitos que se enquadram na Política Nacional de Segurança de Barragens.

A Agência Nacional de Mineração (2019) apresentou um registro de 425 barragens de rejeitos de mineração que se enquadram na PNSB. Conforme mostrado na Figura A 10, a maior parte dessas barragens, 54% delas, estão localizadas no estado de

Minas Gerais, historicamente um estado mineiro. As outras 46% estão mais igualmente divididas, sendo o segundo estado com mais barragens o Pará, com 17%, seguido pelo Mato Grosso com 9%, São Paulo com 6% e Bahia com 4%. Os outros estados, juntos, possuem apenas 10% das barragens do país.

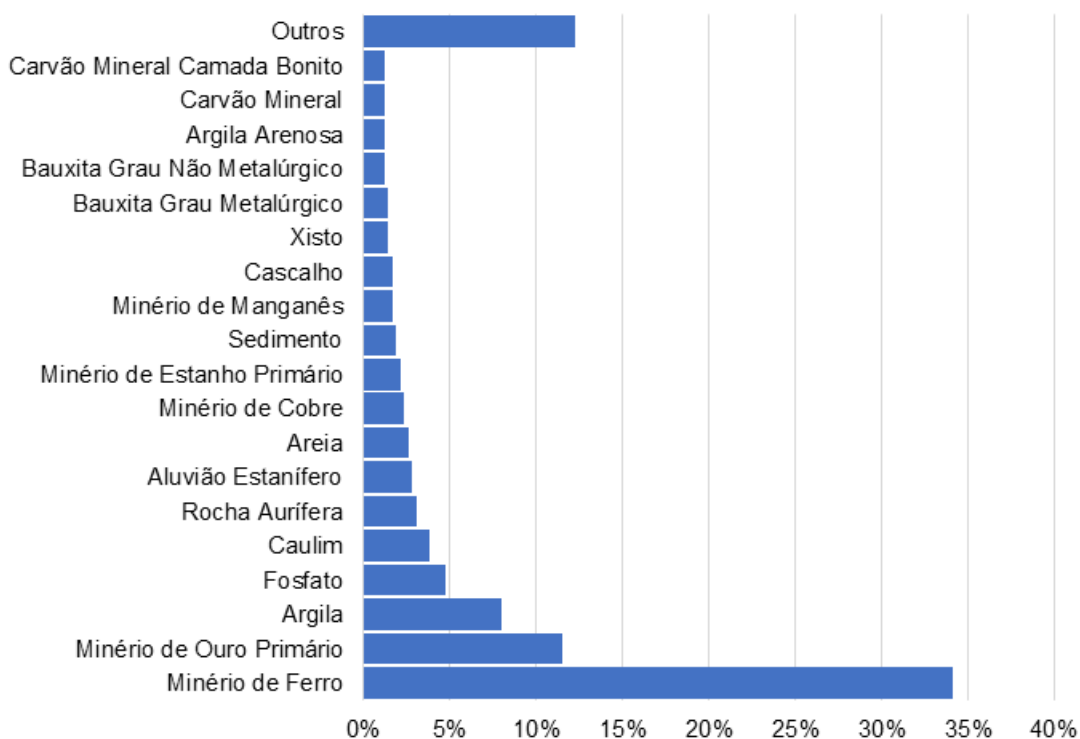
Figura A 10: distribuição das barragens de rejeito no território nacional



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto à exploração mineral, observamos na Figura A 11 que mais de 34% das barragens nacionais são barramentos para rejeito de minério de ferro, seguido pelo Ouro Primário com 12% e pela argila com 8%. Destaca-se ainda a Bauxita, que em suas diferentes formas representam cerca de 2% dos rejeitos de mineração depositados em barragens enquadradas na PNSB.

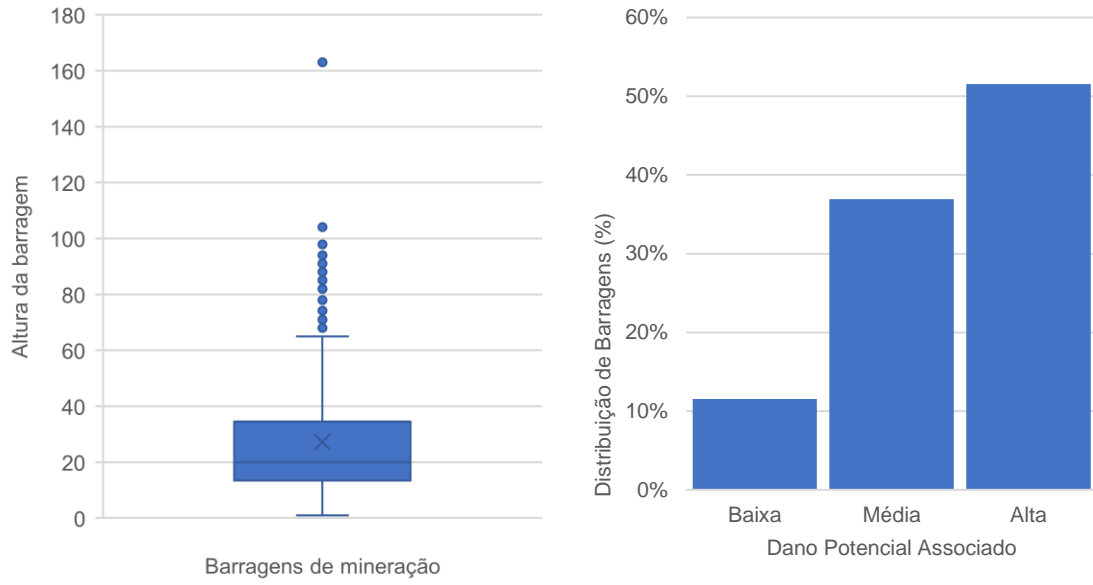
Figura A 11: Distribuição das barragens de rejeito por tipo de minério.



Fonte: Elaborado pela autora.

Outro ponto importante a ser avaliado, principalmente no que diz respeito ao comportamento do material durante a ruptura, é a altura máxima dessas estruturas. Isso porque as tensões normais efetivas presentes nos materiais influenciam em seu comportamento durante o fluxo. Como podemos observar na Figura A 12 (a), a média das barragens de rejeito descritas de encontra em torno de 30m de altura, com 90% das barragens abaixo de 50 m. Porém, observamos alguns outliers, com barragens de grande porte que chegam a mais de 100 m de altura. Além disso, a Figura A 12 (b) apresenta que 52% dessas estruturas apresentam Dano Potencial Associado alto, e apenas 12% das grandes barragens de rejeitos do Brasil apresentam Dano Potencial Associado Baixo.

Figura A 12: Distribuição das barragens de rejeitos no Brasil por (a) altura da barragem e (b) Dano Potencial Associado.



Fonte: Elaborado pela autora.

## ANEXO B – ENSAIOS DE REOLOGIA DE REJEITOS NA LITERATURA

Tabela B 1 – Resumo dos ensaios de reologia de rejeitos encontrados na literatura

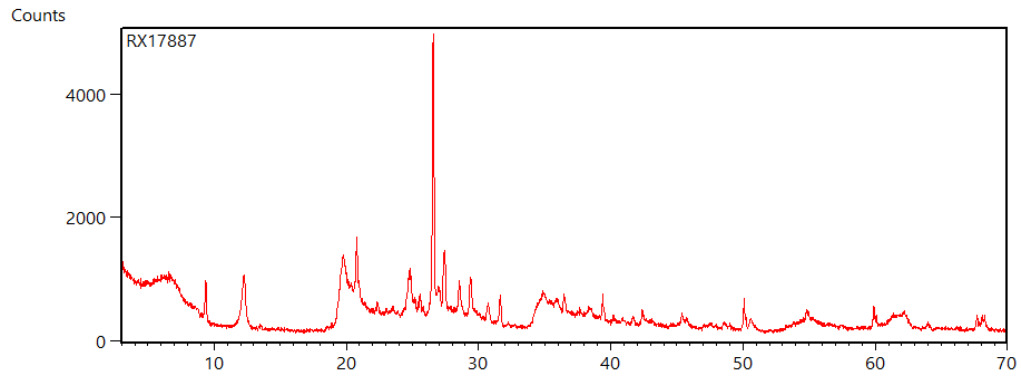
<b>Autores</b>	<b>Rejeito</b>	<b>Teor de Sólidos</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Geometria de Ensaio</b>	<b>Método de ensaio - reômetro rotacional</b>	<b>Modelo Reológico</b>
(SOFRÁ; BOGER, 2002)	Diversos (Lava Vermelha, Níquel, Cobre, Manganês)	-	Bombeamento e Disposição	Vane, capilar	Rampa de Taxa de Cisalhamento, histerese	Bingham
(GAWU; FOURIE, 2004)	Ouro, Zinco e Areias Minerais	20%-50% w/w	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane	Tensão de Escoamento	Tensão de Escoamento
(KWAK; JAMES; KLEIN, 2005)	Ouro	32-40% (w/s)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Cilindros Concêntricos, vane, flume	Rampa de Tensão de Cisalhamento, Taxa de Cisalhamento Constante	Bingham.
(FITTON; CHRYSS; BHATTACHARYA, 2006)	Ouro	45-65% w/w	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Flume	-	Bingham plastic Power-law Herschel-Bulkley
(WICKLAND et al., 2006)	Ouro	26-51% w/w	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Cilindros concêntricos	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Casson
(OSORIO; ARAÚJO; VALADÃO, 2008)	Ferro	58-82% (w/w)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane, Flume	Rampa de Taxa de Cisalhamento	-
(ALEJO, BONIFACIO; BARRIENTOS, 2009)	Cobre	10-30% V/V	Processamento	Cilindros Concêntricos	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(BAKKER, C. W.; MEYER, C. J.; DEGLON, 2009)	Níquel	25-60% w/w	Processamento	Cilindros Concêntricos	-	Herschel-Bulkley
(BOGER, 2009)	Diversos (Lama Vermelha, Argila, Areia, Manganês, Níquel)	18-85% w/w	Indeterminado	Vane, cilindros concêntricos e capilar	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(HENRIQUEZ; SIMMS, 2009)	Ouro	30-60% (w/s)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Placa-Placa	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(JEONG et al., 2010)	Ferro	25-41% (w/s)	Corrida de Massa	Cilindros Concêntricos	Taxa de Cisalhamento Constante Rampa de Taxa de Cisalhamento Histerese	Bingham Herschel-Bulkley

<b>Autores</b>	<b>Rejeito</b>	<b>Teor de Sólidos</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Geometria de Ensaio</b>	<b>Método de ensaio - reômetro rotacional</b>	<b>Modelo Reológico</b>
(SENAPATI; MISHRA, 2010)	Cobre	67.5-72% (w/w)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Indeterminado	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(ENGELS et al., 2011)	Cobre	57-68% w/w	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Flume, conduto tubular e couette	-	Bingham
(MCPHAIL; BECERRA; BARRERA, 2012)	Cobre	63-67% w/w	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane, bombeamento e flume	Tensão de Escoamento	Tensão de Escoamento
(MIZANI; HE; SIMMS, 2013)	Ouro	45% (v/v)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane, Slump	-	Bingham
(JEONG, 2014)	Ferro	-	Corrida de Massa	Cilindros Concêntricos	Taxa de Cisalhamento Constante Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(CHEN et al., 2015)	Carvão Mineral	39-45% w/w	Bombeamento	Couette e Conduto tubular	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(FAITLI; GOMBKÖT, 2015)	Diversos (Lama Vermelha, Cinzas Volantes, Sand Glass)	10-55% V/V	Bombeamento	Cilindros Concêntricos, capilar	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham Herschel-Bulckley
(GAO; FOURIE, 2015)	Ouro	-	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Flume, slump	-	Bingham
(WU; WANG; WANG, 2015)	Cobre	59-76 (w/w)	Bombeamento	Vane	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham Herschel-Bulckley
(ADIANSYAH et al., 2016)	Carvão Mineral	30-70% w/w	Bombeamento	Vane	Rampa de Taxa de Cisalhamento, Rampa de Tensão de Cisalhamento	Herschel-Bulckley
(MIZANI; SIMMS, 2016)	Ouro	45% (v/v)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane	Rampa de Taxa de Cisalhamento, Rampa de Tensão de Cisalhamento, Fluência, Relaxação	Coussot
(MERRILL et al., 2017)	Indeterminado	-	Bombeamento	Cilindros Concêntricos	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(MIZANI; SIMMS; WILSON, 2017)	Indeterminado	-	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Vane	Osc de Tensão, Rampa de Taxa de Cisalhamento, Relaxação	-

<b>Autores</b>	<b>Rejeito</b>	<b>Teor de Sólidos</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Geometria de Ensaio</b>	<b>Método de ensaio - reômetro rotacional</b>	<b>Modelo Reológico</b>
(SENAPATI; MISHRA, 2017)	Cobre	65–72% (w/w)	Bombeamento	Conduto tubular	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(PULLUM; BOGER; SOFRA, 2017)	Diversos	15-80% w/w	Bombeamento e Disposição	Vane e bombeamento	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(WANG et al., 2018)	Ouro, Cobre, Ferro	10-50% (w/w)	Otimização de Deposição de rejeitos espessados	Cilindros concêntricos	Rampa de Taxa de Cisalhamento	
(ADIGUZEL; BASCETIN, 2019)	Chumbo-Zinco	65-80% w/w	Bombeamento	Vane	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(JEONG, 2019)	Indeterminado Arenoso	34% (w/s)	Corrida de Massa	Queda de Bola	-	Bingham, bilinear, Herschel–Bulkley, Bingham modificado, and power law models
(JING et al., 2019)	Cobre	40% (v/v)	Corrida de Massa	Modelo Reduzido	-	-
(TRAMPUS, 2019)	Níquel	10-23% (w/w)	Processamento	Vane, Slump	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Herschel-Bulkley
(SÁNCHEZ-PERALTA et al., 2020)	Ouro	60-70% (w/w)	Corrida de Massa	Vane, flume	Rampa de Taxa de Cisalhamento	Bingham
(OLCAY et al., 2020)	Fosfato	55-75% (w/w)	Processamento e Disposição	Vane	Tensão de Escoamento	Bingham
(LEONG, 2021)	Ferro	58% (w/w)	Bombeamento e Disposição	Cone e Placa	Rampa de Taxa de Cisalhamento, Tensão de Escoamento	
(CHÁCARA, 2020)	Ferro	55-63% w/w	Corrida de Massa	Vane	Rampa de Taxa de Cisalhamento, Histerese, Osc de Tensão, Osc de Frequência	
(KUMAR; RAO, 2022)	Bauxita	67.57-72.46% (w/w)	Corrida de Massa	Placas Paralelas	Rampa de Taxa de Cisalhamento, Histerese	Herschel-Bulkley

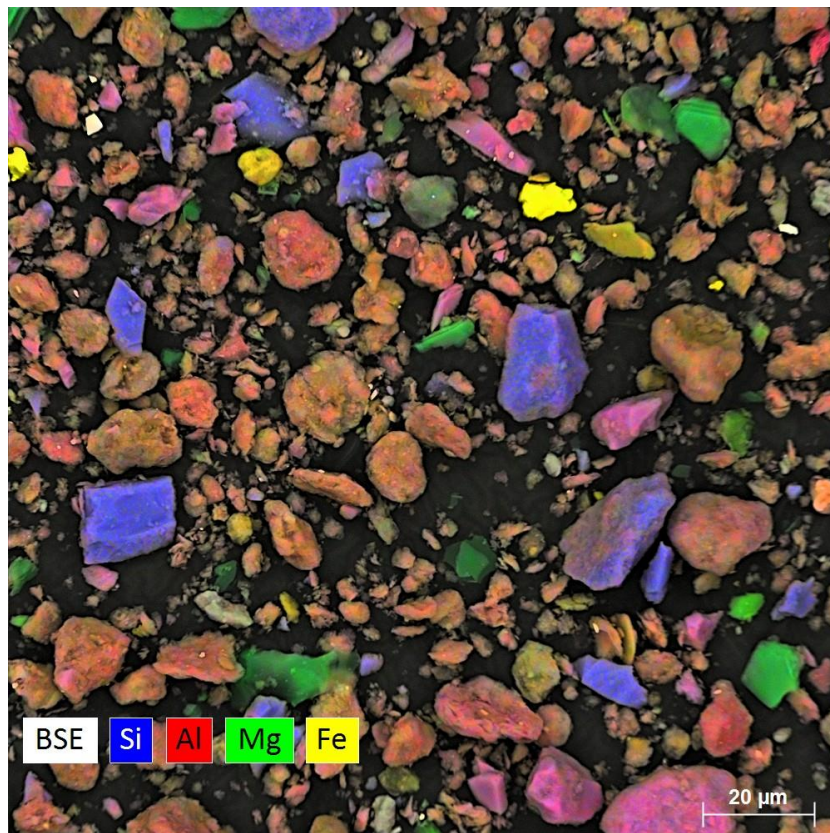
## ANEXO C – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

Figura C 1: Resultados do ensaio de Difração de Raio-X da Bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

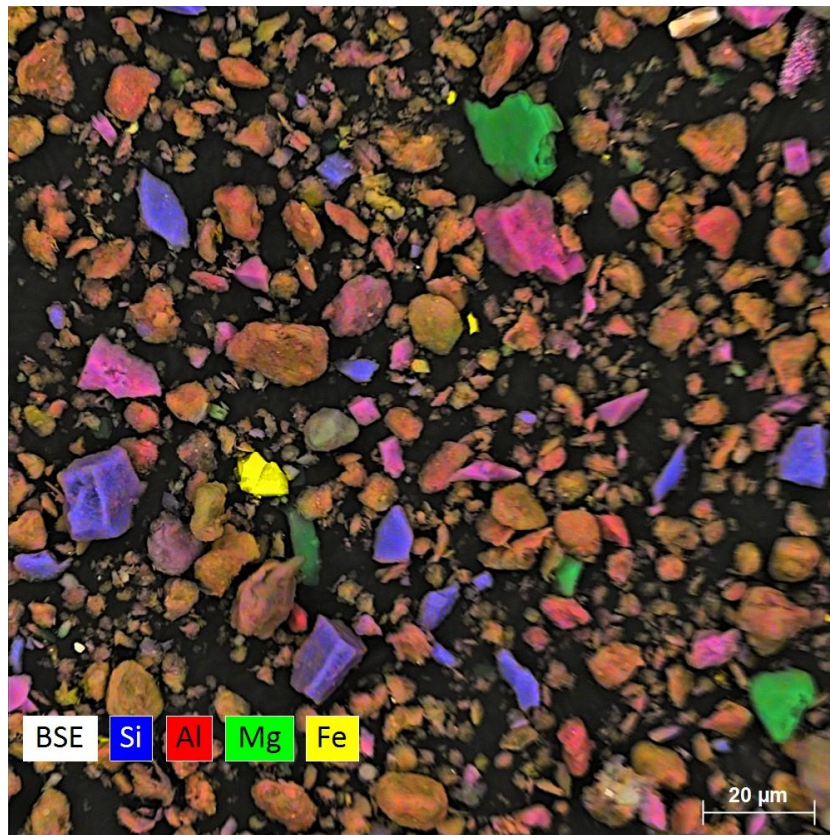
Figura C 2: Imagem de Microscopia Eletrônica com espectrometria da bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

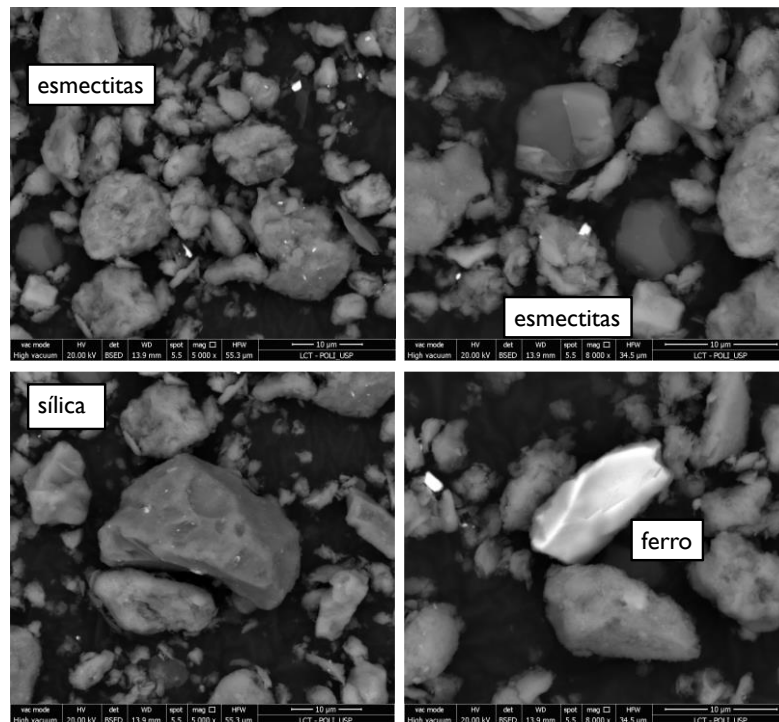


Figura C 3: Imagem de Microscopia Eletrônica com espectrometria da bentonita.



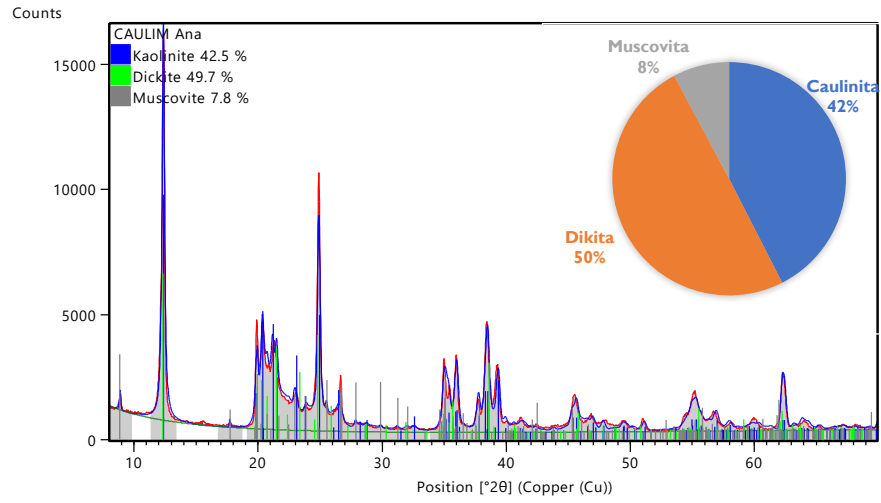
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 4: Detalhes das partículas de Bentonita em Microscopia Eletrônica.



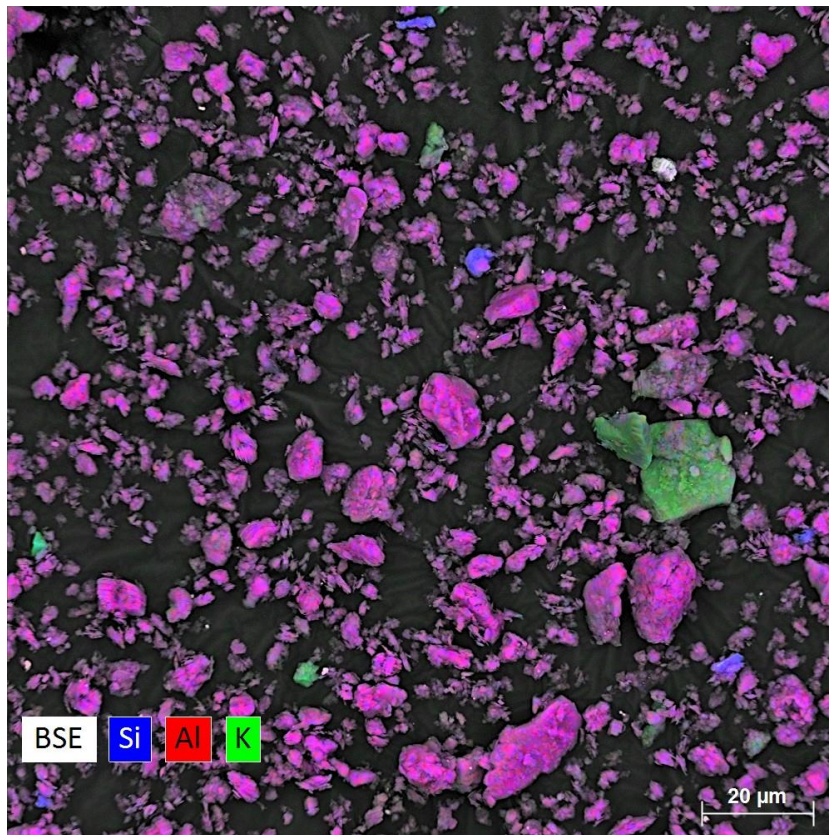
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 5: Resultados do ensaio de Difração de Raio-X do caulim.



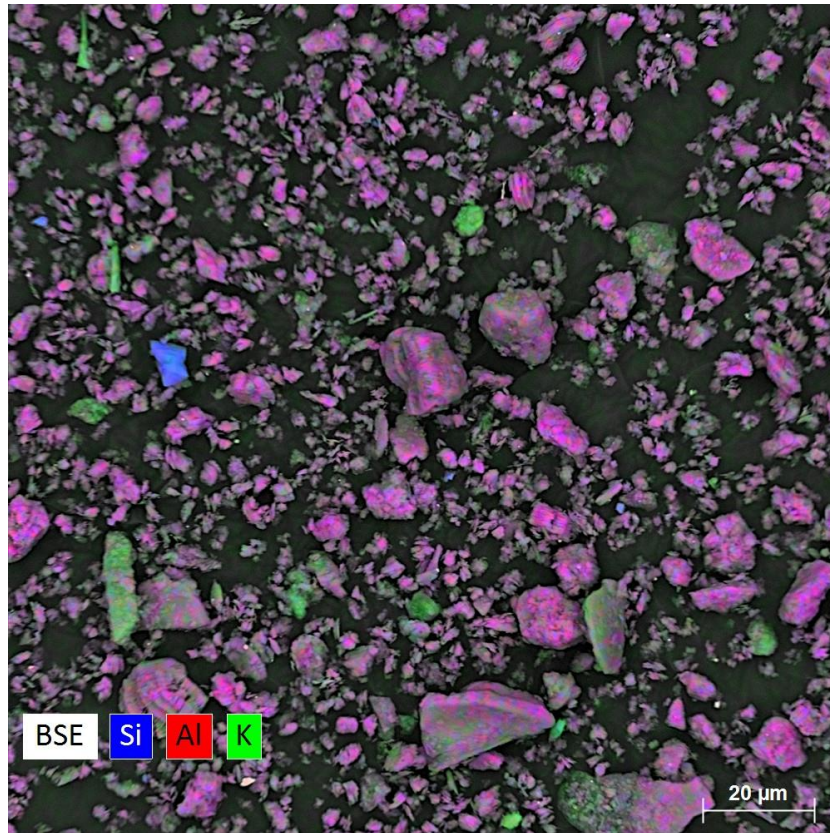
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 6: Imagem de Microscopia Eletrônica com espectrometria do caulim.



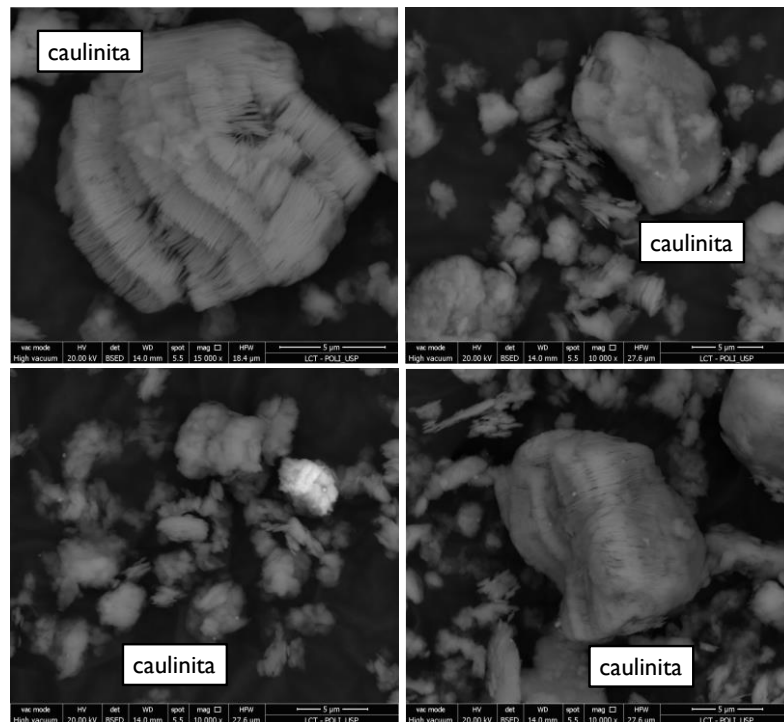
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 7: Imagem de Microscopia Eletrônica com espectrometria do caulim.



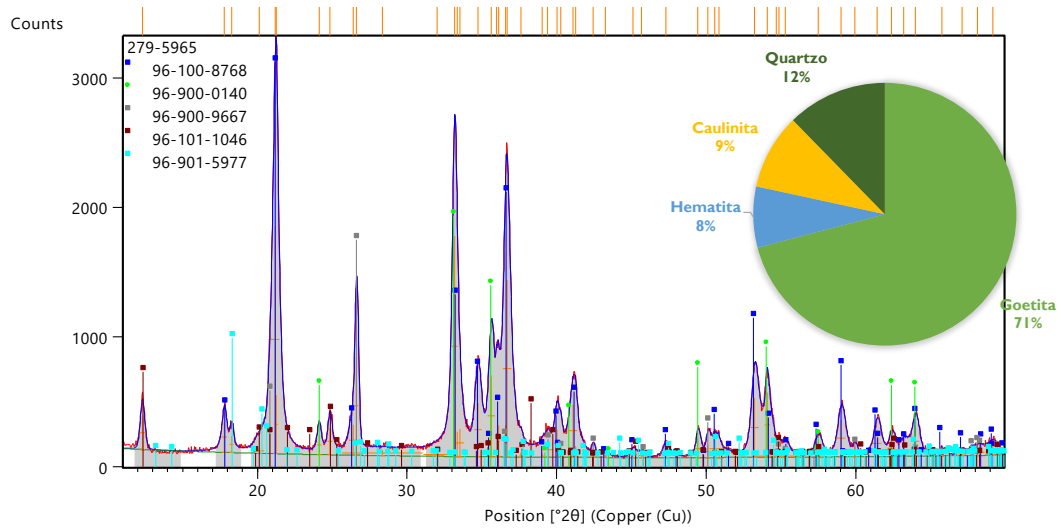
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 8: Detalhes das partículas de Caulim em Microscopia Eletrônica.



