

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS
PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE
ESCOAMENTO EM REJEITOS DE
MINERAÇÃO**

AUTOR: ÁTILA GERALDO R. DOS SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA

OURO PRETO – MAIO DE 2020

ÁTILA GERALDO ROCHIDO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS
PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE
ESCOAMENTO EM REJEITOS DE
MINERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Geotécnica, área de concentração em Geotecnia Aplicada à Mineração.

OURO PRETO

2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Atila Geraldo Rochido dos .
Análise comparativa de métodos para determinação da tensão de escoamento em rejeitos de mineração. [manuscrito] / Atila Geraldo Rochido dos Santos. - 2020.
113 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Pereira.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica.

1. Reologia. 2. Escoamento. 3. Solos - Vane Test. 4. Concreto - Slump Test. I. Pereira, Eleonardo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Átila Geraldo Rochido dos Santos

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO EM REJEITOS DE MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração em *Geotecnia Aplicada à Mineração*.

Aprovada em 15 de maio de 2020

Membros da banca

Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Mário Luís Cabello Russo - (Instituto Federal de Minas Gerais)

O Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 05/03/2021



Documento assinado eletronicamente por **Eleonardo Lucas Pereira**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/03/2021, às 14:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0143207** e o código CRC **74842515**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, o maior orientador da minha vida. Ele nunca me abandonou nos momentos de necessidade.

Aos meus pais, João e Adinônia, por sempre acreditarem em mim e por terem abdicado de suas vidas em prol das realizações e da felicidade de seus filhos.

As minhas irmãs Adrielle e Ariane que tanto me ajudaram.

À minha amada esposa Marcia, por todo amor, incentivo, apoio e compreensão. Nada disso teria sentido se vocês não existissem na minha vida.

Dedico também ao meu Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira, pela confiança, paciência, incentivo, amizade e excelente orientação. Muito Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Utilizar apenas uma página com o intuito de homenagear as pessoas que fizeram parte desta jornada não é nada fácil. Foram anos de dedicação para chegar até aqui para conseguir alcançar mais este desafio proposto na minha vida. “A grande conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas” (Paulo Coelho).

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus por me carregar no colo, dando sabedoria e força para atingir o meu objetivo, por ser o caminho nos momentos de incerteza e por ser o refúgio no momento necessário.

A minha esposa Márcia, por estar sempre ao meu lado, me proporcionando força e coragem para continuar e nunca desistir dos meus objetivos.

A minha família, especialmente aos meus pais, que muitas vezes renunciaram seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Não foram apenas pais, mas amigos e companheiros.

A meus amigos das empresas Fugro e Vale, especialmente Mônica Moncada, que dedicou horas comigo debatendo o tema da minha dissertação, me ajudando com a pesquisa e contribuindo com toda sua experiência. Também não posso deixar de agradecer a Washington Pirete e Rodrigo Marinaro, que foram meus grandes amigos de trabalho, os quais nunca irei esquecer, pelo simples fato de acreditarem em mim e me ajudarem a conquistar este resultado, sou-lhes muito grato.

Agradeço a todos amigos da UFOP que conquistei durante esta curta jornada, foram horas de estudo em conjunto. Como diria nosso caríssimo professor Romero Cesar, desde o primeiro dia de aula: “Sempre procurem apoio uns nos outros, pois somente assim vocês sairão daqui vencedores”. A companhia de todos vocês foi essencial para tornar tudo mais fácil e agradável.

Agradeço ao meu orientador Prof. Eleonardo Lucas Pereira não só pela orientação, atenção e dedicação, mas também por acreditar e confiar em meu trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento da NUGEO, que estimularam meus conhecimentos e me orientaram em assuntos diversos. Mais uma vez, muito obrigado!

RESUMO

As propriedades reológicas dos rejeitos são amplamente utilizadas na indústria da mineração como ferramenta de investigação, capazes de fornecer o correto detalhamento dos sistemas de bombeamento das plantas de tratamento de minérios, transporte dos rejeitos para deposição e parâmetros de entradas para *software* que realizam análises de rupturas hipotéticas de barragens de rejeitos. As propriedades reológicas dos rejeitos são obtidas a partir de ensaios geotécnicos de laboratório, ou seja, os ensaios de reometria. Nesse contexto, os ensaios realizados através dos *Slump* são usualmente utilizados pela facilidade de ser executado e promover baixo custo financeiro. Entretanto, é possível encontrar, nas pesquisas que tratam da sua utilização, questionamentos referentes aos materiais e os procedimentos de realização dos testes, como, por exemplo, os moldes com formas geométricas do tipo cilíndrica ou do tipo tronco de cone, as metodologias de cálculos utilizadas, a influência dos tempos de leituras, bem como as estruturas dos moldes. Considerando os fatores mencionados, o presente estudo objetivou avaliar, por meio de ensaios de *Slump* e de palheta (*Vane Test*), a tensão de escoamento do rejeito do minério de ferro, fazendo-se o uso de diferentes tipos de materiais e de procedimentos para realização destes ensaios. Neste estudo, foi realizada a caracterização dos rejeitos de mineração, definidas as dosagens associadas às misturas dos rejeitos e determinada a tensão de escoamento através de ensaios de *Vane* e de *Slump*. Os ensaios de *Vane* foram realizados com o objetivo de correlacionar os seus resultados com aqueles obtidos no teste de *Slump*, considerando os valores de tensão de escoamento. As análises mostraram-se satisfatórias, dado que o *Vane Test* apresentou bons resultados validando a rotina das correlações realizadas nesta pesquisa. Apesar de pequenas variações na correlação, ao verificar suas regressões lineares, constatou-se que os resultados foram satisfatórios, no âmbito da proposta inicial desta dissertação.

Palavra-Chave: Reologia; Tensão de Escoamento; *Vane Test*; *Slump Test*;

ABSTRACT

The rheological properties of tailings are widely used in the mining industry as a research tool. They are capable of providing details for pumping systems of ore treatment plants, tailings transportation networks for disposal, and input parameters for software which perform hypothetical failure analysis of tailings dams. The rheological properties of tailings are obtained from geotechnical laboratory tests – rheometry tests. In this context, *Slump tests* are usually conducted due to their ease of execution and low financial cost. However, when dealing with research regarding *Slump tests*, one may have questions regarding the materials and the procedures for carrying out the tests. These questions might be related, for instance, to the cylindrical type or cone type molds, the calculation methodologies, the influence of the reading times, and the mold structures. Considering the aforementioned factors, this work aimed to evaluate, through *Slump* and *Vane Tests*, the yield stress of iron ore tailings, using different types of materials and procedures for these tests. In this study, the characterization of mining tailings was carried out, the dosages associated with the tailings blends were defined and the yield stress was determined through *Vane* and *Slump tests*. The *Vane tests* were performed with the objective of correlating their results with those obtained in the *Slump test*, considering the yield stress values. The analyzes proved to be satisfactory, given that the *Vane Test* showed results that validated the routine of the correlations carried out in this research. Despite small variations in the correlation, when verifying their linear regressions, the results were satisfactory to the scope of the initial proposal of this dissertation.

Keyword: Rheology, Yield Stress, *Vane Test*, *Slump Test*.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução do valor da Produção Mineral Brasileira (PMB) em bilhões de dólares (IBRAM, 2018).....	1
Figura 1.2 – Curva de distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de mineração (Do autor, 2019).....	2
Figura 2.1– Modelo de cisalhamento simples entre placas paralelas, desenvolvido por Isaac Newton. (Ferreira <i>et al.</i> , 2005).....	10
Figura 2.2 - Deformação por (a) tração, (b) cisalhamento e (c) compressão.	11
Figura 2.3 – Curvas de fluxo típicas para suspensão concentrada: (a) relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento; (b) relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento (Tadros, 1987).....	12
Figura 2.4 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico (Do autor, 2019).	13
Figura 2.5 – Classificação do comportamento reológico de fluidos independentes do tempo (Fox e McDonald, 1998 <i>apud</i> Castro, 2007).....	14
Figura 2.6 – Resultados fornecidos a partir de um ensaio de deformação constante (a) e resultados fornecidos a partir da aplicação de um torque constante (b) (Sousa, 2005)..	16
Figura 2.7 – Representação esquemática do ensaio de palheta (Nguyen e Boger, 1985).	17
Figura 2.8 – Modelo padrão do equipamento utilizado no ensaio de abatimento do concreto, conforme dimensões da NBR-NM 67 (ABNT, 2012).....	19
Figura 2.9 – Modelo simplificado da realização de ensaio de abatimento (Do autor)...	20
Figura 3.1 – Coleta das amostras de rejeito na Mina do Pico (Do autor, 2019).....	24
Figura 3.2 – Recipiente utilizado para armazenamento do líquido extraído dos rejeitos – água sobrenadante (Do autor, 2019).....	25
Figura 3.3 – Secagem da amostra adotando-se as metodologias: (a) chapa quente e (b) filtro de pressão (Do autor, 2019).	26
Figura 3.4 – Modelo esquemático da homogeneização das amostras (Do autor, 2019). 27	
Figura 3.5 – As fases do solo: (a) no estado natural, (b) separado em volume, (c) em função do volume de sólidos (Pinto, 2006).....	27
Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos rejeitos e das misturas realizadas (Do autor, 2019).....	31
Figura 3.7 – Representação esquemática do ensaio de <i>Vane Test</i> (Maciel <i>et al.</i> , 2016).32	
Figura 3.8 – Resultado de tensão de escoamento obtidos por Ribeiro (2015).	33
Figura 3.9 – Vista dos dispositivos do equipamento utilizado (Do autor, 2019).....	35

Figura 3.10 – Modelos de tronco de cones fabricados de chapa metálica e chapa de acrílico, utilizados para realização dos ensaios de abatimento (Do autor, 2019).	38
Figura 3.11 – (a) Ensaio de <i>Slump</i> com teor inicial de umidade da amostra. (b) Ensaio de <i>Slump</i> com teor final de umidade da amostra (Do autor, 2019).....	40
Figura 4.1 – Representação do tamanho das partículas de rejeito para comparação: a) rejeito de flotação e b) rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	43
Figura 4.2 – Curva de distribuição granulométrica dos rejeitos de flotação (Do autor, 2019).....	44
Figura 4.3 – Curva de distribuição granulométrica dos rejeitos ultrafinos (Do autor, 2019).	45
Figura 4.4 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	45
Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	46
Figura 4.6 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	46
Figura 4.7 – Imagem ampliada em lupa eletrônica do rejeito de flotação (Do autor, 2019).	50
Figura 4.8 – Imagem ampliada em lupa eletrônica do rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	50
Figura 4.9 – Curvas de resistência não drenada <i>versus</i> rotação para o rejeito de flotação (Do autor, 2019).....	52
Figura 4.10 – Curva tensão de escoamento <i>versus</i> teor de umidade para as amostras de rejeito de flotação (Do autor, 2019).....	52
Figura 4.11 – Curvas de resistência não drenada <i>versus</i> rotação para o rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	53
Figura 4.12 – Curva tensão de escoamento <i>versus</i> teor de umidade para as amostras de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	54
Figura 4.13 – Curvas de resistência não drenada <i>versus</i> rotação para a mistura, em peso, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	55
Figura 4.14 – Curva tensão de escoamento <i>versus</i> teor de umidade para a mistura, em peso, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino.	55
Figura 4.15 – Curvas de resistência não drenada <i>versus</i> rotação para a mistura, em peso, de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino.	56
Figura 4.16 – Curva tensão de escoamento <i>versus</i> teor de umidade para a mistura, em peso, de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	56
Figura 4.17 – Curvas de resistência não drenada <i>versus</i> rotação para a mistura, em peso, de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	57
Figura 4.18 – Curva tensão de escoamento <i>versus</i> teor de umidade para a mistura, em peso, de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).	57

Figura 4.19 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).	59
Figura 4.20 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).	60
Figura 4.21 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos de flotação – Moldes cilíndricos com duas dimensões diferentes (Do autor, 2019).	60
Figura 4.22 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos de ultrafino – Moldes do tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).	61
Figura 4.23 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos de ultrafino – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).	61
Figura 4.24 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos ultrafinos – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).	62
Figura 4.25 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).	62
Figura 4.26 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).	63
Figura 4.27 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019)...	63
Figura 4.28 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).	64
Figura 4.29 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).	64
Figura 4.30 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019)...	65
Figura 4.31 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).	65
Figura 4.32 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura.	66
Figura 4.33 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde cilíndrico (Do autor, 2019).....	66
Figura 4.34 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).	68
Figura 4.35 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).	69

Figura 4.36 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Moldes cilíndricos com duas dimensões diferentes (Do autor, 2019).....	70
Figura 4.37 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Moldes do tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).	71
Figura 4.38 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).....	72
Figura 4.39 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).	73
Figura 4.40 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).....	74
Figura 4.41 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).....	75
Figura 4.42 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).	75
Figura 4.43 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).....	76
Figura 4.44 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).....	77
Figura 4.45 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).....	77
Figura 4.46 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).....	78
Figura 4.47 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).....	79
Figura 4.48 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).	79
Figura 4.49 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos de flotação, obtidos com ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).	80

Figura 4.50 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para os rejeitos ultrafinos, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).	81
Figura 4.51 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura de 90% de rejeito de flotação + 10% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).	81
Figura 4.52 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura de 80% de rejeito de flotação + 20% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).	82
Figura 4.53 – Curvas tensão <i>versus</i> teor de umidade para a mistura de 70% de rejeito de flotação + 30% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).	83
Figura 4.54 – Resultados de tensão de escoamento - ensaio de abatimento (Ribeiro, 2015).	85
Figura 4.55 – Resultados de tensão de escoamento - ensaio de palheta (Ribeiro, 2015).	85
Figura 4.56 – Comparação dos resultados de Ribeiro (2015) com os resultados obtidos nesta pesquisa (Do autor, 2019).	86
Figura 4.57 – Comparação dos resultados de Machado (2017) com os resultados obtidos nesta pesquisa (Do autor, 2019).	87

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dosagem realizada para mistura de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	29
Tabela 3.2 – Dosagem realizada para mistura de 80% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	29
Tabela 3.3 – Dosagem realizada para mistura de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	30
Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de abatimento realizados para obtenção da tensão de escoamento em amostras de rejeitos de mineração (Ribeiro, 2015).....	37
Tabela 3.5 – Dimensões dos moldes utilizados nos ensaios de abatimento tipo tronco de cone (Do autor, 2019).....	37
Tabela 3.6 – Dimensões dos amostradores utilizados nos ensaios de <i>Slump</i> do tipo cilíndrico (Do autor, 2019).	38
Tabela 4.1 – Massa específica dos grãos (ρ_s) dos materiais analisados (Do autor, 2019).	42
Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito de flotação (Do autor, 2019).....	47
Tabela 4.3 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	47
Tabela 4.4 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	47
Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	48
Tabela 4.6 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).....	48
Tabela 4.7 – Dimensões de palhetas para <i>Vane Test</i>	51
Tabela 4.8– Umidade de moldagem para ensaios de palheta (Do autor, 2019).	51

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

#	Peneira
%	Porcentagem
<	Menor
=	Igual
\propto	Relação de proporção
°	grau
a	Altura de queda das partículas
a	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for testing and Materials
C-1	Metodologia de cálculo desenvolvida por Pashias (1996)
C-2	Metodologia de cálculo desenvolvida por Castro (2007)
C-3	Metodologia de cálculo desenvolvida por Ferraris, C.F.; De Larrard (1998)
C-4	Metodologia de cálculo desenvolvida por Pereira <i>et al.</i> (2018)
C_c	Coeficiente de curvatura
cm^3	Centímetro cúbico
C_U	Coeficientes de uniformidade
D	Diâmetro da Palheta
d	Diâmetro máximo das partículas
D_{10}	Diâmetro superficial médio de partícula para 10% passante
D_{30}	Diâmetro superficial médio de partícula para 30% passante
D_{60}	Diâmetro superficial médio de partícula para 60% passante
E-01	Rejeito de flotação
E-02	Rejeito Ultrafino
E-03	Mistura em percentual de massa de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino
E-04	Mistura em percentual de massa de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino
E-05	Mistura em percentual de massa de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino
F	Força

g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cubico
H	Altura da palheta
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
k	Constante da palheta
kg	Quilogramas
kPa	Quilo Pascal
L	Leitura do densímetro na suspensão
L _d	Leitura do densímetro no meio dispersor
m	Metro
M ₁	Massa do solo úmido
M ₂	Massa do picnômetro + solo + água, na temperatura do ensaio
M ₃	Massa do picnômetro cheio de água
M _g	Massa do material retido na peneira de 2,0mm
M _r	Massa do material retido acumulado em cada peneira
M _s	Massa total da amostra seca
M _T	Massa da amostra seca na temperatura ambiente
mm	Milímetro
N	Percentual do material que passa na peneira
N.m	Newton vezes metro
N ^o	Número
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial Hidrogeniônico
M _w	Massa do material úmido usado na sedimentação
PVC	Policloreto de Vinila
Q _g	Porcentagem dos materiais que passam em cada peneira
Q _s	Porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro
R ²	Valor do raio elevado ao quadrado
s	Altura de “ <i>Slump</i> ”
s'	Altura de “ <i>Slump</i> ” (adimensional)
s/H	Razão de abatimento “ <i>slump</i> ”
S _u	Resistência ao cisalhamento não-drenado
Su	Resistência não drenada ao cisalhamento
t	Tempo de sedimentação

T	Torque
T_m	Torque máximo
v	Velocidade
V	Volume da suspensão
V_s	Volume de sólidos
w	Teor de umidade
γ	Peso específico
ρ_w	Massa específica da água
ρ_s	Massa específica dos grãos
Π	Pi Radiano
T	Tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão de escoamento
ρ	Massa específica
τ'_y	Tensão de escoamento
γ	Peso específico
γ_s	Peso específico dos grãos
η	Coeficiente de viscosidade do meio dispersor

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 JUSTIFICATIVA	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
CAPÍTULO 2	8
REOLOGIA DOS REJEITOS	8
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
2.2 VISCOSIDADE – LEI DE NEWTON.....	9
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS REOLÓGICOS	11
2.3.1 Fluidos newtonianos.....	12
2.3.2 Fluidos não newtonianos:	13
2.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DOS FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS.....	15
2.4.1 Ensaio de palheta (<i>Vane Test</i>).....	15
2.4.2 Ensaio de abatimento (<i>Slump Test</i>).....	19
2.4.3 Outros ensaios para determinação da tensão de escoamento de fluidos não newtonianos	23
CAPÍTULO 3	24
MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
3.2 AMOSTRAGEM.....	24
3.3 SECAGEM E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS	25
3.4 PREPARO DAS AMOSTRAS	26
3.5 MISTURAS DOS REJEITOS ULTRAFINOS E DE FLOTAÇÃO	27
3.6 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	30
3.7 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	31
3.8 ENSAIO DE PALHETA (<i>VANE TEST</i>).....	32
3.9 ENSAIO DE ABATIMENTO (<i>SLUMP TEST</i>)	36

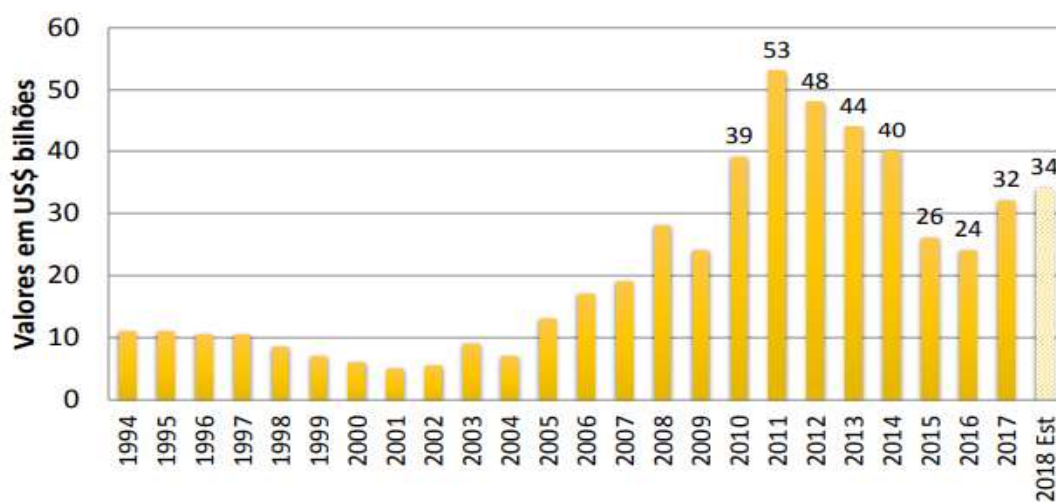
CAPÍTULO 4	41
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	41
4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	42
4.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	43
4.4 ENSAIO DE PALHETA (<i>VANE TEST</i>).....	51
4.5 ENSAIO DE ABATIMENTO	58
4.5.1 Resultados dos ensaios de abatimento com água destilada.....	59
4.5.2 Resultados dos ensaios de abatimento com água do processo	79
4.5.3 Análise comparativa dos resultados.....	84
CAPÍTULO 5	88
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
5.1 CONCLUSÕES	88
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS	92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mineração é o ato de extrair minerais que se concentram na Terra. Levando em consideração apenas os minerais metálicos, o ferro contribuiu com mais de 70% do valor total da produção comercializada (ANM, 2018). A Figura 1.1 destaca a variação, com razoável crescimento a partir de 2002 e com leve queda após 2011, mas ainda em patamares consideráveis. Em 2017, por exemplo, a produção mineral brasileira somou US\$ 32 bilhões, superando os resultados de 2015 e de 2016. Este contexto foi motivado pela variação positiva no preço das *commodities* ao longo do ano, apesar dos volumes produzidos terem variado pouco em relação ao ano anterior (IBRAM, 2018).



Valores Exclusivos da Indústria Extrativa Mineral, não inclui Petróleo e Gás.
A PMB é a soma de todos os bens minerais produzidos no país calculados em bilhões de dólares, metodologia IBRAM.

Figura 1.1 – Evolução do valor da Produção Mineral Brasileira (PMB) em bilhões de dólares (IBRAM, 2018).

A mineração no Brasil é capaz de abastecer diversos segmentos industriais tais como montadoras de veículos, indústrias de metalurgia, indústrias de aços para construção civil e diversos outros setores. Além disso, a mineração é também responsável por atrair grande

número de investimentos em tecnologias de extração e de disposição dos resíduos gerados durante a produção do minério de ferro.

A indústria mineradora é responsável pelas atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar, beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los benéficos econômicos e sociais. Na execução destas atividades, são gerados os rejeitos caracterizados como materiais remanescentes dos processos extrativos, sendo inevitáveis durante a fase de beneficiamento do minério. Devido à extração de minério, esses rejeitos são produzidos em grandes proporções, paralelamente ao produto de interesse, e possuem características granulométricas que dependem diretamente do tipo de minério bruto envolvido no processo, além das questões relacionadas ao processo industrial de beneficiamento (Portes, 2013). Em razão das variabilidade granulométrica entre os rejeitos de minério de ferro que foram utilizados nesta pesquisa, foi realizado ensaios de granulometria para demonstrar o quanto o rejeito pode sofrer alteração, devido ao processo de beneficiamento (Figura 1.2).

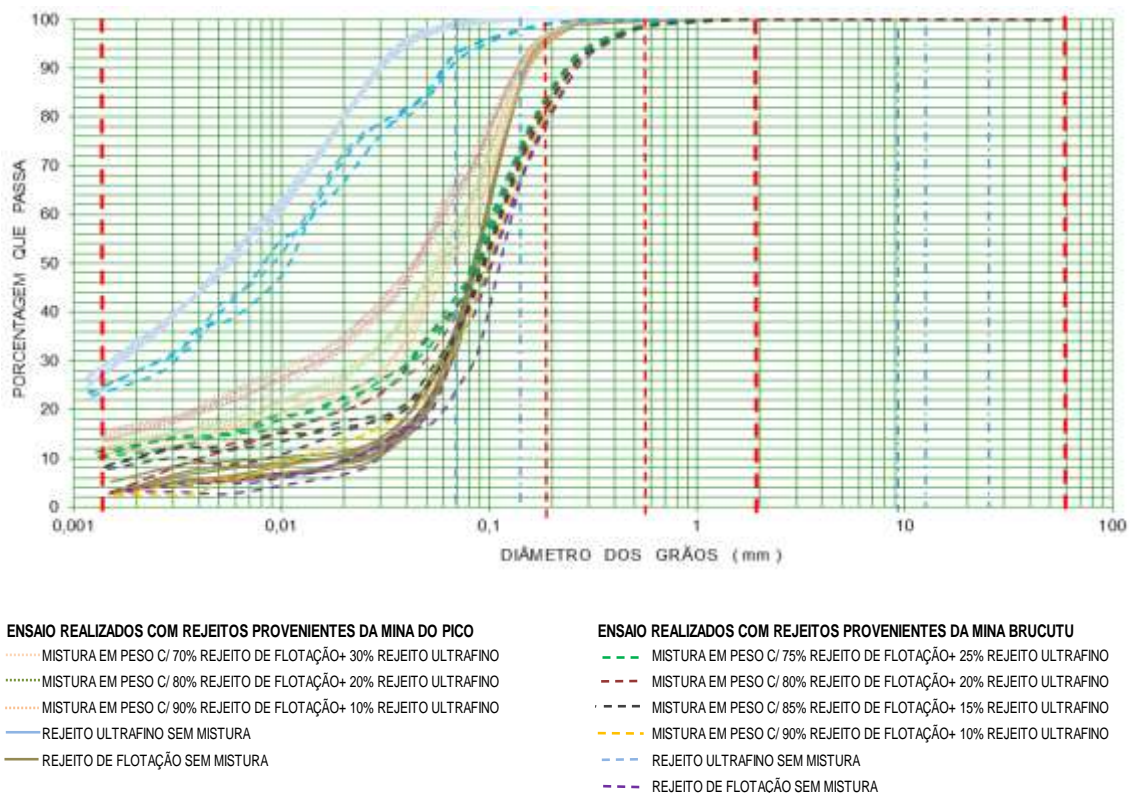


Figura 1.2 – Curvas de distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos produzidos na mineração (Do autor, 2019).

Os rejeitos são resultantes dos processos de beneficiamento, sendo aquilo que sobra durante o processo. Em geral, esses rejeitos são compostos por minérios com baixos teores de ferro, sendo classificados como rejeitos arenosos e rejeitos ultrafinos “lamas”. Os rejeitos arenosos são obtidos nos processos de flotação e constituído de partículas de quartzo.

Além dos rejeitos arenosos é gerado o rejeito ultrafino, conhecido também como rejeito argiloso e ou lama de rejeito. Os rejeitos ultrafinos são obtidos através do overflow da ciclonagem, sendo separados e lançados geralmente a montante das barragens de rejeitos.

Além de se preocupar com o processo produtivo, a indústria da mineração é responsável por destinar e armazenar os rejeitos gerados na etapa de beneficiamento. Sendo assim, as empresas buscam estudar cada vez mais os rejeitos e os minérios em busca de formas adequadas de transporte e armazenamento das polpas e/ou pastas de rejeitos e do produto beneficiado. O transporte e o descarte dos rejeitos são geralmente condicionados ao processo de beneficiamento, sendo feitos na forma sólida ou na forma de polpa, sendo a última mais comumente empregada pela viabilidade econômica.

Os estudos realizados em menor escala podem trazer informações valiosas para a especificação da tecnologia a ser empregada na indústria, evitando-se, assim, erros de projetos como subdimensionamento de sistemas ou custos extras desnecessários com materiais e equipamentos superdimensionados (Garcia, 2014).

Os projetos dos sistemas de bombeamento envolvendo o transporte e a disposição dos rejeitos em polpa e pasta levam em consideração os parâmetros geotécnicos do material, em geral obtidos através de ensaios de laboratório. Desta forma, torna-se possível compreender o comportamento das polpas e das pastas provenientes dos processos de mineração bem como suas características reológicas.

Estudar o comportamento dos rejeitos também é de extrema importância para a realização adequada do dimensionamento do sistema de bombeamento das tubulações que transportam as polpas de minérios na usina.

Investigações mais detalhadas sobre o escoamento da pasta de rejeito depositada podem fornecer informações adicionais para uma operacionalização mais segura dos processos e maior detalhamento no comportamento desses rejeitos. Estas pastas, conduzidas por tubulações e/ou depositadas em barragens, apresentam características de fluidos não Newtonianos, ou seja, fluidos no qual tem a capacidade de mudar sua viscosidade em resposta a uma tensão aplicada, obtendo um comportamento próximo ao limite, podendo agir tanto como um líquido, como com um sólido.

Projetos de sistemas de bombeamento de polpas e pastas minerais podem ser realizados com dados obtidos em ensaios de laboratório. Os estudos sobre ensaios de laboratório, em função da variedade dos processos de extração dos diferentes materiais que compõem o minério, possibilitam ampliar o conhecimento sobre os dados de parâmetros reológicos como a determinação dos valores de tensão de escoamento. Estes estudos podem aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos durante os testes de laboratório.

Considerando os aspectos mencionados anteriormente, este projeto de pesquisa visou determinar a tensão de escoamento do rejeito de minério de ferro realizando diversos ensaios de palheta (*Vane Test*) e ensaios de abatimento (*Slump Test*) alterando inicialmente a composição granulométrica do rejeito. Para os ensaios de *Slump* foi modificada a composição líquida do material estudado (utilizando água destilada e água proveniente do processo de flotação). Também foi incorporada a variação dos tempos de leitura e os materiais utilizados na confecção dos instrumentos utilizados no teste. A viabilidade desses ensaios se apresenta no baixo custo financeiro e na simplicidade de execução, podendo ser realizados no laboratório ou mesmo em campo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A dissertação tem como objetivo geral estudar o comportamento reológico do rejeito de minério de ferro por meio da realização de ensaios de laboratórios de palheta (*Vane Test*) e de abatimento (*Slump Test*) em amostras de rejeito de flotação, rejeito ultrafino e misturas do rejeito de flotação + rejeito ultrafino proveniente da indústria mineral. Os resultados serão tratados e analisados com o auxílio de gráficos para comparação dos

valores de tensões de escoamento obtidas durante os estudos de ensaios de palheta e de abatimento, com a finalidade de produzir um modelo de cone cilíndrico que atenda os parâmetros obtidos nos métodos de determinação das tensões de escoamento de variados materiais, com as especificações de granulometria e de mineralogia semelhantes às amostras ensaiadas. Desta forma, caracteriza-se como objetivo geral a proposição de uma análise comparativa na determinação da tensão de escoamento dos rejeitos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Caracterizam-se como objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais estudados;
- Correlacionar os valores da tensão de escoamento definidas no ensaio de palheta (*Vane*) com os valores obtidos nos diferentes ensaios de abatimento (*Slump*);
- Investigar os materiais mais apropriados para a confecção dos equipamentos para ensaio de abatimento (*Slump*), bem como as dimensões mais adequadas;
- Avaliar o tempo mais adequado para a leitura do *Slump*, para que sejam mitigados os erros durante a execução dos testes.

Os ensaios de palheta (*Vane Test*) serão conduzidos com base nos procedimentos prescritos na norma americana D-4648 (ASTM, 2016). Deste modo, será possível definir as melhores diretrizes e equipamentos para execução dos ensaios.

1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecer os valores de tensão de escoamento dos rejeitos é importante não somente no dimensionamento dos sistemas de transporte destes materiais, mas também na definição de diversos parâmetros de projeto na disposição, como por exemplo, análise de modelagem de ruptura hipotética de barragem (*Dambreak*). Conforme já ressaltado, a tensão de escoamento é relevante no transporte das pastas de rejeito através de tubulações diversas, assim como cálculos de espigotamento em barragens de rejeito. A tensão de escoamento pode ser determinada através de ensaios de *Vane Test*, *Slump* e ensaios de viscosidade, sendo que seus respectivos resultados são utilizados rotineiramente na indústria da mineração.

A reologia dos materiais tem sido estudada por meio de ensaios simples e práticos, como o próprio ensaio de *Slump* (Lu *et al.*, 2015). No entanto, durante a rotina convencional das atividades de laboratório na execução de ensaios de *Slump* utilizando rejeito de mineração, foram observadas algumas dificuldades. Dentre elas, está o fato das metodologias existentes não detalharem, com clareza, os procedimentos de execução do ensaio, e, além disso, autores como Hoppe Filho *et al.* (2006) e Osorio (2005) evidenciam que os valores disponibilizados durante as análises do *Slump* isoladamente não são confiáveis. Considerando os fatores citados, alguns questionamentos surgem na tentativa de melhor desenvolvimento dos testes, tais como o tipo de cone e o material de fabricação mais adequado para a metodologia proposta, dado que algumas vezes o material fica preso na parede do amostrador metálico, comprometendo os resultados obtidos. A obtenção de menor rugosidade do material também é de extrema importância para o procedimento.

Considerando diversas metodologias, o modelo de ensaios de *Slump* apresentado por Pashias *et al.* (1996), uma das principais referências na área, aplicado ao estudo do comportamento de rejeitos, é abordado nesta pesquisa. O autor utilizou lama vermelha de rejeito proveniente da extração de alumínio, tendo como principal objetivo a obtenção dos parâmetros de tensão de escoamento. Pashias *et al.* (1996) também considerou em seus estudos a utilização de amostradores cilíndricos com geometrias circulares, mantendo a razão de 1:1 entre o diâmetro e a altura. No entanto, para o cálculo dos ensaios, de acordo com este modelo, foi observado aumento na incerteza dos resultados. Esta imprecisão dos resultados foi obtida através de ensaios com tensões de escoamento diferentes para o mesmo teor de sólidos ensaiado (Pashias *et al.*, 1996).

Outro questionamento feito em relação aos ensaios de *Slump* é quanto ao tempo de leitura após a retirada do recipiente de moldagem. A cada segundo passado nas leituras dos ensaios, é possível constatar um maior adensamento das pastas minerais, sendo este tempo um fator importante que interfere diretamente nos resultados calculados. Diante dessas observações, pretende-se, através deste trabalho, apresentar procedimentos mais adequados na construção de um equipamento e na definição de metodologias eficientes na realização dos ensaios de *Slump* aplicado ao estudo em rejeitos de mineração.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi subdividido em 5 capítulos, de acordo com a estrutura dos temas analisados:

Capítulo 1: aborda, de maneira simplificada, as considerações sobre a mineração. Apresenta a justificativa e os objetivos expostos, além da organização desenvolvida para esta pesquisa, retratada neste item.

Capítulo 2: descreve a reologia e a viscosidade dos fluidos, além de fornecer informações detalhadas sobre as classificações dos modelos reológicos para fluidos newtonianos e não newtonianos. Este capítulo ainda aborda de forma sistêmica as considerações pertinentes ao desenvolvimento dos ensaios de palheta (*Vane*) e abatimento (*Slump*), abordando as metodologias empregadas e utilizadas nas obtenções de parâmetros reológicos.

Capítulo 3: apresenta a metodologia empregada para a realização das amostragens na saída do mangote dos espessadores, detalhando os procedimentos de secagem e armazenamento das amostras. Contextualiza, de maneira detalhada, os preparos após a secagem das amostras e os procedimentos utilizados para realização das misturas entre os rejeitos. Ainda neste capítulo, são descritas as metodologias empregadas para realização dos ensaios de laboratório, tais como caracterização, ensaios de *Vane* e *Slump*.

Capítulo 4: apresenta os resultados das análises laboratoriais para os rejeitos e os ensaios da maneira natural de deslamagem e dos rejeitos dosados no laboratório. Neste capítulo, são realizadas comparações desta pesquisa com pesquisas de outros autores, bem como as discussões sobre os materiais utilizados na confecção dos amostradores e sua forma geométrica, além dos cálculos, tempo de leitura e a influência do meio líquido utilizado para realização dos testes em bancada.

Capítulo 5: apresenta as conclusões desta pesquisa, pontuando de maneira objetiva os pontos positivos e negativos deste estudo e sugestões de pesquisas futuras na área de análises de ensaios reológicos dos rejeitos provenientes da indústria da mineração.

CAPÍTULO 2

REOLOGIA DOS REJEITOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A definição de reologia, de acordo com Toledo (1991), corresponde ao estudo do modo como os materiais deformam ou escoam ao longo do tempo quando submetidos a esforços originados por forças externas. Sendo assim, o comportamento dos fluidos pode ser definido por duas grandezas básicas: a viscosidade e a tensão de escoamento. A viscosidade é promovida pelo atrito interno entre as partículas e tida como a relação de proporcionalidade entre a taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento impostas ao fluido. Já a tensão de escoamento, pode ser definida como a tensão mínima para que seja iniciado o escoamento do fluido (Romano *et al.*, 2011).

Fernández *et al.* (2014) trataram o conceito de reologia como a ciência que estuda a deformação e o escoamento de matéria. Na definição, a terminologia é aplicada para indicar as propriedades de um determinado fluido, destacando os efeitos de temperatura, pressão e taxa de deformação. Em outras palavras, podemos definir a reologia como uma ciência proveniente da física que está preocupada em estudar a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo ou predizer a deformação ou o escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de força em um corpo (Manrich e Pessan, 1987).

De acordo com Oliveira (2000), os principais parâmetros estudados na reologia podem ser destacados como: concentração volumétrica dos sólidos (que corresponde às grandezas relacionadas à densidade do meio líquido), temperatura, características físicas das partículas (forma, densidade, diâmetro dos grãos) e a concentração de moléculas dispersantes no meio líquido.

Melo (2014) afirmou que há muito em comum entre as propriedades de diversos tipos de materiais. Sendo assim, qualquer experiência adquirida com estudos de materiais distintos

poderá ser de grande utilidade para a realização de testes experimentais e teóricos em materiais adjacentes. As propriedades reológicas obtidas em materiais como madeira, metais, plásticos, concretos e qualquer outro sistema disperso contribuirão consideravelmente no preenchimento de informações na reologia dos solos em geral, assim como no desenvolvimento de soluções de problemas complexos em solos de característica argilosa.

A determinação da tensão de escoamento pode ser realizada a partir da medição da tensão requerida para se produzir uma dada deformação em função do tempo ou pode-se medir a deformação provocada por uma dada tensão, com esses dados pode-se obter as propriedades reológicas do material. A partir desta premissa, considera-se que os dois desafios principais nos estudos reológicos são (Lázaro, 2003):

- a definição de uma correlação quantitativa entre deformação e tensão ao longo do tempo para o material considerado;
- o aperfeiçoamento de uma correlação entre o comportamento reológico de um material e sua estrutura, composição e condições ambientais, tais como temperatura e pressão.

A deformação poderá ser dividida em dois tipos (Venâncio, 2008):

- deformação espontânea e reversível, conhecida como elasticidade que ocorre em sólidos;
- deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento que ocorre em líquidos ou gases.

2.2 VISCOSIDADE – LEI DE NEWTON

Em 1687, Isaac Newton representou o conceito de viscosidade através de alguns experimentos utilizando o escoamento de fluidos entre duas placas paralelas. No modelo de experimento utilizado, foi possível medir a quantidade de atrito/resistência necessária para a substância utilizada fluir. O experimento consistiu em realizar uma aplicação de

força “F” em uma placa de área conhecida “a”, fixando a placa inferior e realizando um movimento “v” na placa superior com a velocidade “v”. O autor ressalta que, após o início do deslocamento, o fluido que está entre as placas irá possuir uma velocidade de deslocamento semelhante às de ambas as placas, provocando um aumento de velocidade nas camadas intermediárias do fluxo uniformemente de uma placa para outra conforme demonstrado na Figura 2.1.

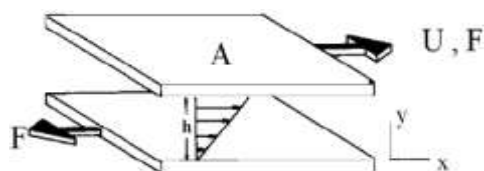


Figura 2.1– Modelo de cisalhamento simples entre placas paralelas, desenvolvido por Isaac Newton. (Ferreira *et al.*, 2005).

A tensão de cisalhamento τ é dada por:

$$\tau \propto v/l \Rightarrow \tau = \mu \gamma \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Em que γ é a taxa de cisalhamento em qualquer ponto do fluido, podendo ser uma razão entre a velocidade da placa superior e a distância entre elas. A constante de proporcionalidade μ é denominada viscosidade.

De acordo com Castro (2007), a viscosidade é definida como a velocidade de deformação de um corpo, ou ainda, um indicativo de coesão entre moléculas que constituem as lâminas adjacentes de um fluido. Para Bretas e D’Ávila (2000), o termo viscosidade é definido como a propriedade que realiza a medição da resistência do material quanto ao seu escoamento. Portanto, quanto maior a viscosidade do material, maior será sua resistência. Do ponto de vista de Van Wazer (1963), o termo viscosidade é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento para corpos de provas viscosos ideais.

Oliveira (2013) define que a viscosidade pode ser usada qualitativamente ou quantitativamente. O uso qualitativo deverá referir-se à propriedade do material em

resistir ao escoamento. Já para o uso da expressão quantitativa, deve-se definir viscosidade como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, quando esta for constante. Entretanto, este termo deverá ser aplicado somente quando o fluido tiver características de fluidos newtonianos, no qual a curva de escoamento é linear. Portanto, o seu uso para outros materiais está incorreto (Tattersall, 1991 apud Castro, 2007).

Portanto, afirma-se que a viscosidade é a medida da resistência ao escoamento dos fluidos, influenciada principalmente pelas forças de tração, cisalhamento e compressão do material, conforme mostra a Figura 2.2. Ela é capaz de variar de acordo com a velocidade e a temperatura do meio analisado, dependendo da natureza físico-química do fluido, da temperatura do fluido, da pressão do fluido, além da taxa de cisalhamento, que constitui um fator decisivo associado ao tempo em que uma dispersão foi submetida ao cisalhamento contínuo ou se foi proporcionada uma parada antes de ser realizado o ensaio e do campo elétrico atuante.

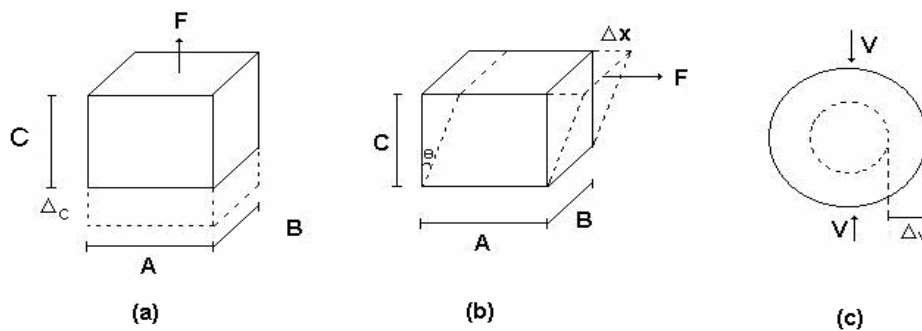


Figura 2.2 - Deformação por (a) tração, (b) cisalhamento e (c) compressão.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS REOLÓGICOS

A viscosidade de alguns fluidos depende do cisalhamento aplicado ou do tempo de sua aplicação, podendo ser classificados em função do seu comportamento reológico. Entretanto, as relações entre tensão e deformação que caracterizam reologicamente um material podem apresentar diferentes formas. Em determinados fluidos, a viscosidade deixa de ser constante para se tornar uma propriedade dependente das condições em que o fluido é deformado ou submetido a tensões. Essencialmente os fluidos podem ser classificados em newtonianos e não newtonianos.

2.3.1 Fluidos newtonianos

São considerados fluidos newtonianos os fluidos que apresentam comportamento similar como anunciado pela Segunda Lei de Isaac Newton: “A resistência advinda do atrito das partes do líquido, com outras condições inalteradas, é proporcional à velocidade com que as partes do líquido são separadas umas das outras”. Portanto, a Lei de Newton descreve fluxo ideal utilizando uma equação constitutiva na qual tensão e taxa de deformação estão relacionadas através de uma proporcionalidade constante, tecnicamente chamada de viscosidade.

Em outras palavras, a viscosidade de fluidos newtonianos se mantém constante, independentemente da deformação e do tempo. Deste modo, podemos afirmar que a curva de escoamento de um fluido newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação cujo inverso é igual ao coeficiente de viscosidade (Oliveira, 2013).

A representação gráfica de um fluido newtoniano pode ser caracterizada como nas curvas da Figura 2.3.

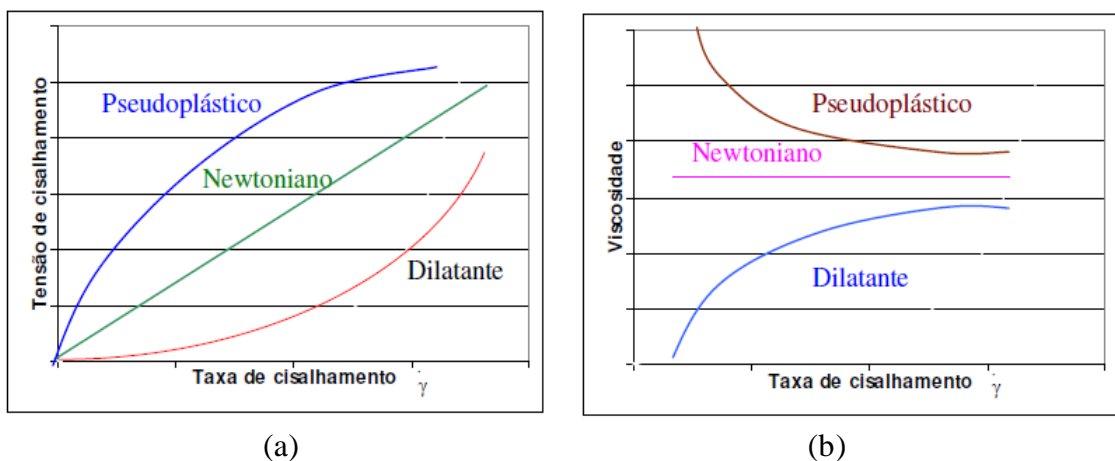


Figura 2.3 – Curvas de fluxo típicas para suspensão concentrada: (a) relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento; (b) relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento (Tadros, 1987).

De acordo com Osório (2005), nas curvas apresentadas por Tadros (1987), podem ser observados ambos os casos de comportamento newtoniano: pseudoplástico e dilatante.

Tratando-se de comportamento pseudoplástico, oriundos de solos argilosos, ocorre uma diminuição na viscosidade comparando com a taxa de cisalhamento. Já nos casos do comportamento de fluxo dilatante, tem-se uma adição da viscosidade com a taxa de cisalhamento. Em vista disso, as características de fluxo que expressam o comportamento reológico da suspensão são expressas pela fração volumétrica da fase dispersa.

2.3.2 Fluidos não newtonianos:

São considerados não newtonianos os fluidos em que a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento não é linear. Por isso, quando se trata de fluidos não newtonianos, a viscosidade é dita como aparente. A tensão de escoamento de fluidos não newtonianos pode ser estabelecida isoladamente fazendo o uso de técnicas de ensaios de laboratório e de campo, tais como: ensaio de palheta (*Vane Test*), ensaio de abatimento (*Slump Test*), viscosidade, reometria, entre outros.

De acordo com Castro (2007), os fluidos não newtonianos podem ser classificados em três tipos, de acordo com seu comportamento: fluidos independentes do tempo, fluidos dependentes do tempo e fluidos viscoelásticos conforme demonstrado na Figura 2.4. Autores como Van Wazer (1963), Fox e McDonald (1998) e Schram (2006), classificaram os comportamentos da mesma forma.