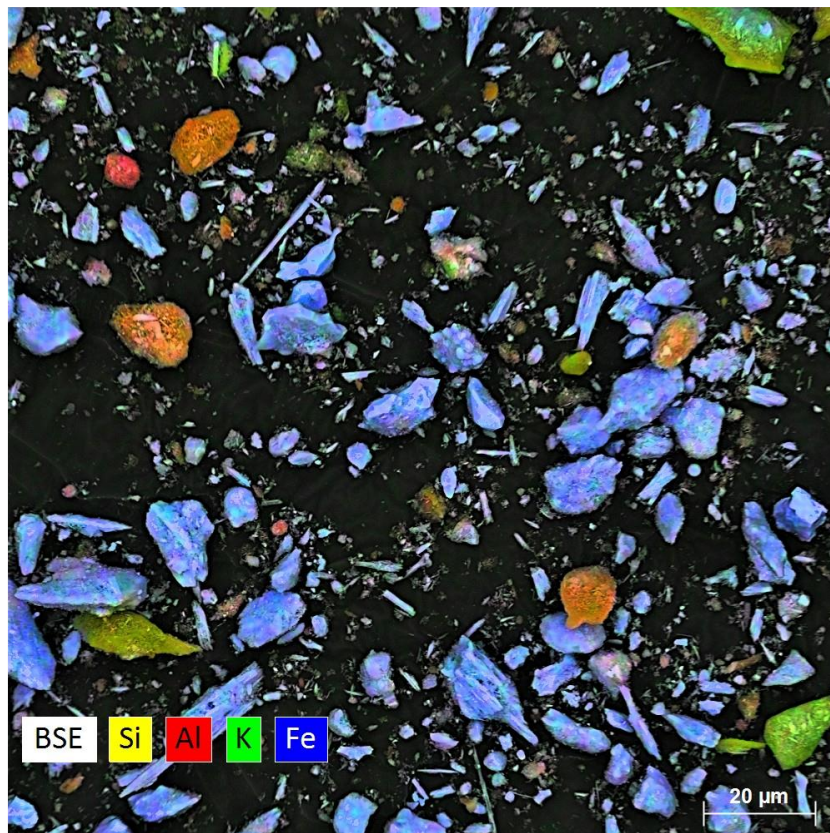
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 9: Resultados do ensaio de Difração de Raio-X do rejeito de minério de ferro em granulometria fina.



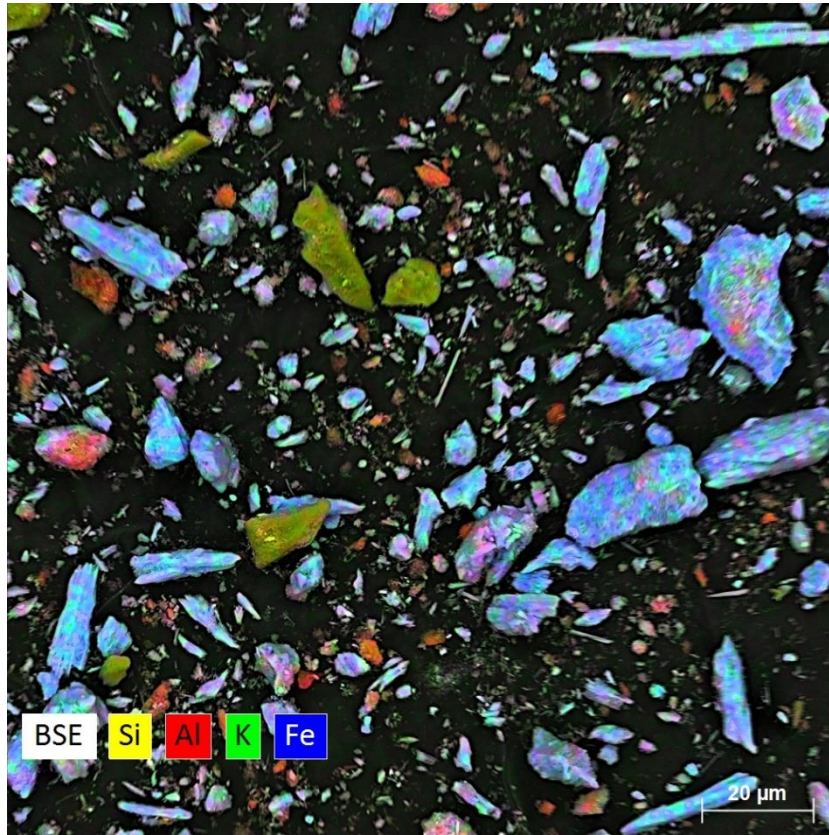
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 10: Imagem de MEV com espectrometria do rejeito de minério de ferro em granulometria fina.



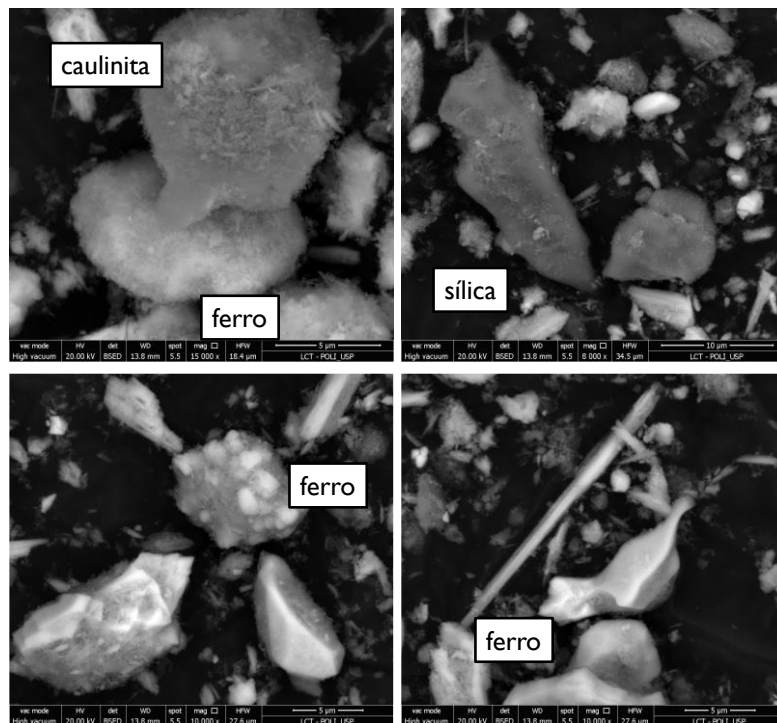
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 11: Imagem de MEV com espectrometria do rejeito de minério de ferro em granulometria fina.



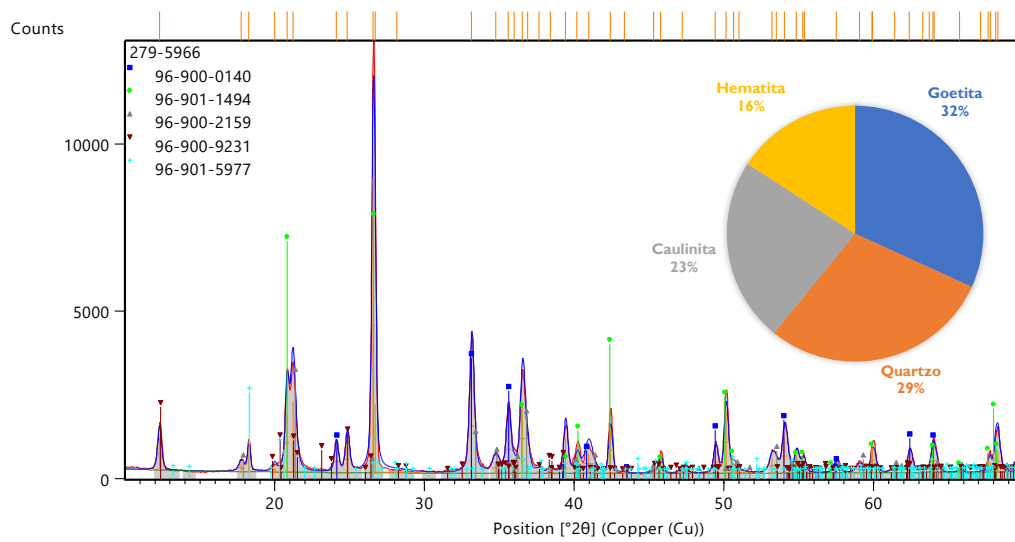
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 12: Detalhes das partículas de rejeito de minério de ferro em granulometria fina em MEV.



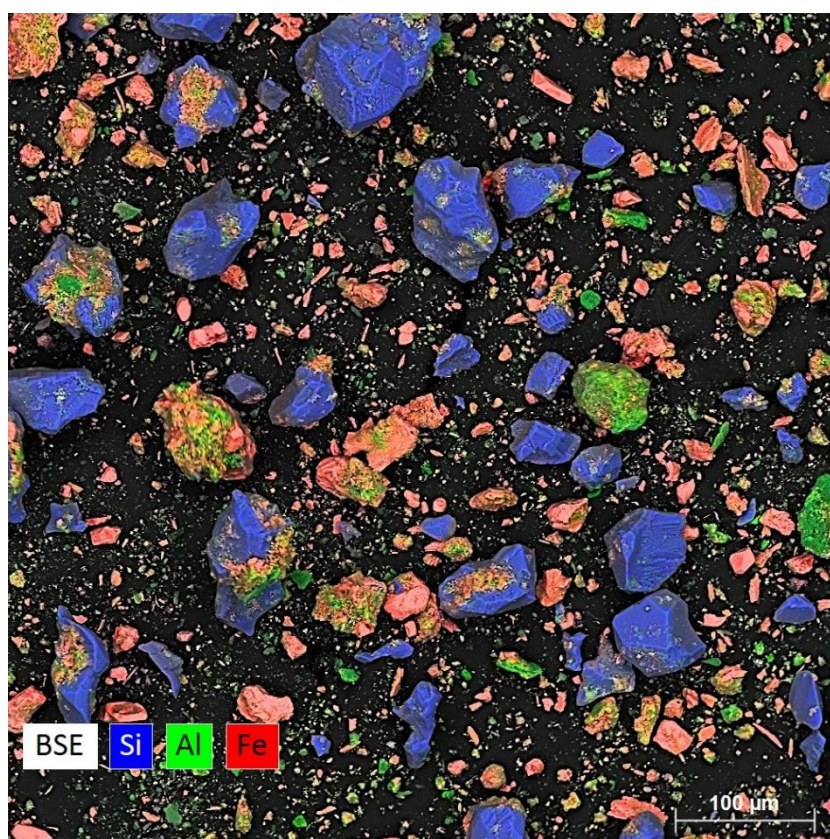
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 13: Resultados do ensaio de Difração de Raio-X do rejeito de minério de ferro em granulometria total.



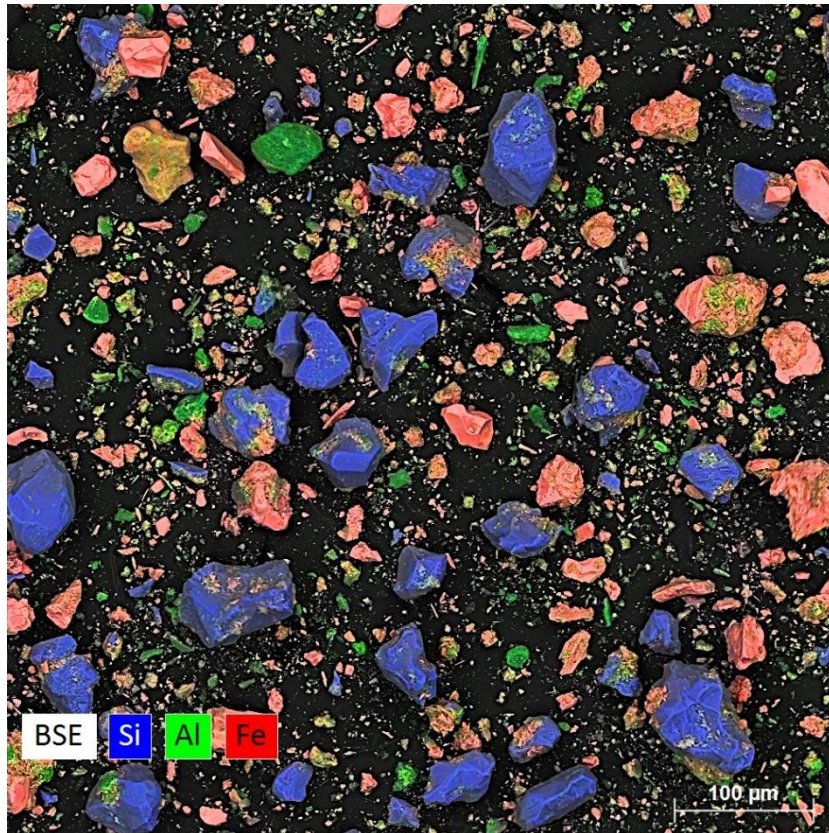
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 14: Imagem de MEV com espectrometria do rejeito de minério de ferro total.



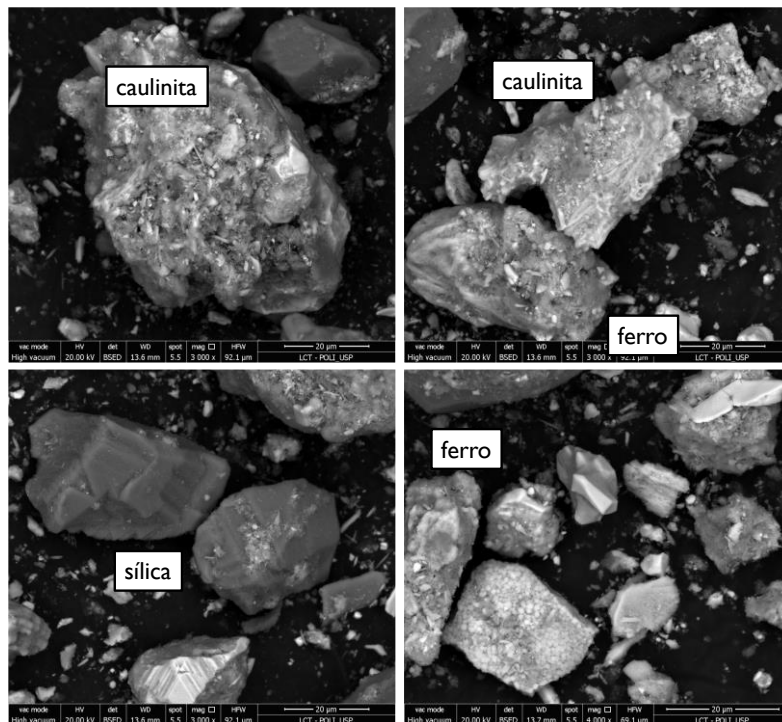
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 15: Imagem de MEV com espectrometria do rejeito de minério de ferro total.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura C 16: Detalhes das partículas de rejeito de minério de ferro em granulometria total em MEV.

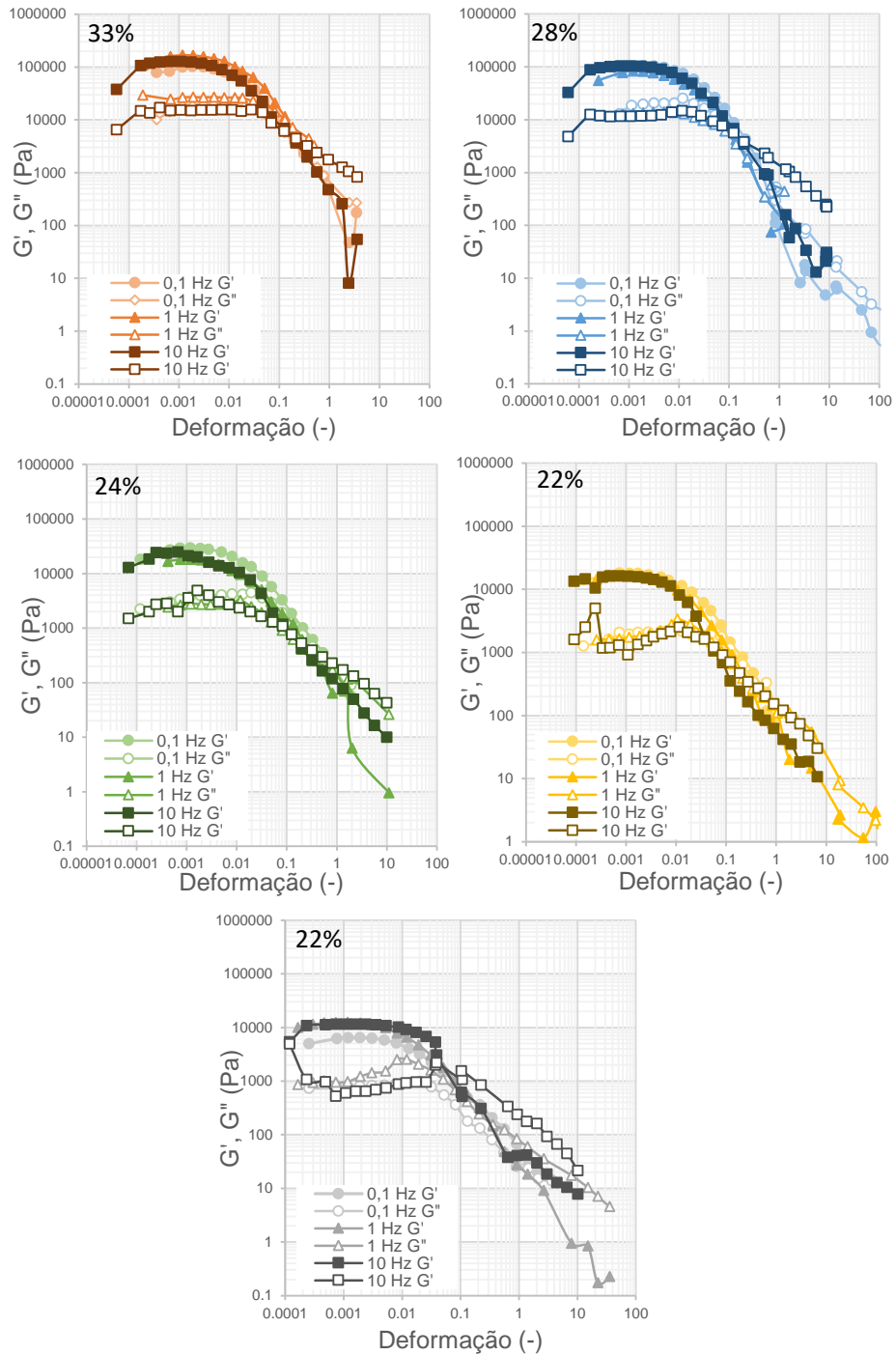


Fonte: Elaborado pela autora.

# ANEXO D – RESULTADOS DOS ENSAIOS OSCILATÓRIOS DOS MATERIAIS

## D-1) Resultados Ensaio Oscilatório De Deformação

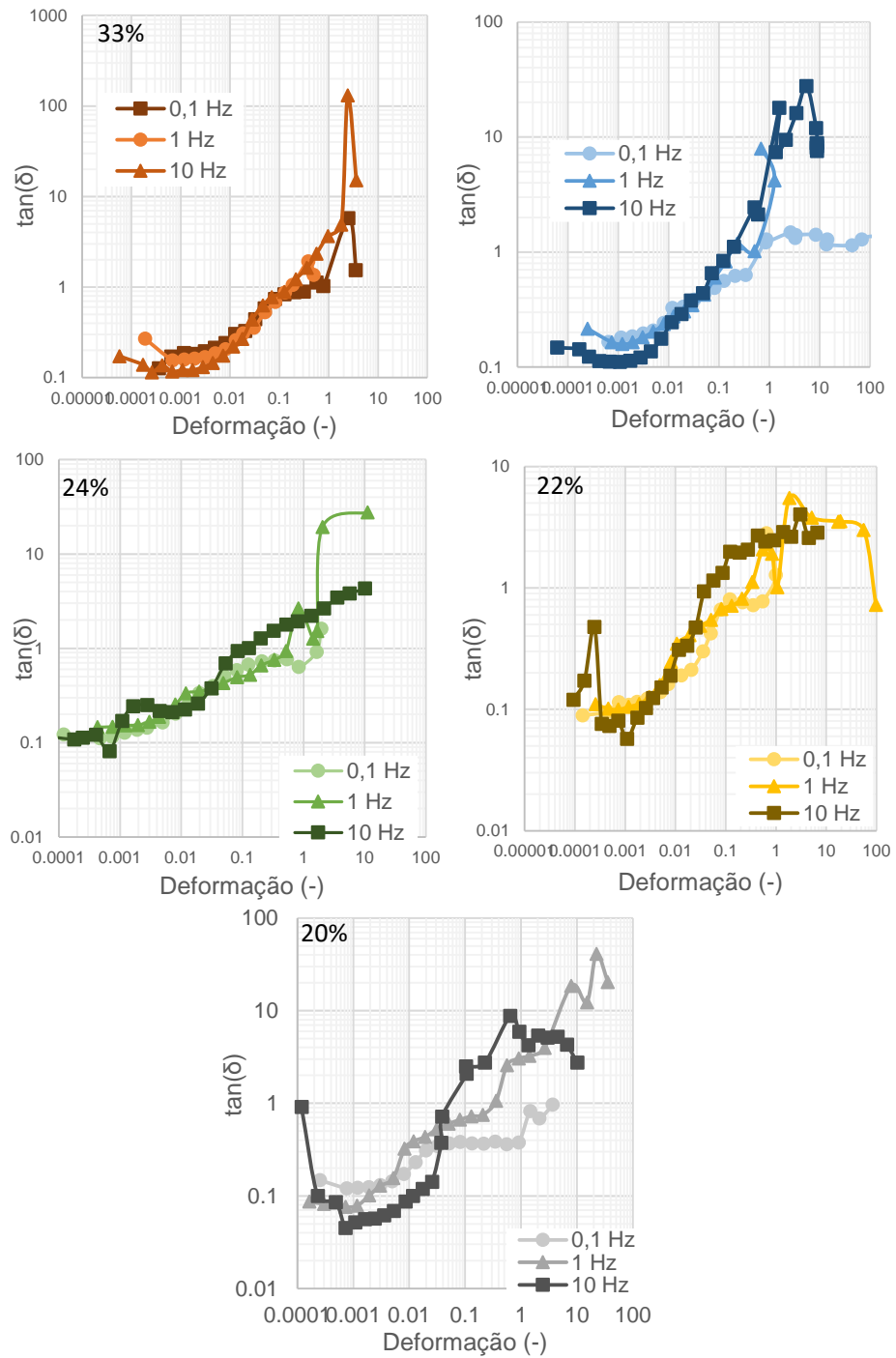
Figura D 1: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação da Bentonita – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus deformação (-).



Fonte: Elaborado pela autora.

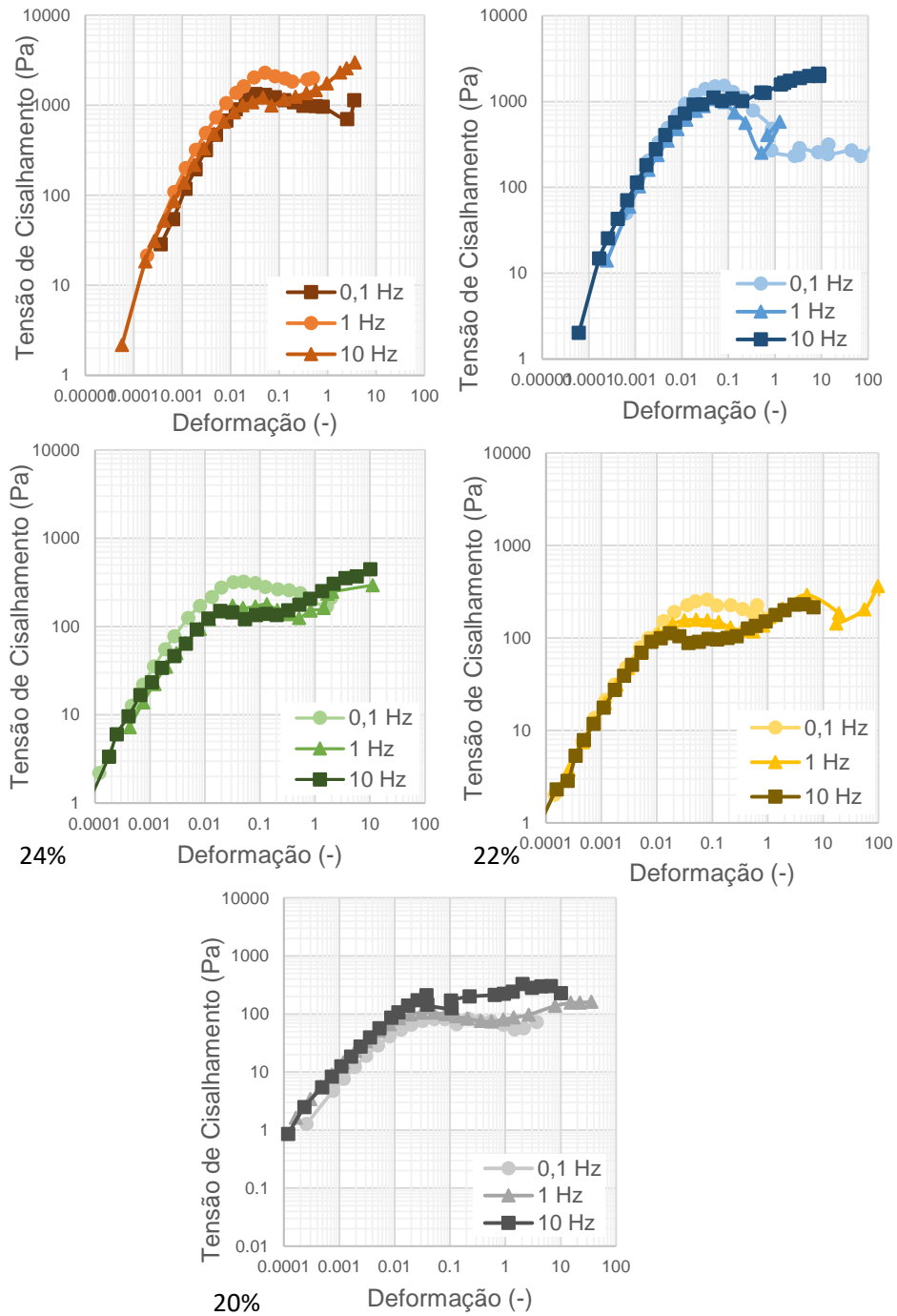


Figura D 2: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação da Bentonita – Gráficos tangente de delta (-) versus deformação (-).



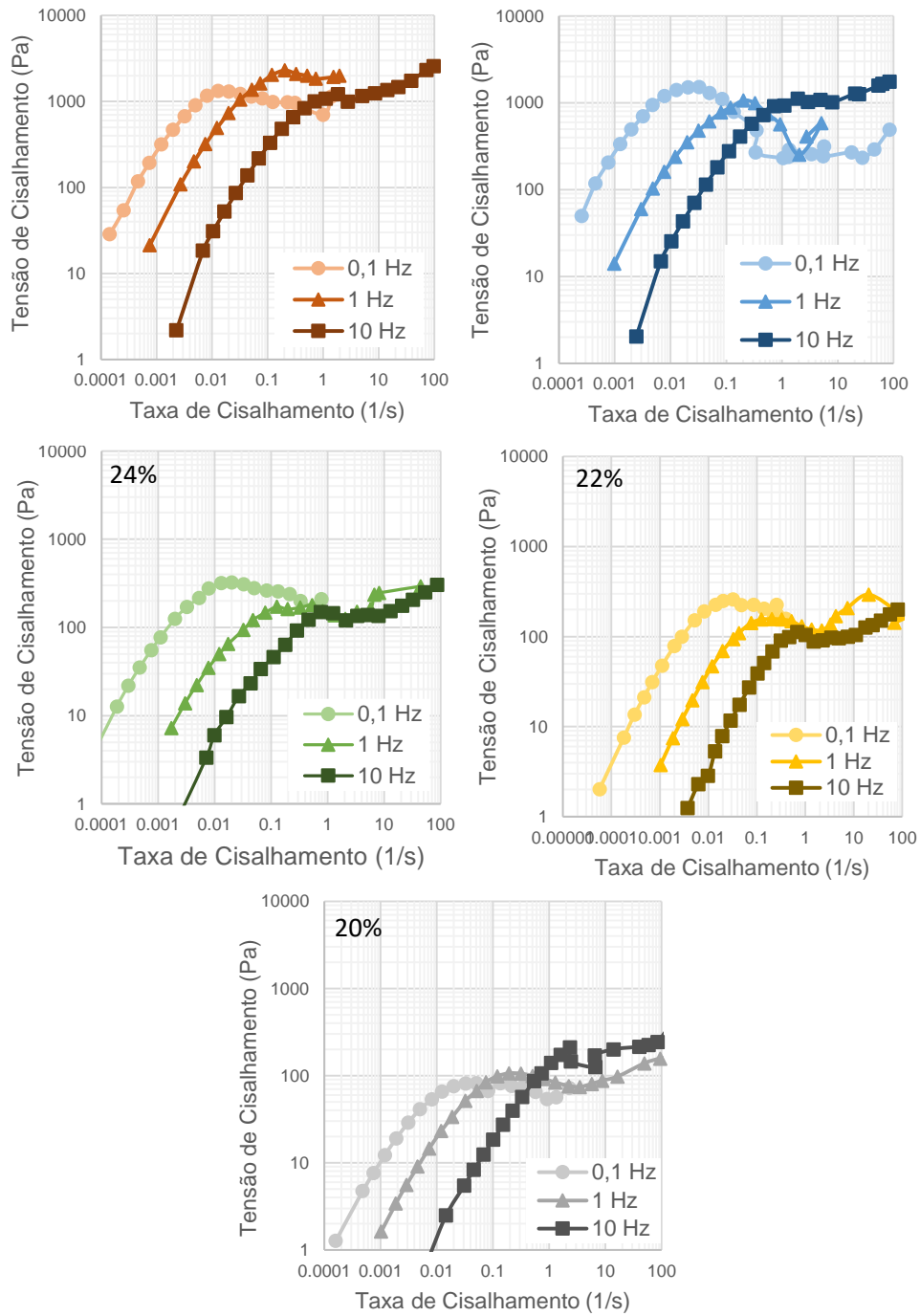
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 3: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação da Bentonita – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus deformação (-).