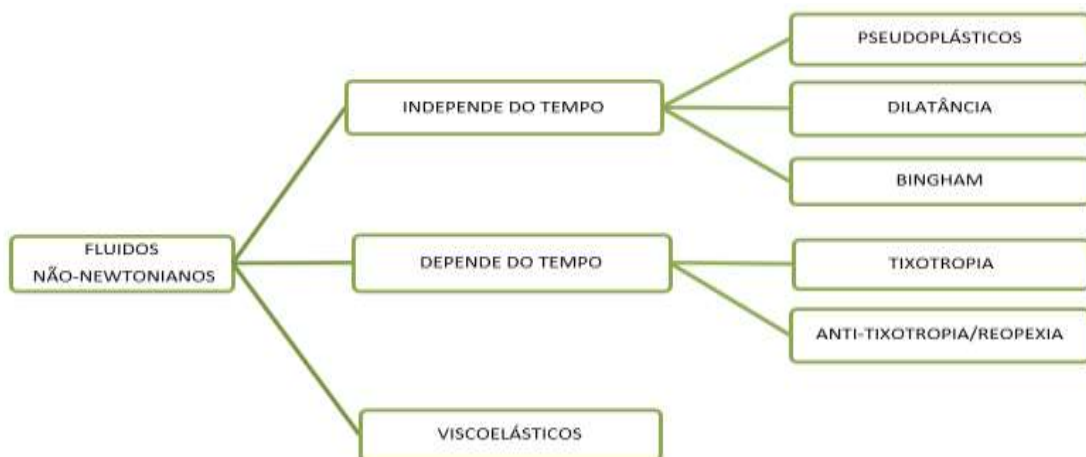


Figura 2.4 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico (Do autor, 2019).

- **Fluidos independentes do tempo**

Consistem em fluidos nos quais a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é função apenas da tensão de cisalhamento. Portanto, podemos dizer que o valor de viscosidade voltará a seu valor original quando o torque for finalizado ou interrompido. Podem ser classificados como fluidos pseudoplásticos, dilatantes e de Bingham (binghamianos).

Os fluidos pseudoplásticos são fluidos em que a viscosidade diminui progressivamente com o aumento da tensão de cisalhamento e a viscosidade se torna linear em deformações elevadas. Podem ou não apresentar tensões de escoamento. Os fluidos dilatantes são fluidos que apresentam comportamento oposto ao pseudoplástico, ou seja, a sua viscosidade cresce progressivamente, sendo que a curva de escoamento deste tipo de material é caracterizada pelo aumento da viscosidade do fluido à medida que se eleva a taxa de cisalhamento. Os fluidos plásticos de Bingham (binghamianos), também conhecidos como fluidos viscoplásticos, são fluidos que apresentam comportamento semelhante ao sólido, sendo necessário aplicar certa tensão para começar a fluir. Assim, o comportamento característico está relacionado à tensão de cisalhamento e à taxa de deformação que passam a ser lineares quando o fluido começa a escoar.

A Figura 2.5 mostra os três comportamentos reológicos descritos, comparando-os ao fluido newtoniano.

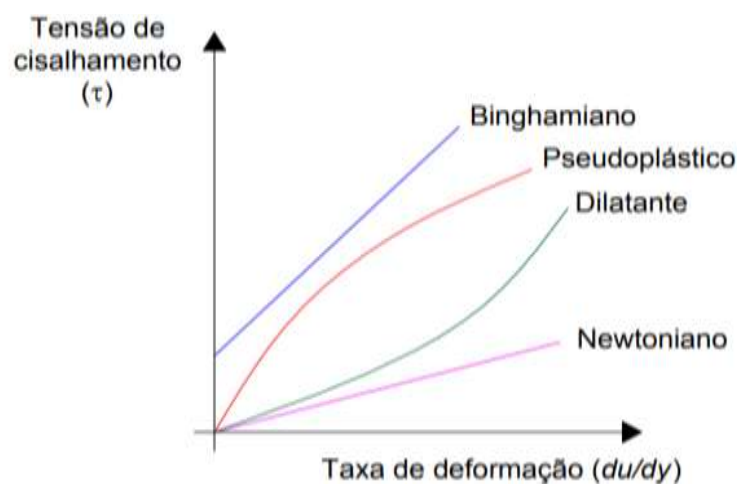


Figura 2.5 – Classificação do comportamento reológico de fluidos independentes do tempo (Adaptado de Fox e McDonald, 1998 *apud* Castro, 2007).

- **Fluidos dependentes do tempo**

Trata-se de fluidos com sistemas mais complexos, onde a relação entre a tensão de cisalhamento e a sua taxa de cisalhamento depende necessariamente do tempo em que o fluido foi cisalhado. Dividem-se em tixotrópicos, que apresentam sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos com quando esta cessa, e reopéticos, cuja viscosidade aumenta com o tempo de aplicação da tensão, retornando à viscosidade inicial quando esta força cessa.

- **Fluidos viscoelásticos**

São fluidos possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas. Estas substâncias quando submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação e quando esta cessa, ocorre recuperação parcial da deformação sofrida.

2.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DOS FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS

2.4.1 Ensaio de palheta (*Vane Test*)

O ensaio de palheta, desenvolvido inicialmente para realizar medições *in situ*, foi trazido para o Brasil em 1949 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e normatizado, em 1987, pela ASTM, que realizou uma conferência específica sobre o tema. Geralmente, esta determinação é utilizada para medir a resistência ao cisalhamento de solos submetidos à condição de carregamento não drenada (parâmetros S_u ou C_u).

No contexto do uso do ensaio para medição da tensão de escoamento, de acordo com o Bisco (2009), os resultados mostraram-se satisfatórios quando comparados aos métodos de obtenção de parâmetros reológicos convencionais. Atualmente, podem ser encontrados diversos equipamentos de ensaios de *Vane Test* para avaliar materiais como pastas e argilas, sendo que os equipamentos mais completos permitem uma série de avaliações adicionais. Utilizado com maior frequência para medir a tensão de escoamento, deformação de escoamento e módulo de deformação, o ensaio de *Vane Test* deve ser realizado utilizando-se uma palheta de modelo predefinido. A palheta é girada com baixa

velocidade de rotação e a tensão é medida em função do ângulo de deformação da amostra, conforme observado na Figura 2.6 (a). O ensaio também pode ser utilizado para medir deformação instantânea, fluência, recuperação elástica e escoamento permanente em materiais. Nestes casos, ele é realizado aplicando um torque inicial na amostra, por um determinado tempo, e a deformação é registrada, concomitantemente, em função do tempo. Após um determinado período de tempo, a tensão é removida e são avaliadas a recuperação elástica e a deformação permanente do material, conforme pode ser observado na Figura 2.6 (b).

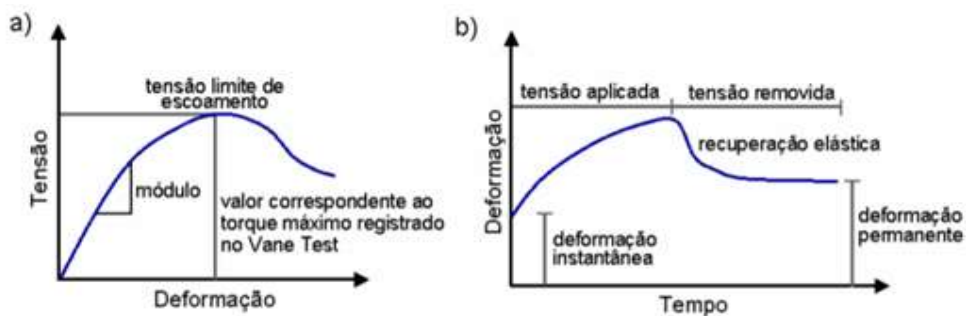


Figura 2.6 – Resultados fornecidos a partir de um ensaio de deformação constante (a) e resultados fornecidos a partir da aplicação de um torque constante (b) (Sousa, 2005).

Em todos os ensaios de palheta são utilizados equipamentos motorizados que permitem trabalhar com a taxa de deformação constante (velocidade angular) durante as medidas. As molas podem possuir diversas dimensões, dependendo diretamente das limitações impostas nos equipamentos, e, também, podem ser previamente calibradas a partir de um sistema de aquisição de dados. A palheta deverá ser constituída por quatro lâminas, cada uma delas fixada a 90° das lâminas adjacentes. Além disso, as lâminas devem ser resistentes o suficiente para não deformar sob o torque máximo para a qual foi projetada.

O princípio do *Vane Test* consiste inicialmente em cravar uma palheta que pode ser substituída por diferentes geometrias na amostra. Ao iniciar o ensaio, a mesma desce, fazendo com que a haste fique em contato com a amostra. Após esta etapa, inicia-se a fase de cisalhamento. O movimento rotacional da haste força o solo a escoar e a resistência imposta pelo solo, devido a sua viscosidade, resulta em um torque que se contrapõe ao torque aplicado pelo equipamento. O torque é transferido para o sistema de

mola e, a cada 5° de rotação da haste no corpo de prova, é registrado o valor do torque. Uma curva de escoamento poderá ser obtida através dos dados calculados de tensão de escoamento para diferentes teores de umidade (Sampaio, 2017). Um esquema do ensaio é mostrado na Figura 2.7.

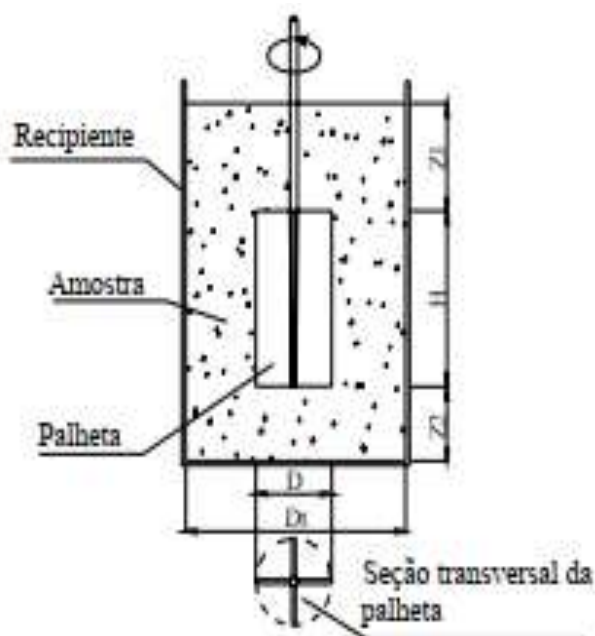


Figura 2.7 – Representação esquemática do ensaio de palheta (Nguyen e Boger, 1985).

O ensaio de palheta para determinação da tensão de escoamento ocorre na superfície cilíndrica delimitada pelas hastes da palheta. Assumindo que a tensão de cisalhamento é uniformemente distribuída ao longo do cilindro e igual à tensão de escoamento (τ_0), em que o torque é máximo (T_m), a tensão de escoamento pode ser obtida de acordo com a Equação 2.2 (Nguyen e Boger, 1985):

$$T_m = \frac{\pi D^3}{2} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Na qual:

D = diâmetro da palheta (m)

H = altura da palheta (m)

T_m = Torque máximo (N.m)

τ_0 = tensão de escoamento (kPa)

Citado por Sousa (2005), o *Vane Test* tem demonstrado ser um método simples e eficiente para medir os valores de tensão de escoamento, apresentando uma boa concordância com a maioria dos métodos reológicos disponíveis atualmente (Dzuy e Boger, 1985; Austin *et al.*, 1999; Barnes e Nguyen, 2001).

Conforme já ressaltado, o método do *Vane Test* é bastante utilizado na Mecânica dos Solos para determinar a tensão de cisalhamento não drenado do solo, existindo equipamentos de pequeno porte, bem como equipamentos de grande porte para ensaios de campo (Venâncio, 2008). Há pequenas divergências no meio técnico sobre os valores obtidos através do ensaio. Neste contexto, Sousa (2005) admite que os ensaios executados possuem uma média indireta da consistência pela qual se obtém o parâmetro reológico de tensão de escoamento.

Na caracterização das propriedades físico-mecânicas das argamassas no estado fresco, Venâncio (2008) utilizou o ensaio de palheta em diferentes proporções de mistura, sendo possível, após os estudos, conhecer os parâmetros de consistência das argamassas, tendo o ensaio seguido a metodologia proposta por Sousa (2005). Na realização do ensaio, a argamassa recém-misturada foi transferida para dentro de um recipiente cilíndrico, com capacidade aproximada de 962 mililitros, em três camadas aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes em cada camada. Observou-se que este procedimento foi de extrema importância para se evitar o aparecimento de vazios na interface entre a palheta e a amostra, que poderia comprometer os resultados.

Os resultados obtidos nos ensaios corresponderam à média de três determinações consecutivas, realizadas em uma amostra diferente de uma mesma argamassa. Utilizando este método, Venâncio (2008) afirma que foi possível obter bons resultados para cálculo da tensão de escoamento através do aparelho de *Vane Test*.

Do ponto de vista das condições de operacionalidade, o ensaio de palheta é um método consideravelmente simples, em comparação aos diversos métodos utilizados para obtenção de tensão de escoamento na reologia convencional, especialmente para os rejeitos de mineração.

De acordo com Barnes e Nguyen, (2001), o método tem diversas vantagens, com destaque para a facilidade de fabricação das palhetas devido à sua geometria, facilidade da limpeza após a execução do teste e eliminação do escorregamento nas superfícies da palheta. Portanto, a teoria e o desenvolvimento da técnica da palheta estão em uso em diversos seguimentos e aplicações, desde a obtenção de parâmetro de cisalhamento em amostras diversas de fluidos não newtonianos até a obtenção da tensão de escoamento na indústria alimentícia.

2.4.2 Ensaio de abatimento (*Slump Test*)

O ensaio de abatimento, também reportado na literatura como *Slump Test* foi desenvolvido por Murata (1984). O ensaio, através do modelo de geometria cilíndrica, foi adaptado por Christensen (1991), sendo inicialmente utilizado somente para determinar a consistência ou plasticidade da mistura de concreto em obras de construção civil.

A partir de 1998, passou a ser reconhecido e normatizado pelas normas ASTM, levando o seu conhecimento para toda a engenharia mundial (C-143, C-143M, 2015). O método do ensaio foi originalmente desenvolvido para fornecer uma técnica para monitorar a consistência do concreto não endurecido.

Como mostrado na Figura 2.8, os equipamentos utilizados no *Slump Test* consistem em uma placa metálica, que serve de base para realização do ensaio, um molde metálico adaptado ao formato de tronco de cone aberto nas duas extremidades, apoiado sobre a placa e uma haste para auxiliar na vibração do concreto e na medida do abatimento.

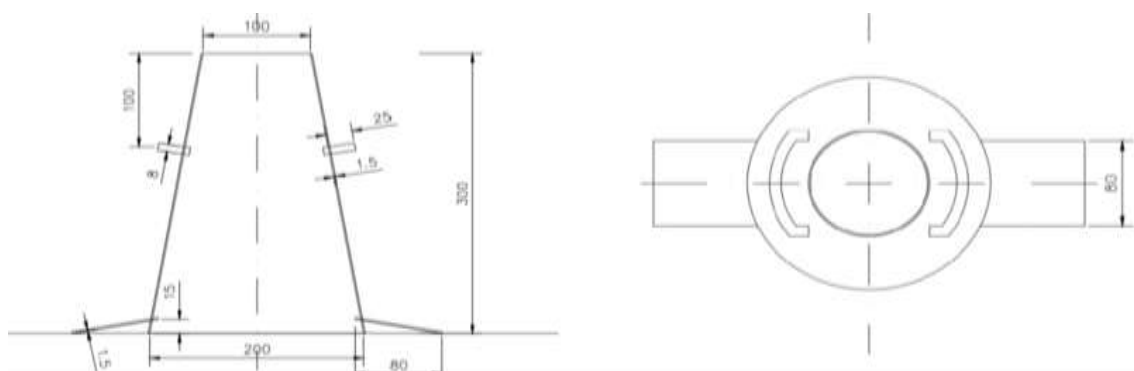


Figura 2.8 – Modelo padrão do equipamento utilizado no ensaio de abatimento do concreto, conforme dimensões da NBR-NM 67 (ABNT, 2012).

A Figura 2.9 destaca o procedimento de realização do *Slump Test*, que parte do preenchimento de todo o volume do cone com concreto. Após o preenchimento, o material é golpeado 25 vezes com uma haste metálica, visando retirar os espaços vazios. Posteriormente, o cone é retirado lentamente na direção vertical sem submeter o concreto a torções laterais e, por fim, é realizada a verificação do *Slump*, ou seja, da diferença entre a altura original e a altura final do concreto, também conhecida como altura de abatimento.

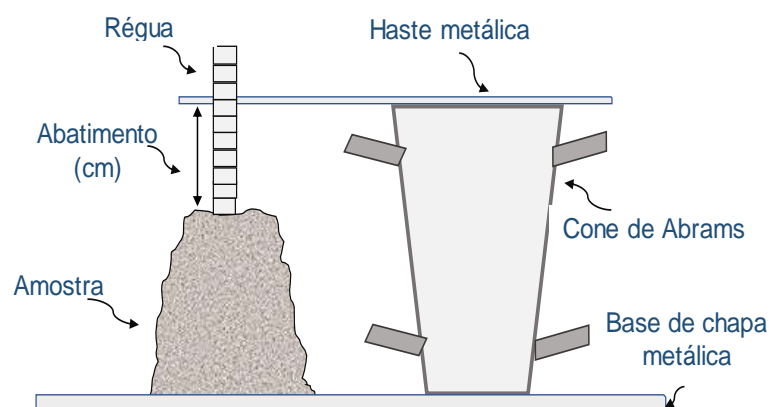


Figura 2.9 – Modelo simplificado da realização de ensaio de abatimento (Do autor).

O artigo publicado por Pashias *et al.* (1996) traz, de maneira detalhada, a forma de execução do ensaio de Slump e a metodologia de cálculo para ensaios utilizando recipientes cilíndricos e recipientes do tipo tronco de cone.

Ressalta-se que o ensaio de abatimento é bastante utilizado em obras que requerem acurácia na composição do concreto. Um fator que possibilita a utilização do teste durante a execução de projetos é sua simplicidade. Deste modo, ele é utilizado para controlar a qualidade do concreto, pois possibilita determinar pequenas variações na composição da mistura, permitindo analisar as variações no teor de água a partir da especificação do projeto.

O ensaio envolve técnicas simples, de fácil execução e rapidez na obtenção dos resultados com flexibilidade na execução, podendo ser realizado no laboratório ou em campo. Logo, a sua utilização não se restringiu a análise de composição de concreto. Estudos foram

desenvolvidos com o intuito de se utilizar o *Slump Test* para medir a tensão de escoamento em fluidos não newtonianos.

De acordo com Ribeiro (2015), a utilização do *Slump* para determinar a tensão de escoamento de um material consiste em um bom ponto de partida para a avaliação reológica de rejeitos de mineração em laboratório, principalmente devido ao baixo custo financeiro, que por sua vez gera menor impacto nas verbas disponíveis para execução de ensaios laboratoriais. Desta forma, sua praticidade de execução permite obter a consistência do rejeito em variados teores de sólidos, sendo possível aprimorar os resultados obtidos correlacionando-os com dados obtidos em outros ensaios.

No contexto da mineração, os resultados de tensão de escoamento são dependentes da função da frente de lavra da mineração e de mudanças nos processos de produção, sendo necessário um rígido controle de valores de tensão de escoamento durante a operação da mina para a construção de modelagens numéricas que interferem nos processos de transporte do rejeito. Portanto, ensaios rápidos são fundamentais para um bom controle tecnológico.

O ensaio de abatimento (*Slump Test*) vem, portanto, sendo constantemente utilizado em algumas indústrias mineradoras para realizar o monitoramento da consistência de rejeitos nas operações de disposição (Bisco, 2009). A altura de *Slump* é utilizada como parâmetro de controle, para avaliação da consistência da pasta. Essa altura é dependente tanto da tensão de escoamento quanto da densidade do material.

Ribeiro (2015) cita o *Slump Test* com fluidos não newtonianos e descreve uma proposta de metodologia para avaliação dos efeitos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos. Conforme descreve o autor, o ensaio de *Slump* apresenta vantagens em sua utilização para a determinação da tensão de escoamento na indústria de mineração, uma vez que tem baixo custo financeiro, já ressaltado nesta dissertação.

De acordo com Bisco (2009), alguns parâmetros para a realização do *Slump Test* não alteram de maneira significativa os resultados, como a inserção de um aumento na altura

do cilindro, em que o valor da tensão de escoamento se manterá dentro de uma região de precisão. Esta região de precisão foi verificada através de testes cilíndricos de abatimento, realizados variando-se a altura destes cilindros. Para tanto, foi mantida a razão entre altura e diâmetro igual a 1 (Bisco, 2009).

A altura de *Slump* é utilizada como parâmetro de controle para a avaliação da consistência da pasta (Osório, 2005). O estudo afirma que a altura é dependente tanto da tensão de escoamento, quanto da densidade do material. Entretanto, foi observado também que a utilização da altura de *Slump* como um único parâmetro para avaliação da consistência de pastas proveniente da mineração pode não obter um resultado satisfatório condizente com as propriedades do material estudado. Barreda (2008) reforça a importância de não se utilizar a altura de *Slump* como o único parâmetro de avaliação da consistência para a disposição de rejeitos, devido à dispersão de valores.

Para aplicações dos resultados de tensão de escoamento, o ensaio de abatimento utilizando o modelo cilíndrico tem diversas vantagens sobre os ensaios no modelo de cone, sendo destacadas as principais (Osório, 2005):

- Determinação mais precisa da tensão de escoamento, devido à simetria do cone;
- maior facilidade para realização dos cálculos, devido ao modelamento do corpo de prova ser simétrico;
- maior facilidade para moldagem, sendo que durante a confecção do corpo de prova é possível verificar a presença de bolhas de ar.

De acordo com Ribeiro (2015), os ensaios de abatimento consistem em um bom ponto de partida para a avaliação reológica dos rejeitos, uma vez que os testes realizados em laboratório são de baixo custo financeiro e através do método é possível obter a consistência do rejeito para cada teor de sólido estudado, de maneira a guiar o desenvolvimento de novos estudos.

Outros estudos relatam a aplicabilidade da geometria cilíndrica e para a avaliação da consistência de polpas oriundas da mineração (Boger, 2009; Mizani e Simms, 2016).

Mais recentemente, Trampus e França (2019) estudaram os rejeitos da flotação de minério sulfetado de níquel, submetendo-os a ensaios de floculação e ensaios de sedimentação, sendo que os sedimentos coletados a partir destes estudos foram utilizados para análises de ensaios reológicos de *Vane Test* e *Slump Test*, com o intuito de obter informações sobre tensão limite de escoamento e percentagem de abatimento do rejeito adensado. Portanto, a tendência de se utilizar estes ensaios, associada à relativa divergência entre alguns autores em relação à utilização do ensaio de abatimento para se determinar a tensão de escoamento, reforça sobremaneira a importância do estudo realizado nesta dissertação.

2.4.3 Outros ensaios para determinação da tensão de escoamento de fluidos não newtonianos

Além dos ensaios já destacados, o comportamento reológico de fluidos pode ser determinado com a utilização de ensaios associados a outros equipamentos, citando-se, por exemplo, os viscosímetros, como viscosímetros capilares, viscosímetro de tubo e de rotação, bem como o viscosímetro rotacional de cilindro concêntrico. Os equipamentos são restritos à determinação da viscosidade do fluido em um número limitado de condições

Os ensaios realizados por meio de reômetros também são comuns. Ao contrário de um viscosímetro, que possui restrições, o reômetro é capaz de medir a viscosidade e a elasticidade de materiais não newtonianos em uma ampla variedade de condições.

As propriedades reológicas que se destacam em um material são as medições da viscoelasticidade, viscosidade rotacional, tixotropia, comportamento de relaxamento da tensão, tensão de escoamento, considerando-se também parâmetros relevantes ao processo, como expansão da matriz e fratura do fundido.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme já destacado na fase introdutória desta dissertação, o conhecimento dos valores de tensão de escoamento dos rejeitos é importante não somente no dimensionamento dos sistemas de transporte destes materiais, mas também na definição de diversos parâmetros de projeto na disposição. Assim, uma análise experimental particularmente cuidadosa torna-se relativamente importante.