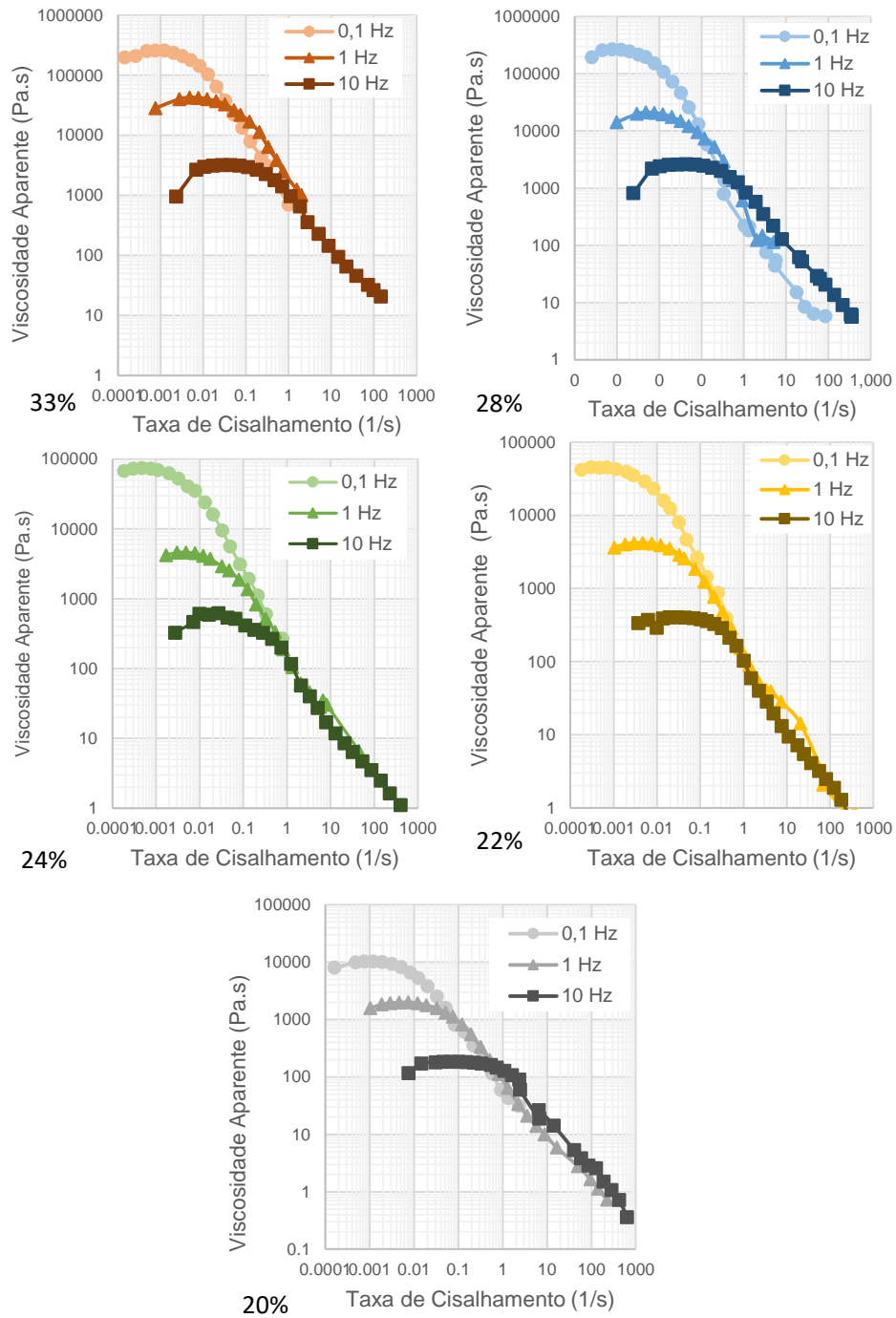
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 4: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação da Bentonita – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



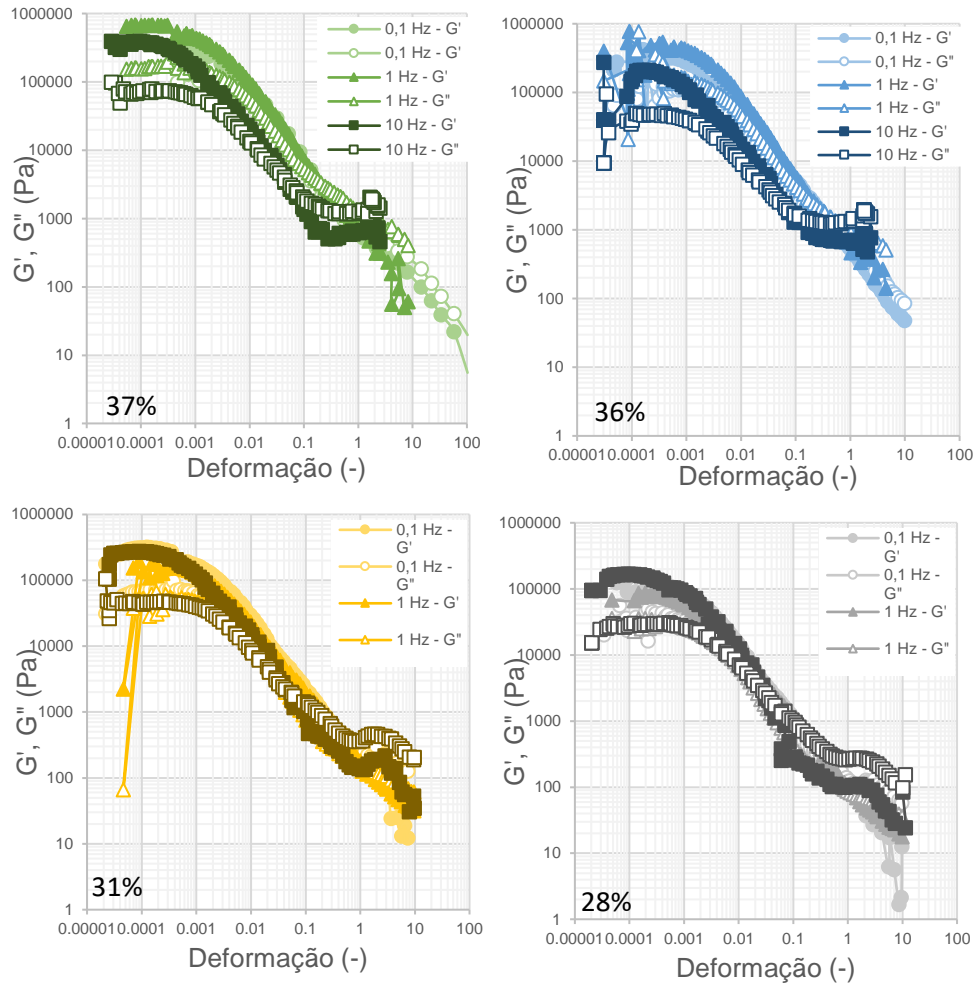
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 5: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação da Bentonita – Gráficos viscosidade aparente calculada (Pa.s) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



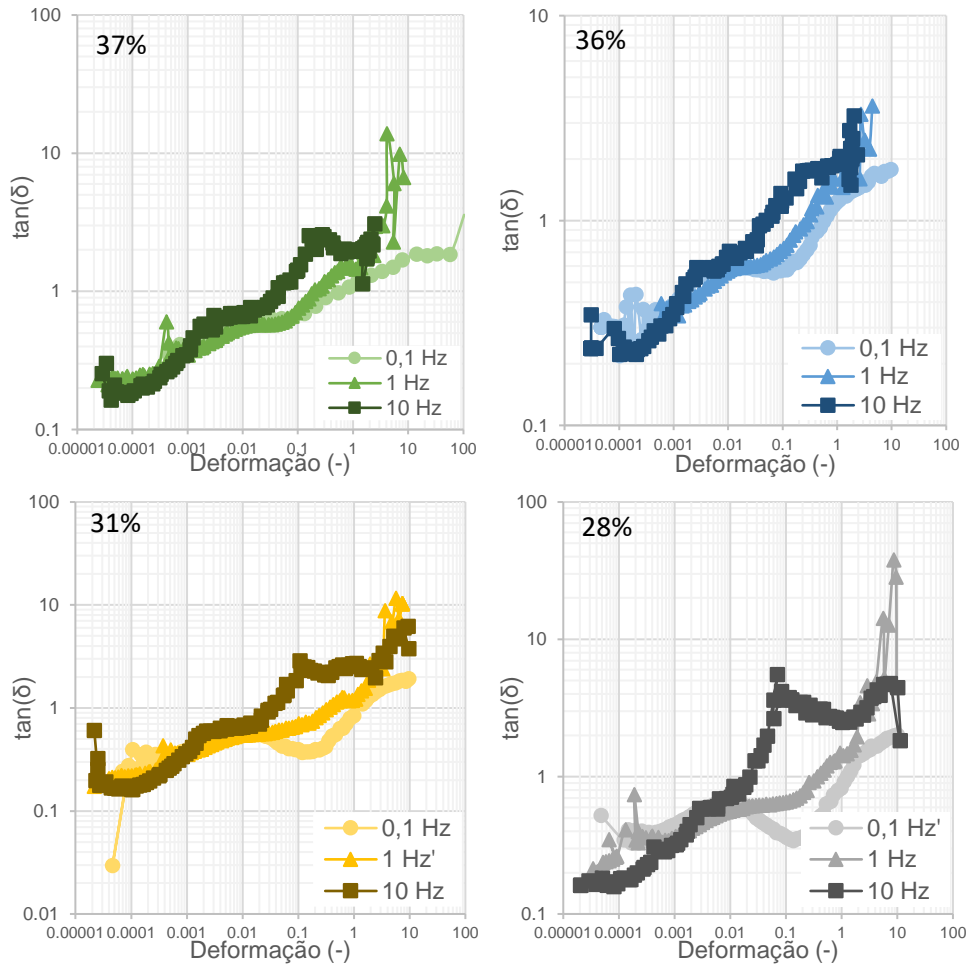
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 6: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Caulim – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus deformação (-).



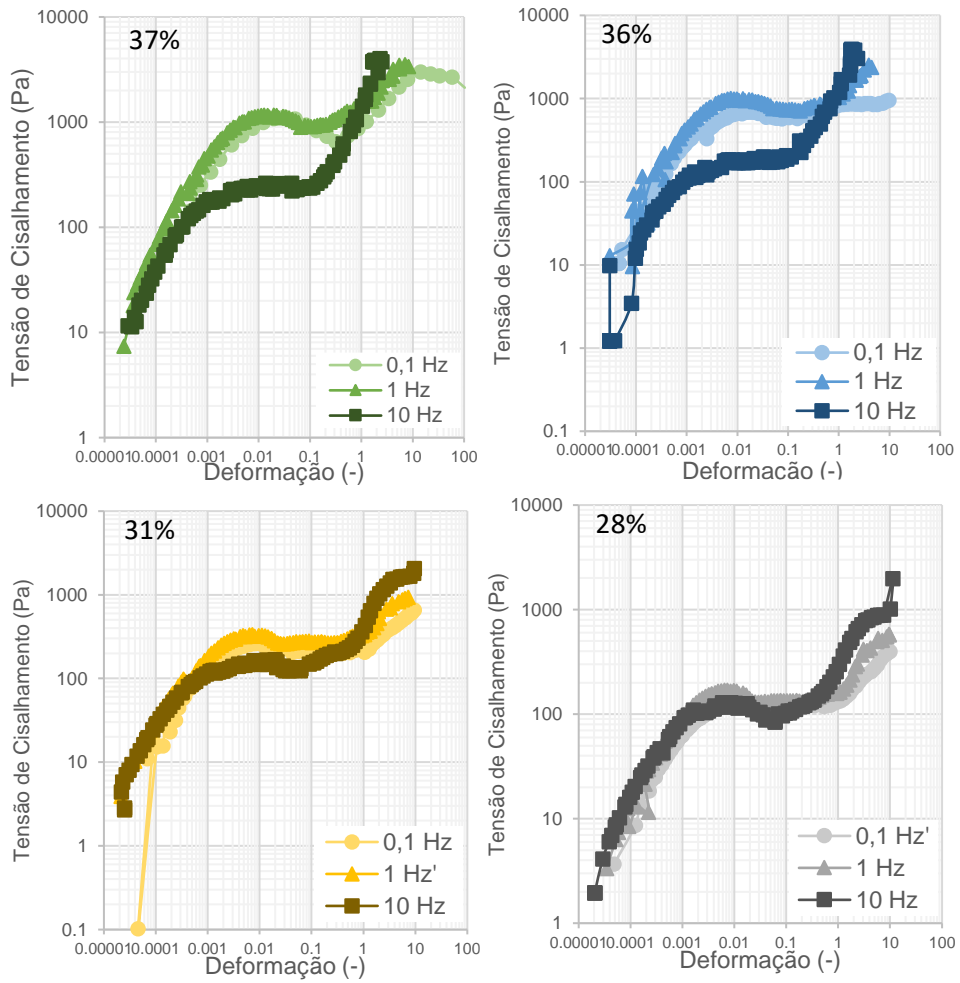
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 7: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Caulim – Gráficos tangente de delta (-) versus deformação (-).



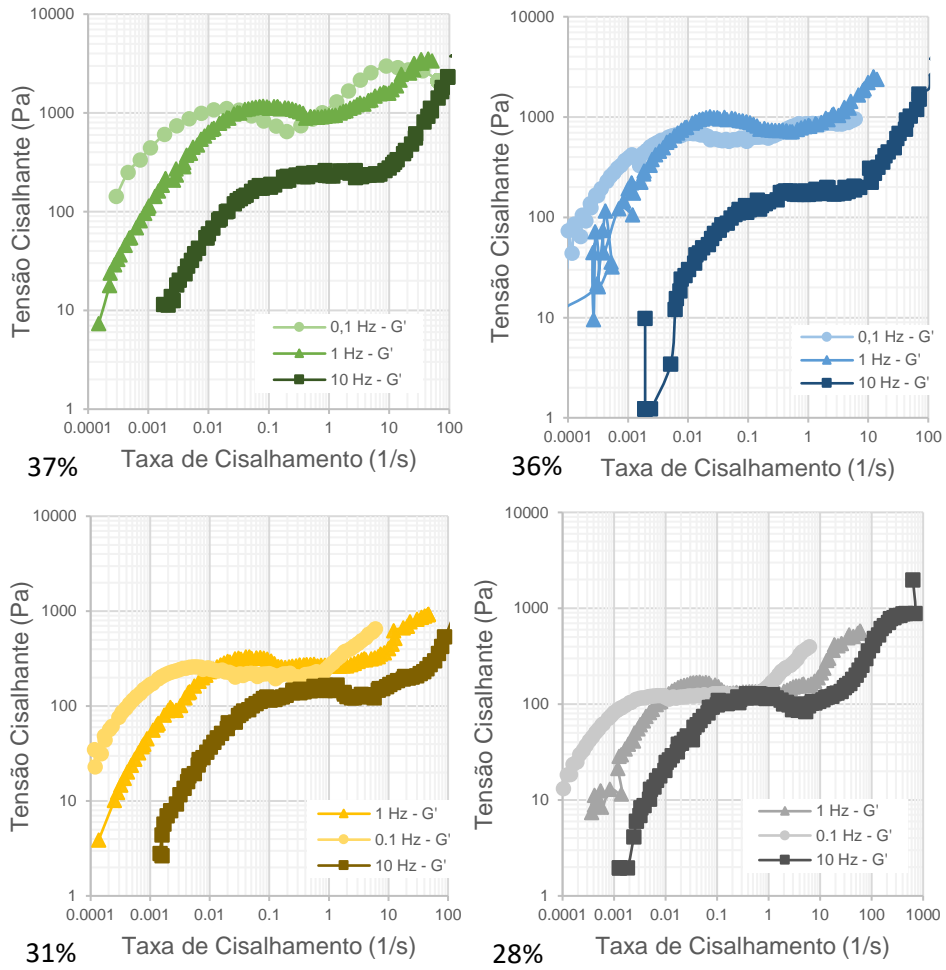
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 8: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Caulim – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus deformação (-).



Fonte: Elaborado pela autora.

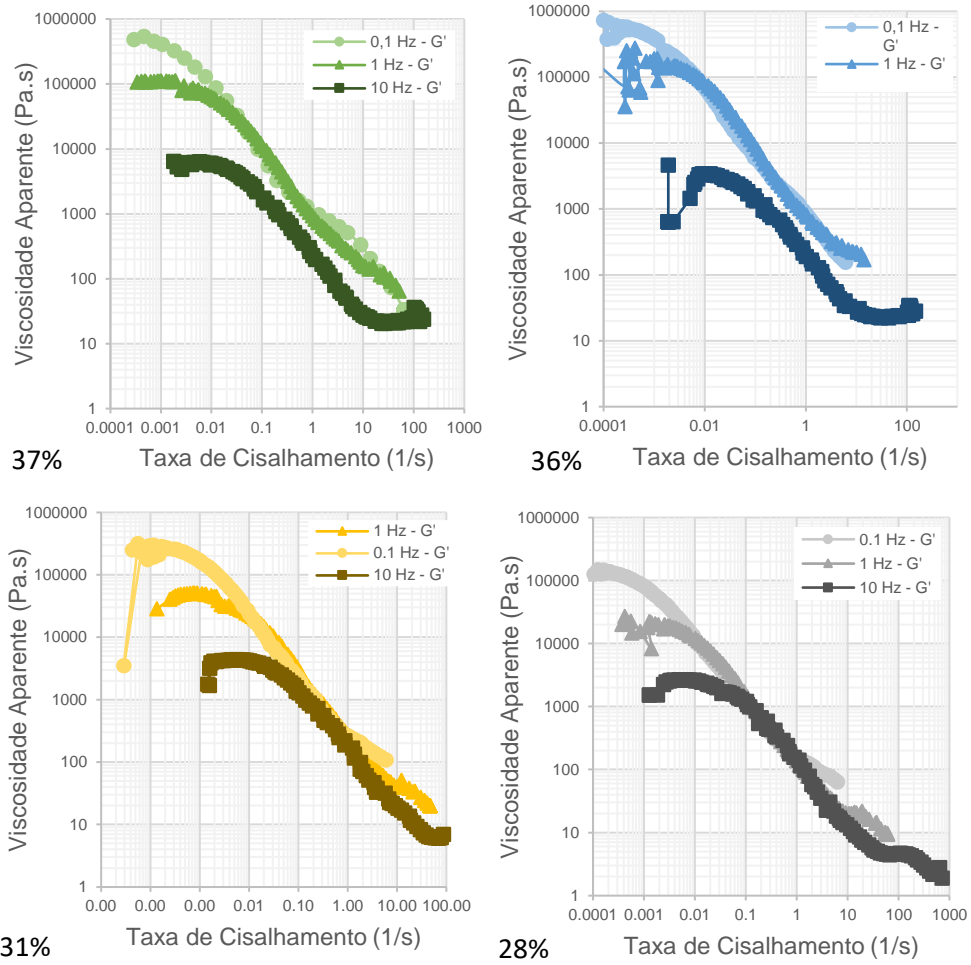
Figura D 9: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Caulim – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



Fonte: Elaborado pela autora.

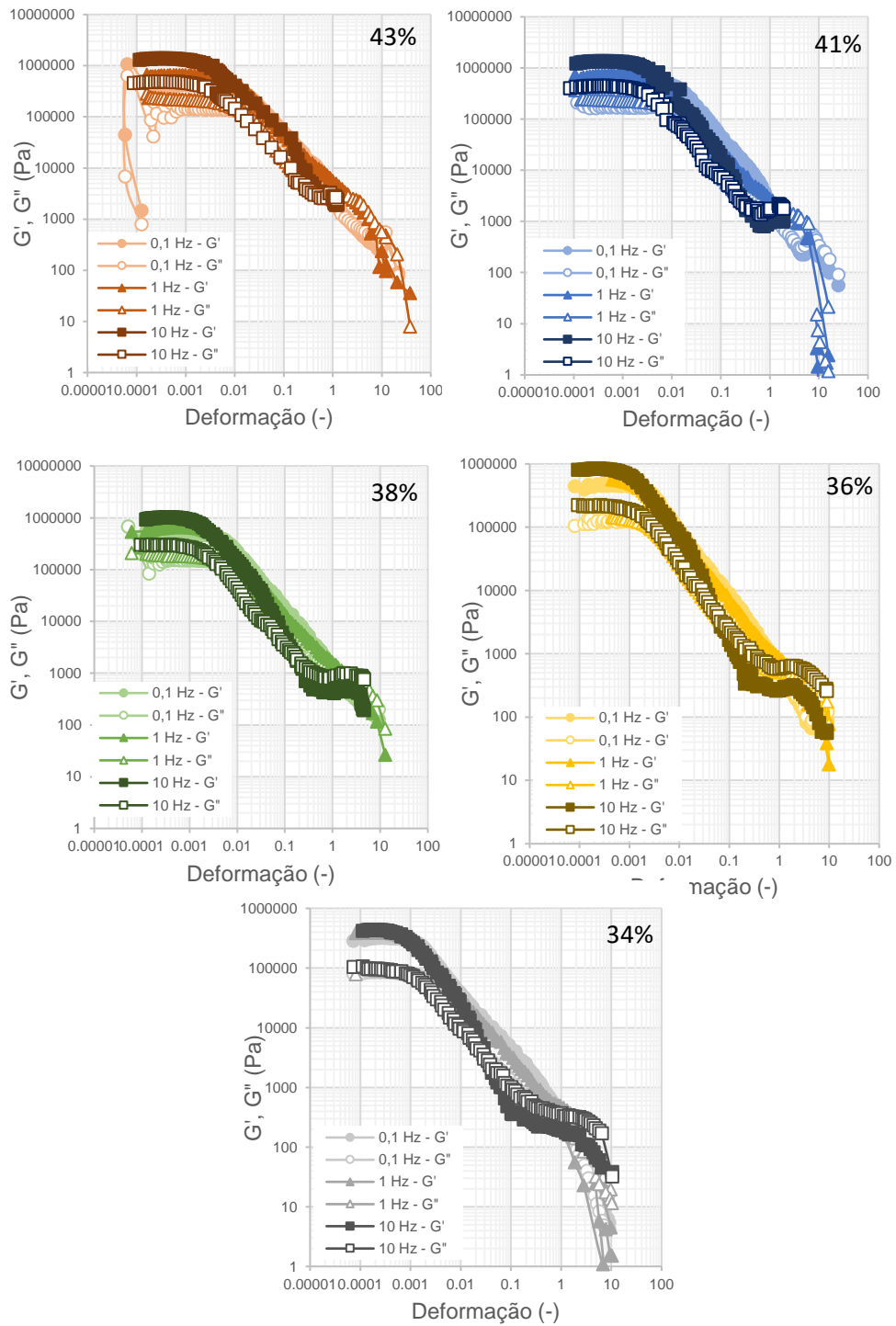


Figura D 10: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Caulim – Gráficos viscosidade aparente calculada (Pa.s) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



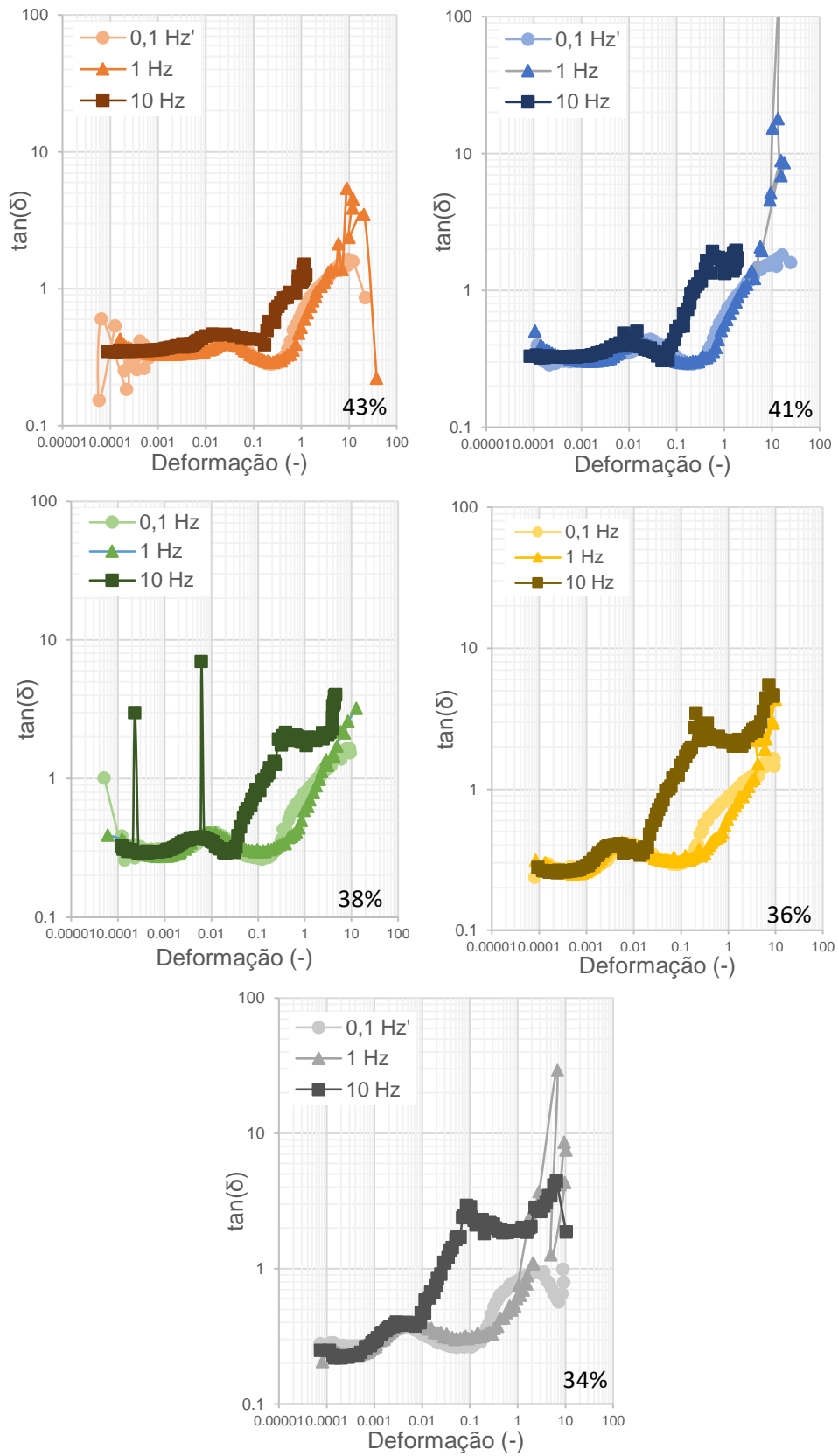
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 11: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus deformação (-).



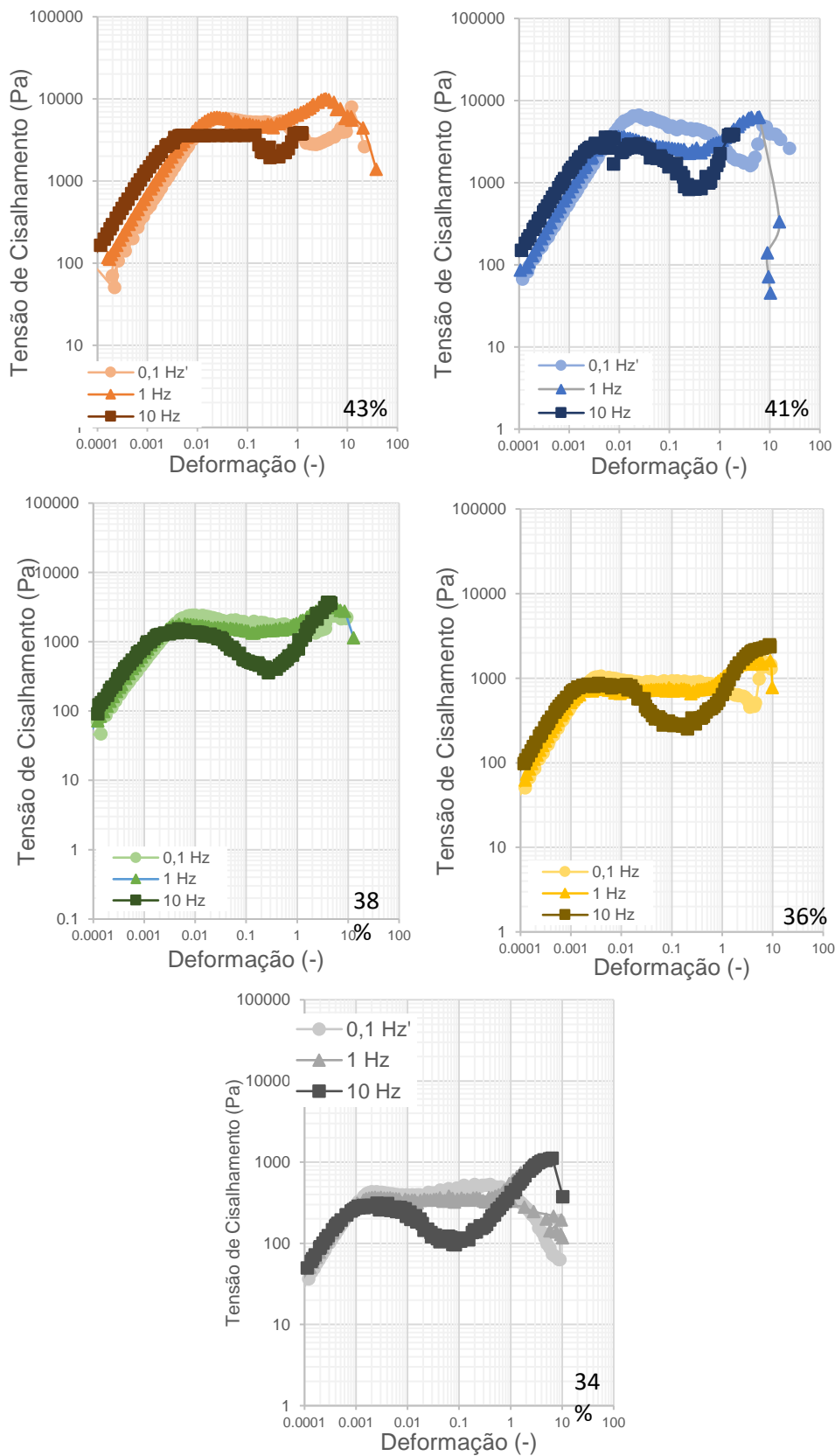
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 12: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos tangente de delta (-) versus deformação (-).



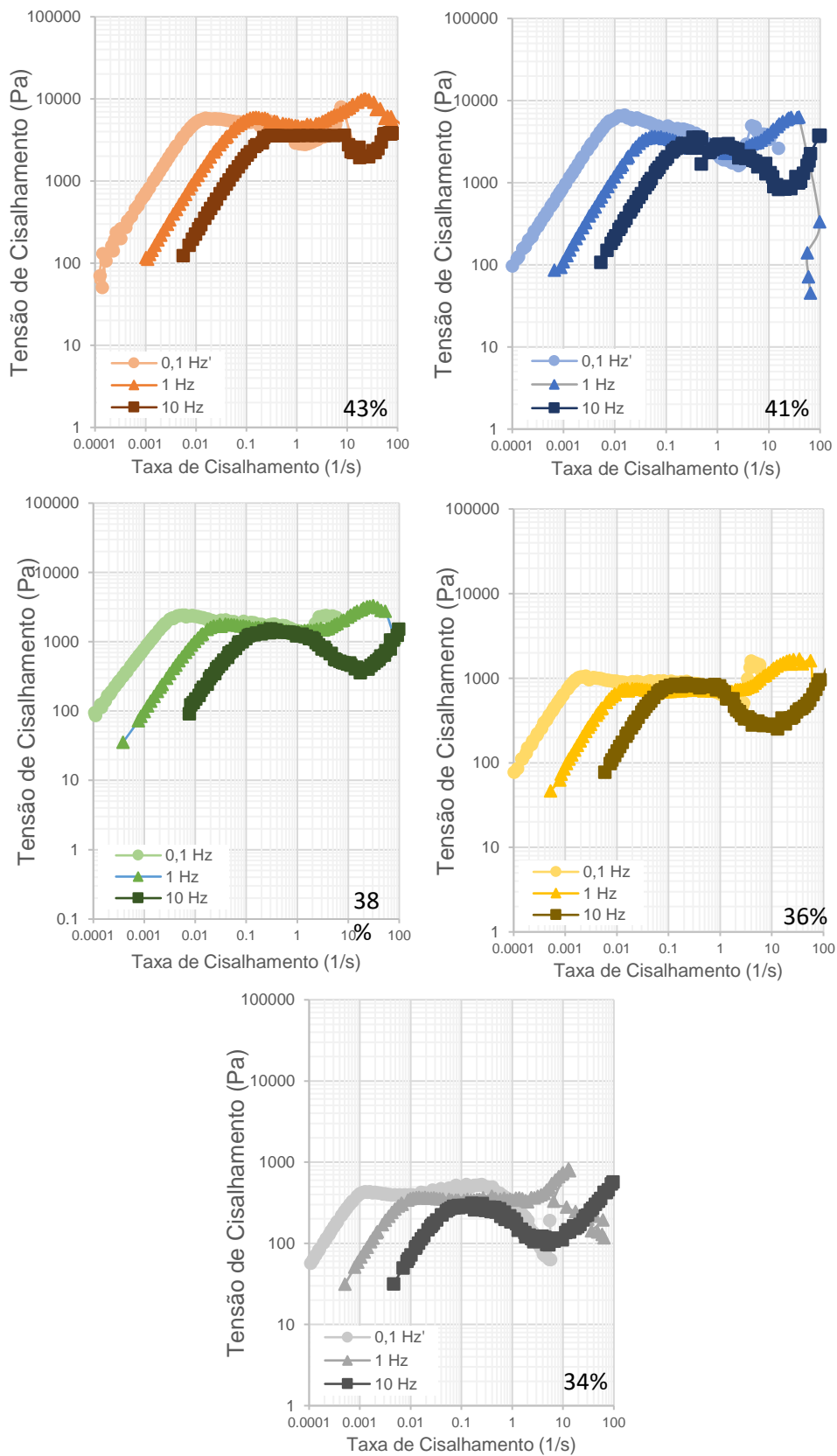
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 13: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus deformação (-).



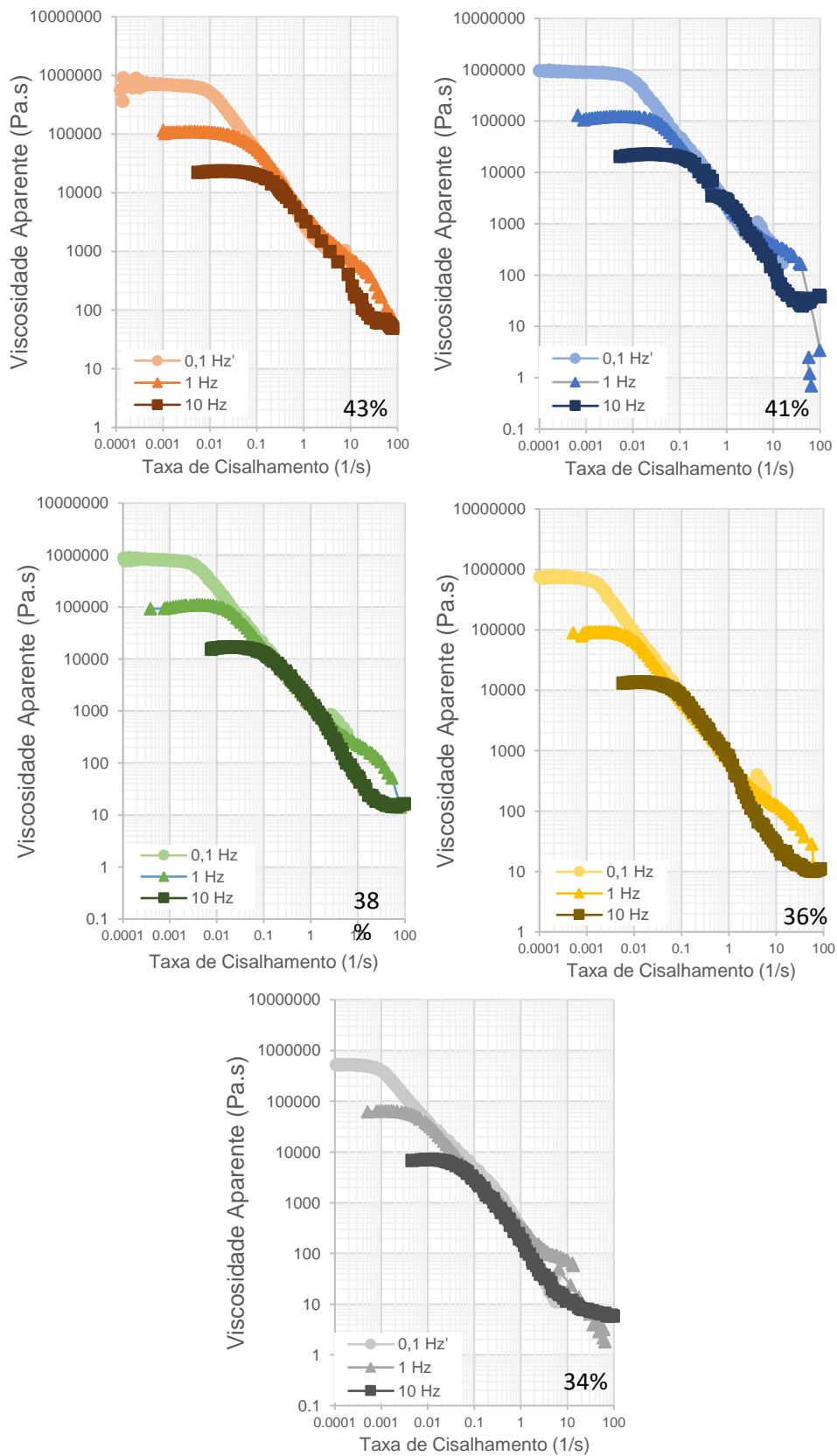
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 14: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



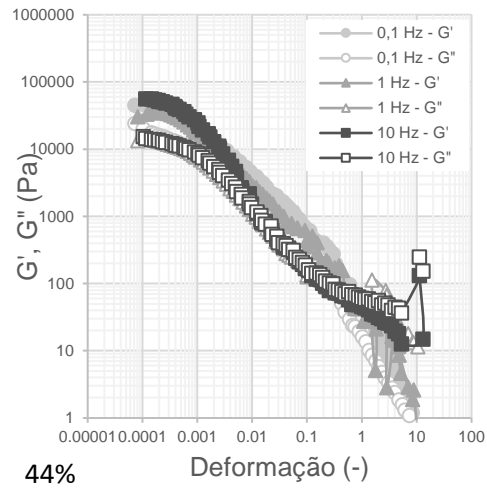
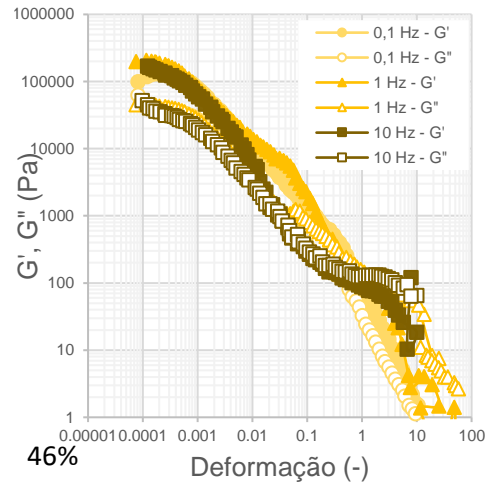
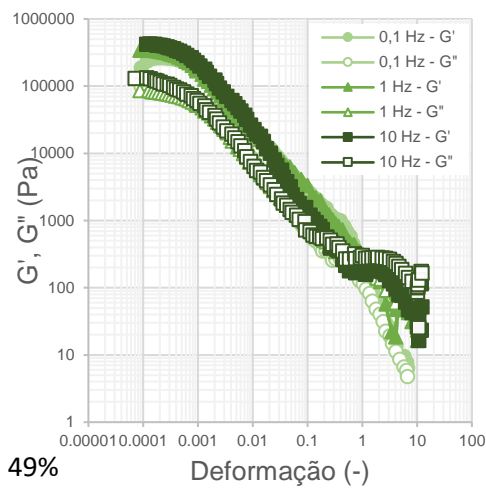
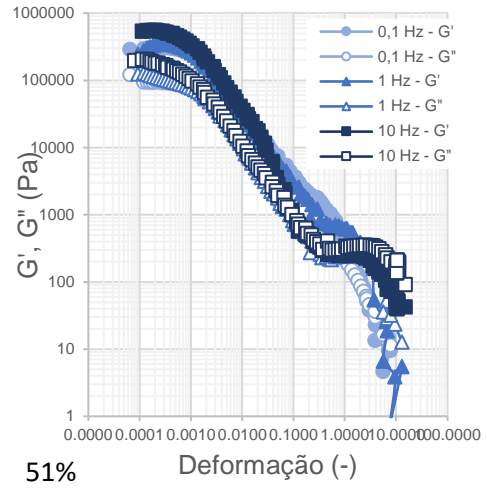
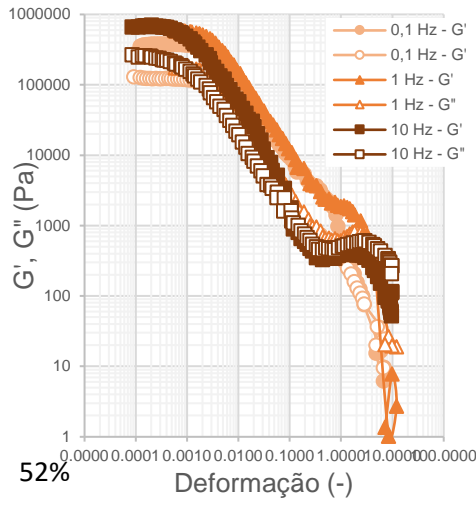
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 15: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos viscosidade aparente calculada (Pa.s) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



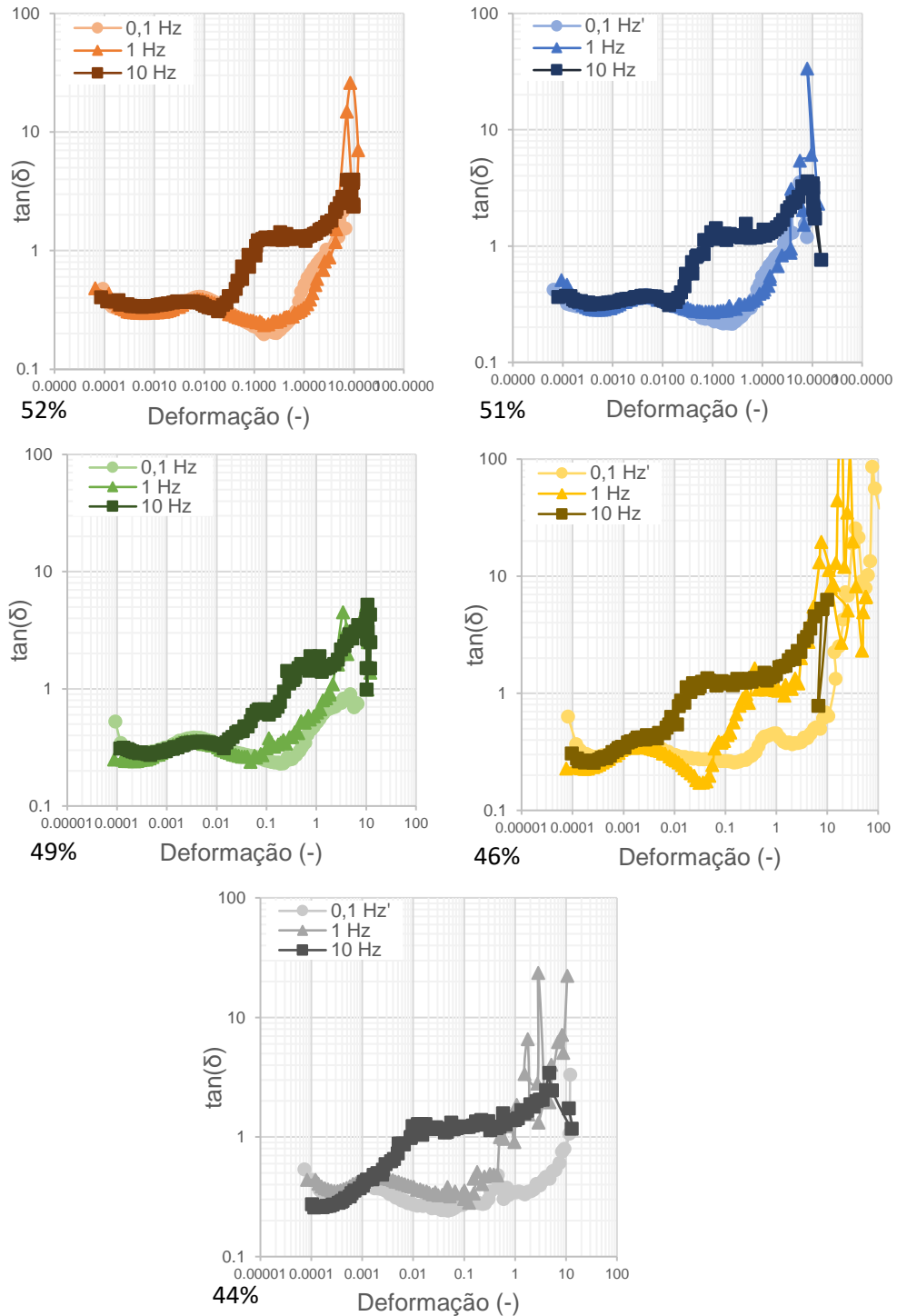
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 16: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos G';G'' (Pa) versus deformação (-).



Fonte: Elaborado pela autora.

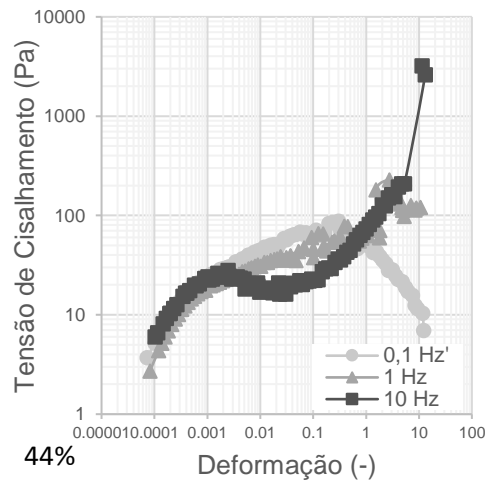
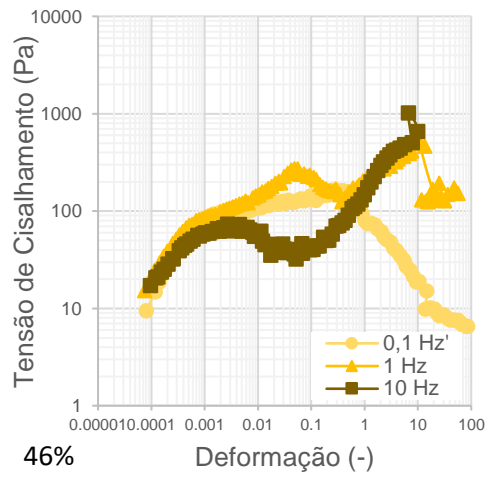
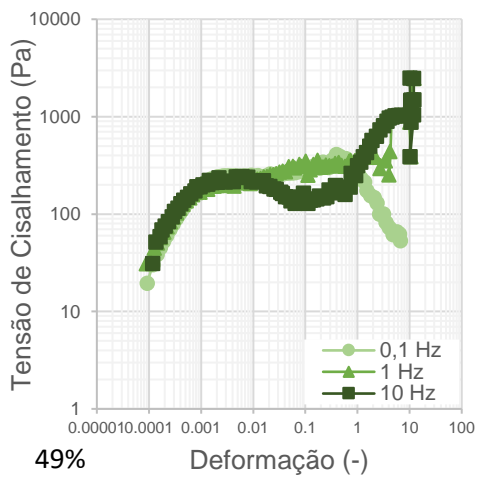
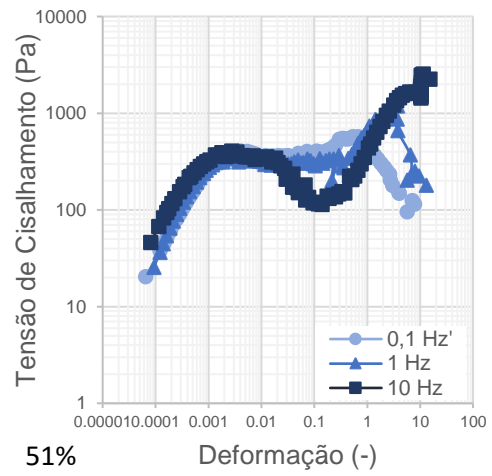
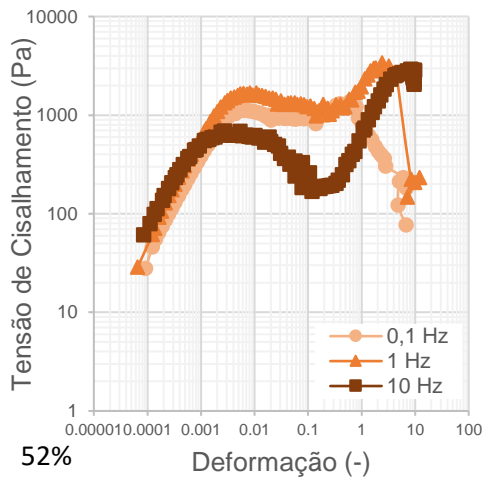
Figura D 17: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos tangente de delta (-) versus deformação (-).



Fonte: Elaborado pela autora.

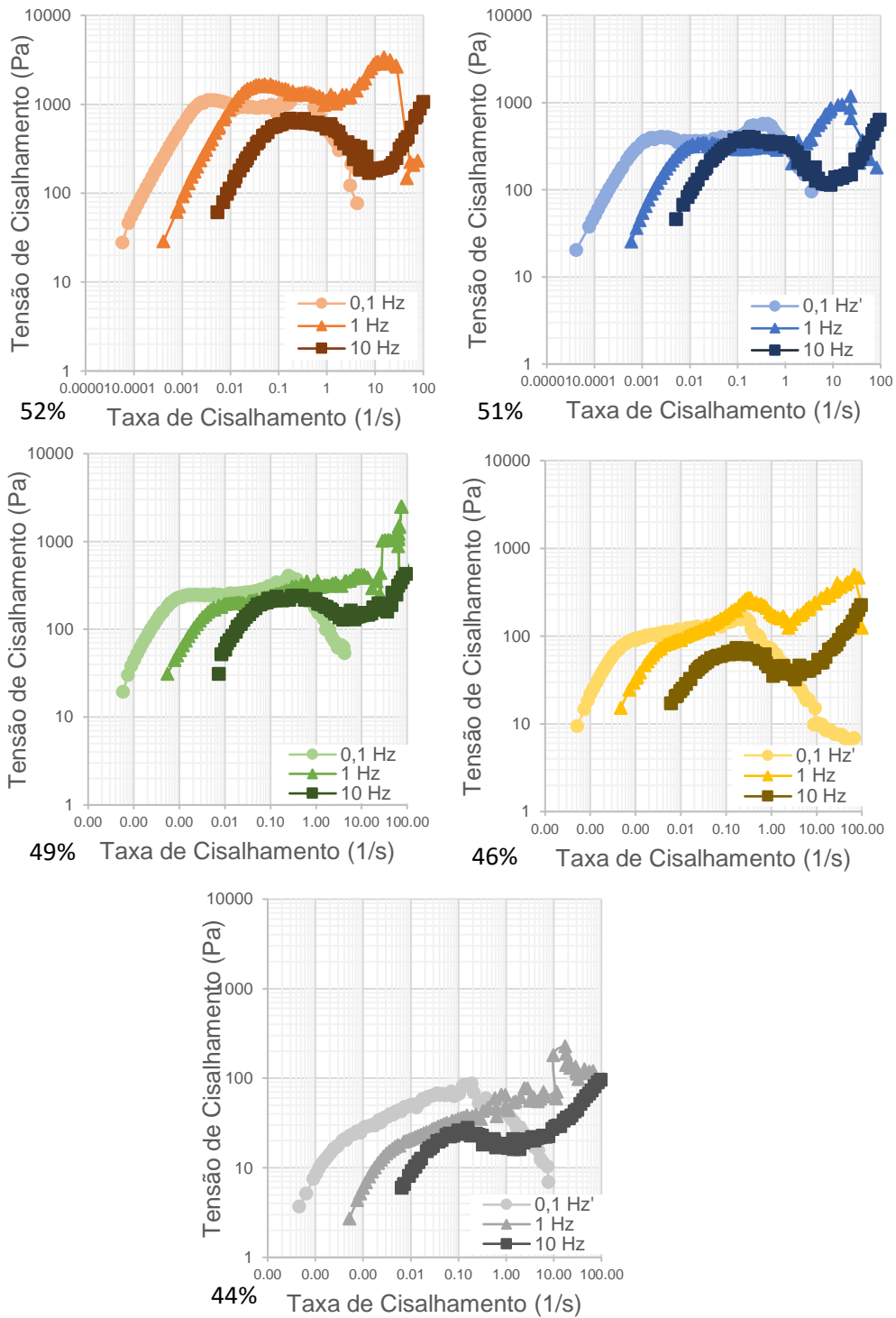
Figura D 18: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus deformação (-).





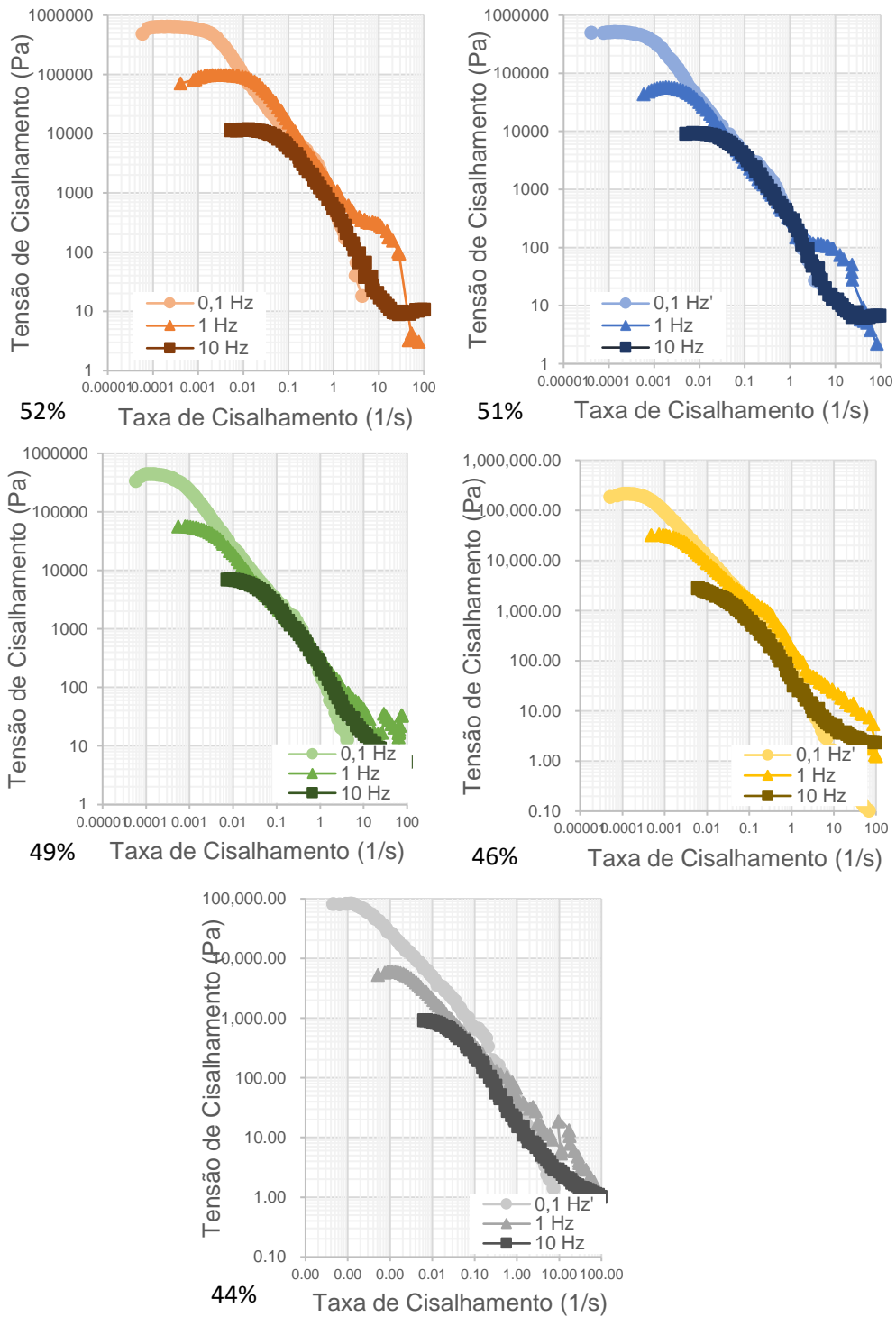
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 19: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos tensão cisalhante medida (Pa) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



Fonte: Elaborado pela autora.