Uma ampla campanha de investigação geotécnica foi implementada nesta dissertação. Toda a rotina dos ensaios, desde a amostragem dos rejeitos até as metodologias dos ensaios, é destacada neste capítulo.

3.2 AMOSTRAGEM

O estudo foi realizado com amostras de rejeito de minério de ferro coletadas no beneficiamento da mineração. Consistiram de rejeitos de flotação e rejeitos ultrafinos, coletados diretamente na bomba dos tanques dispersadores das usinas (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Coleta das amostras de rejeito na Mina do Pico (Do autor, 2019).

3.3 SECAGEM E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS

Após a realização da coleta de amostras dos rejeitos, iniciou-se a preparação das amostras para execução de ensaios de caracterização geotécnica, realização de ensaios físicos e ensaios químicos, seguindo a sequência conforme detalhado:

- 1ª Etapa - Foi realizada a transferência das amostras para um recipiente que não permitisse a perda de rejeitos ultrafinos e da água contida na amostragem. O recipiente foi colocado em repouso por algumas horas. Quando o rejeito estava decantado no fundo do recipiente, utilizou-se do auxílio de uma pera de borracha para remover a água que estava sobrenadante, garantindo que, no momento da sucção, não fosse coletado rejeito ultrafino composto com o líquido absorvido.
- 2ª Etapa - Todo o líquido coletado pela pera de borracha foi armazenado dentro de um recipiente do tipo leiteira de plástico (Figura 3.2), pois de acordo com alguns procedimentos, este tipo de recipiente mantém o líquido fora da presença de luz solar, garantindo a permanência das propriedades contidas no meio líquido. A estocagem da água foi necessária para que, durante a realização dos acréscimos de umidade, pudessem ser feitas comparações entre os resultados obtidos com a utilização da água pertencente ao processo de deslamagem e aqueles obtidos com o uso de água destilada durante o ensaio de abatimento. Com isso, foi possível verificar a influência dos meios líquidos nos resultados.



Figura 3.2 – Recipiente utilizado para armazenamento do líquido extraído dos rejeitos – água sobrenadante (Do autor, 2019).

- 3ª Etapa - Após a realização do desaguamento parcial das polpas de rejeito, as amostras foram colocadas em um filtro prensa, do tipo semiautomático, com capacidade de 10 litros e, na sua base, foi adicionado um papel filtro umedecido para evitar o carreamento de partículas finas (Figura 3.3 a).
- 4ª Etapa - Após realizar a secagem das amostras no filtro prensa, iniciou-se a fase de secagem das amostras na chapa quente, à temperatura máxima de 105°C e homogeneizada constantemente, evitando-se a queima de partículas ultrafinas (Figura 3.3 b).



Figura 3.3 – Secagem da amostra adotando-se as metodologias: (a) chapa quente e (b) filtro de pressão (Do autor, 2019).

3.4 PREPARO DAS AMOSTRAS

Após realizar a etapa de secagem das amostras, estas foram armazenadas em sacos plásticos e, subsequentemente, homogeneizadas. A homogeneização das amostras foi realizada utilizando-se o método da divisão: inicialmente as amostras foram dispostas em uma bancada limpa, revestida com borracha e revolvidas para desfazer os aglomerados. Posteriormente, todo o material foi empilhado em forma de cone e achatado, obtendo-se um aspecto de torta para ser dividido. A divisão foi realizada como mostrado na Figura 3.4, sempre em 4 partes iguais, retirando-se dois quartos opostos, homogeneizados no processo anterior e levados para o passo seguinte.

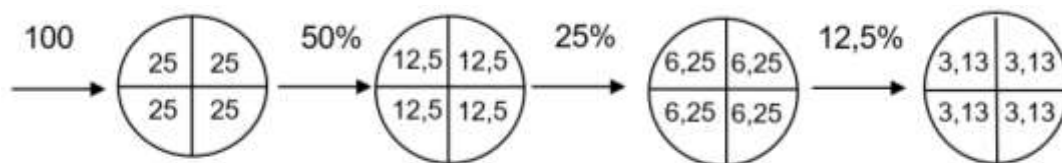


Figura 3.4 – Modelo esquemático da homogeneização das amostras (Do autor, 2019).

As operações descritas foram repetidas até a obtenção de uma massa bastante homogênea para os ensaios, tomando-se o cuidado para que não houvesse grandes variações de massa entre os incrementos realizados.

3.5 MISTURAS DOS REJEITOS ULTRAFINOS E DE FLOTAÇÃO

Os rejeitos são considerados um sistema trifásico, semelhante aos solos compostos por água, ar e sólidos Figura 3.5. Na engenharia, quando se deseja encontrar parâmetros relacionados a um determinado material, como, por exemplo, o teor de umidade, índices de vazios, granulometria, massa específica dos grãos e análises químicas das partículas, é necessário separá-los dos demais. Estes parâmetros podem fornecer informações novas e importantes para se determinar as características e o comportamento do material estudado, expandido o conhecimento sobre este e, auxiliando o entendimento das propriedades diretamente relacionadas à estabilidade e à maneira que os materiais interagem.

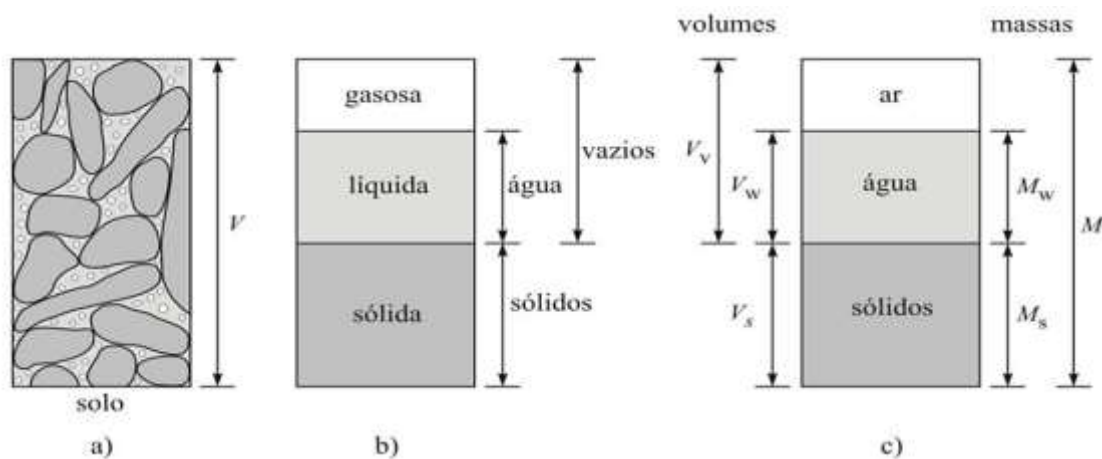


Figura 3.5 – As fases do solo: (a) no estado natural, (b) separado em volume, (c) em função do volume de sólidos (Pinto, 2006).

O Quadrilátero Ferrífero tem grande representatividade no futuro da mineração, o que, considerando o histórico de exploração de minério nessa região, projeta-se a necessidade de se explorar minérios com baixo teor de ferro. O processo de extração do minério de ferro de baixo teor envolve, conseqüentemente, a deslamagem de rejeitos de granulometrias cada vez mais finas, podendo assumir percentuais de 70% a 90% de rejeito flotação e 10% a 30% dos compostos de rejeito de características ultrafinas.

O processo de deslamagem da mistura de rejeitos na mineração é denominado de rejeito total. Esse rejeito é geralmente utilizado, por exemplo, como material de construção de aterros em barragens. Deste modo, as características de interesse nestes materiais, principalmente os utilizados em maciços terrosos, estão diretamente associadas à sua estabilidade e comportamento na utilização de diversas obras.

Com base nas informações dos percentuais de rejeitos provenientes do beneficiamento mineral, decidiu-se, nesta dissertação, trabalhar com as misturas em massas de sólidos dos rejeitos ultrafinos + rejeitos de flotação, sendo que os processos mecânicos e químicos que atuam na partícula mineral, desde a sua formação no beneficiamento, até a sua deposição como rejeito, refletem consideravelmente em sua composição, tamanho e forma. As misturas, considerando a condição seca das amostras foram compostas nas seguintes proporções, em massa:

- 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino;
- 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino;
- 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino.

Com a definição dos percentuais de mistura, foi realizada a dosagem das amostras de rejeitos para os ensaios de massa específica dos grãos, análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, ensaios de palheta e ensaio de abatimento. As misturas propostas foram definidas visando caracterizar a disposição futura da mineração, pois cada vez mais, a tendência de se realizar a disposição de rejeitos de características ultrafinas é avaliada na indústria da mineração. Os valores obtidos nas dosagens realizadas no laboratório podem ser observados nas Tabela 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 – Dosagem realizada para mistura de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

MASSA DE REJEITO SECO TOMADO PARA O CÁLCULO DA MISTURA								
DADOS DA AMOSTRAGEM			ENSAIO DE TENSÃO DE ESCOAMENTO		OUTROS ENSAIOS	REG. DA MISTURA=E-03		
PENEIRAS	MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-01		
RETIDO # N°4						w (%)=5,3%		
RETIDO # N°10	100000	100	14216	6634	2843	PARA A		
MASSA TOTAL	100000	100	14216	6634	2843	MISTURA = 90%		
PENEIRAS			MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-02
RETIDO # N°4							w (%)=7,1%	
RETIDO # N°10	100000	100	1607	750	321	PARA A		
MASSA TOTAL	100000	100	1607	750	321	MISTURA = 10%		
PESO TOTAL DA MISTURA			15822	7384	3164	-		

Tabela 3.2 – Dosagem realizada para mistura de 80% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

MASSA DE REJEITO SECO TOMADO PARA O CÁLCULO DA MISTURA								
DADOS DA AMOSTRAGEM			ENSAIO DE TENSÃO DE ESCOAMENTO		OUTROS ENSAIOS	REG. DA MISTURA=E-04		
PENEIRAS	MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-01		
RETIDO # N°4						w (%)=5,3%		
RETIDO # N°10	100000	100	12636	5897	2527	PARA A		
MASSA TOTAL	100000	100	12636	5897	2527	MISTURA = 80%		
PENEIRAS			MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-02
RETIDO # N°4							w (%)=7,1%	
RETIDO # N°10	100000	100	3213	1499	643	PARA A		
MASSA TOTAL	100000	100	3213	1499	643	MISTURA = 20%		
PESO TOTAL DA MISTURA			15849	7396	3170	-		

Tabela 3.3 – Dosagem realizada para mistura de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

MASSA DE SOLO SECO TOMADO PARA O CÁLCULO DA MISTURA						
DADOS DA AMOSTRAGEM			ENSAIO DE TENSÃO DE ESCOAMENTO		OUTROS ENSAIOS	REG. DA MISTURA=E-05
PENEIRAS	MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-01
RETIDO # N°4						w (%)=5,3% PARA A MISTURA = 70%
RETIDO # N°10	100000	100	11057	5160	2211	
MASSA TOTAL	100000	100	11057	5160	2211	
PENEIRAS	MASSA RETIDA (g)	%	SLUMP (g)	VANE TEST (g)	CARACTERIZAÇÃO (g)	REG. DA AMOSTRA=E-02
RETIDO # N°4						w (%)=7,1% PARA A MISTURA = 30%
RETIDO # N°10	100000	100	4820	2249	964	
MASSA TOTAL	100000	100	4820	2249	964	
PESO TOTAL DA MISTURA			15876	7409	3175	-

Os valores de dosagem das amostras provenientes de misturas de rejeitos de flotação e ultrafino foram calculados em função da massa seca de rejeito, desconsiderando-se a massa de água contida, garantindo desta forma que a mistura realizada contenha o percentual de partículas sólidas do rejeito determinado anteriormente para as misturas.

3.6 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

A massa específica dos grãos (ρ_s) é, por definição, a relação entre a massa dos grãos e o seu volume real. Dessa forma, podemos dizer que o ensaio de massa específica é um elemento necessário para a determinação do índice de vazios e outros índices físicos do solo e também para realizara a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação. A massa específica dos grãos dos rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero está relativamente condicionada ao teor de ferro presente nos mesmos. As partículas de ferro, por si só, apresentam massa específica dos grãos em torno de 5,25 g/cm³, enquanto que os grãos de quartzo são caracterizados por possuírem massa específica em torno de 2,65 g/cm³.

A determinação da massa específica dos grãos foi realizada conforme os procedimentos da NBR-6458 (ABNT, 2016).

3.7 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica dos rejeitos tem a função de determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas das frações correspondentes no material. Da mesma forma que a massa específica dos grãos, para os rejeitos, utilizam-se os procedimentos normativos destinados ao estudo dos solos. A análise granulométrica foi realizada seguindo os procedimentos da NBR-7181 (ABNT, 2016). Esta norma também permite obter parâmetros como os diâmetros necessários ao cálculo de coeficientes de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c). A análise granulométrica é de extrema importância no contexto desta dissertação, pois permite o acompanhamento correto dos teores de misturas escolhidos e das porções de areias e partículas ultrafinas encontradas no rejeito analisado (Figura 3.6).

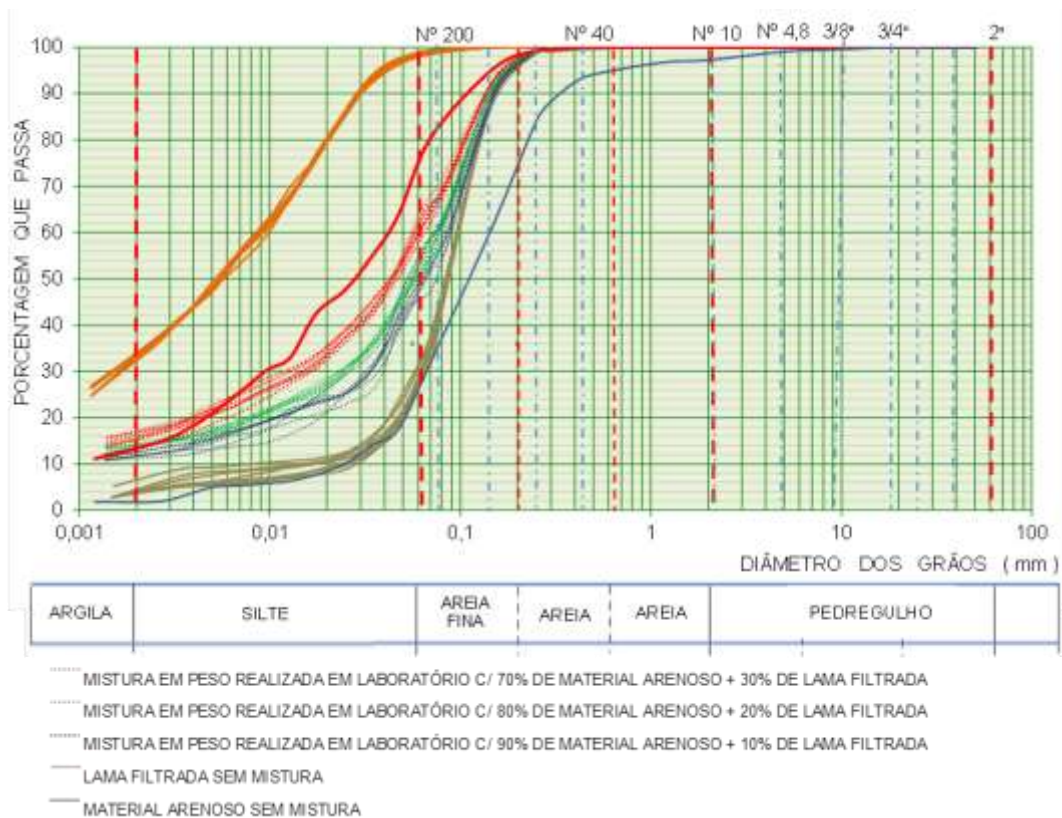


Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos rejeitos e das misturas realizadas (Do autor, 2019).

Conforme mencionado, a partir das curvas granulométricas é possível verificar, em termos de tamanho das partículas, a efetiva composição de cada mistura realizada. Deste modo, a granulometria do material analisado possibilita a correlação entre as propriedades de tensão de escoamento e os teores das misturas dos rejeitos de flotação e ultrafinos realizados neste trabalho.

3.8 ENSAIO DE PALHETA (*VANE TEST*)

O ensaio de palheta (*Vane Test*) foi desenvolvido seguindo as especificações da norma americana D-4648 (ASTM, 2016). O ensaio foi utilizado nesta pesquisa para determinar a tensão de escoamento dos rejeitos. O experimento é caracterizado por possuir uma superfície de medição plana. Durante o teste, a palheta é cravada na amostra de rejeito e efetivamente empurra o material enquanto faz o movimento de rotação, de acordo com o modelo exposto na Figura 3.7.

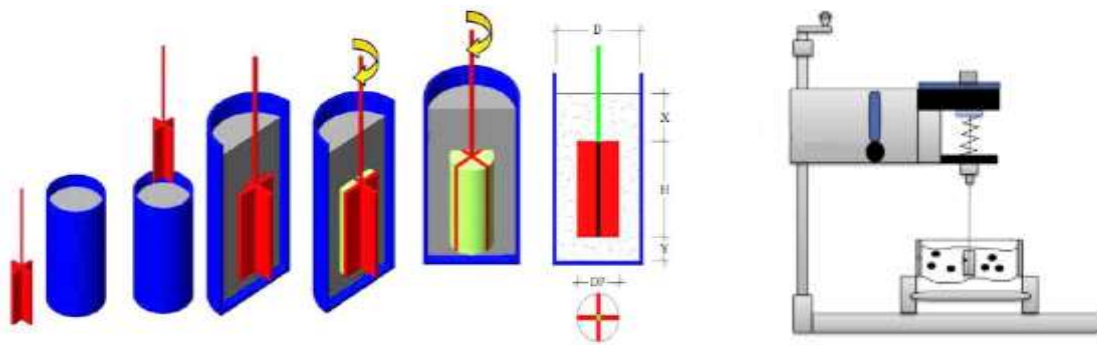


Figura 3.7 – Representação esquemática do ensaio de *Vane Test* (Maciel *et al.*, 2016).

Ribeiro (2015) explica que, para o desenvolvimento de uma metodologia eficiente de análises de ruptura de barragens de rejeitos, é necessário realizar ensaios para a determinação de propriedades reológicas em fluidos não newtonianos. Ensaios distintos podem ser utilizados para a determinação da tensão de escoamento, como, por exemplo, os ensaios de resistência de cisalhamento. O autor desenvolveu um viscosímetro coaxial de palhetas com foco em determinar as propriedades reológicas dos rejeitos. Na Figura 3.8 pode ser visualizado o gráfico demonstrando os valores de tensão de escoamento obtidos por ele.

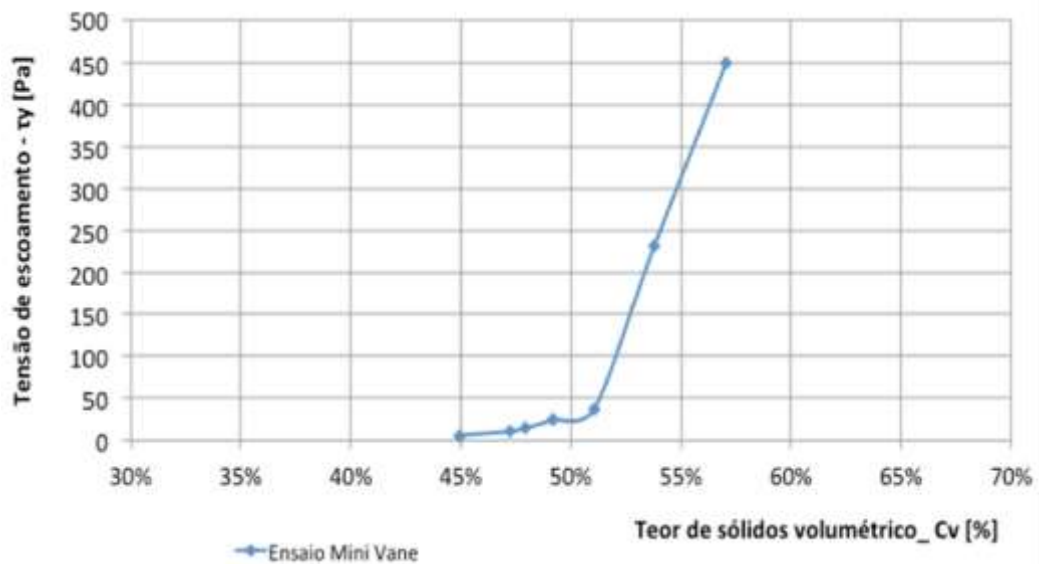


Figura 3.8 – Resultado de tensão de escoamento obtidos por Ribeiro (2015).

Para o desenvolvimento do ensaio de palheta, foi preparada uma massa homogênea de rejeitos com teores de sólidos variados, dependente do teor da mistura estudado. Posteriormente, foi realizada a cravação da palheta para cada teor de sólidos estudado. Ao fim de cada ensaio, foi determinado o teor de umidade do rejeito. Uma vez finalizados os testes para cada teor de sólido estudado, foi calculada a quantidade de água necessária para colocar a mistura de rejeito em uma concentração de sólidos menor. Posteriormente, adicionou-se água e toda a massa foi misturada até a homogeneização completa da mistura. Foram, então, repetidos os processos de cravação da palheta.

No desenvolvimento do ensaio utilizaram-se rejeitos de características ultrafinas, arenosas e misturas em proporções diversas, com a finalidade de se determinar a tensão de escoamento para diversas variabilidades de rejeitos liberados nas plantas de deslamagem, aumentando-se a confiabilidade das correlações utilizadas nos ensaios de abatimento.

A metodologia baseia-se em cravar a palheta na amostra a uma profundidade mínima igual ao dobro da altura da palheta escolhida. Depois de ser realizada a cravação, inicia-se a rotação da palheta a uma velocidade 60° a 90° por minuto. Após o início dos ensaios, devem ser registradas as leituras do torque a cada 5° de rotação, até que os valores se

tornem estáveis (o que significa a ruptura do solo) ou a leitura máxima ao ser atingida para uma rotação de 180° do aparelho. O torque é medido por uma mola calibrada, que é acoplada diretamente à palheta. Este torque é convertido em uma resistência de cisalhamento unitário de área de superfície cilíndrica.

Quanto ao procedimento de preparo da amostra, foi utilizado um método similar ao do ensaio de caracterização. Após o preparo do rejeito, foi separada uma quantia de aproximadamente 10 kg e efetuada a conseqüente homogeneização. Posteriormente, foi realizado o acréscimo de água até que se atingisse uma umidade inicial de aproximadamente 10 %.

Após a preparação da mistura, a mola foi selecionada considerando a que melhor se adaptasse à característica do rejeito, de acordo com a resistência não drenada esperada. Em seguida, o rejeito foi acondicionado no recipiente de ensaio em três camadas iguais, sendo aplicados, em cada amostra, 10 golpes com o auxílio de uma haste arredondada. Cabe destacar que, durante todo o processo, tornou-se necessário um relativo cuidado e atenção durante esta etapa, visando evitar o aparecimento de vazios na região de interface entre a palheta e a amostra, fato que poderia comprometer o resultado. Em seguida, foi inserida a palheta na amostra de rejeito em uma profundidade mínima igual ao dobro da altura da palheta utilizada, de modo a garantir que o topo da palheta estava embutido, no mínimo, a uma profundidade igual à altura da palheta.

Iniciou-se a fase de rotação da palheta à velocidade de 60° por minuto, registrando-se as leituras de deflexão ou o torque ao mínimo a cada 5° de rotação, até que os valores se tornassem estáveis ou até a obtenção máxima de 180°. Na sequência foi separada uma parte representativa da amostra para a determinação do teor de umidade, sendo o rejeito inspecionado dentro do recipiente ensaiado com a finalidade da verificação dos padrões de ruptura, os quais poderiam influenciar o resultado dos ensaios realizados.