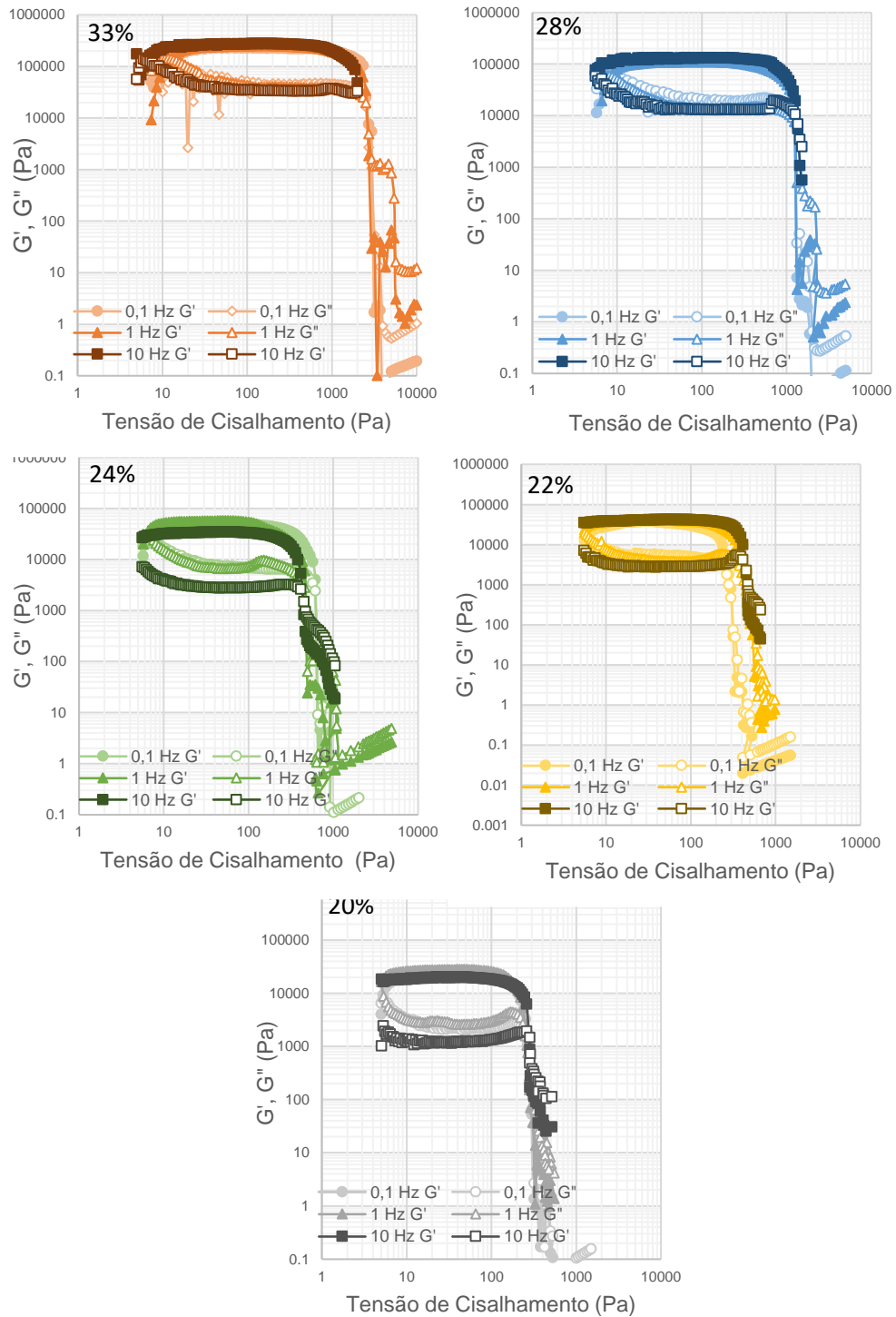
Figura D 20: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Deformação do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos viscosidade aparente calculada (Pa.s) versus taxa de cisalhamento máxima do ciclo (1/s).



Fonte: Elaborado pela autora.

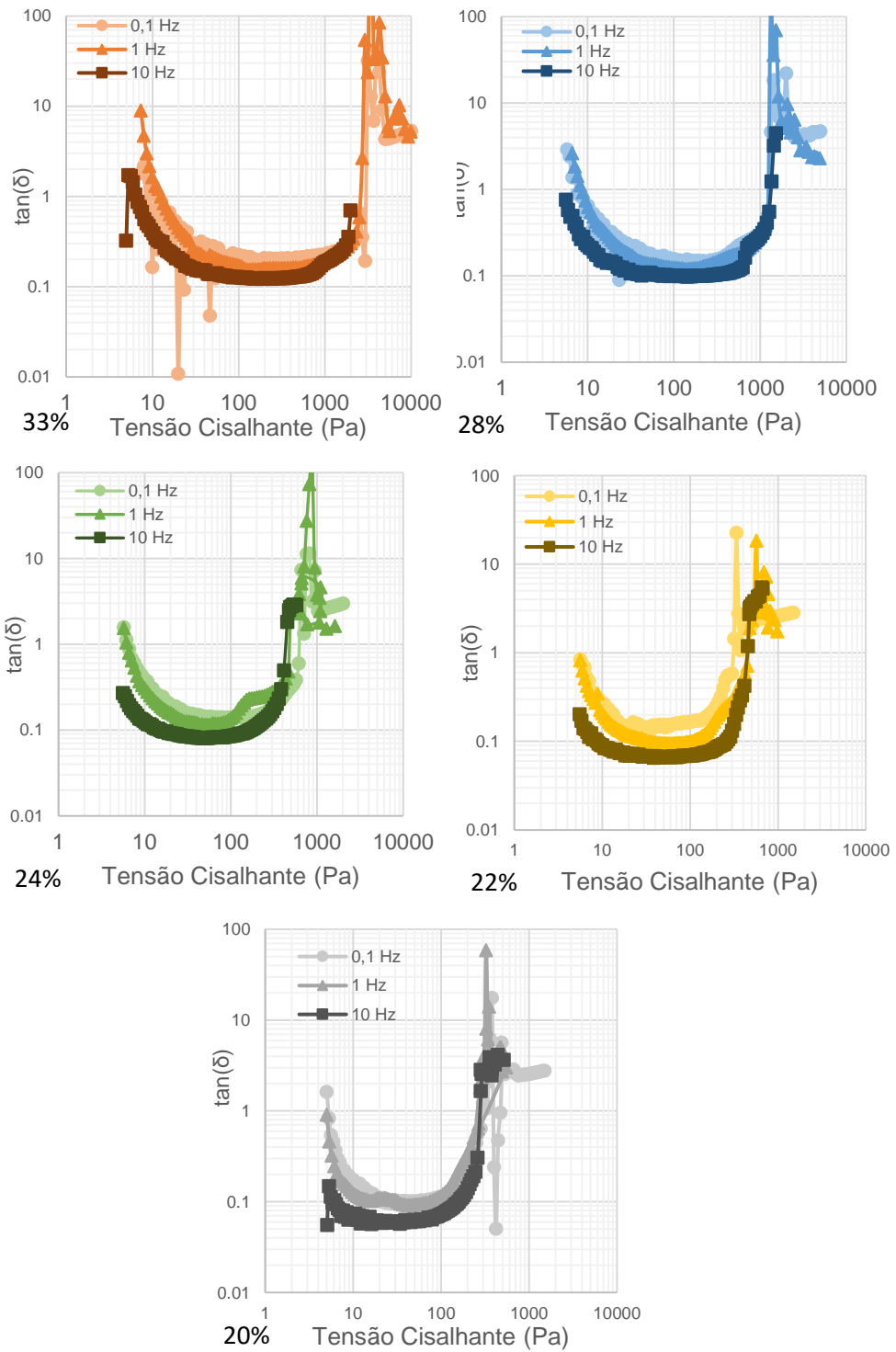
## D-2) Resultados Ensaio Oscilatórios De Tensões

Figura D 21: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões da Bentonita – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tensão de cisalhamento (Pa).



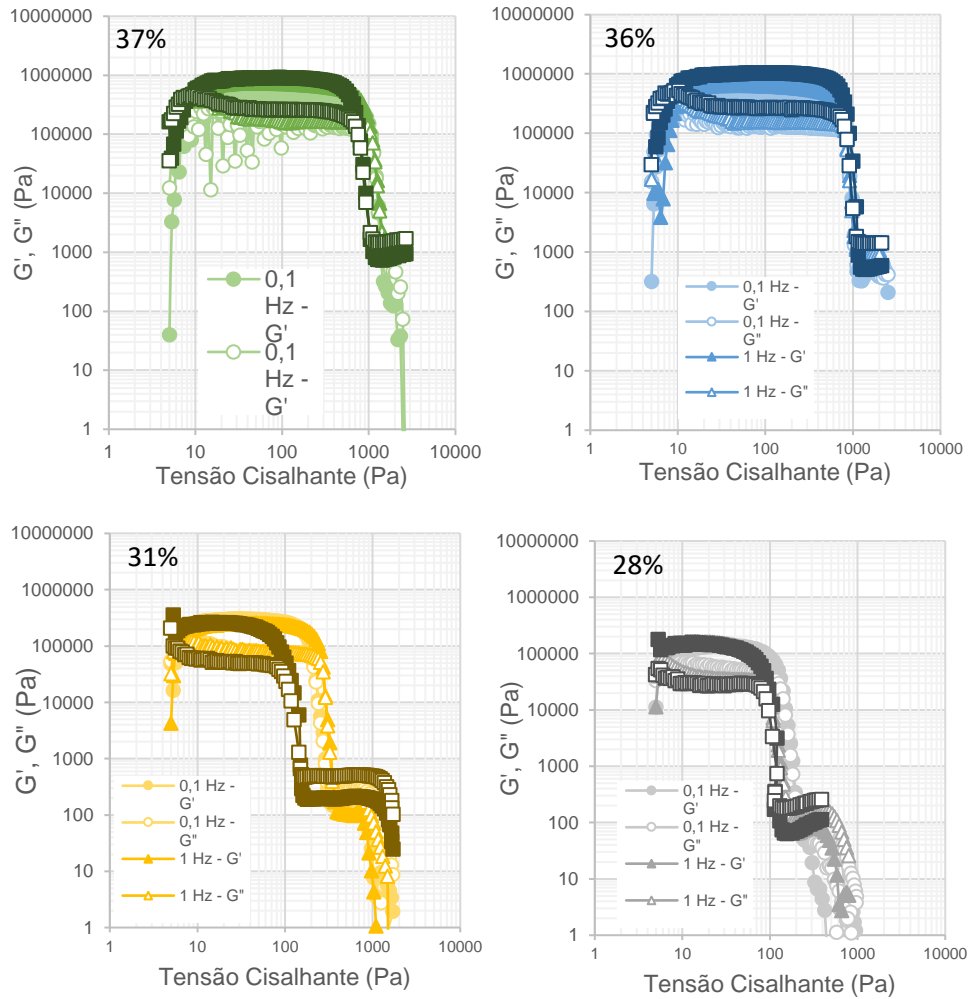
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 22: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões da Bentonita – Gráficos tangente de delta (-) versus tensão de cisalhamento (Pa).



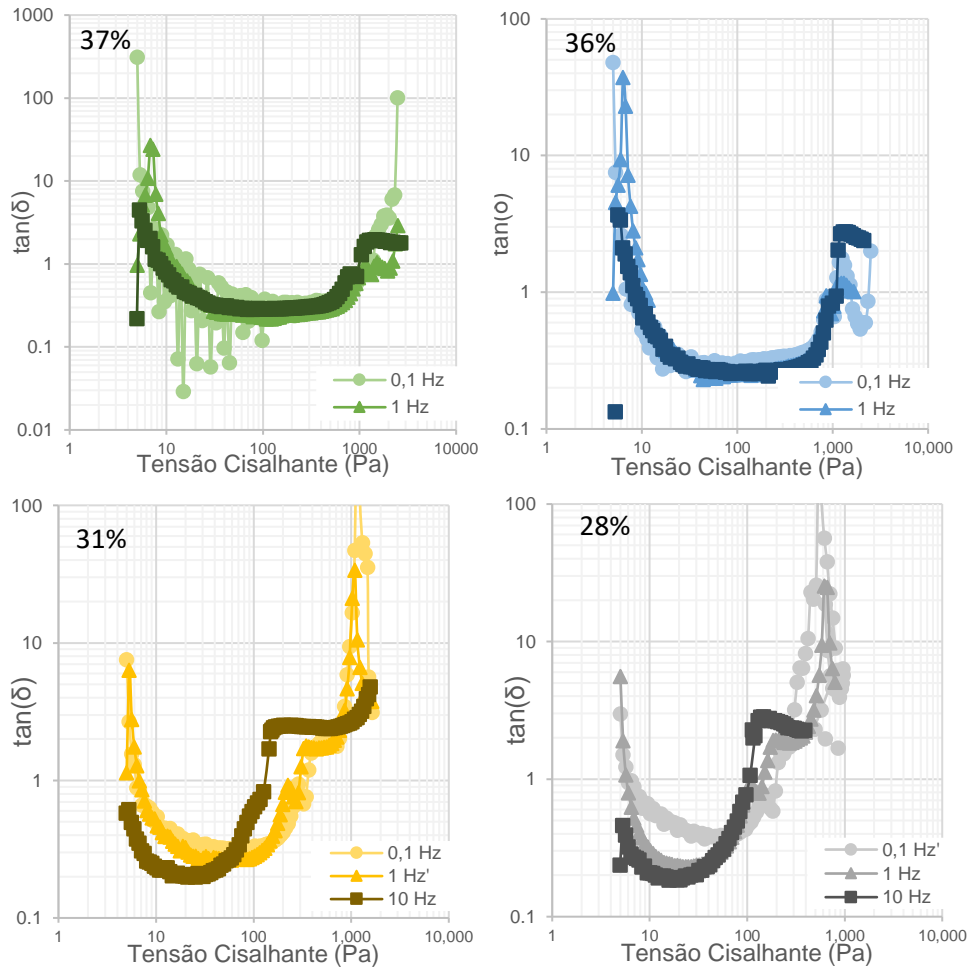
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 23: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Caulim – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tensão de cisalhamento (Pa).



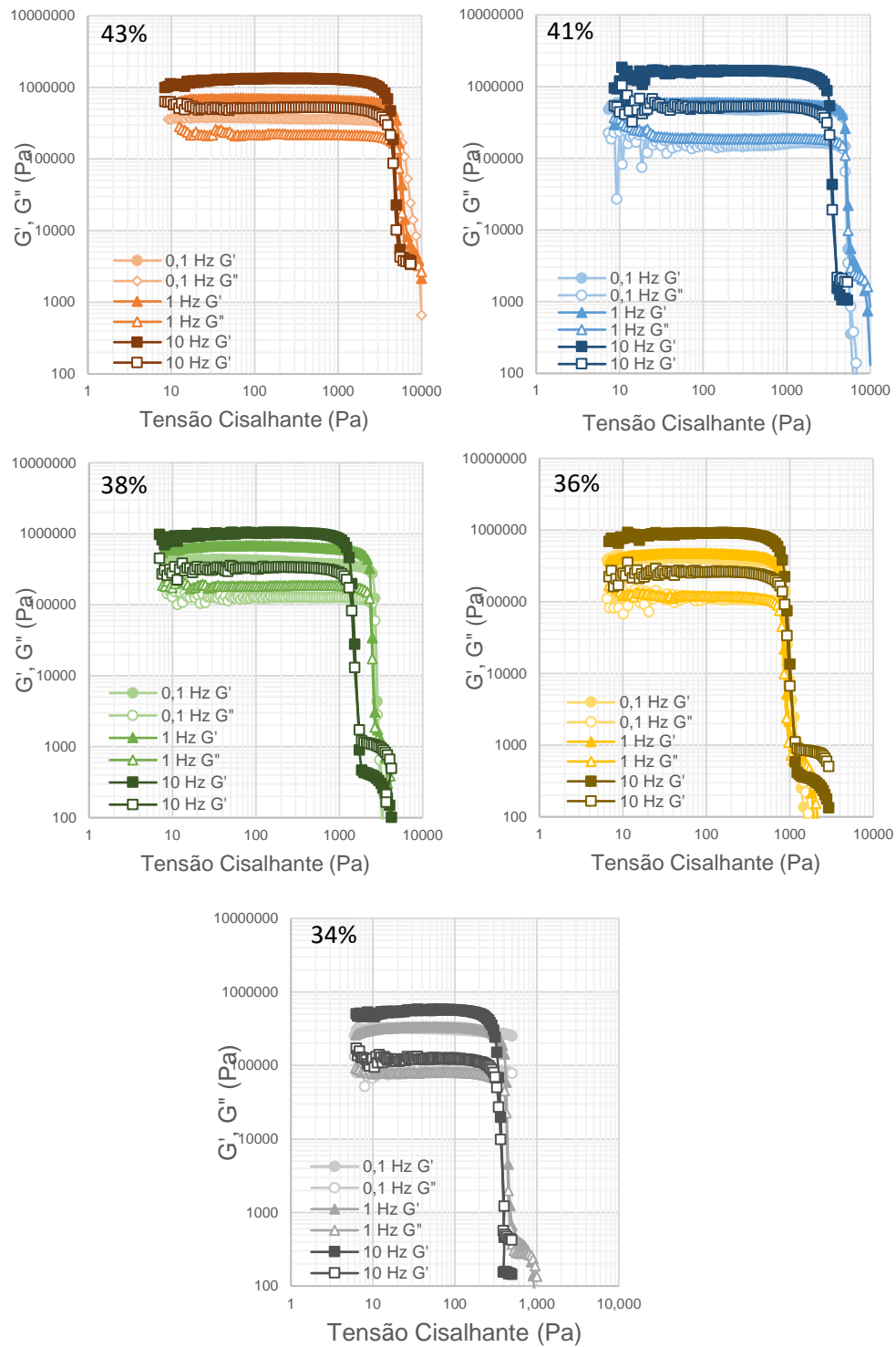
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 24: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Caulim – Gráficos tangente de delta (-) versus tensão de cisalhante (Pa).



Fonte: Elaborado pela autora.

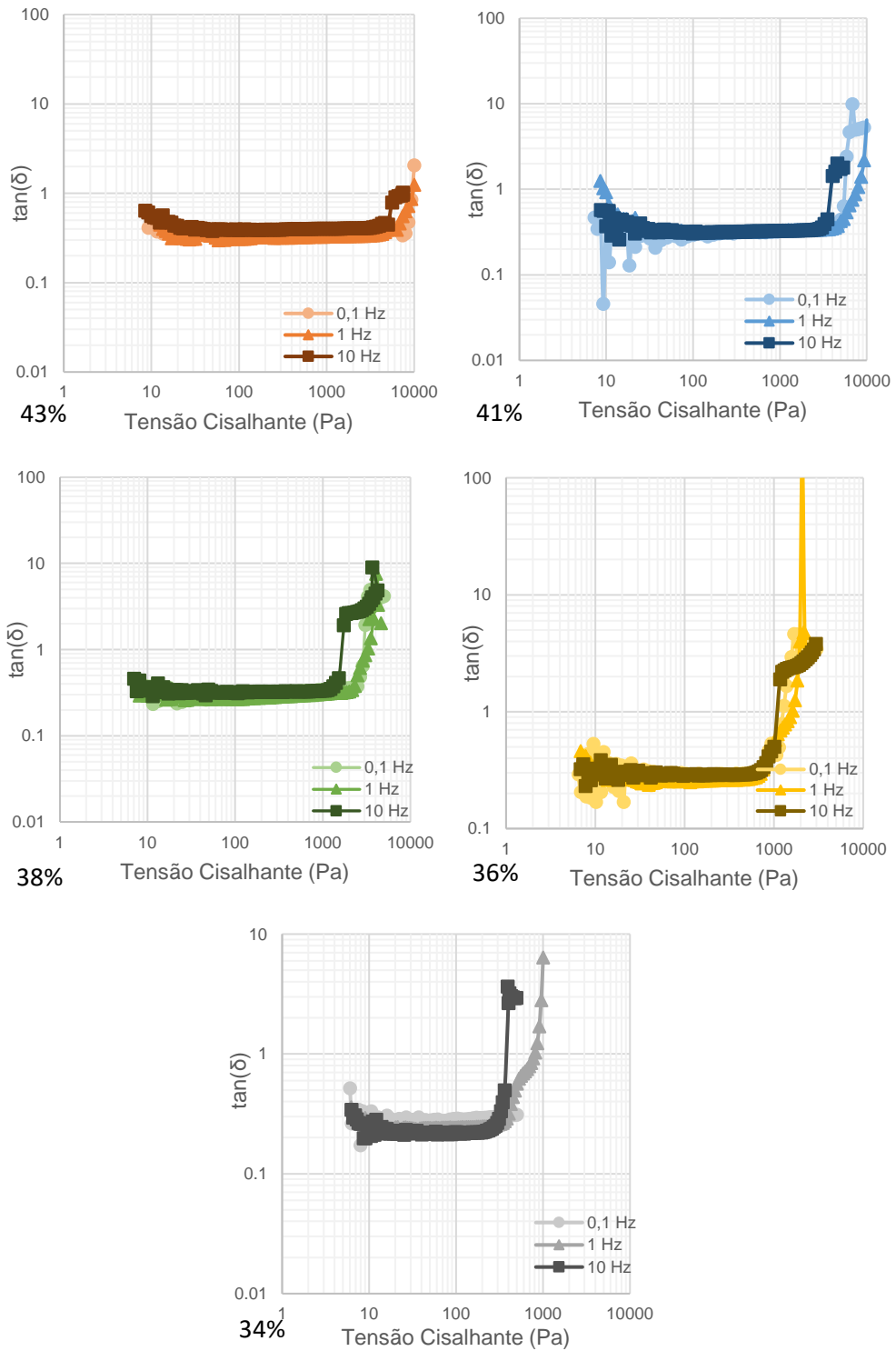
Figura D 25: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tensão de cisalhante (Pa).



Fonte: Elaborado pela autora.

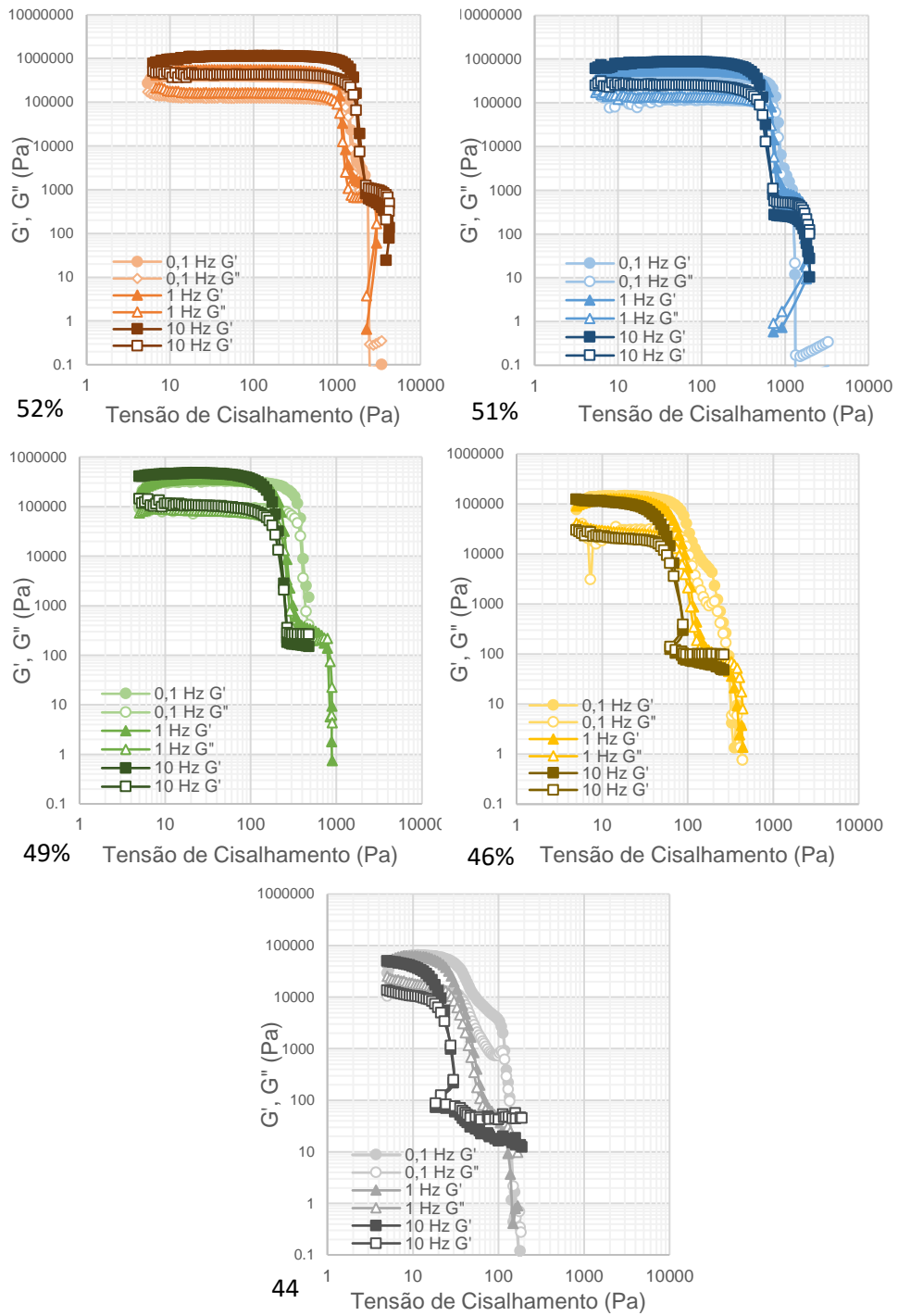


Figura D 26: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos tangente de delta (-) versus tensão de cisalhamento (Pa).



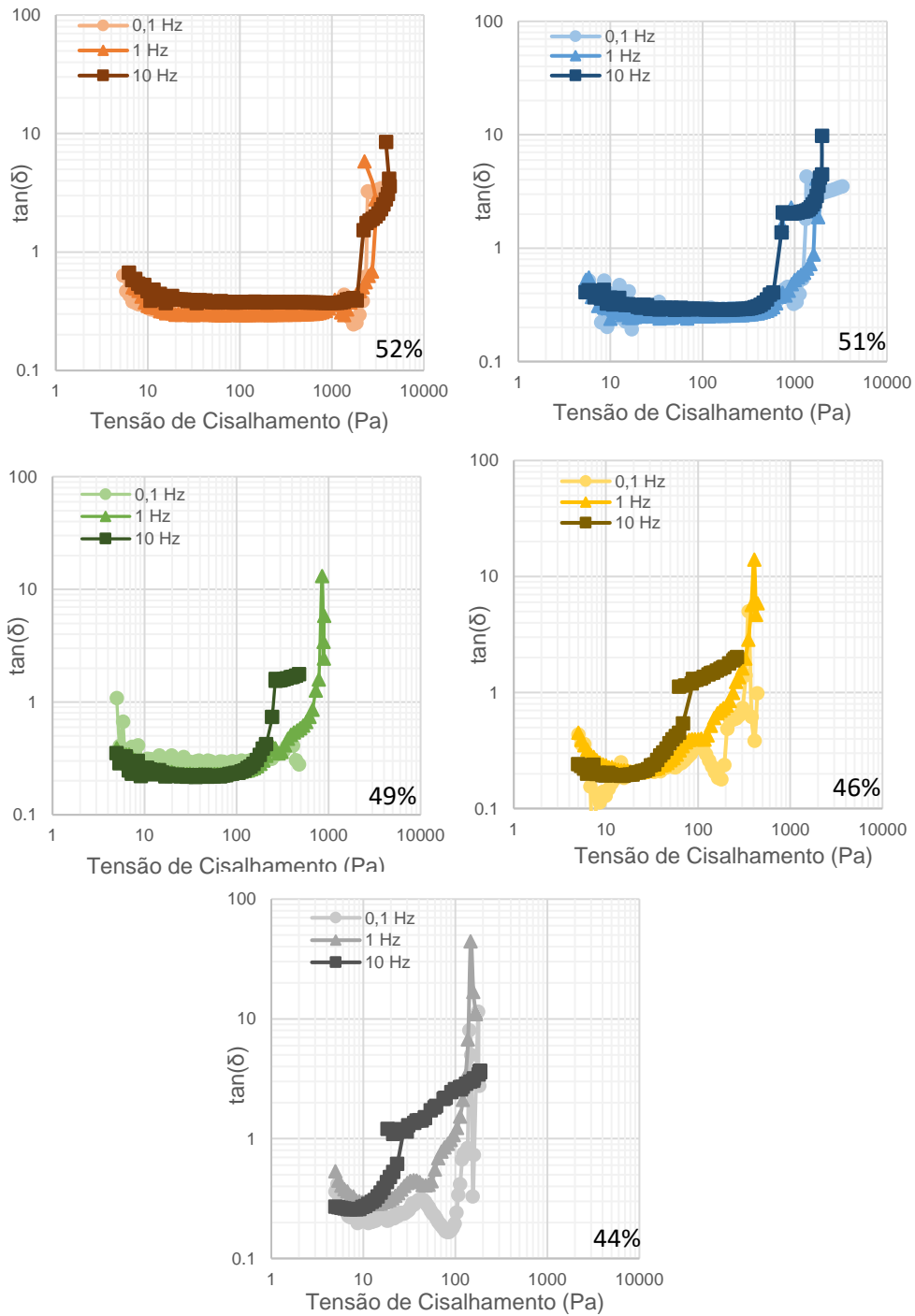
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 27: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tensão de cisalhamento (Pa).



Fonte: Elaborado pela autora.

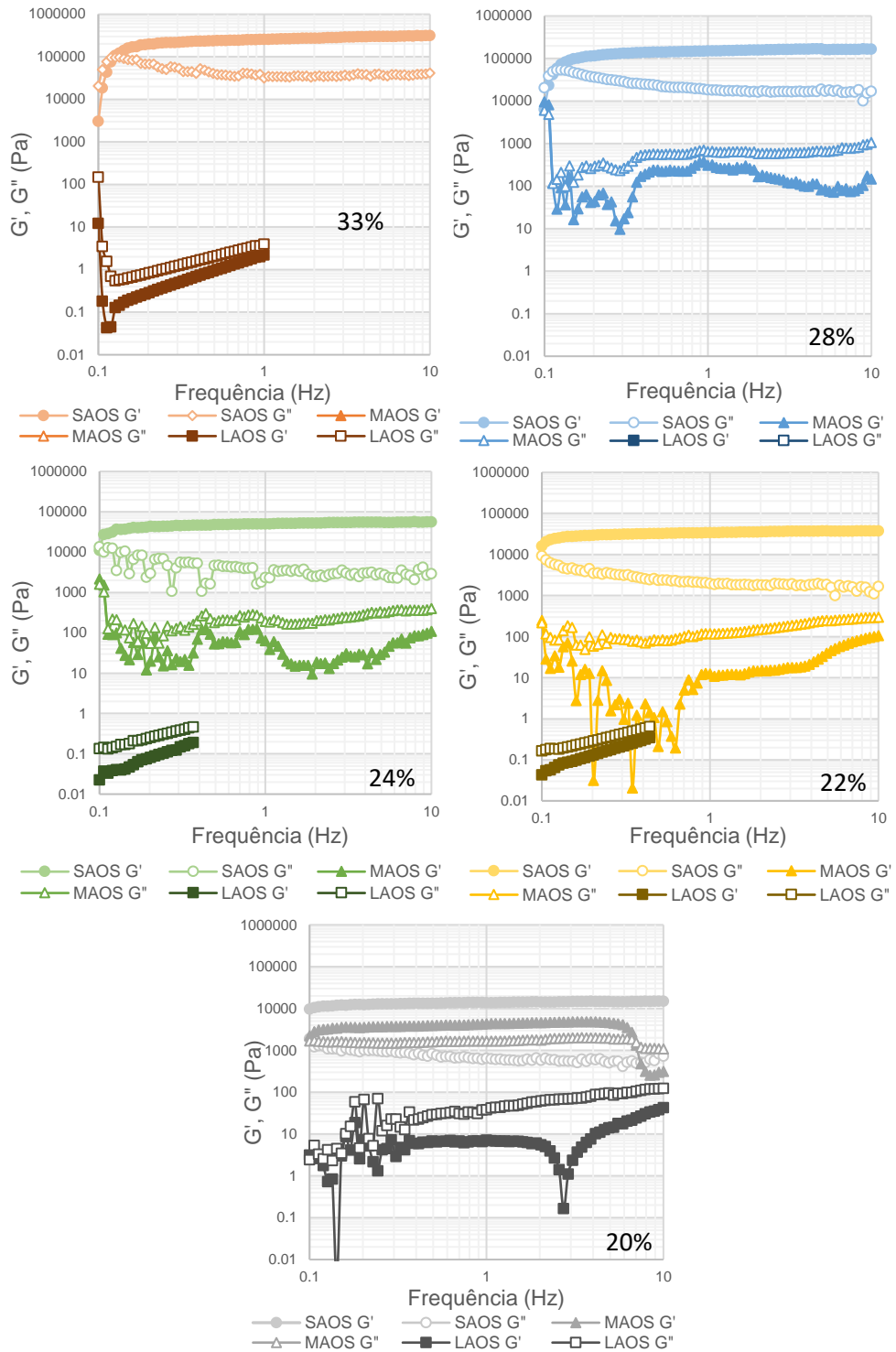
Figura D 28: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tensões do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos tangente de delta (-) versus tensão de cisalhamento (Pa).



Fonte: Elaborado pela autora.

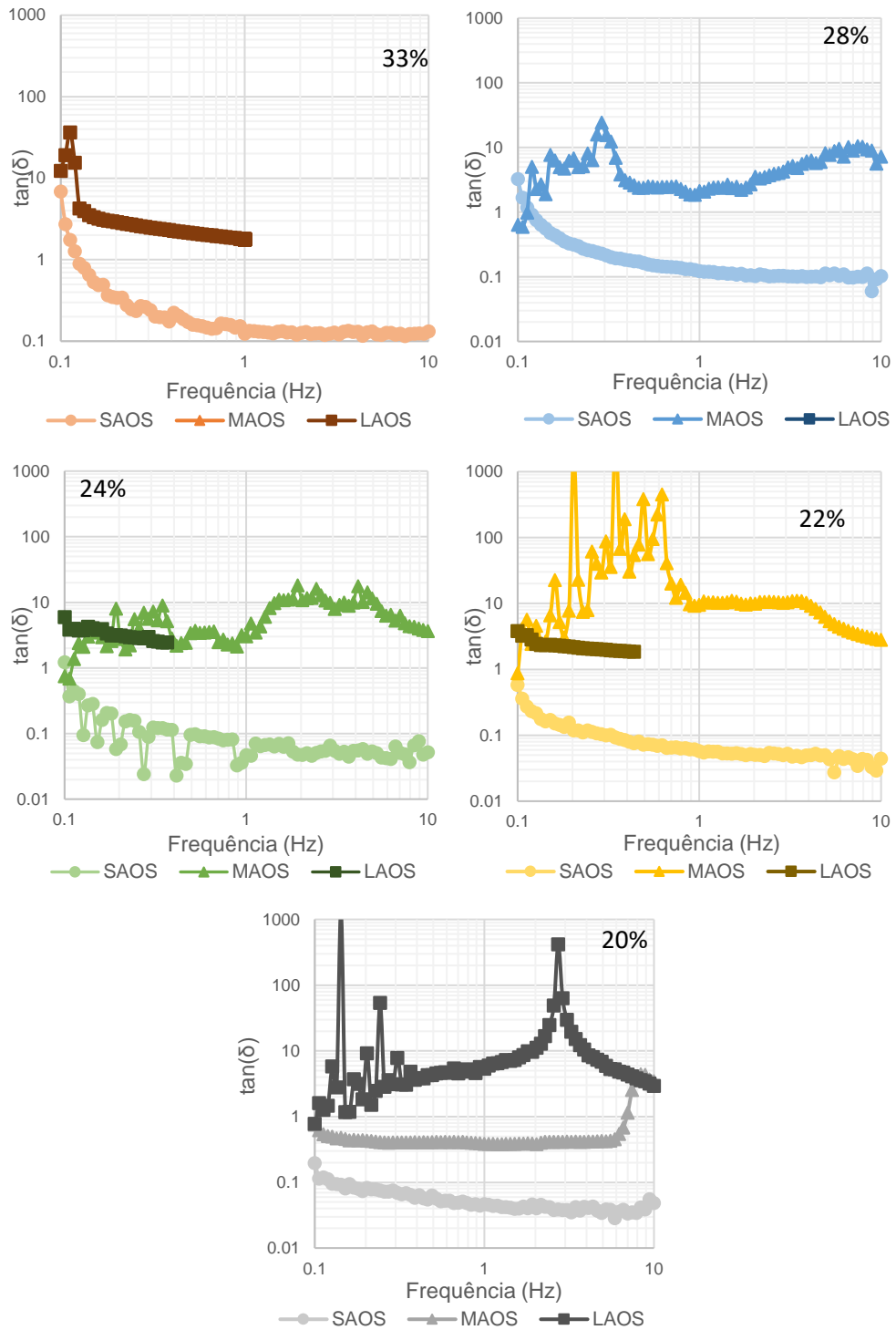
### D-3) Resultados Ensaio Oscilatórios De Frequência

Figura D 29: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência da Bentonita – Gráficos G';G'' (Pa) versus frequência (Hz).



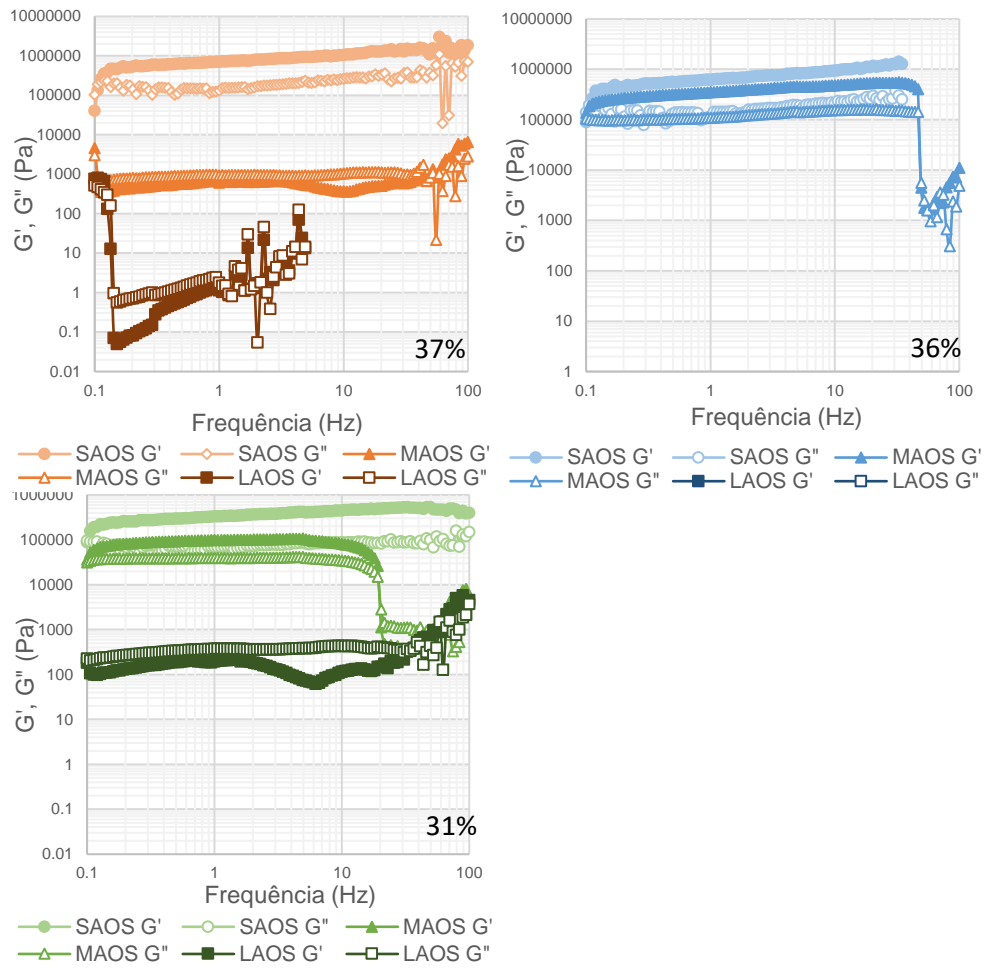
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 30: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência da Bentonita – Gráficos tangente de delta (-) versus frequência (Hz).



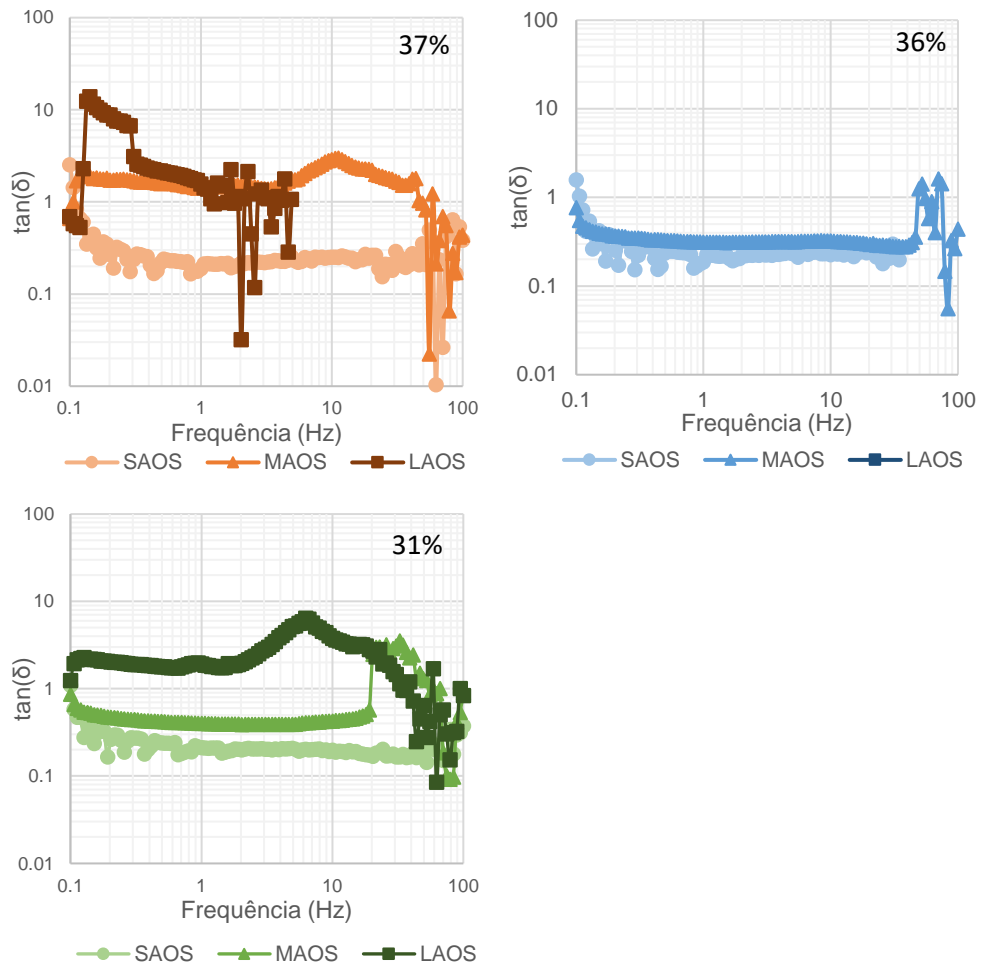
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 31: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Caulim – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus frequência (Hz).



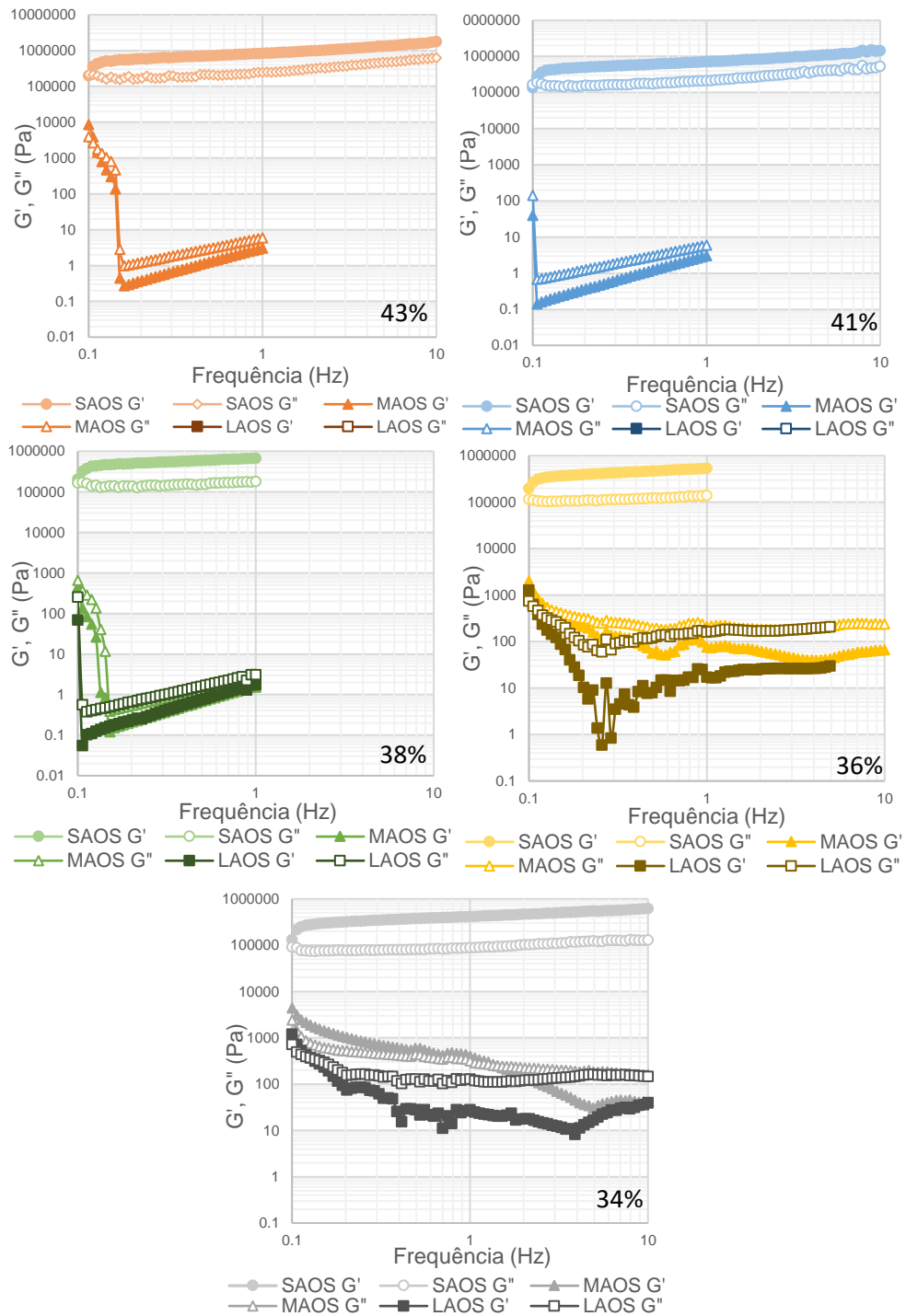
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 32: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Caulim – Gráficos tangente de delta (-) versus frequência (Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

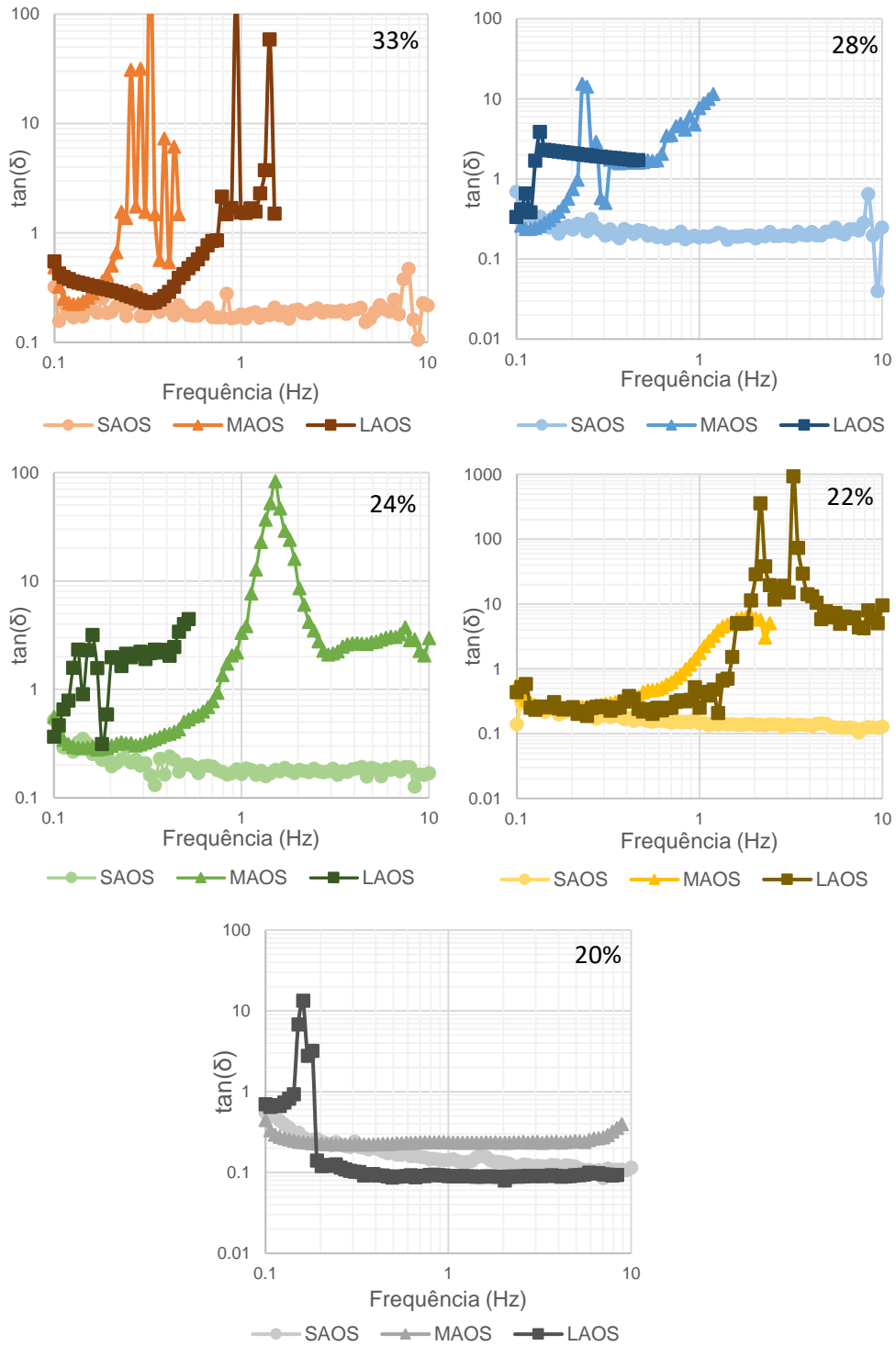
Figura D 33: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos G';G'' (Pa) versus frequência (Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

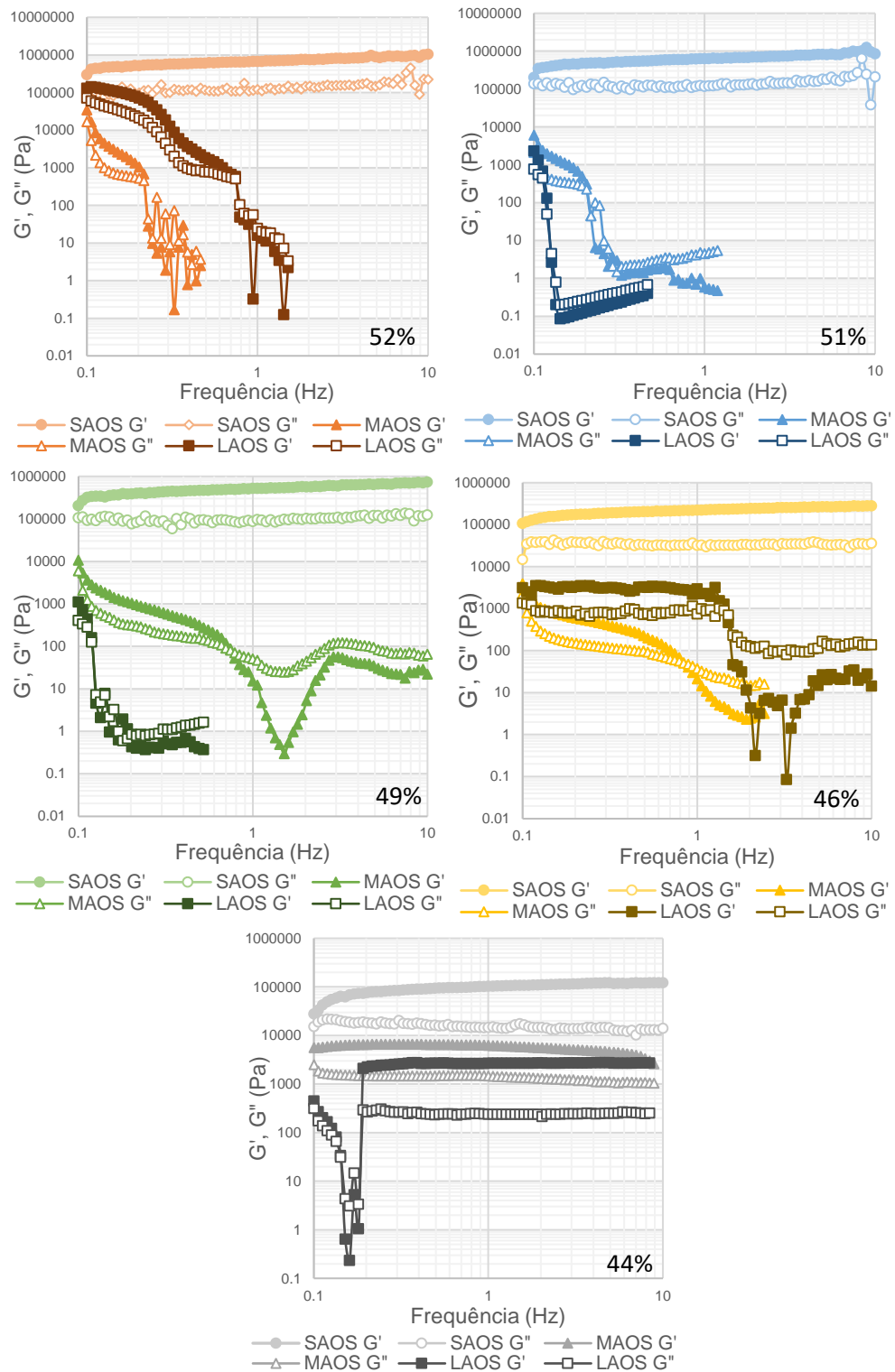


Figura D 34: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos tangente de delta (-) versus frequência (Hz).



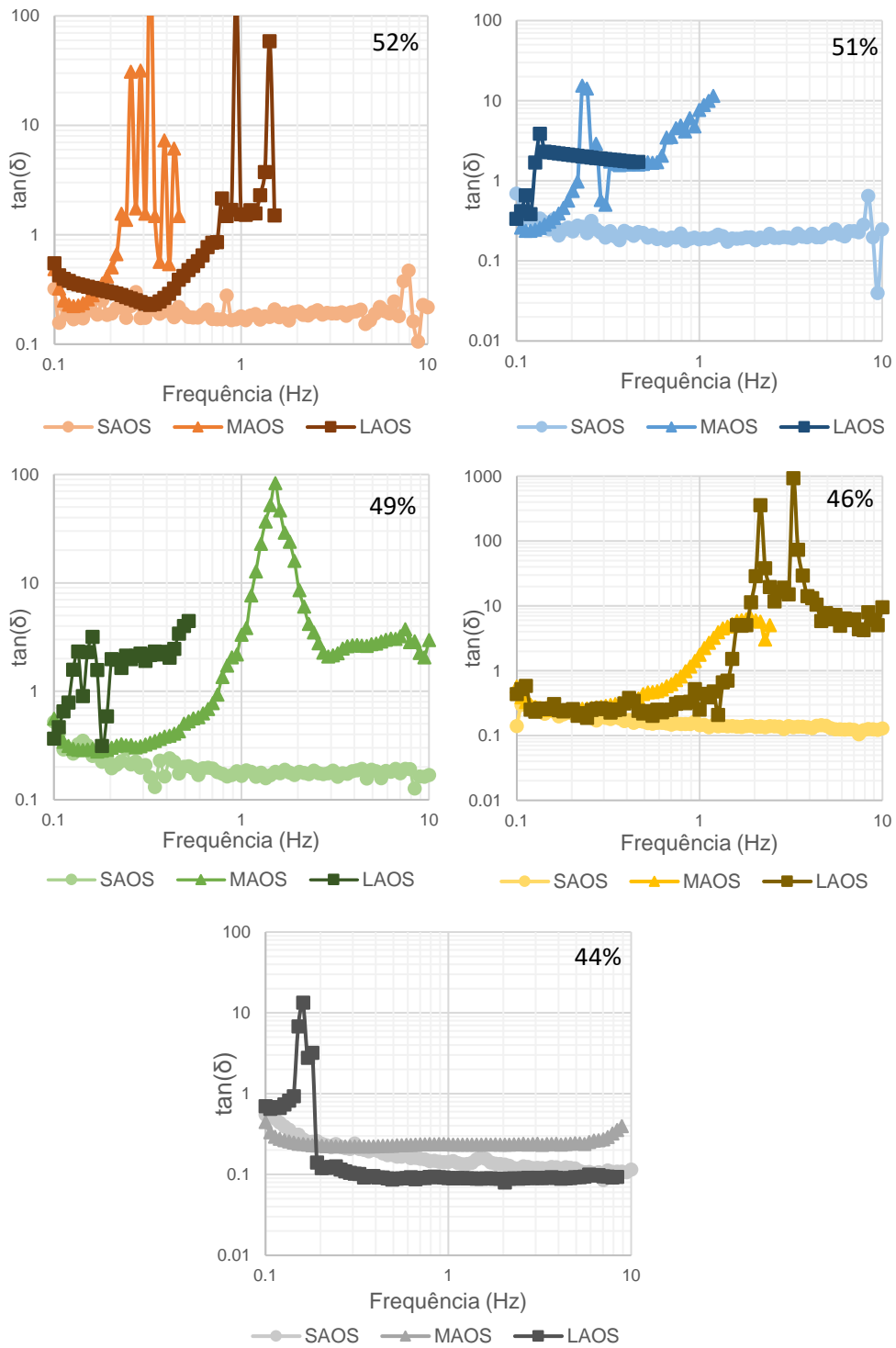
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 35: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus frequência (Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

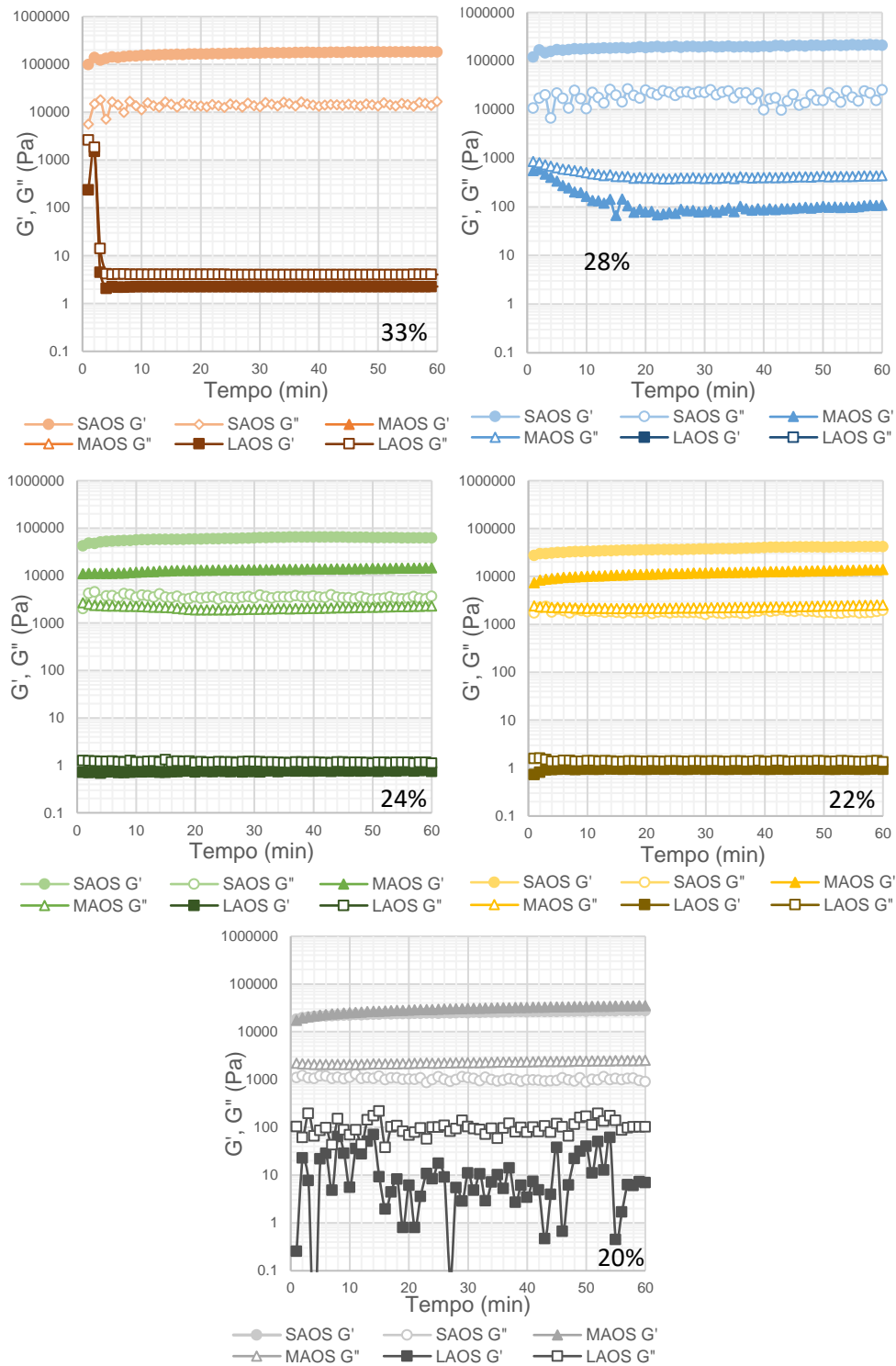
Figura D 36: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Frequência do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos tangente de delta (-) versus frequência (Hz).