Os resultados considerados, na avaliação de cada rejeito, corresponderam à média de três determinações consecutivas, realizadas em amostras diferentes de uma mesma mistura do rejeito. Na Figura 3.9 são destacadas algumas partes do dispositivo utilizado.



Figura 3.9 – Vista dos dispositivos do equipamento utilizado (Do autor, 2019).

O cálculo da resistência não drenada, de acordo com a palheta utilizada, foi realizado considerando a Equação 3.1:

$$S_u = \frac{T}{k} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

S_u = Resistência não drenada ao cisalhamento, em Pa;

T = Torque (N/m) medido durante o ensaio;

k = Constante da palheta.

O cálculo do torque máximo, de acordo com a palheta utilizada, foi realizado com base na Equação 3.2:

$$T_m = \frac{\pi D^3}{2} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde:

D = diâmetro da palheta (m)

H = altura da palheta (m)

T_m = Torque máximo (N.m)

τ_0 = tensão de escoamento (kPa)

3.9 ENSAIO DE ABATIMENTO (*SLUMP TEST*)

Diversos modelos já foram utilizados para determinar a tensão de escoamento através da metodologia do ensaio de abatimento (*Slump Test*). Entretanto, são atípicas as pesquisas que realizam o detalhamento preciso da metodologia utilizada. Autores como Hoppe Filho *et al.* (2006) e Pashias *et al.* (1996) divergem opiniões sobre a eficiência do método associado ao ensaio de abatimento. Tais divergências estão relacionadas à forma apropriada de realização dos ensaios.

Dentre essas divergências, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Reis (2008), que menciona a necessidade de realizar um aprimoramento nas técnicas dos ensaios de abatimento realizados a partir da metodologia de tronco de cone. A proposta incorporou o aperfeiçoamento do cone com sensores eletrônicos para captar o tempo de descida do material contido no interior do cone, procurando correlações matemáticas que permitam utilizar o dispositivo para alturas maiores e menores que os trabalhos desenvolvidos por Ferraris e De Larrard (1998).

A determinação da tensão de escoamento de materiais provenientes da indústria mineral através de ensaios de abatimento em laboratório, habitualmente, é realizada utilizando-se moldes cilíndricos com a razão entre altura e diâmetro igual a 1:1, conforme modelo proposto por Pashias *et al.* (1996). Dada a necessidade de se obter maior detalhamento dos procedimentos de execução do teste de abatimento, verificando a influência dos materiais utilizados e dos tempos de leitura, propõe-se, como uma das etapas deste trabalho, a determinação da tensão de escoamento de amostras de rejeitos de minério de ferro, analisando a influência da variação dos parâmetros nos resultados obtidos: tempo de leitura, meio líquido (água destilada e água do processo de beneficiamento do minério), materiais utilizados para confecção dos moldes cilíndricos (PVC) e tronco de cone (chapa metálica e acrílico) e variação dos diâmetros dos moldes.

Conforme já destacado no capítulo de revisão, Ribeiro (2015) realizou ensaios de abatimento, destacando como vantagem o baixo custo destes. Os resultados dos ensaios realizados pelo autor, para determinação da tensão de escoamento, por meio dos ensaios de abatimento, são condizentes com os parâmetros já esperados (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de abatimento realizados para obtenção da tensão de escoamento em amostras de rejeitos de mineração (Ribeiro, 2015).

Teor de sólidos Volumétrico Cv [%]	Teor de sólidos gravimétrico Cw [%]	Teor de umidade W [%]	índice de vazios e	Massa específica ρ_s [kg/m ³]	Slump_S [mm]	Tensão de escoamento [Pa]
32,5%	63,2%	57,9%	2,08	2000,75	243	0,00
45,0%	74,5%	34,0%	1,22	2183,52	232	59,59
50,0%	78,2%	27,8%	1,00	2289,28	223	114,70
52,5%	79,8%	25,2%	0,90	2350,55	186	350,52
55,0%	81,4%	22,8%	0,82	2442,30	147	646,89
57,5%	82,9%	20,6%	0,74	2474,15	78	1278,21
60,0%	84,3%	18,6%	0,67	2542,47	45	1726,33
65,0%	86,9%	15,0%	0,54	2675,36	15	2396,53

Os moldes metálicos e acrílicos de tronco de cone utilizados seguiram as dimensões mostradas na Tabela 3.5, de acordo com os modelos normatizados para os ensaios de abatimento de concreto e cilindro modificado. Considerando que um dos objetivos desta dissertação é estudar a influência dos materiais que compõem os amostradores, houve a necessidade da fabricação dos moldes de acrílico de troncos de cone, uma vez que esses modelos não são disponibilizados comercialmente.

Dois moldes do tipo tronco de cone, com diferentes dimensões, foram construídos. Um dos moldes seguiu criteriosamente os formatos exigidos para o ensaio de abatimento, em conformidade com a NBR-NM 67 (ABNT, 1998) e o segundo, com dimensões variadas para verificar sua relação com os resultados obtidos (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Dimensões dos moldes utilizados nos ensaios de abatimento tipo tronco de cone (Do autor, 2019).

NÚMERO DO MOLDE	MATERIAL DO MOLDE	ALTURA DO MOLDE (cm)	DIÂMETRO (cm)	
			SUPERIOR	INFERIOR
01	Metálico	30,0	20,0	10,0
02	Acrílico	30,0	20,0	10,0
03	Metálico	21,5	14,4	4,7
04	Acrílico	21,5	14,4	4,7

A utilização do modelo em acrílico permitiu determinar a interferência no valor da tensão de escoamento em função da rugosidade do material e o quanto esta variação pode alterar

os resultados, com base na comparação dos valores obtidos. Este procedimento foi escolhido após ter sido observado que a força de atrito na parede do amostrador metálico poderia afetar a confiabilidade dos resultados experimentais executados no laboratório.

Considerando que o rejeito ultrafino apresenta uma coesão provocada pela sucção interna do material, durante a moldagem das amostras poderia ocorrer a formação de espaços vazios, ocupados diretamente pela presença de ar no interior do corpo de prova ou entre a parede e a amostra. A utilização de moldes transparentes possibilitou a visualização desses espaços, podendo assim anular os erros provocados pela presença de bolhas de ar durante a moldagem dos corpos de prova. Tornou-se possível também a verificação da influência dos moldes transparentes nos valores de tensão de escoamento. Os moldes de acrílico e metálico são apresentados na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Modelos de tronco de cones fabricados de chapa metálica e chapa de acrílico, utilizados para realização dos ensaios de abatimento (Do autor, 2019).

Adicionalmente, foram realizados ensaios de tensão de escoamento em dois tipos de moldes cilíndricos nas dimensões mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Dimensões dos amostradores utilizados nos ensaios de *Slump* do tipo cilíndrico (Do autor, 2019).

NÚMERO DO MOLDE	MATERIAL DO AMOSTRADOR	ALTURA DO MOLDE (cm)	DIÂMETRO DO MOLDE (cm)
05	PVC	10,0	10,0
06	PVC	7,5	7,5

A metodologia adotada para a execução dos ensaios de abatimento envolveu grande quantidade de ensaios (242 ensaios). A verificação do teor de umidade das amostras foi realizada por meio de medida indireta, quantificando-se a massa da amostra úmida e seca, a secagem das amostras foi realizada em estufa por 12 horas, à temperatura de 110°C. Este procedimento foi realizado em cada amostra depois de acrescentada a quantidade de água necessária para o ensaio e para cada molde determinado anteriormente (Tabela 3.5 e 3.6).

Dentre os procedimentos aplicados na realização do ensaio, primeiramente, as amostras foram homogeneizadas e separadas. Em seguida, foram realizados os acréscimos de umidade até a obtenção de uma mistura úmida e consistente. Posteriormente, foram realizadas as moldagens dos corpos de provas. Com o objetivo de corresponder exatamente ao critério de amassamento dos ensaios de palheta realizados anteriormente, repetiu-se o procedimento citado para todas as moldagens do ensaio de abatimento.

A moldagem foi executada em três etapas, acrescentando o material em camadas iguais. A primeira camada foi moldada com aproximadamente $1/3$ da altura total do molde, a segunda camada aproximadamente $2/3$ da altura total, e a terceira, consecutivamente, foi moldada na altura restante de modo a preencher completamente o molde. Após o preenchimento de cada camada, o rejeito foi vibrado dentro do molde com o auxílio de uma haste cilíndrica, visando garantir a retirada de bolhas de ar e o adensamento uniformemente distribuído no interior do equipamento. Depois de preenchido, o recipiente foi rasado na superfície com o auxílio de uma régua.

Concluída a etapa de moldagem, foi realizada a limpeza do rejeito que caiu na placa de base e nas paredes externas em torno do molde, para não haver interferência na amostra quando retirado o molde. Posteriormente, o molde foi elevado cuidadosamente, com velocidade aproximadamente constante e uniforme. Em seguida, foram realizadas as leituras de adensamento do rejeito com as variações de tempo de medida. As leituras foram realizadas no ponto médio da amostra. A primeira leitura foi realizada 30 segundos após a retirada do molde, a segunda leitura 1 minuto após a retirada do molde e a terceira e última leitura, 2 minutos após a retirada do molde. Após as leituras de adensamento do

rejeito, a amostra contida no interior do equipamento foi pesada na balança e a massa registrada para a posterior realização dos cálculos de tensão de escoamento.

Os ensaios de abatimento utilizando moldes com o formato do tipo tronco de cone de acrílico com altura de 23,5cm e moldes cilíndricos de PVC com alturas de 10,0cm e 7,5cm foram realizados em duplicidade, alterando-se a água para acréscimo de umidade. Conforme já enfatizado anteriormente, utilizou-se, como procedimento, 2 tipos de água: a água destilada e a água utilizada no processo de deslamagem. Os critérios de moldagem foram os mesmos para todas as amostras.

Os teores de umidade das amostras dos ensaios de abatimento apresentaram variações devido às características dos rejeitos utilizados. Para determinação dos teores de umidade, acrescentou-se água às amostras do rejeito, de modo a atingir uma umidade que não permitisse se observar deformação do corpo de prova ao realizar o ensaio. O teor de umidade inicial foi definido considerando-se o primeiro corpo de prova que apresentou deformação após acréscimo de umidade, como mostrado na Figura 3.11 (a). O teor de umidade final das amostras foi definido a partir da amostra que não apresentou coesão na realização do teste de abatimento, como mostrado na Figura 3.11 (b). A quantidade inicial de água acrescida à amostra, de modo a atender o parâmetro de não deformação do corpo de prova, pode ser corrigida ajustando-se as proporções de rejeito e água. Observou-se que quando a umidade atingida foi inferior à necessária para tal, o procedimento foi marcado pela dificuldade de retirada do molde, inviabilizando a realização do ensaio. Por outro lado, quando a umidade ultrapassou a prevista como necessária, a amostra se deformou, não atendendo ao parâmetro estabelecido inicialmente.



Figura 3.11 – (a) Ensaio de *Slump* com teor inicial de umidade da amostra.
(b) Ensaio de *Slump* com teor final de umidade da amostra (Do autor, 2019).

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios obtidos no programa experimental proposto nesta dissertação, bem como as análises e discussões dos resultados obtidos, com o objetivo de definir a tensão de escoamento por meio do ensaio de palheta e do ensaio de abatimento.

Neste sentido, busca-se estabelecer a melhor correlação entre os dois ensaios e obter a relação entre as diferentes variáveis propostas na execução destes. Para determinação da tensão de escoamento, foram utilizadas quatro metodologias de cálculos propostas por autores distintos:

- C-1 (Pashias *et al.*, 1996);
- C-2 (Castro, 2007);
- C-3 (Ferraris e De Larrard, 1998);
- C-4 (Pereira *et al.*, 2018).

Inicialmente serão apresentadas as misturas utilizando dois tipos de rejeito de minério de ferro, definidas suas proporções e a caracterização dos rejeitos derivados do beneficiamento de minério de ferro:

- rejeito de flotação;
- rejeito ultrafino;
- mistura, em percentual de massa, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino;
- mistura, em percentual de massa, de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino;

- mistura, em percentual de massa, de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino.

Os resultados dos ensaios estão descritos em forma de texto, tabelas e gráficos, de modo a contextualizá-los com as metodologias de cálculo utilizadas, visando determinar a tensão de escoamento, relacionando os materiais e misturas realizadas nos ensaios.

4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Para realização dos ensaios para determinação da massa específica dos grãos (ρ_s), foram preparadas as amostras para cada tipo de rejeito ou mistura analisados: rejeito de flotação, rejeito ultrafino, mistura em percentual de massa de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino, mistura percentual de massa de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino e mistura percentual de massa de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino. As médias dos respectivos valores estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Massa específica dos grãos (ρ_s) dos materiais analisados
(Do autor, 2019).

ENSAIO	MATERIAL DE ESTUDO	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm ³)
E-01	Rejeito de flotação	2,950
E-02	Rejeito Ultrafino	3,908
E-03	Mistura em percentual de massa de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino	3,067
E-04	Mistura em percentual de massa de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino	3,143
E-05	Mistura em percentual de massa de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino	3,229

Para determinação da massa específica dos grãos, foram realizados dois ensaios por grupo de amostra, conforme preconizado na norma vigente, devendo ser analisado a variação de no máximo 0,009 g/cm³ por grupo de ensaio, sendo a massa específica dos grãos o resultado médio entre eles.

4.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As características granulométricas dos rejeitos influenciam fortemente no comportamento reológico dos materiais estudados. Este comportamento está relacionado à fluidez, ao tamanho e à forma das partículas constituintes nos rejeitos.

Antes da apresentação dos resultados de granulometria, ressalta-se que a Figura 4.1 mostra uma imagem realizada com o auxílio de uma lupa eletrônica (estereomicroscópio Leica EZ4 HD), com as proporções de tamanho das partículas de rejeito arenoso e rejeito ultrafino detalhadas, produzida em laboratório. Analisando esta figura percebe-se que, o quão menor é uma partícula de rejeito ultrafino quando comparada ao rejeito de flotação, normalmente classificados como pertencente aos grupos argila ou silte, de acordo com a proporção de cada rejeito. O rejeito de mineração de ferro pode apresentar granulometria muito fina, sendo classificado algumas vezes como argila. No entanto, suas características mineralógicas e de plasticidade são bastante diferentes das encontradas em solo mineral, motivo pelo qual muitos autores adotam o termo ‘fração argila’ para nominar os rejeitos contidos nesta granulometria.

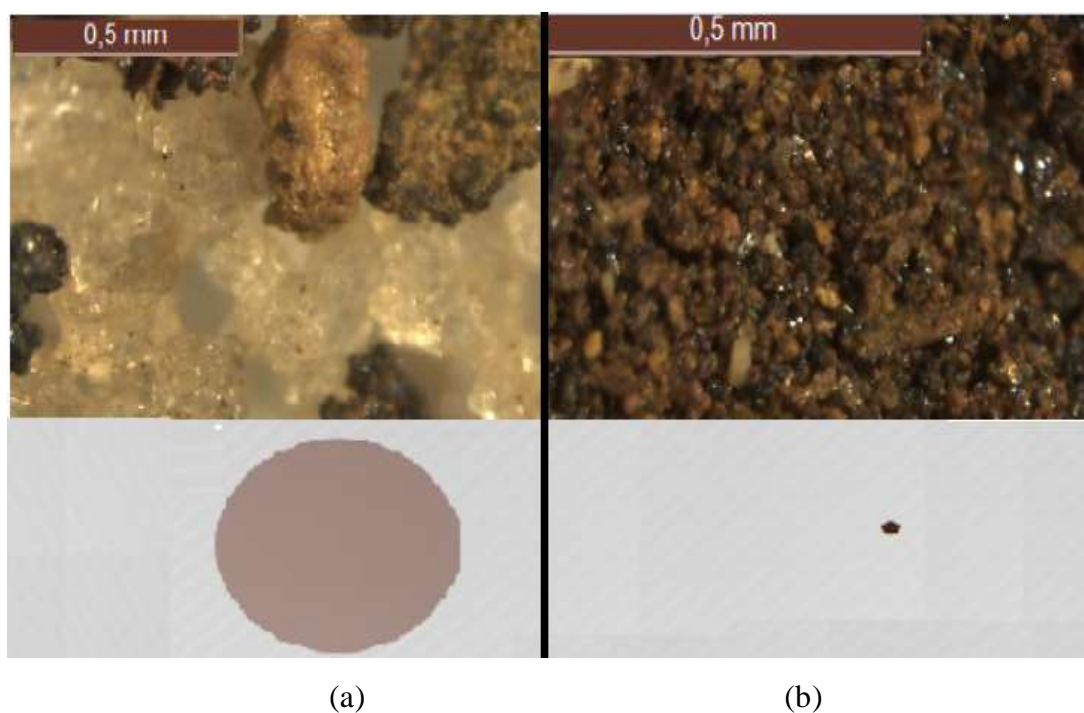


Figura 4.1 – Representação do tamanho das partículas de rejeito para comparação: a) rejeito de flotação e b) rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

A caracterização e a classificação dos rejeitos de flotação e rejeito ultrafino foram realizadas considerando 8 ensaios de granulometria em cada rejeito, conforme metodologia descrita anteriormente. Após caracterizar os rejeitos, iniciou-se a fase de mistura nas proporções indicadas na metodologia. Posteriormente ao processo de mistura e homogeneização, foram ensaiadas oito alíquotas de cada dosagem de rejeitos (70/30, 80/20 e 90/10), a fim de verificar a composição das amostras estudadas.

A partir da análise granulométrica realizada, foram traçadas curvas de distribuição de tamanho de grão para os rejeitos e as misturas. As Figura 4.2 a 4.6, mostram as curvas granulométricas obtidas, cujos dados são fornecidos das Tabela 4.2 a 4.6. Estas tabelas apresentam ainda o resumo das porcentagens das frações granulométricas, assim como os valores de D_{10} , D_{30} e D_{60} . Os diâmetros representam o tamanho máximo dos grãos das partículas presentes no material nas frações de 10, 30 e 60 %, respectivamente. A partir destas análises é possível caracterizar o rejeito quanto ao seu coeficiente de curvatura (C_c) e coeficiente de não uniformidade (C_u), classificando o rejeito como bem graduado, uniformemente graduado ou graduação de característica aberta.

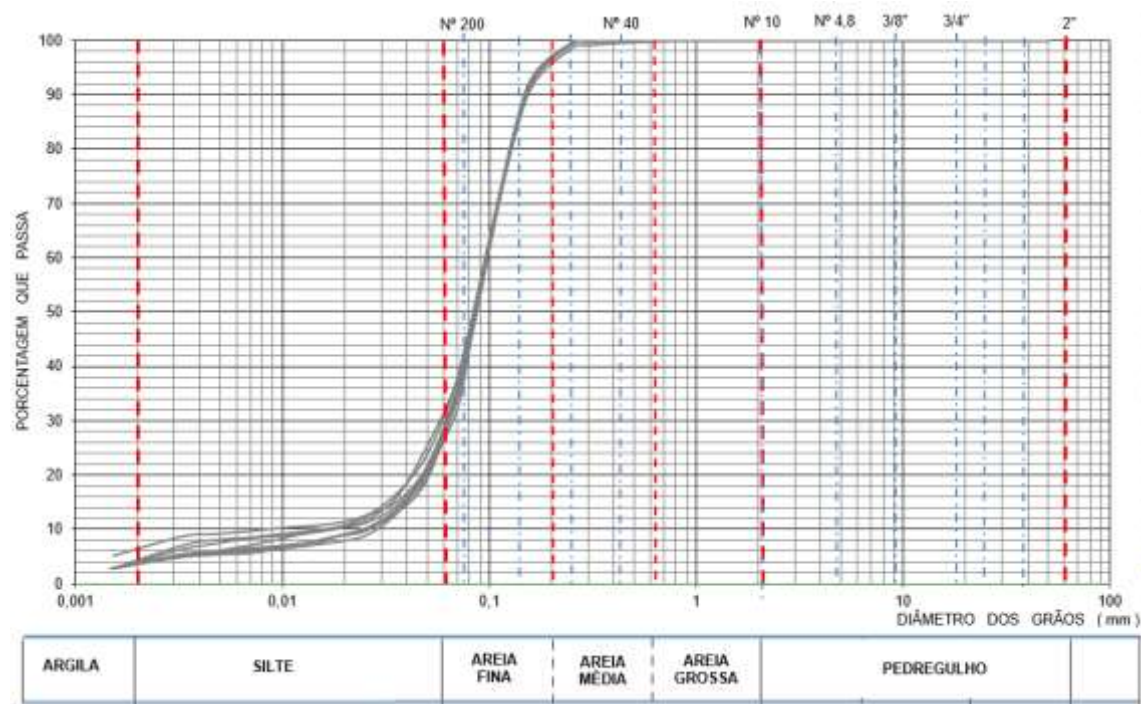


Figura 4.2 – Curva de distribuição granulométrica dos rejeitos de flotação (Do autor, 2019).

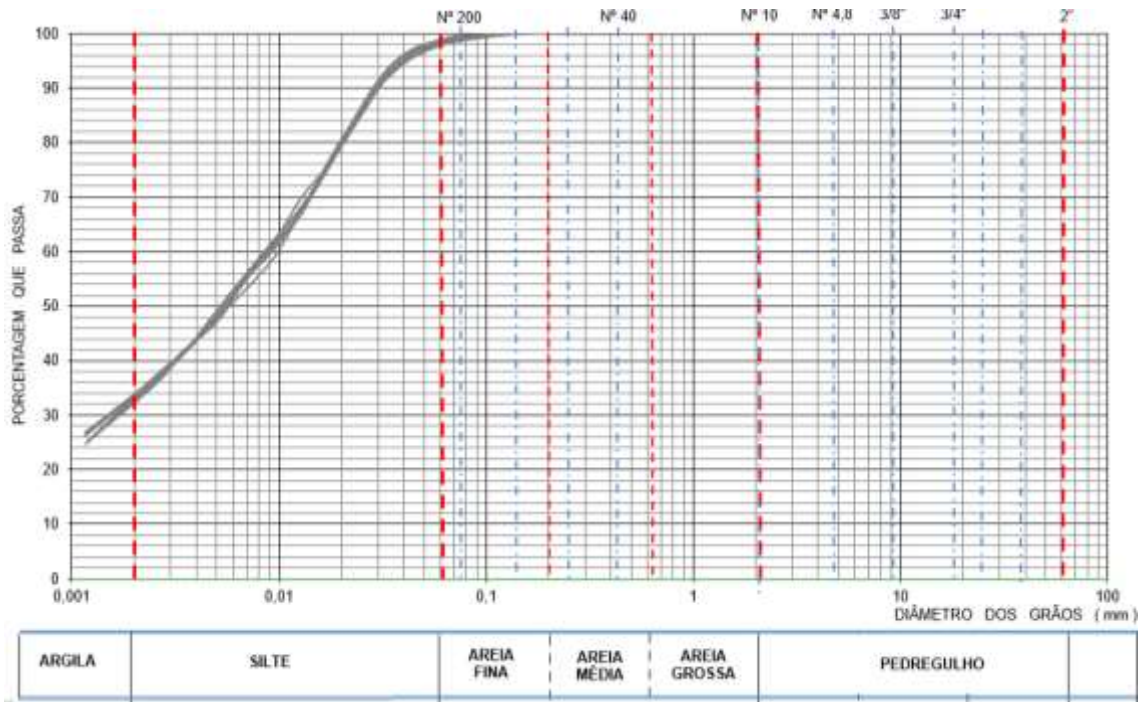


Figura 4.3 – Curva de distribuição granulométrica dos rejeitos ultrafinos (Do autor, 2019).