Fonte: Elaborado pela autora.

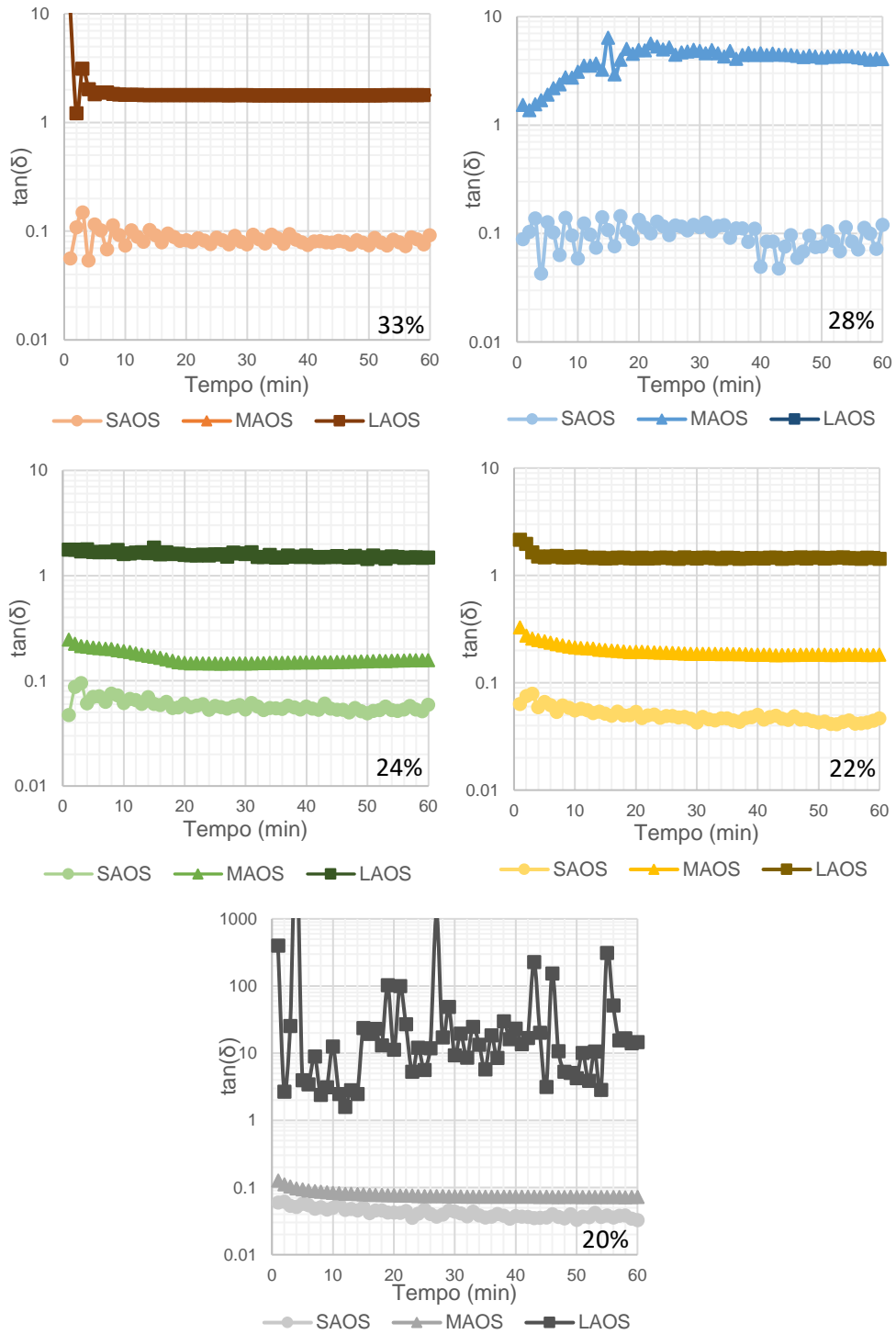
#### D-4) Resultados Ensaio Oscilatórios De Tempo

Figura D 37: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo da Bentonita – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tempo (min).



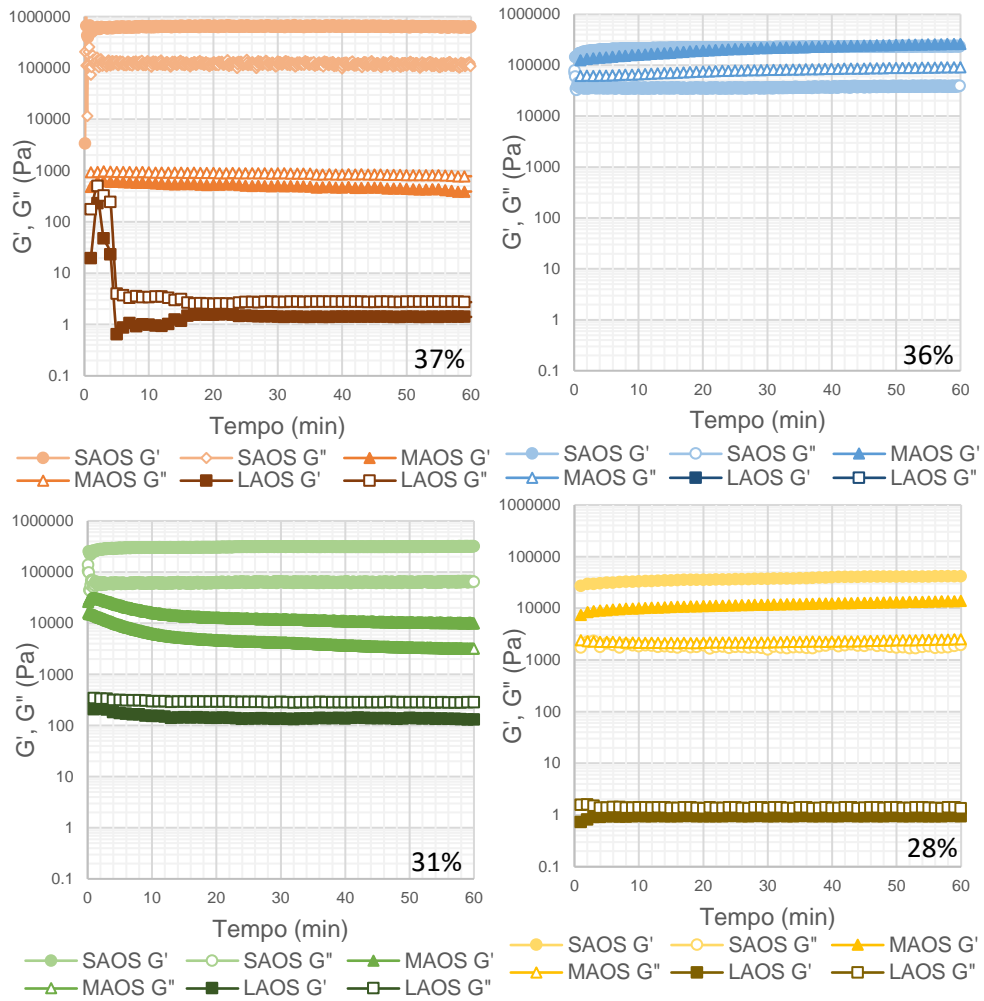
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 38: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo da Bentonita – Gráficos tangente de delta (-) versus tempo (min).



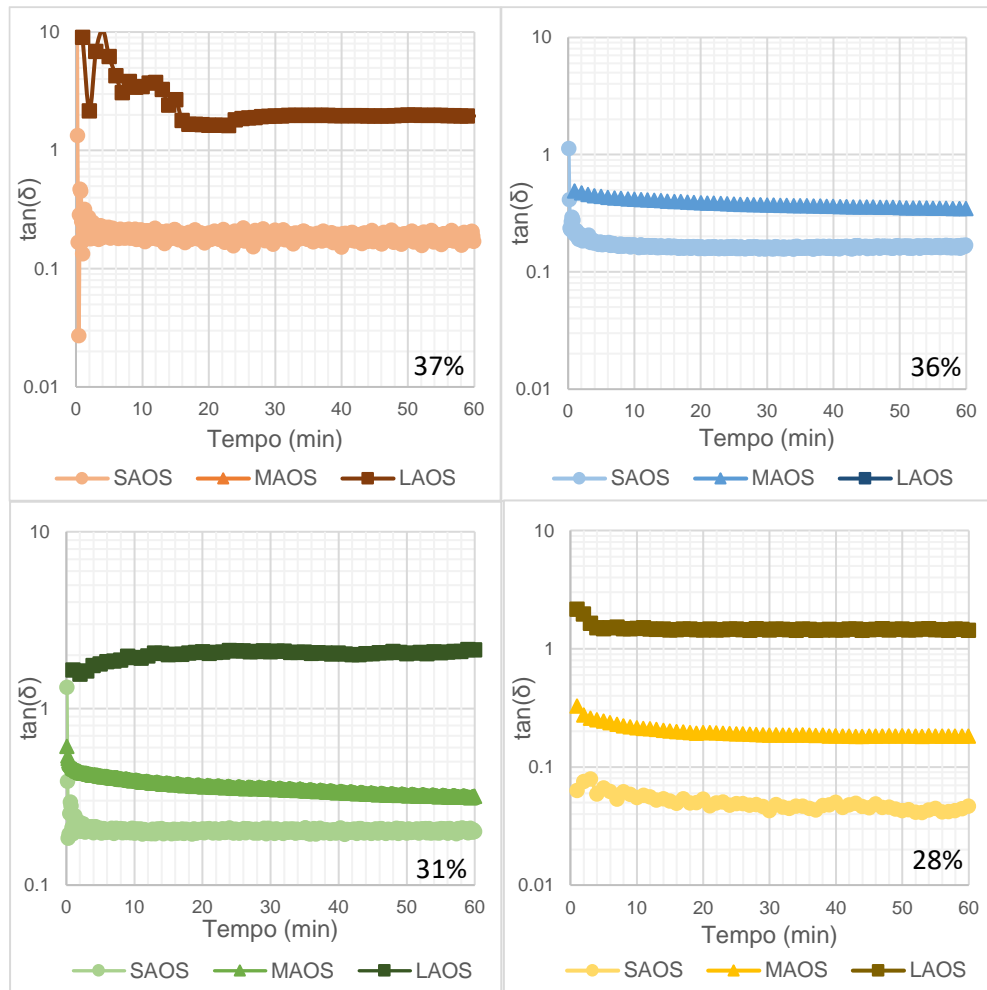
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 39: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Caulim – Gráficos G';G'' (Pa) versus tempo (min).



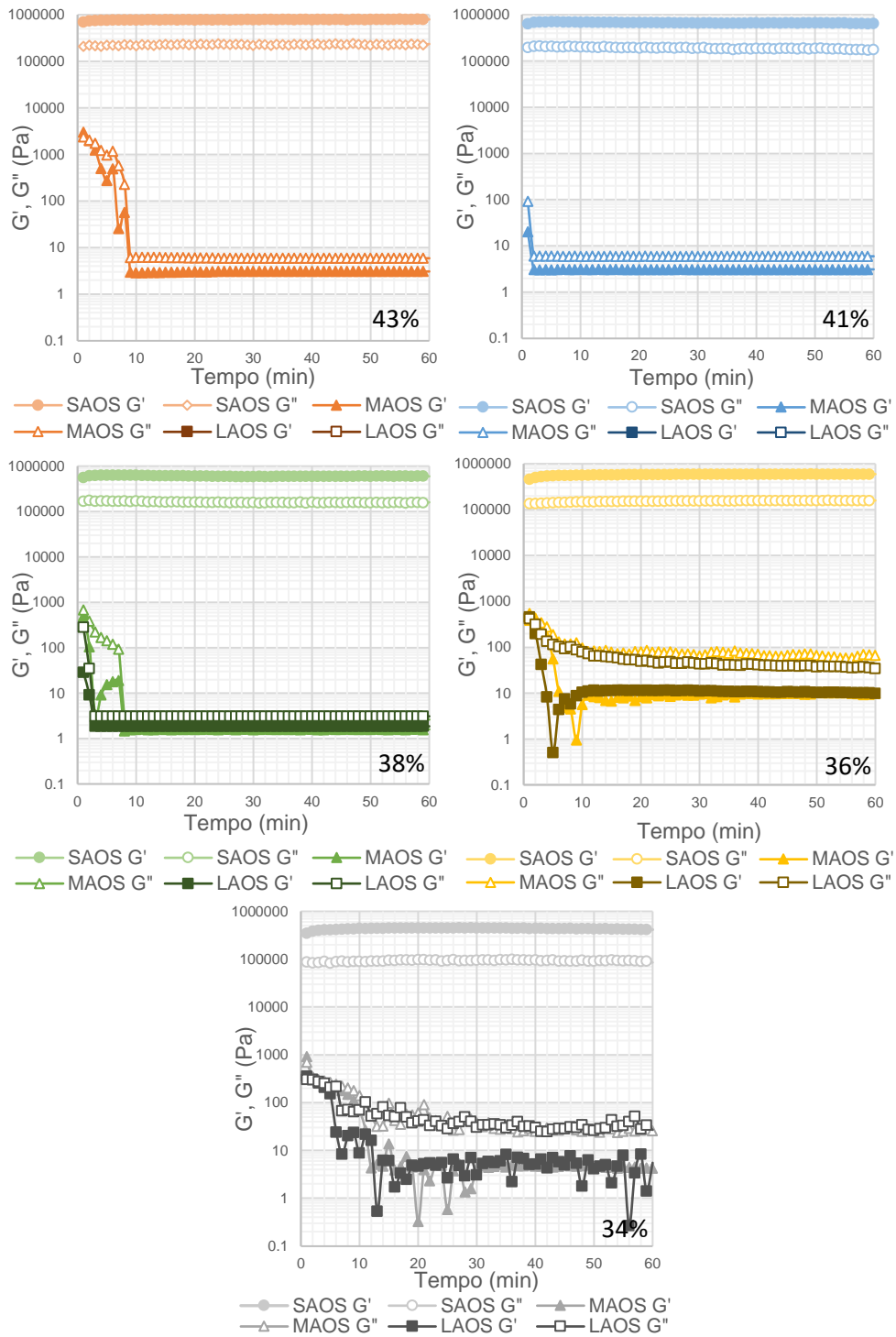
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 40: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Caulim – Gráficos tangente de delta (-) versus tempo (min).



Fonte: Elaborado pela autora.

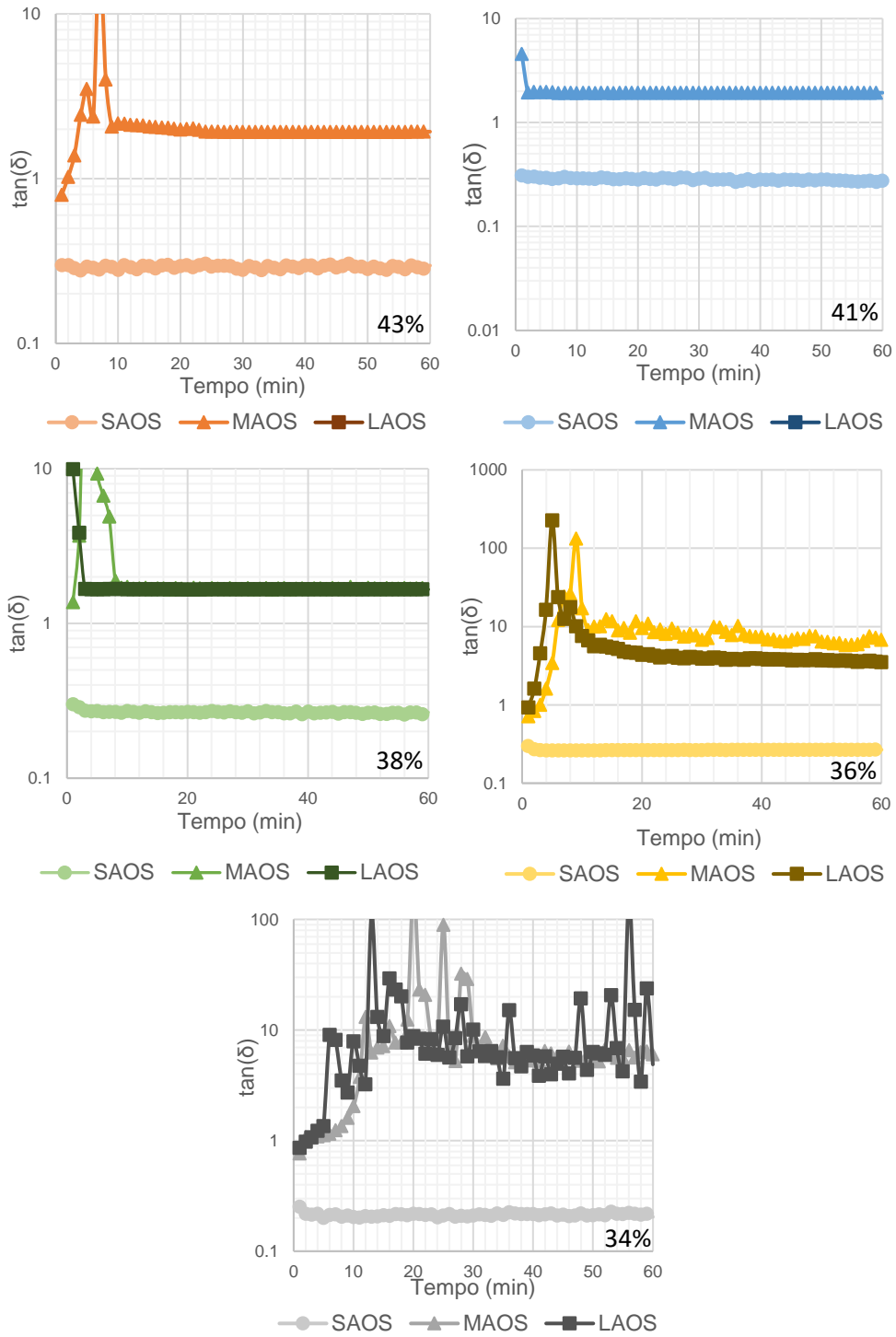
Figura D 41: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina – Gráficos G';G'' (Pa) versus tempo (min).



Fonte: Elaborado pela autora.

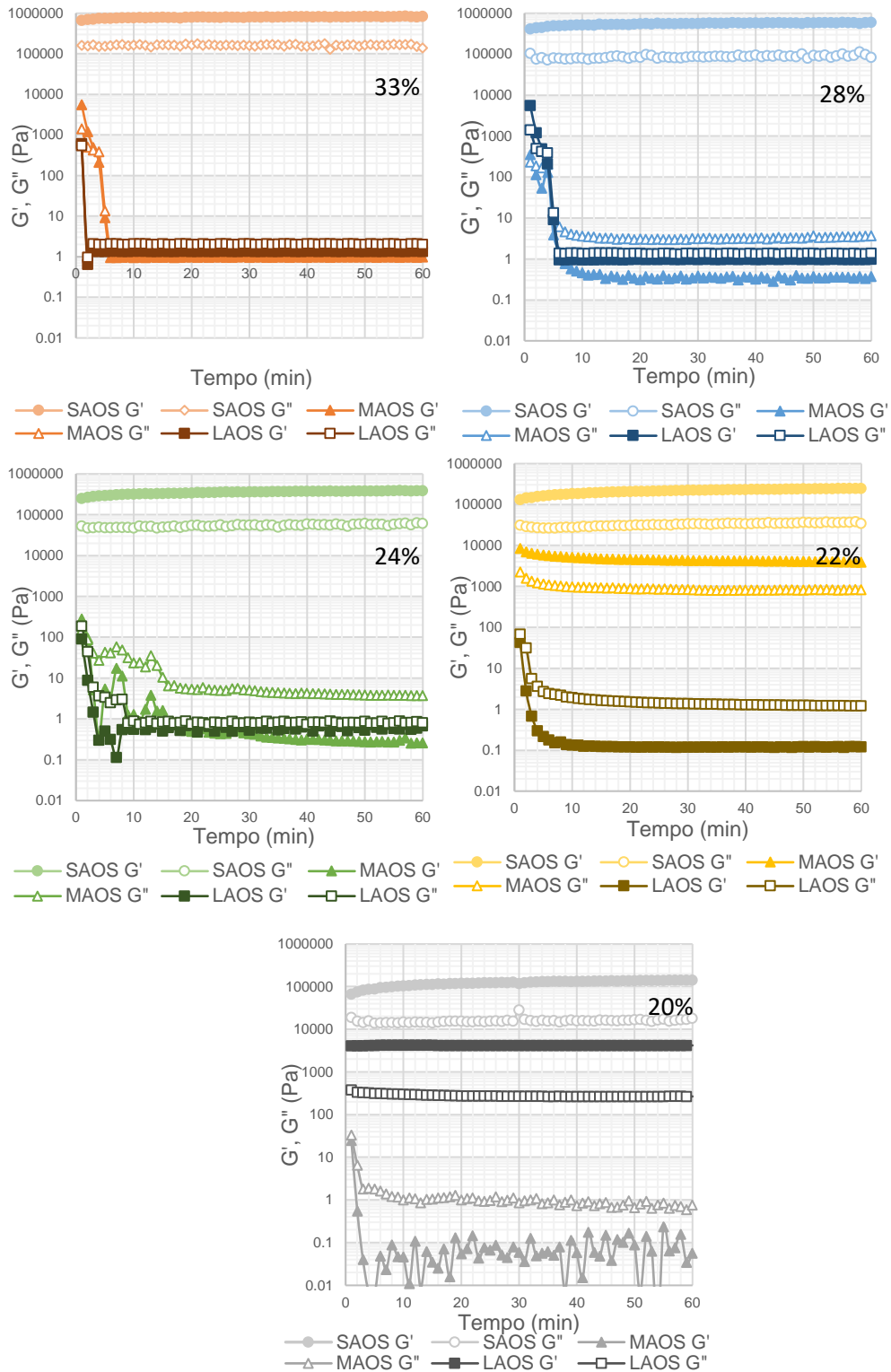


Figura D 42: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria fina - Gráficos tangente de delta (-) versus tempo (min).



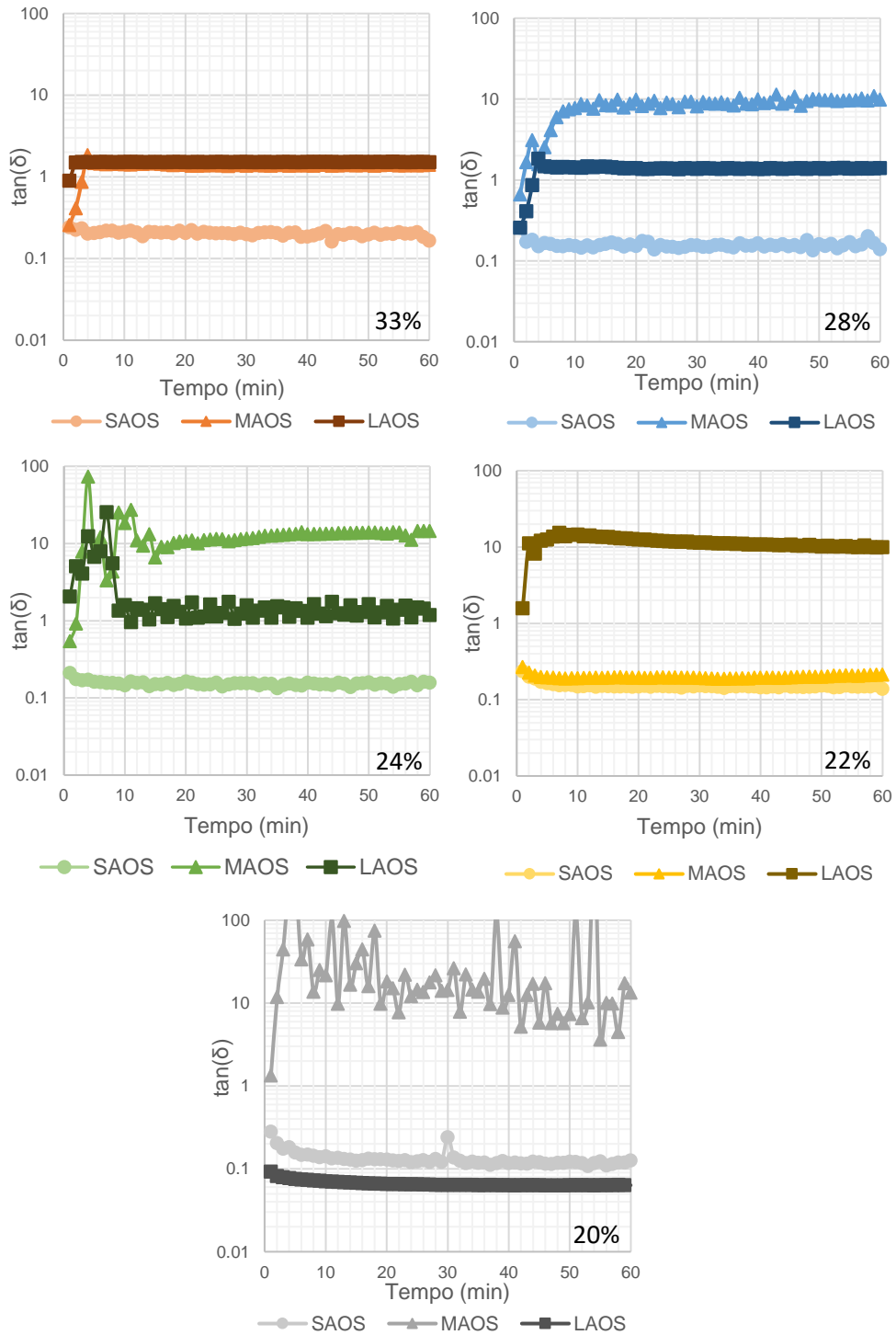
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura D 43: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total – Gráficos  $G'$ ;  $G''$  (Pa) versus tempo (min).



Fonte: Elaborado pela autora.