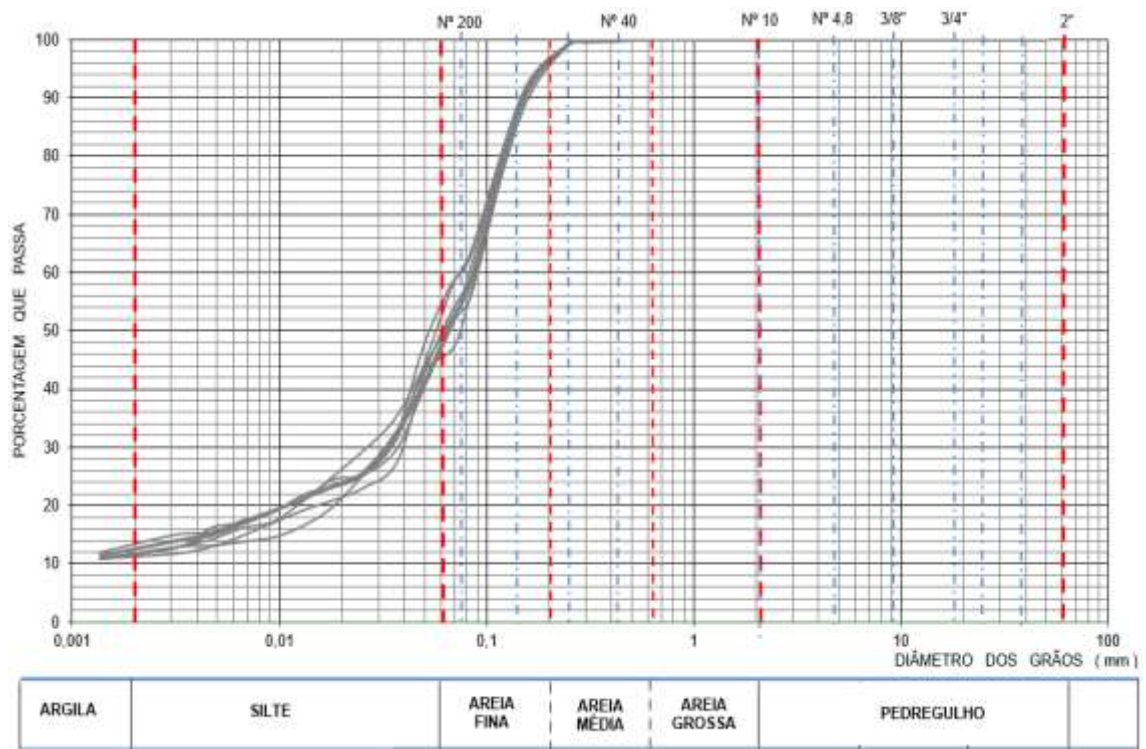


Figura 4.4 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

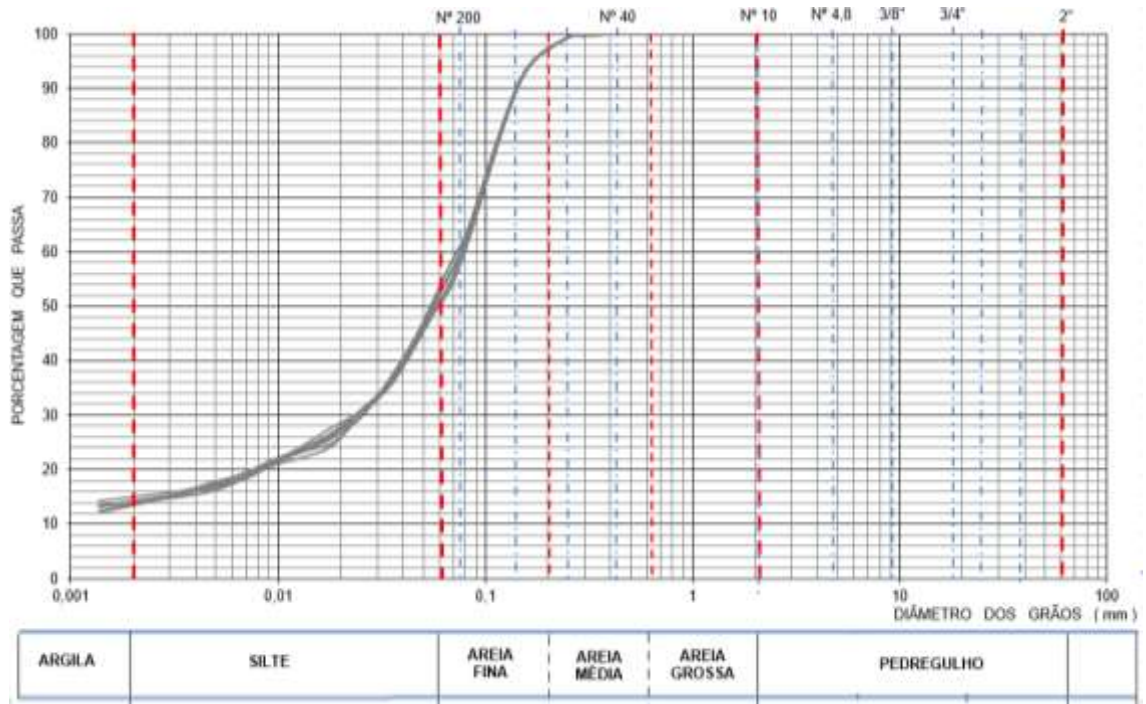


Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

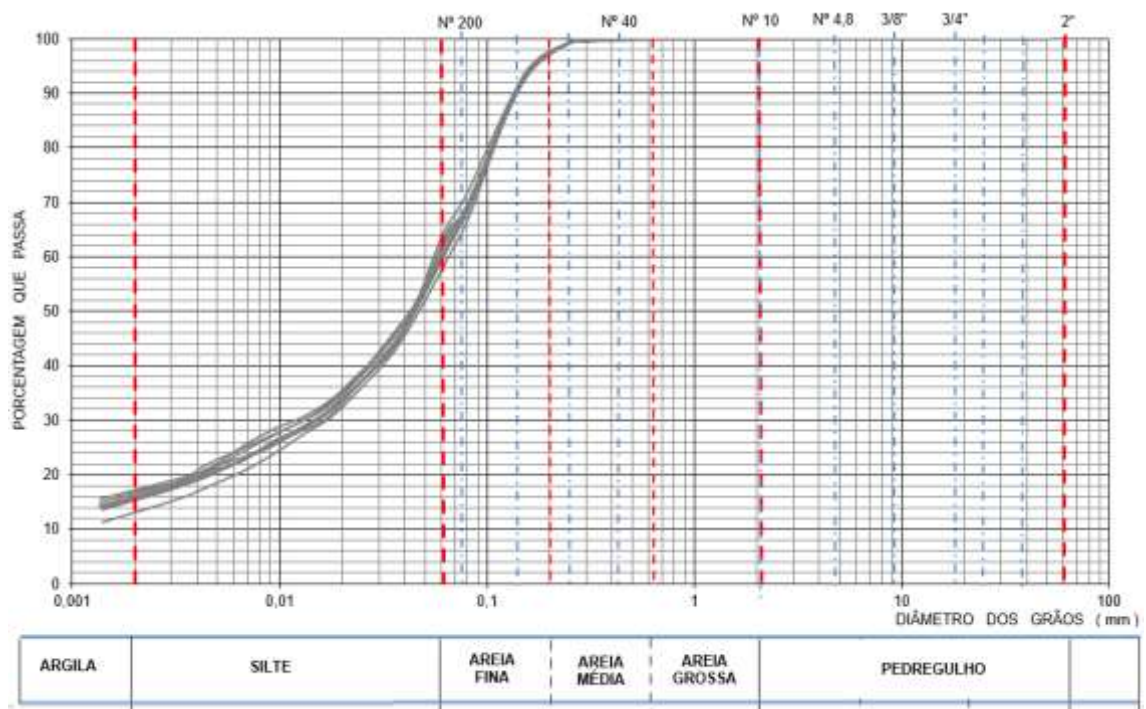


Figura 4.6 – Curva de distribuição granulométrica da mistura em peso de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito de flotação (Do autor, 2019).

DADOS	AMOSTRAS								MEDIANA DOS RESULTADOS
	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	
D ₁₀	0,0156	0,0080	0,0156	0,0280	0,0180	0,0270	0,0260	0,0230	0,0205
D ₃₀	0,0590	0,0610	0,0600	0,0650	0,0620	0,0630	0,0630	0,0630	0,0625
D ₆₀	0,0980	0,0980	0,0970	0,0990	0,0980	0,1000	0,0980	0,0980	0,0980
C _c	2,2769	4,7462	2,3791	1,5242	2,1791	1,4700	1,5577	1,7609	1,9700
C _u	6,2821	12,2500	6,2179	3,5357	5,4444	3,7037	3,7692	4,2609	4,8527
% Argila	4,35	6,41	4,14	3,76	3,84	3,77	3,62	3,66	3,81
% Silte	27,45	23,01	27,15	23,15	24,91	24,35	24,11	24,04	24,23
% Areia	68,20	70,58	68,71	73,09	71,25	71,88	72,27	72,30	71,57

Tabela 4.3 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

DADOS	AMOSTRAS								MEDIANA DOS RESULTADOS
	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	
D ₃₀	0,0016	0,0015	0,0017	0,0016	0,0016	0,0017	0,0018	0,0018	0,0017
D ₆₀	0,0085	0,0089	0,0092	0,0099	0,0088	0,0087	0,0091	0,0089	0,0089
% Argila	33,61	33,99	33,35	33,52	33,77	33,03	32,31	32,74	33,44
% Silte	64,20	63,54	64,91	64,42	64,08	65,49	66,06	65,71	64,67
% Areia	2,19	2,47	1,74	2,06	2,15	1,48	1,63	1,55	1,90

Tabela 4.4 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

DADOS	AMOSTRAS								MEDIANA DOS RESULTADOS
	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	
D ₃₀	0,0460	0,0370	0,0270	0,0380	0,0320	0,0320	0,0310	0,0320	0,0320
D ₆₀	0,0890	0,0820	0,0850	0,0860	0,0740	0,0730	0,0860	0,0900	0,0855
% Argila	12,55	11,69	11,82	11,24	12,50	11,75	13,33	11,75	11,79
% Silte	32,70	34,97	36,95	37,72	41,63	40,51	34,47	35,12	36,04
% Areia	54,75	53,34	51,23	51,04	45,87	47,74	52,20	53,13	51,72

Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

DADOS	AMOSTRAS								MEDIANA DOS RESULTADOS
	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	
D ₃₀	0,0230	0,0250	0,0220	0,0260	0,0250	0,0240	0,0240	0,0260	0,0245
D ₆₀	0,0760	0,0730	0,0720	0,0770	0,0760	0,0770	0,0780	0,0760	0,0760
% Argila	13,53	14,30	14,23	13,87	14,14	13,98	13,61	15,00	14,06
% Silte	37,35	39,33	39,23	38,00	38,32	37,30	36,61	36,22	37,68
% Areia	49,12	46,37	46,54	48,13	47,54	48,72	49,78	48,78	48,43

Tabela 4.6 – Resultado dos ensaios de caracterização granulométrica do rejeito misturado em peso na proporção de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

DADOS	AMOSTRAS								MEDIANA DOS RESULTADOS
	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	
D ₃₀	0,0160	0,0170	0,0120	0,0130	0,0160	0,0150	0,0150	0,0140	0,0150
D ₆₀	0,0610	0,0650	0,0580	0,0550	0,0610	0,0590	0,0600	0,0580	0,0595
% Argila	15,62	13,17	17,04	16,64	16,12	15,51	15,28	17,18	15,87
% Silte	43,41	44,38	44,71	46,72	43,44	45,07	44,54	44,35	44,46
% Areia	40,97	42,45	38,25	36,64	40,44	39,42	40,18	38,47	39,80

A Figura 4.2 mostra a curva granulométrica do rejeito de flotação. Os dados apresentados na Tabela 4.2 demonstram o comportamento do rejeito quanto ao seu coeficiente de curvatura (C_c), obtendo valor de 1,9700. Portanto, na análise do coeficiente ($1 < C_c < 3$), classifica-se o rejeito como bem graduado. Para a análise de coeficiente de não uniformidade (C_u) o rejeito apresentou o valor médio 4,8527 (< 5), classificado muito uniforme. Com base na análise granulométrica, foi possível classificar o rejeito de flotação como uma areia silto-argilosa de cor marrom.

A Figura 4.3 apresenta os resultados de análise granulométrica realizados nas amostras ultrafinas. Os dados apresentados na Tabela 4.3 demonstram o comportamento do rejeito quanto ao seu coeficiente de curvatura (C_c) e coeficiente de não uniformidade (C_u).

Entretanto, para o rejeito de característica ultrafino, não foi possível conhecer graficamente os valores de D_{10} . Conseqüentemente, não foi possível obter parâmetros de curvatura e uniformidade. Com base na análise granulométrica o rejeito ultrafino é classificado como um silte argilo-arenoso de cor marrom.

Visando caracterizar e classificar os rejeitos dosados nas proporções de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino, 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino e 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino, foram realizados oito ensaios de granulometria, conforme resultados apresentados nas Figura 4.4, 4.5 e 4.6. A necessidade foi constatada, objetivando controlar a qualidade das dosagens proposta nos ensaios de palheta e abatimento, com água destilada e com água de processo.

Os dados apresentados na Tabela 4.4 demonstram o que para a mistura, composta no laboratório na proporção de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino, não foi possível conhecer graficamente os valores de D_{10} , o que impediu a obtenção dos parâmetros de curvatura e uniformidade. Com base na análise granulométrica, a mistura foi classificada como sendo uma areia silto-argilosa de cor marrom.

A Figura 4.5 apresenta os resultados de análise granulométrica realizados nas amostras de rejeitos dosados em laboratório na proporção de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino. Da mesma forma, não foi possível obter parâmetros de curvatura e uniformidade. O mesmo comportamento foi observado na mistura associada à proporção de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino. As misturas contendo 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino e 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino foram classificadas, respectivamente, como areia silto-argilosa e silte areno-argiloso, todos de cor marrom.

Com base nas características mostradas pelas curvas de granulométricas, foi possível realizar uma análise comparativa das misturas, observando a homogeneidade e qualidade das misturas, conforme preconizado na metodologia para todos os teores estudados, aumentando consideravelmente a precisão e confiabilidade dos resultados das análises de tensão de escoamento nos rejeitos dosados em laboratório.

Com relação à forma dos grãos, as Figuras 4.7 e 4.8 apresentam imagens ampliadas dos rejeitos de flotação e ultrafino. Em relação ao primeiro rejeito, é verificada-se as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência de forma, recebendo a classificação de partículas subangulares. A mesma característica foi observada no rejeito ultrafino.

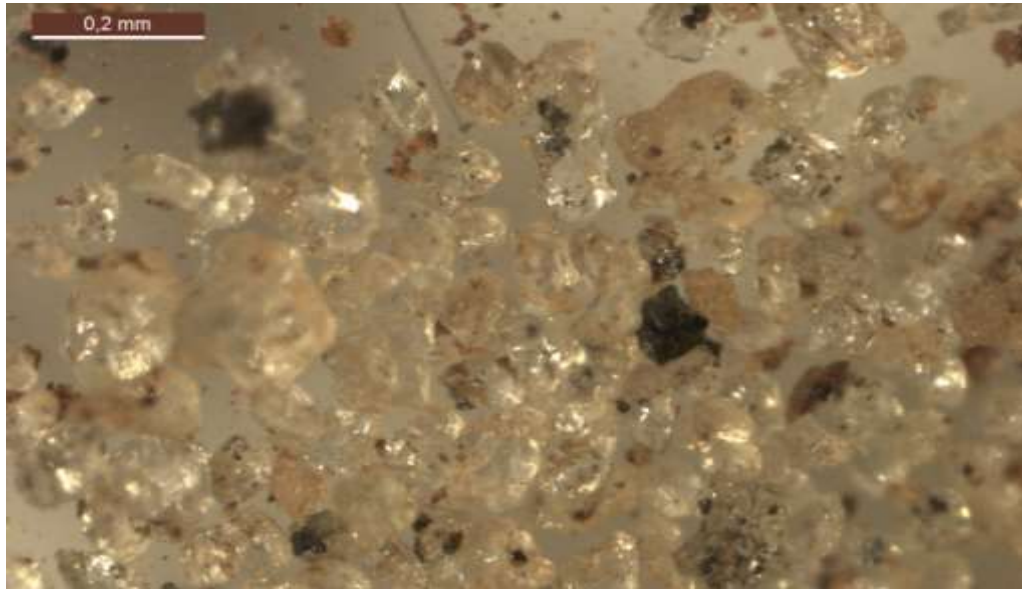


Figura 4.7 – Imagem ampliada em lupa eletrônica do rejeito de flotação
(Do autor, 2019).



Figura 4.8 – Imagem ampliada em lupa eletrônica do rejeito ultrafino
(Do autor, 2019).

4.4 ENSAIO DE PALHETA (*VANE TEST*)

O ensaio de palheta é um dos métodos mais utilizados na determinação da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), devido à rapidez de execução e simplicidade operacional. Podendo ser utilizado em diversos tipos de amostras, tais como: argilas, siltes, areias e rejeitos (objeto de pesquisa).

Inicialmente, ressalta-se que foi necessário realizar alguns ensaios de palheta, visando definir qual seria a palheta mais indicada e que melhor representaria os ensaios aplicados aos rejeitos de mineração de ferro em estudo. Na Tabela 4.7 são mostradas as diferentes alternativas de palhetas disponíveis para realização dos ensaios. Contudo, a palheta que melhor representou os experimentos realizados foi a palheta 1, de razão 1:1.

Tabela 4.7 – Dimensões de palhetas para *Vane Test*

Dimensões da Palheta	Palheta 1	Palheta 2	Palheta 3	Palheta 4
Diâmetro (D) mm	25,3	12,6	12,6	12,6
Altura (H) mm	25,3	25,3	18,8	12,6
Constante (mm ³)	33917,21	7356,70	5735,73	4189,58

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados do percentual de água em cada fase executada nos ensaios de rejeito de flotação, calculadas com base no peso seco inicial da amostra, sem adição de água.

Tabela 4.8– Umidade de moldagem para ensaios de palheta (Do autor, 2019).

Ensaio (nº)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
Umidade de moldagem (%)	17,3	20,0	21,0	22,1	23,0	24,1	25,1	26,0	26,9	28,1	29,0	30,2	31,5

A Figura 4.9 apresenta as curvas de resultados dos ensaios de palheta para rejeito de flotação, considerando a resistência não drenada *versus* a rotação da palheta. Os valores previstos foram alcançados.

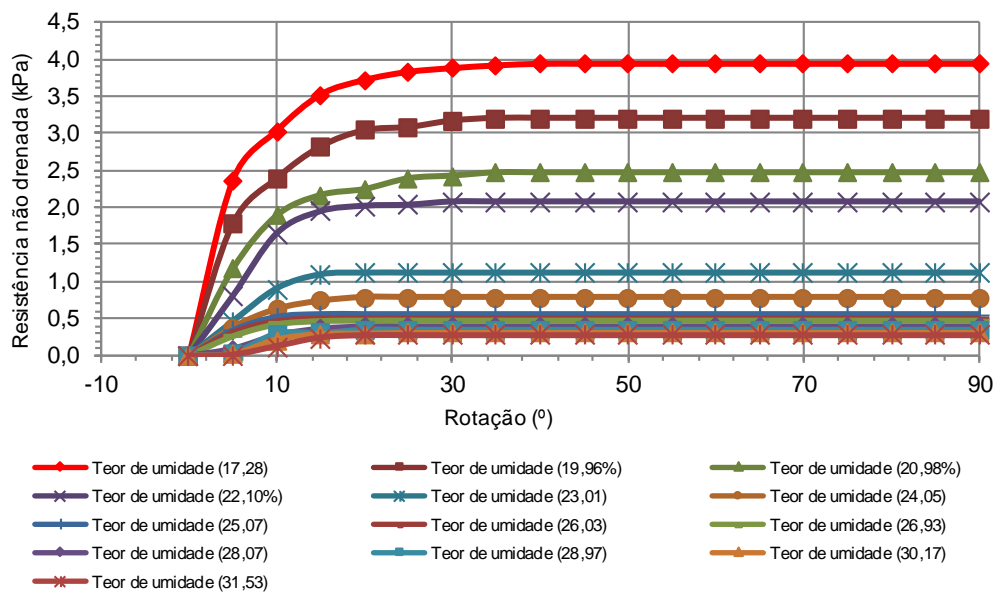


Figura 4.9 – Curvas de resistência não drenada *versus* rotação para o rejeito de flotação (Do autor, 2019).

Após a obtenção dos resultados, com base na análise da resistência não drenada, foram realizados os cálculos de tensão de escoamento, conforme demonstrado na Figura 4.10.

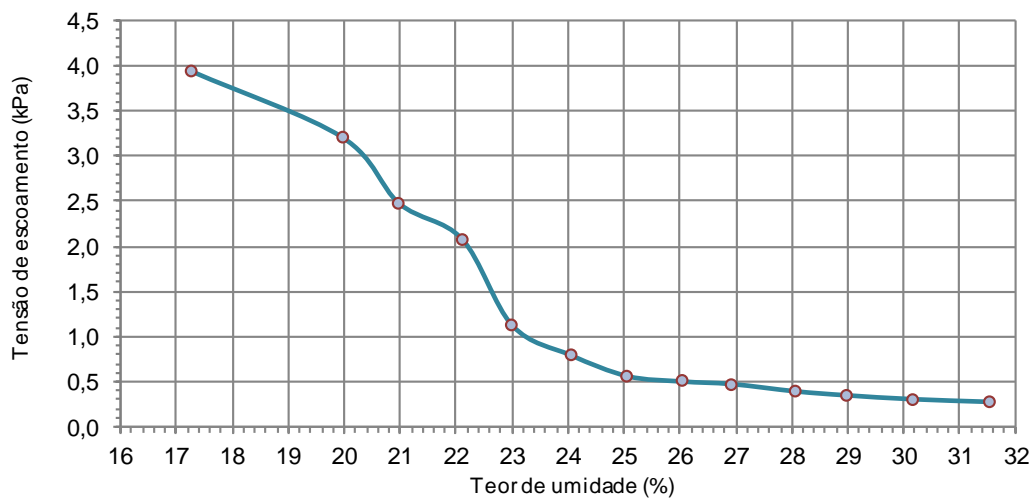


Figura 4.10 – Curva tensão de escoamento *versus* teor de umidade para as amostras de rejeito de flotação (Do autor, 2019).

Observa-se, na Figura 4.10, que a tensão de escoamento está relacionada ao percentual de água adicionado. À medida que o teor de umidade é acrescido, há uma redução na

curva de escoamento. Nota-se também que, a partir de certa consistência (relativo ao teor de umidade de 25%), o valor da tensão de escoamento aproxima-se da linearidade, demonstrando comportamento relacionado à capacidade do material fluir espontaneamente, comumente observado em fluidos não newtonianos.

O valor da tensão de escoamento encontrado para o teor de umidade de 17,28% foi de 3,93 kPa e, para um teor final de umidade de 31,53% foi de 0,28 kPa. Avaliando-se apenas esses dois pontos no gráfico, não é possível verificar o comportamento não linear da tensão de escoamento encontrado para 17% e 25%, indicando que os resultados não são proporcionais. Deste modo, os resultados comprovam a necessidade de realização do ensaio de palheta em diversos teores de umidade, devido ao comportamento não linear da curva.

A Figura 4.11 apresenta as curvas de resistência não drenada *versus* rotação, obtidas nos ensaios de palheta para o rejeito ultrafino.