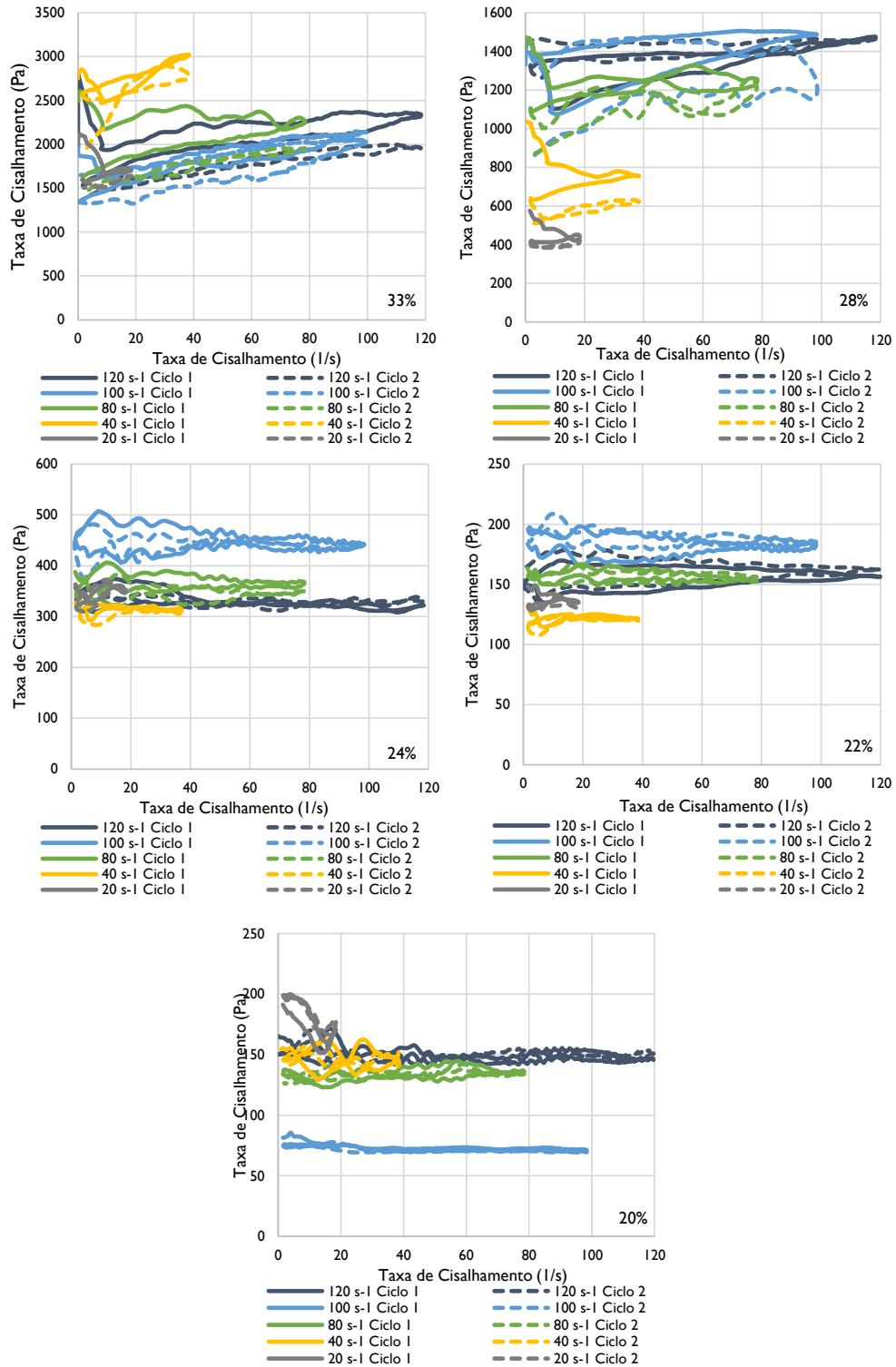
Figura D 44: Resultados dos ensaios Oscilatórios de Tempo do Rejeito de Minério de Ferro em granulometria total - Gráficos tangente de delta (-) versus tempo (min).



Fonte: Elaborado pela autora.

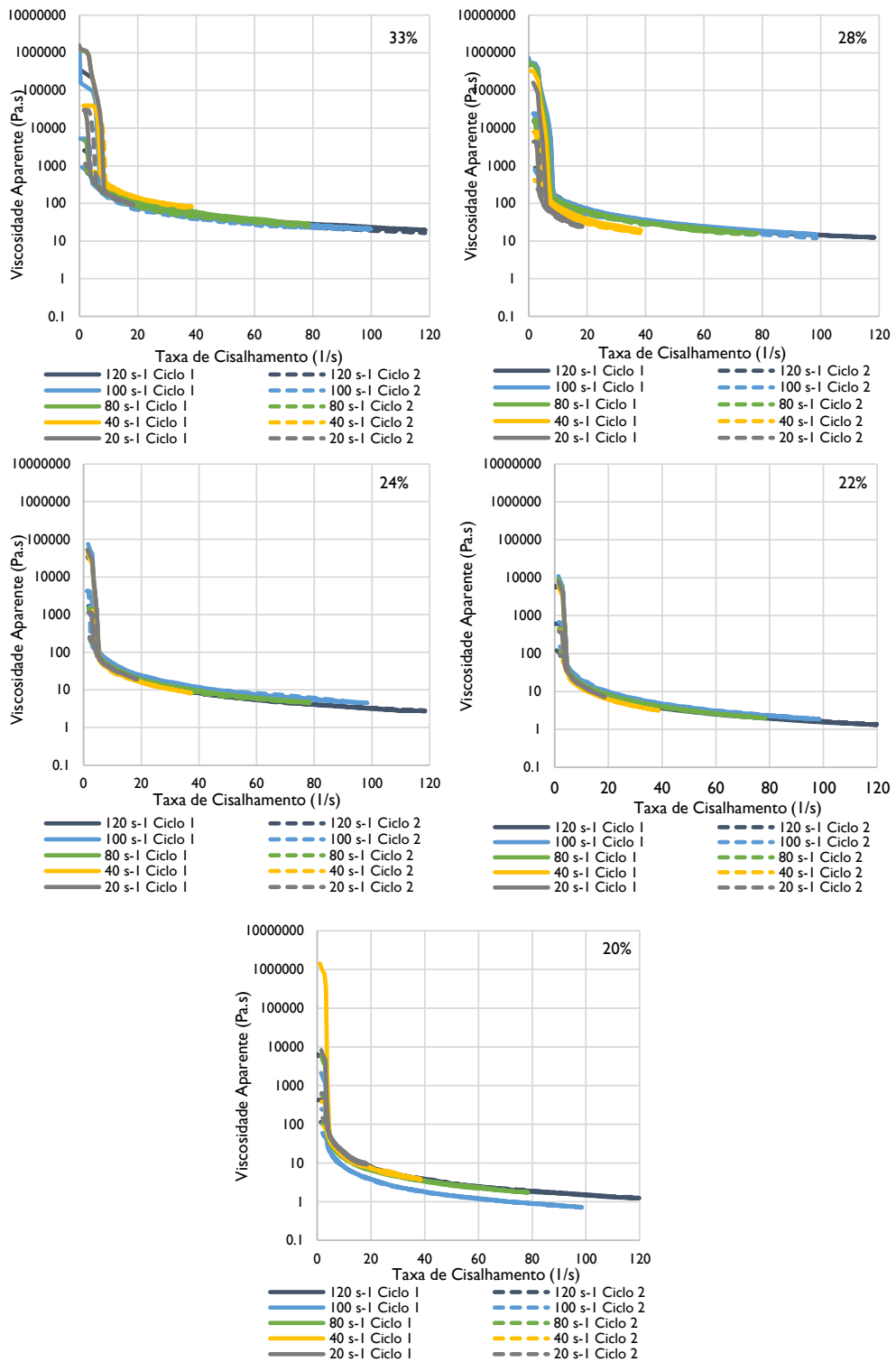
## ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUXO DOS MATERIAIS

Figura E 1: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de bentonita - Gráficos tensão de cisalhamento (Pa) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



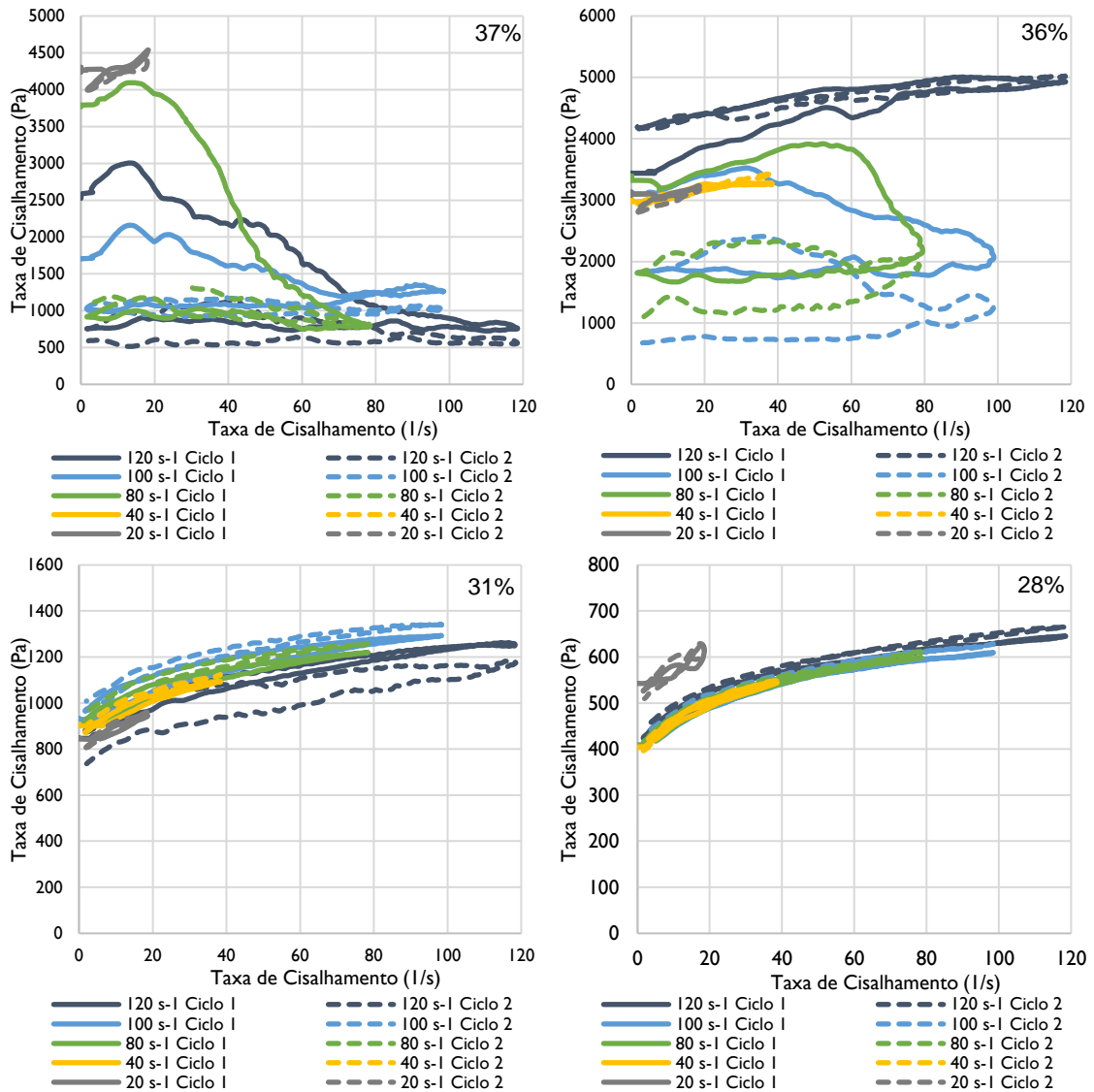
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura E 2: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de bentonita – Gráficos viscosidade aparente (Pa.s) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



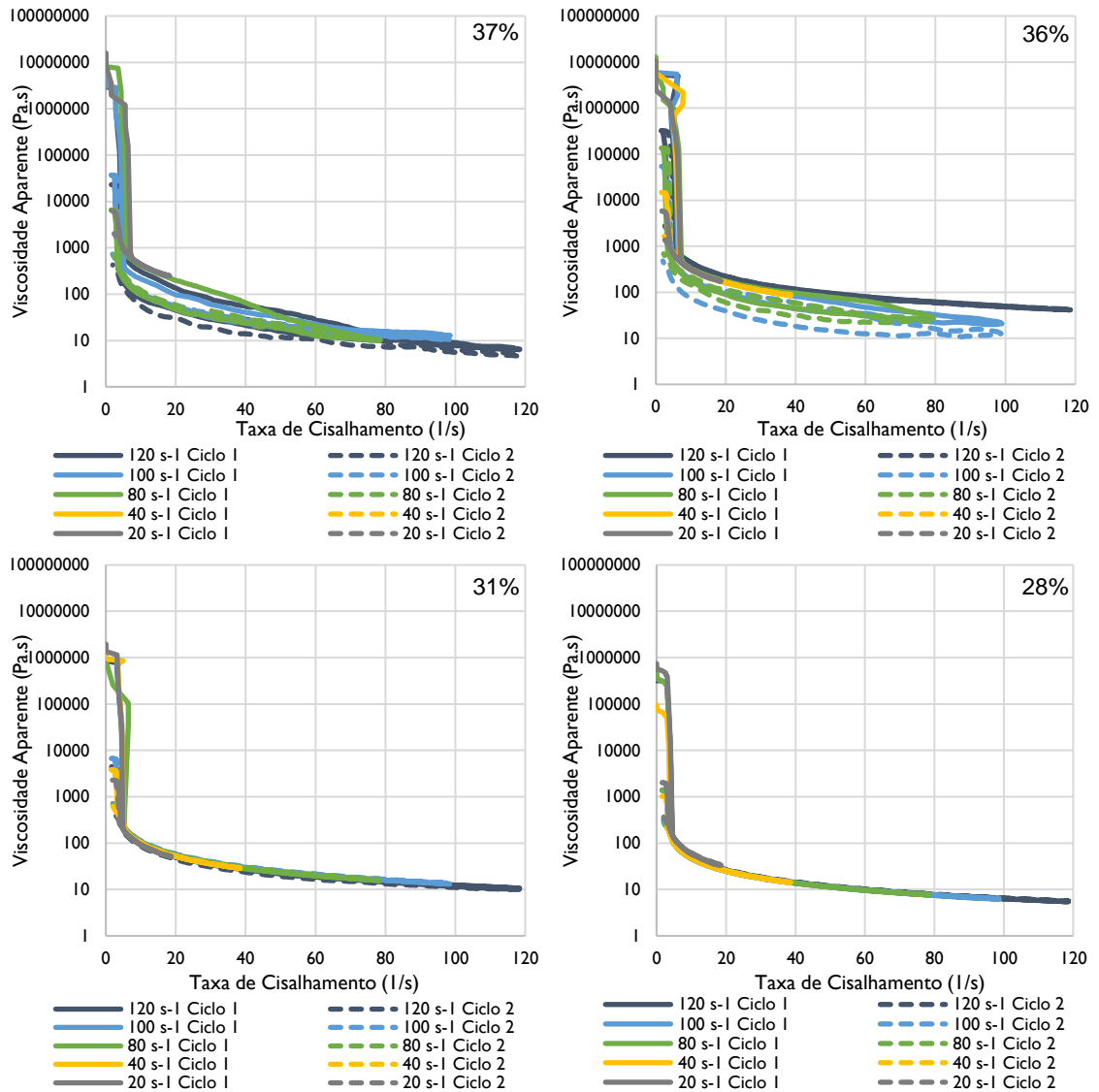
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura E 3: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de caulim - Gráficos tensão de cisalhamento (Pa) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



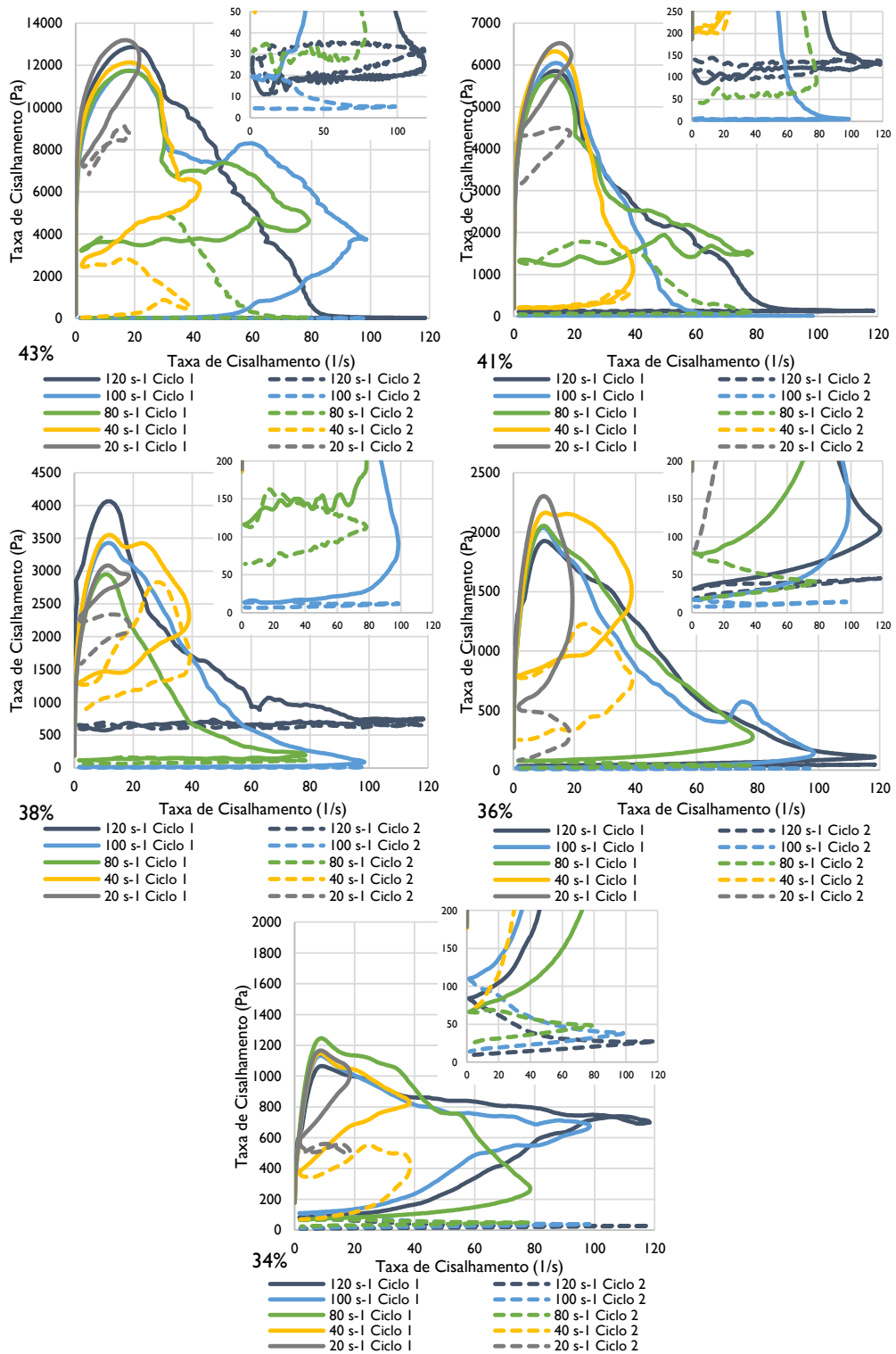
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura E 4: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de caulim – Gráficos viscosidade aparente (Pa.s) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

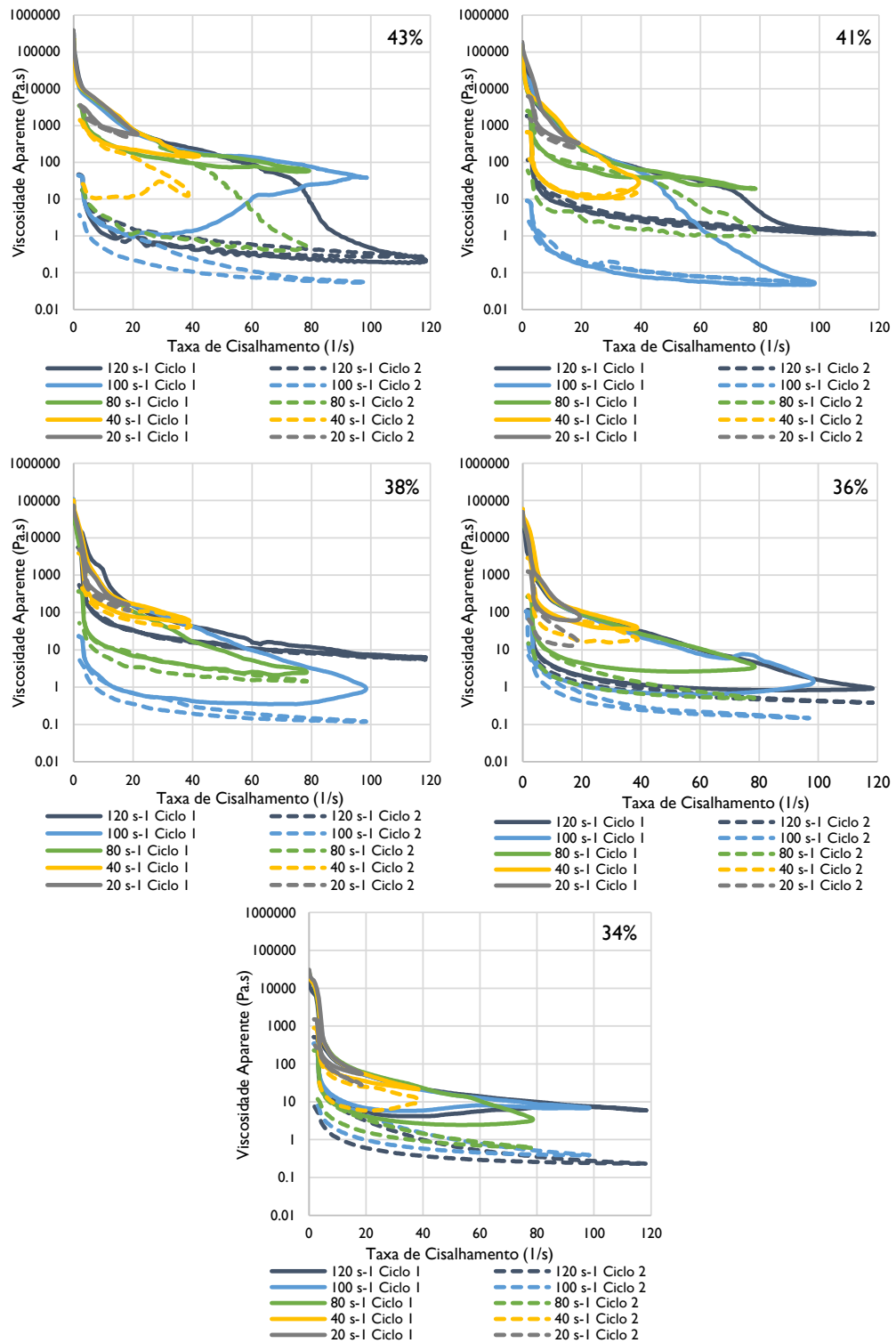
Figura E 5: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina - Gráficos tensão de cisalhamento (Pa) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

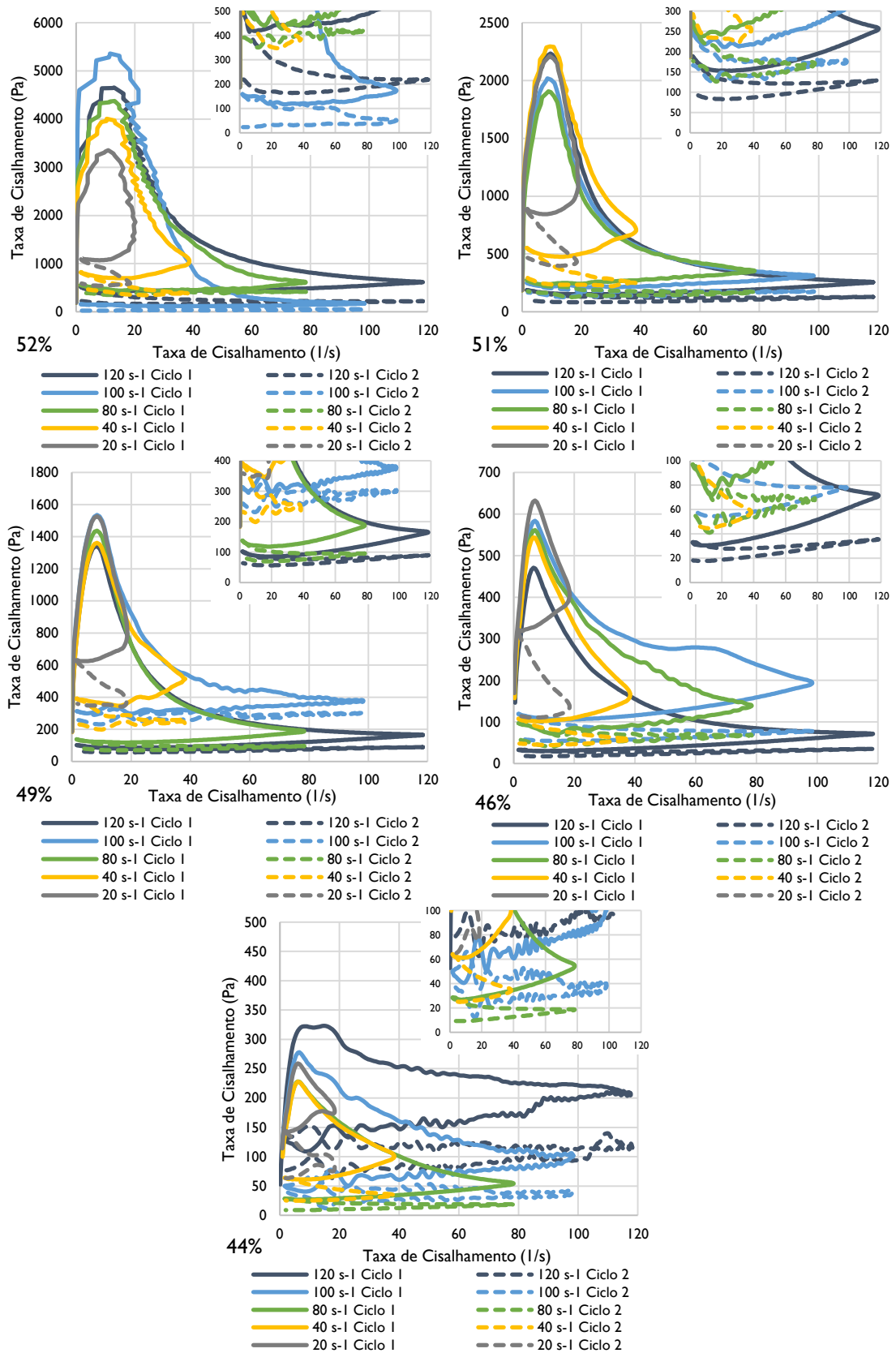


Figura E 6: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria fina – Gráficos viscosidade aparente (Pa.s) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



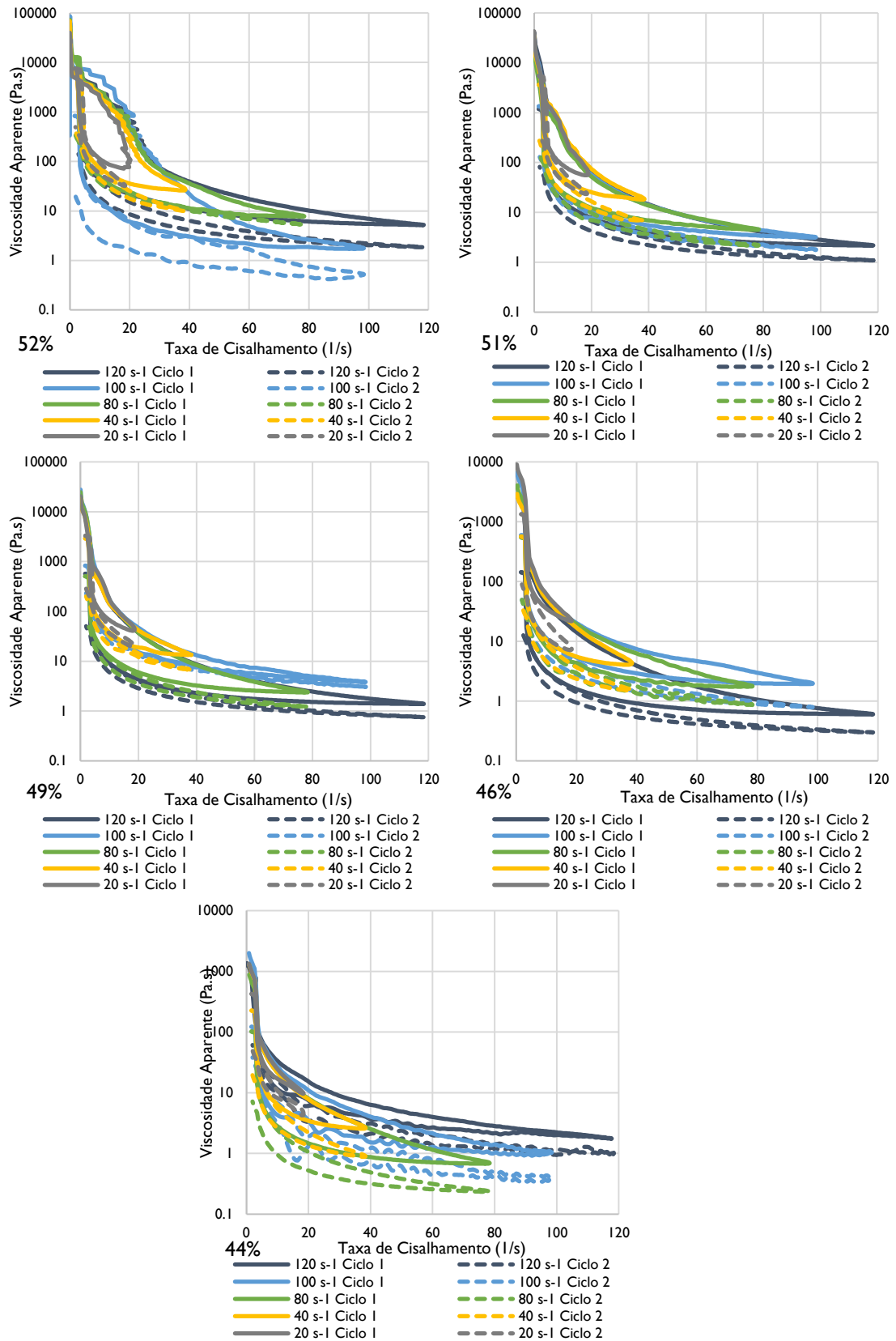
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura E 7: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total - Gráficos tensão de cisalhamento (Pa) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura E 8: Resultados dos ensaios de fluxo das suspensões de rejeito de minério de ferro em granulometria total – Gráficos viscosidade aparente (Pa.s) versus taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pela autora.