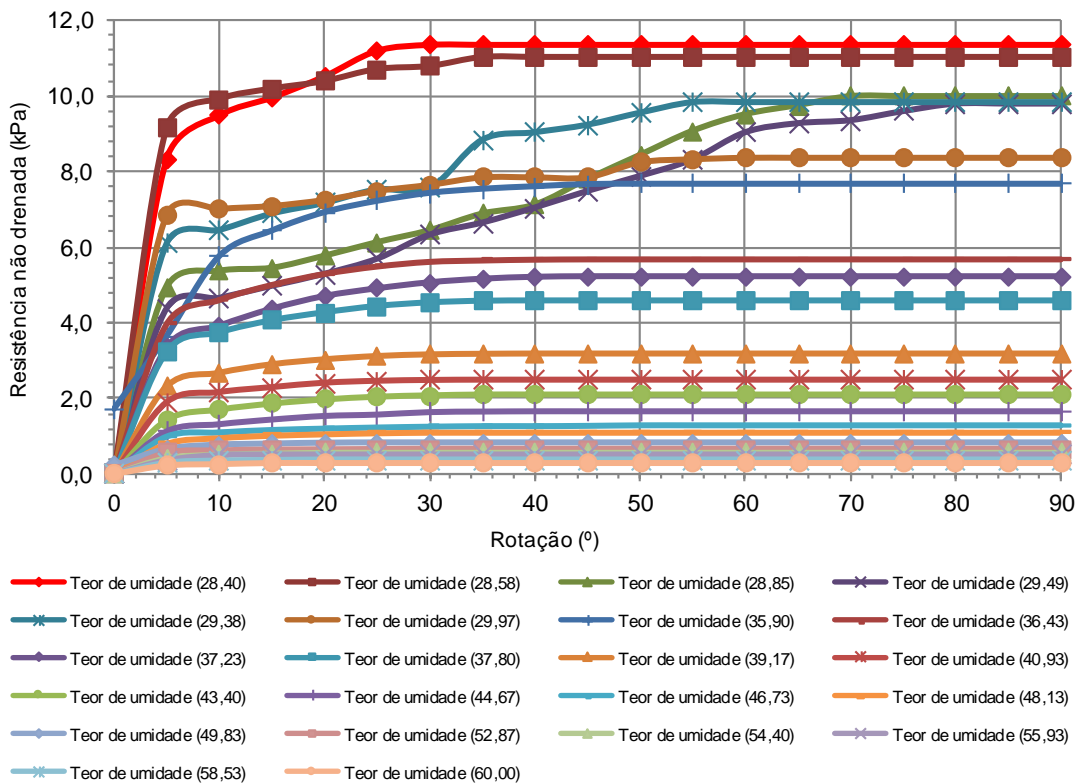


Figura 4.11 – Curvas de resistência não drenada *versus* rotação para o rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

Neste estudo experimental, foi possível confirmar a relação entre granulometria e tensão de escoamento. Anteriormente ao estudo, acreditava-se que, quanto menor fosse o diâmetro das partículas do rejeito, menor seria a tensão de escoamento necessária para fazê-lo fluir. Entretanto, foi observado, a partir das análises dos resultados obtidos que, quanto menor o diâmetro das partículas encontradas nos rejeitos, maior será a umidade necessária para fazer com que o rejeito comece a fluir. No caso do gráfico apresentado na Figura 4.12, por exemplo, verifica-se que, para o rejeito alcançar uma tensão de escoamento de 1,0 kPa, foi necessário que este estivesse na condição de 48,5% de teor de umidade. Contudo, no rejeito de flotação, observou-se que, para os mesmos valores de tensão de escoamento, o rejeito apresentou um teor de umidade 23,2%.

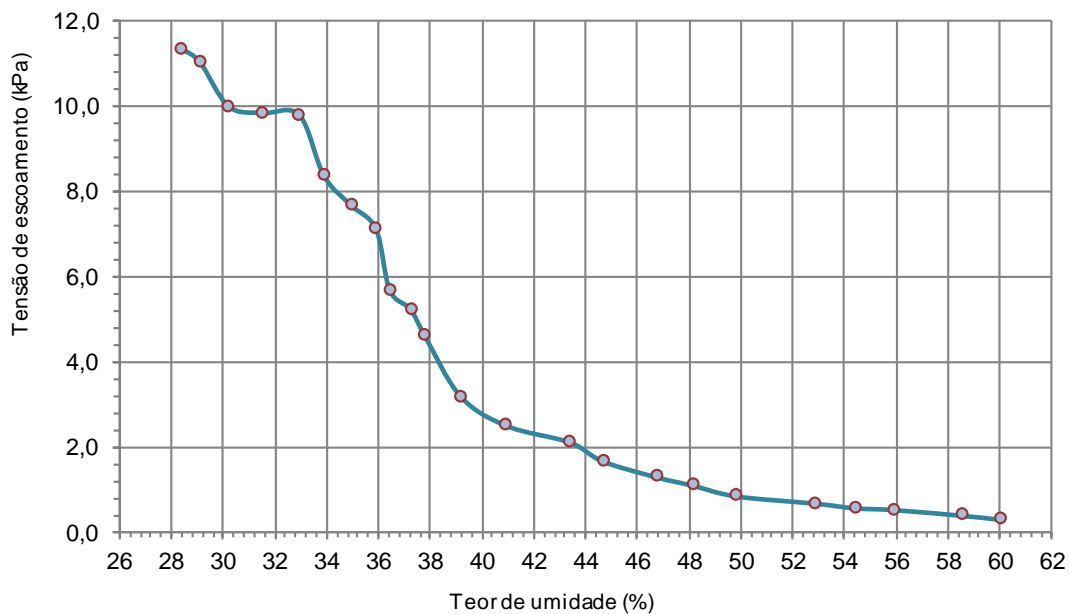


Figura 4.12 – Curva tensão de escoamento *versus* teor de umidade para as amostras de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

Fez-se necessário estudar as tensões de escoamento dos rejeitos dosados no laboratório, para representar, de maneira adequada, o futuro das deslamagem nas usinas de mineração. Entretanto, foi observado que estes valores não se diferem uns dos outros, podendo ser notado quase uma sobreposição das curvas. A Figura 4.13 mostra a curva de resistência não drenada *versus* rotação da palheta para a mistura 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino, em que a resistência não drenada permanece constante a partir de

22,07% de teor de umidade, afetando diretamente a tensão de escoamento do rejeito, conforme demonstrado na Figura 4.14.

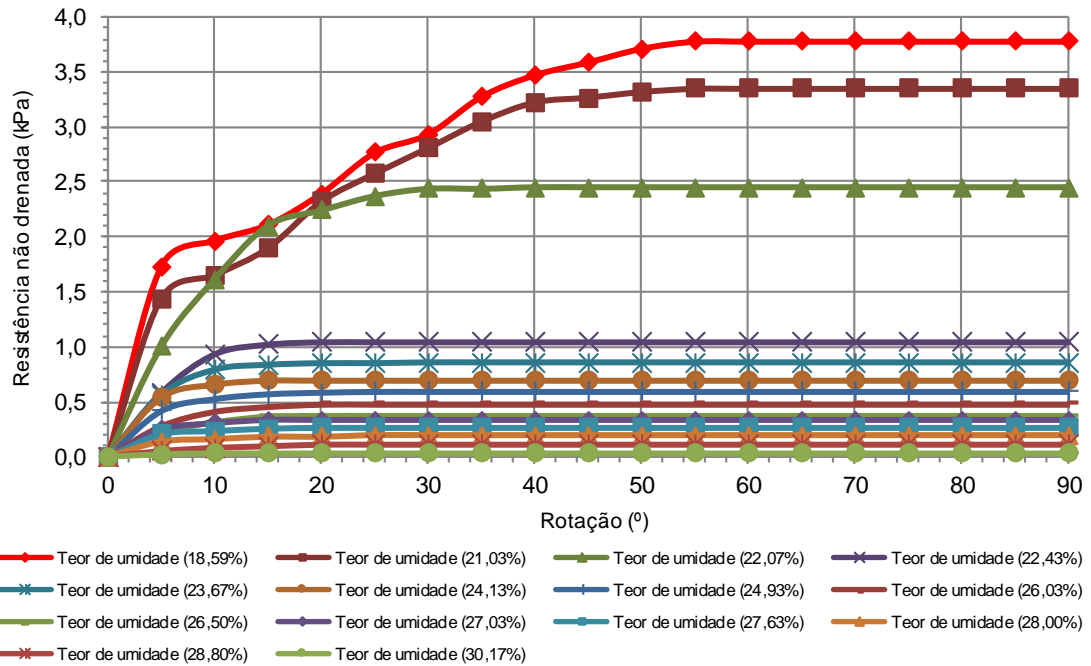


Figura 4.13 – Curvas de resistência não drenada *versus* rotação para a mistura, em peso, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

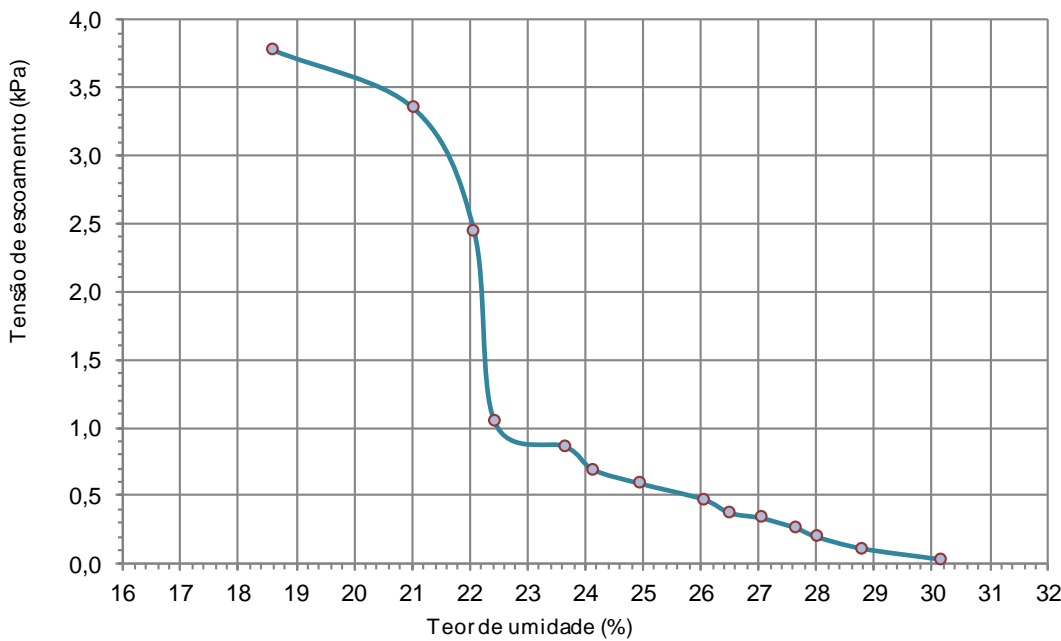


Figura 4.14 – Curva tensão de escoamento *versus* teor de umidade para a mistura, em peso, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino.

As Figuras 4.15 a 4.18 apresentam os resultados obtidos para as demais misturas compostas nesta dissertação, ou seja, as misturas compostas nas proporções 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino e 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino.

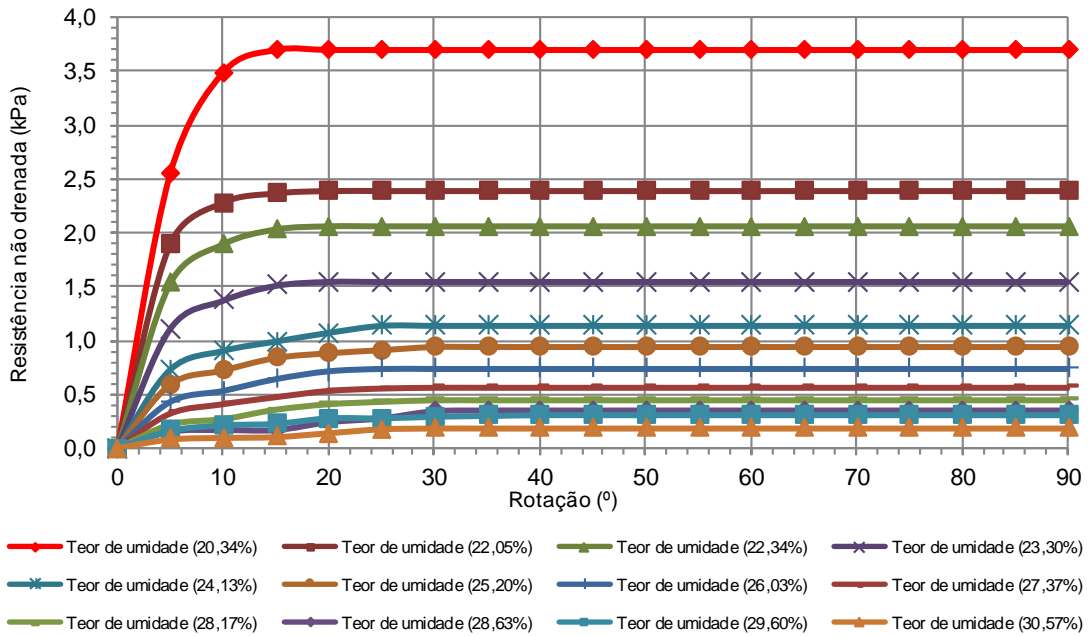


Figura 4.15 – Curvas de resistência não drenada *versus* rotação para a mistura, em peso, de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino.

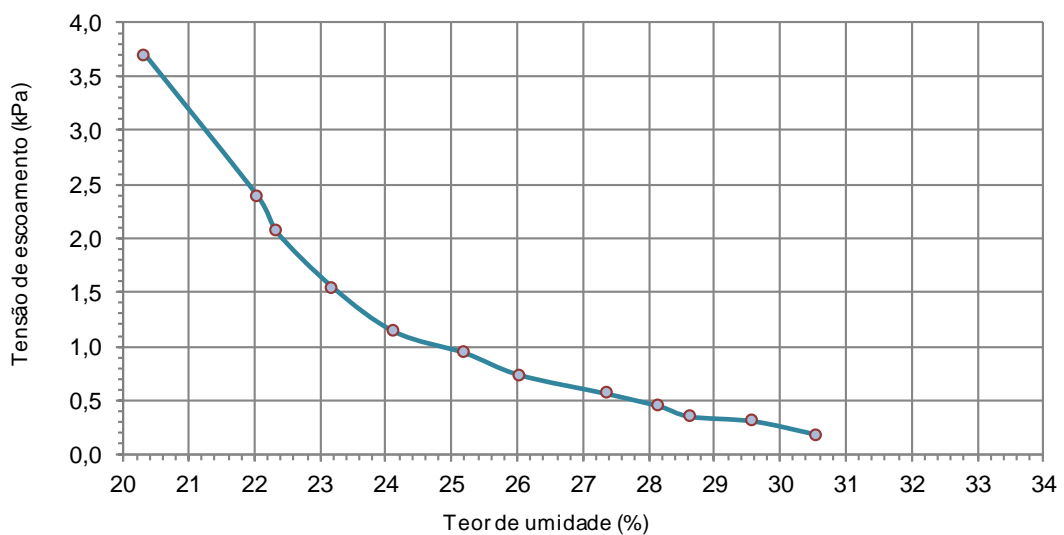


Figura 4.16 – Curva tensão de escoamento *versus* teor de umidade para a mistura, em peso, de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

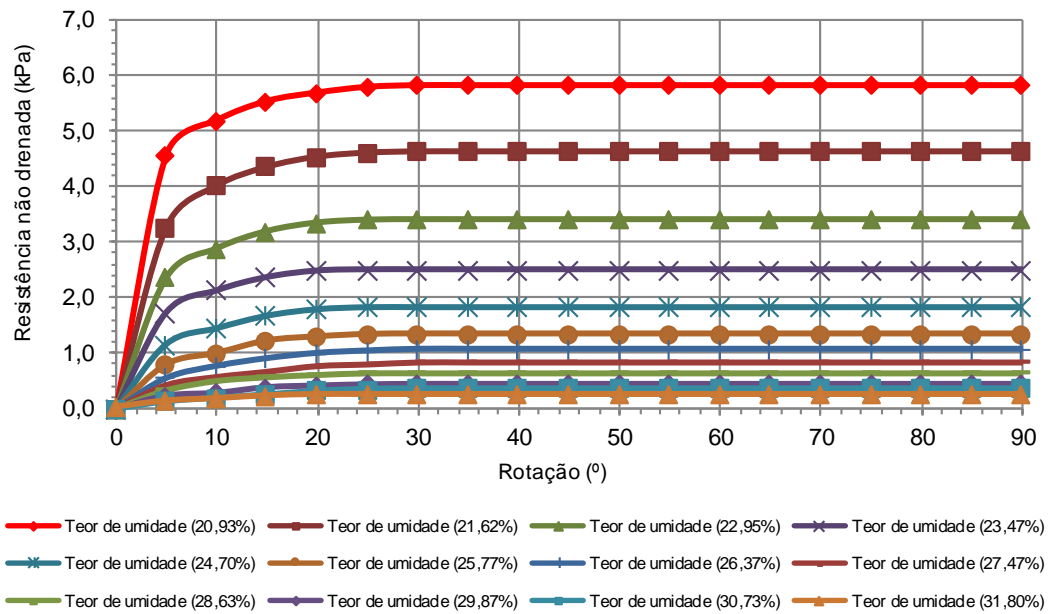


Figura 4.17 – Curvas de resistência não drenada *versus* rotação para a mistura, em peso, de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

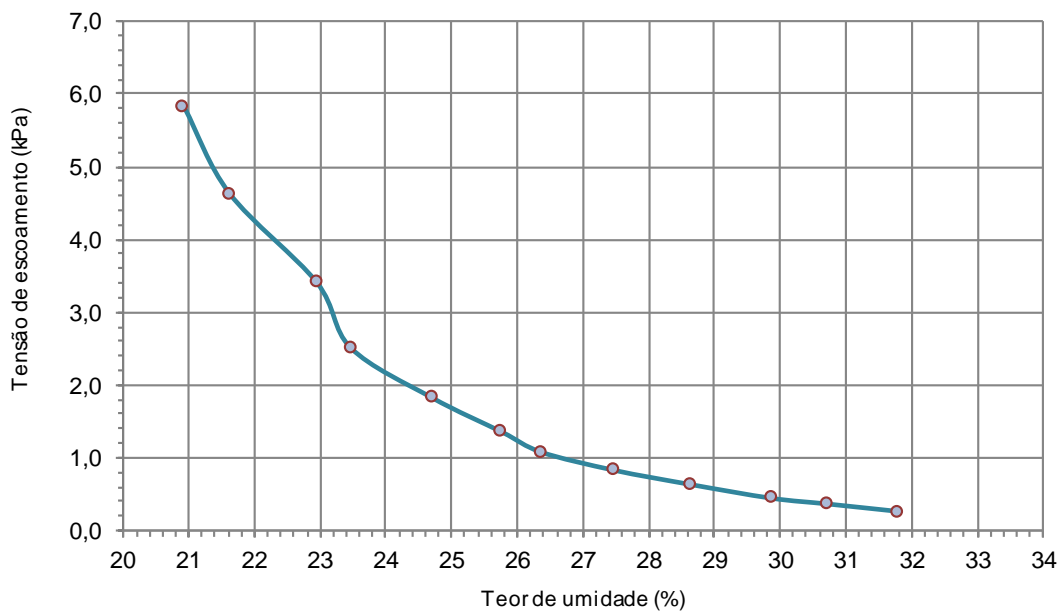


Figura 4.18 – Curva tensão de escoamento *versus* teor de umidade para a mistura, em peso, de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino (Do autor, 2019).

Os teores de umidade foram adicionados, de acordo com o comportamento inicial de fluidez observado em cada mistura estudada, obtendo-se uma consistência similar nos rejeitos estudados separadamente e nos rejeitos acrescidos de partículas ultrafinas.

A partir das análises realizadas, considerando as misturas de rejeitos dosados no laboratório, foi possível observar que a relação entre a umidade da amostra e a sua tensão de escoamento está proporcionalmente interligada à quantidade de rejeito ultrafino misturada, ou seja, é necessário aumentar, consideravelmente, o teor de umidade presente na mistura quanto maior for a proporção de rejeito ultrafino presente nessa amostra. Esta relação pode ser observada comparando-se os valores da Figura 4.14, em que foi necessário o rejeito abranger um teor de umidade de 22,07% para obter uma tensão de escoamento de 1,0 kPa, com a Figura 4.18, em que a mistura da amostra apresenta maior quantidade de rejeito ultrafino e, para atingir o mesmo valor de tensão de escoamento próximo a 1,0 kPa, foi necessário um teor de 26,58% de umidade.

Portanto, a partir das análises realizadas, pode-se concluir que, para valores próximos de tensão de escoamento nas misturas com maior percentual de rejeito ultrafino, é necessário aumentar o teor de umidade. Este comportamento da mistura indica características de material com menor consistência e menor capacidade de escoamento a baixas umidades.

Ao modificar o teor de umidade alteram-se também as características de plasticidade do material, resultando em maior ou menor resistência ao cisalhamento. Essas análises foram realizadas através dos resultados de tensão de escoamento obtidos pelo método de *Vane Test*.

Cabe ressaltar, no entanto, que este método é capaz de fornecer dados para a determinação da tensão de escoamento do material, permitindo caracterizá-lo quanto à viscosidade. Contudo, os valores obtidos no ensaio de palheta podem sofrer variações, de acordo com as características de produção e reagentes utilizados nas plantas de deslamagem.

4.5 ENSAIO DE ABATIMENTO

Os resultados apresentados a seguir correspondem à determinação da tensão de escoamento utilizando-se ensaios de abatimento (*Slump Test*) realizadas nas diferentes amostras de rejeitos e misturas propostas, onde foram utilizadas água destilada e água de processo para alterar os teores de umidade das amostras. Foram adotadas quatro

metodologias diferentes para o cálculo da tensão de escoamento, como citado anteriormente.

As metodologias foram nomeadas de C-1 (Pashias *et al.*, 1996), C-2 (Castro, 2007), C-3 (Ferraris e De Larrard, 1998) e C-4 (Pereira *et al.*, 2018). As metodologias consideradas foram as mais indicadas na literatura estudada para testes em rejeito ou concreto. Os resultados dos ensaios de palheta, apresentados no item anterior, foram utilizados como referência para comparação com os resultados obtidos nos ensaios de abatimento.

4.5.1 Resultados dos ensaios de abatimento com água destilada

As curvas de tensão de escoamento em função do teor de umidade são apresentados nas Figura 4.19 a 4.33. Os resultados são referentes aos ensaios de abatimento (*Slump Test*) realizados nos rejeitos ultrafinos, rejeitos de flotação e rejeitos compostos em laboratório (misturas). As Figuras destacam as diferentes metodologias já citadas e do tipo de molde adotado.

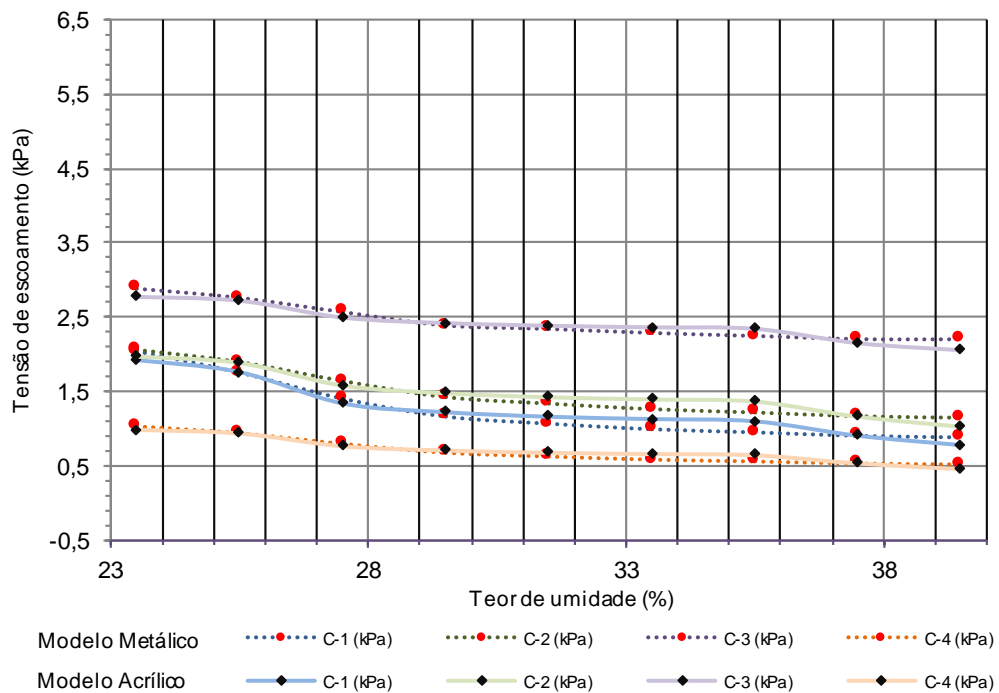


Figura 4.19 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).

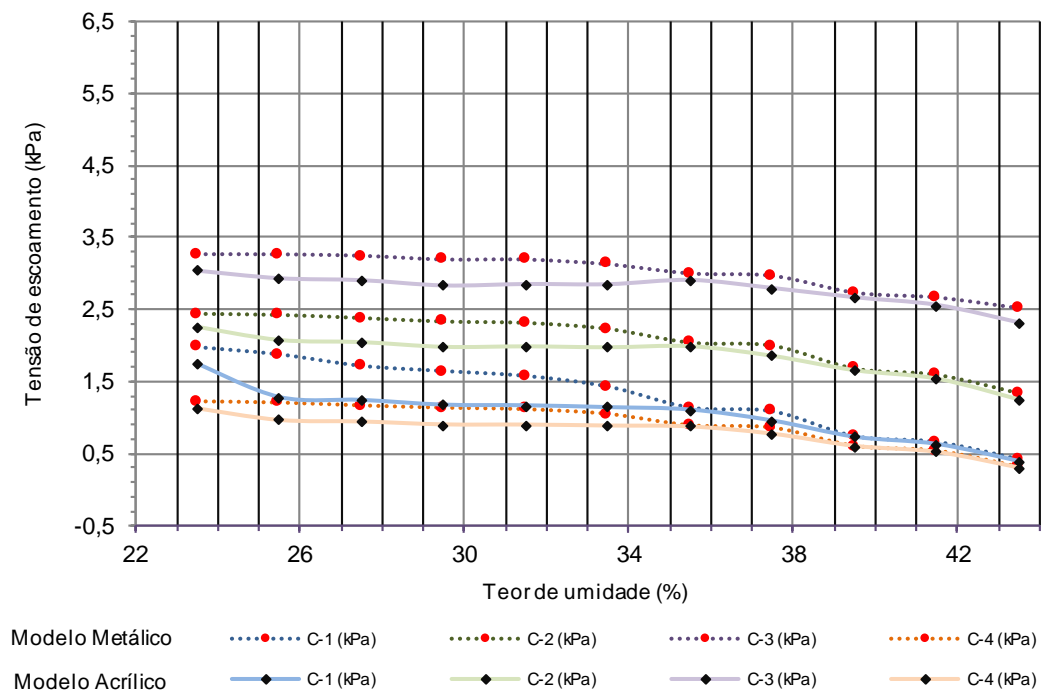


Figura 4.20 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).

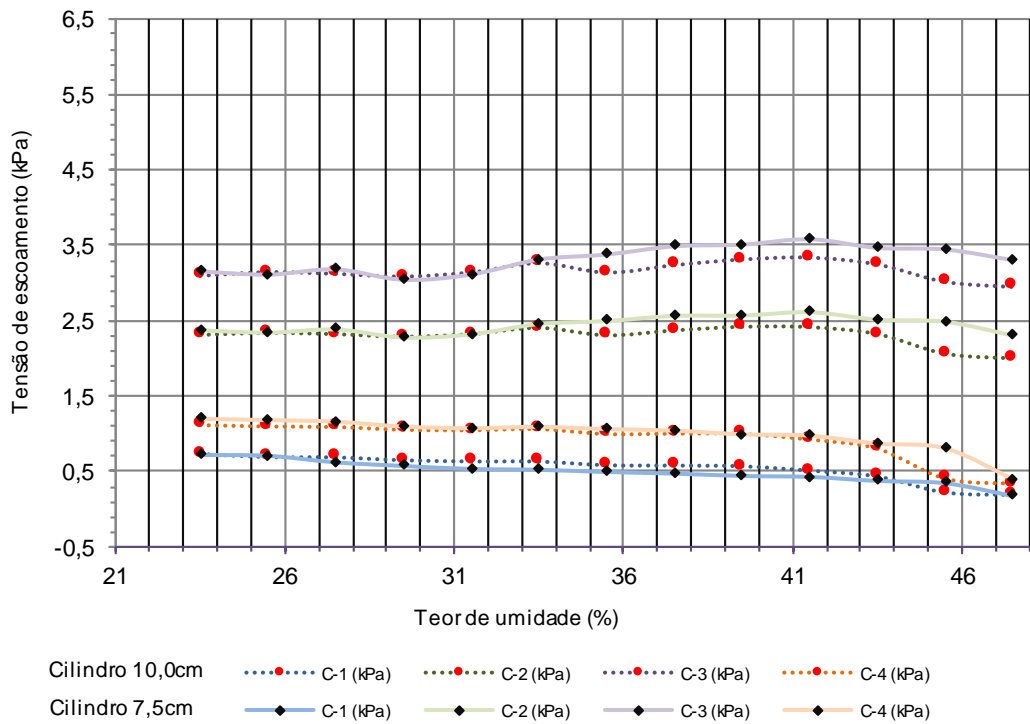


Figura 4.21 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos de flotação – Moldes cilíndricos com duas dimensões diferentes (Do autor, 2019).

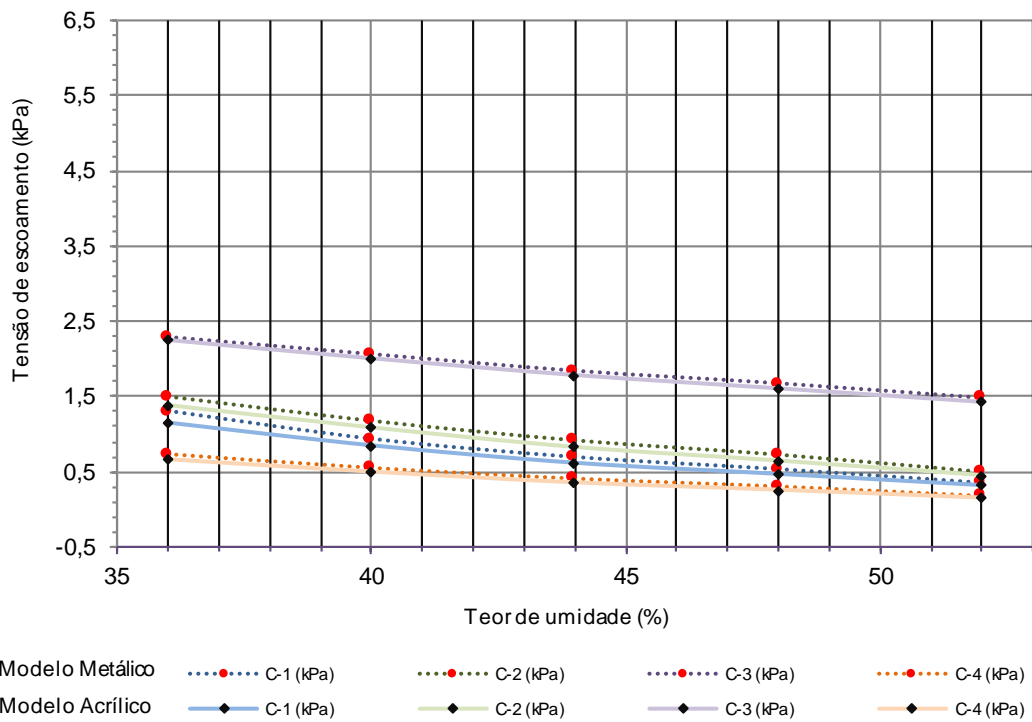


Figura 4.22 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos de ultrafino – Moldes do tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).

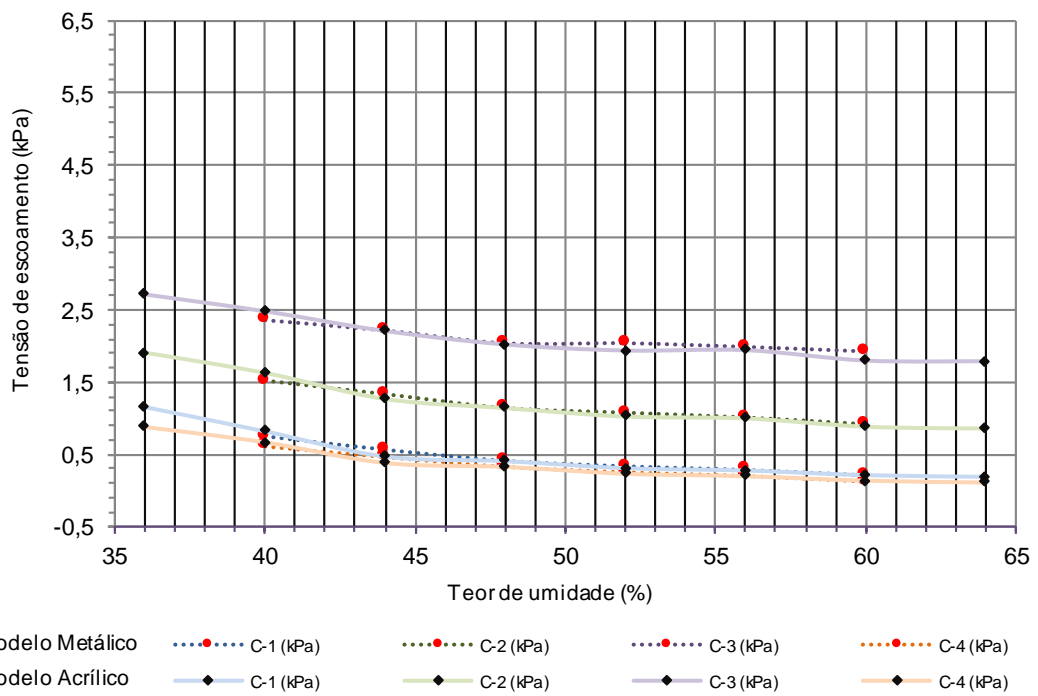


Figura 4.23 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos de ultrafino – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).

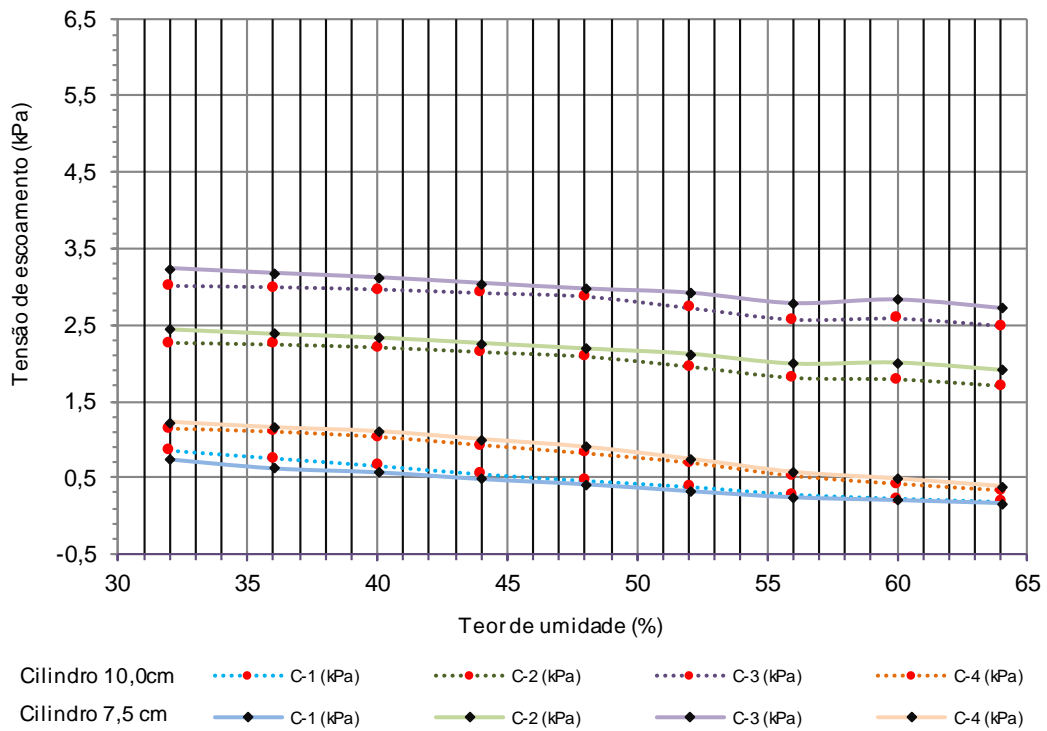


Figura 4.24 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos ultrafinos – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

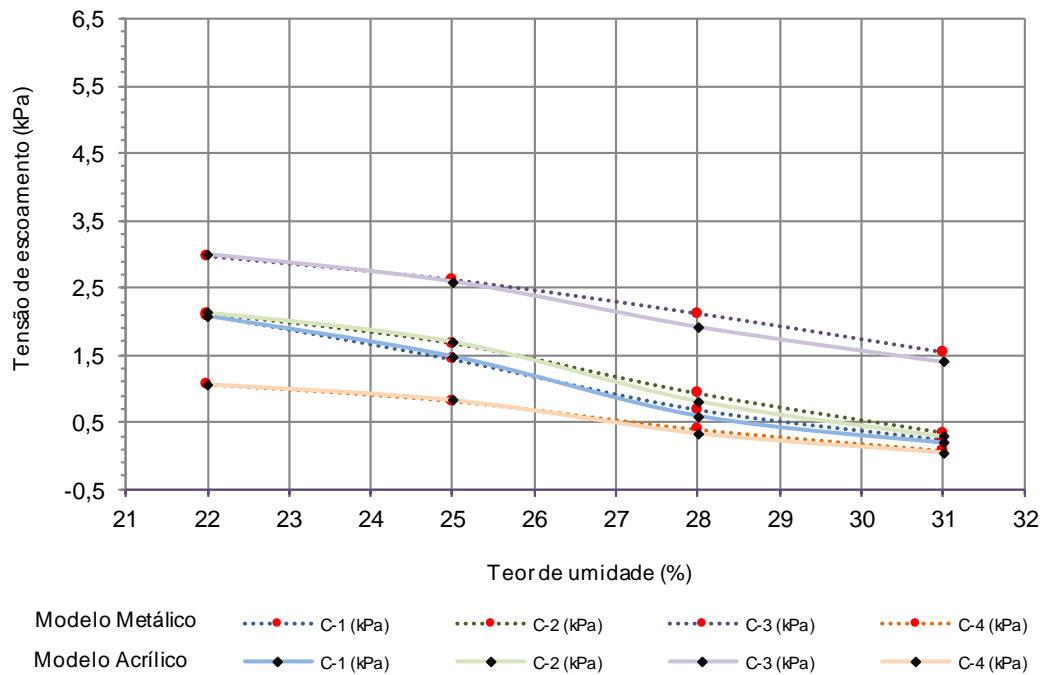


Figura 4.25 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).

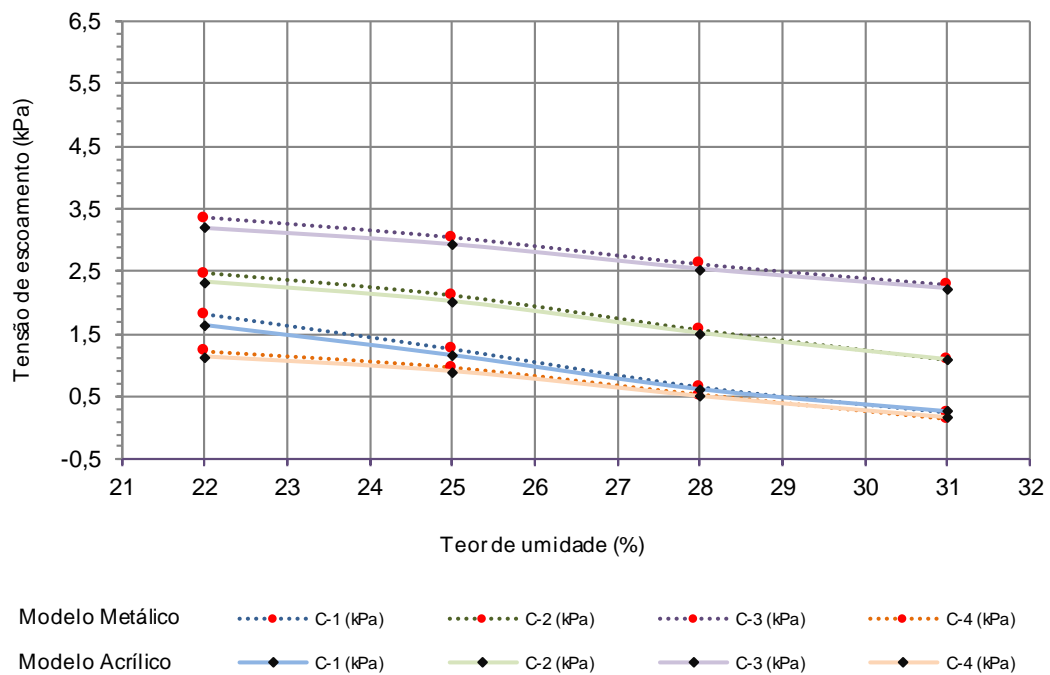


Figura 4.26 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).

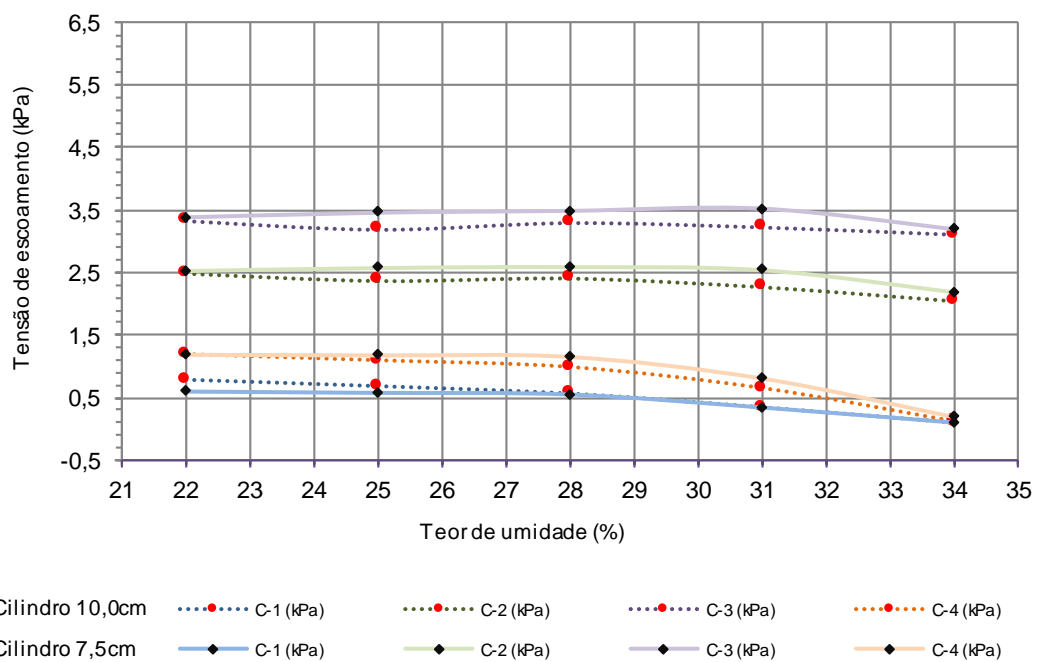


Figura 4.27 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

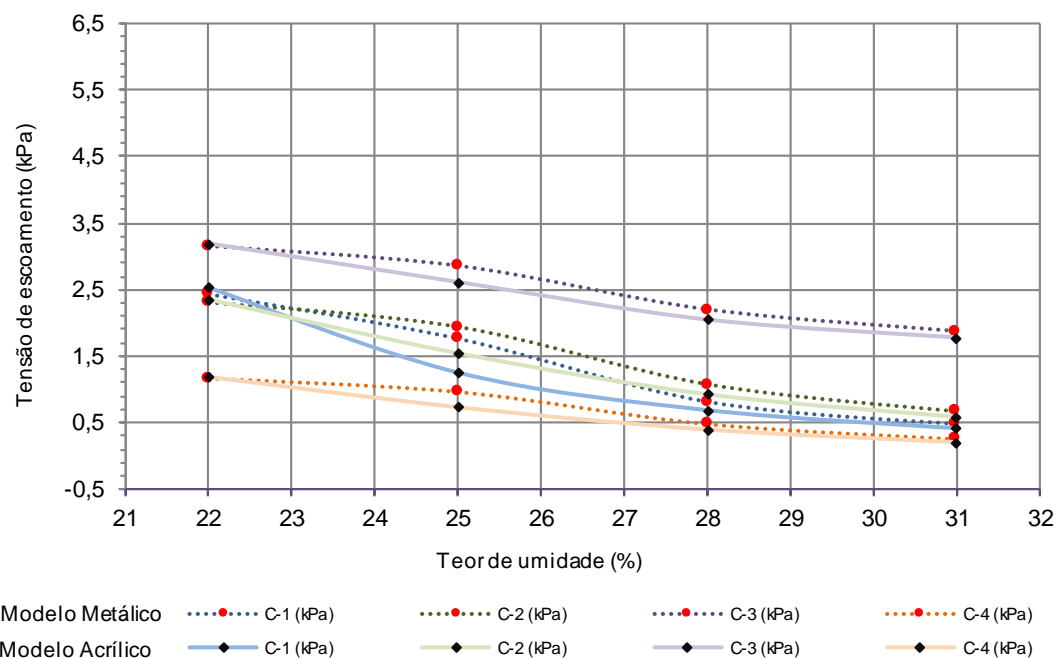


Figura 4.28 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).

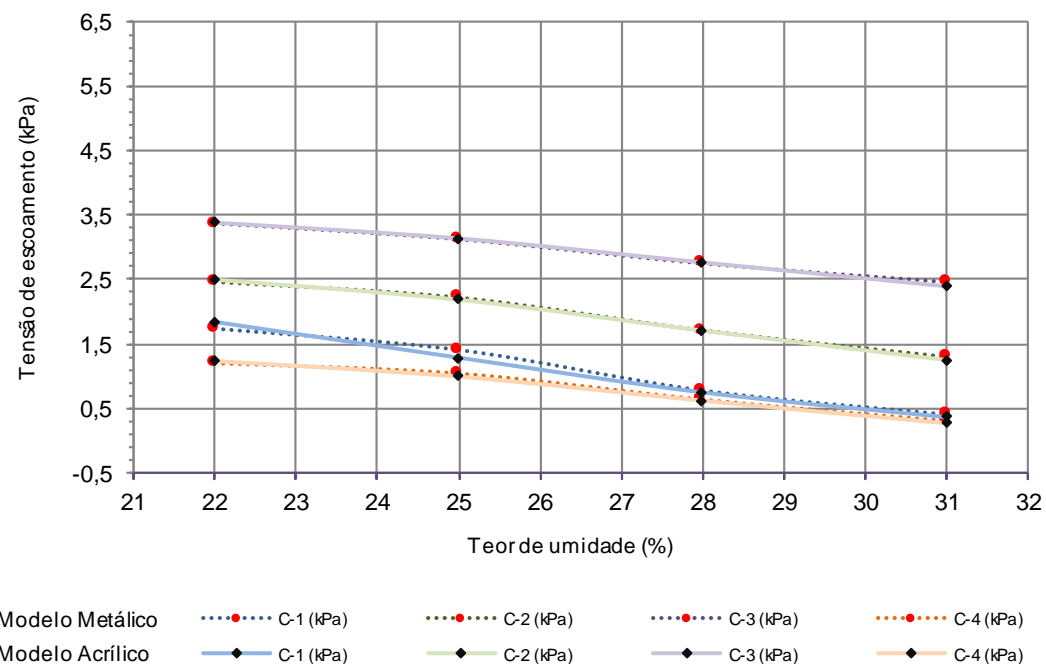


Figura 4.29 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).

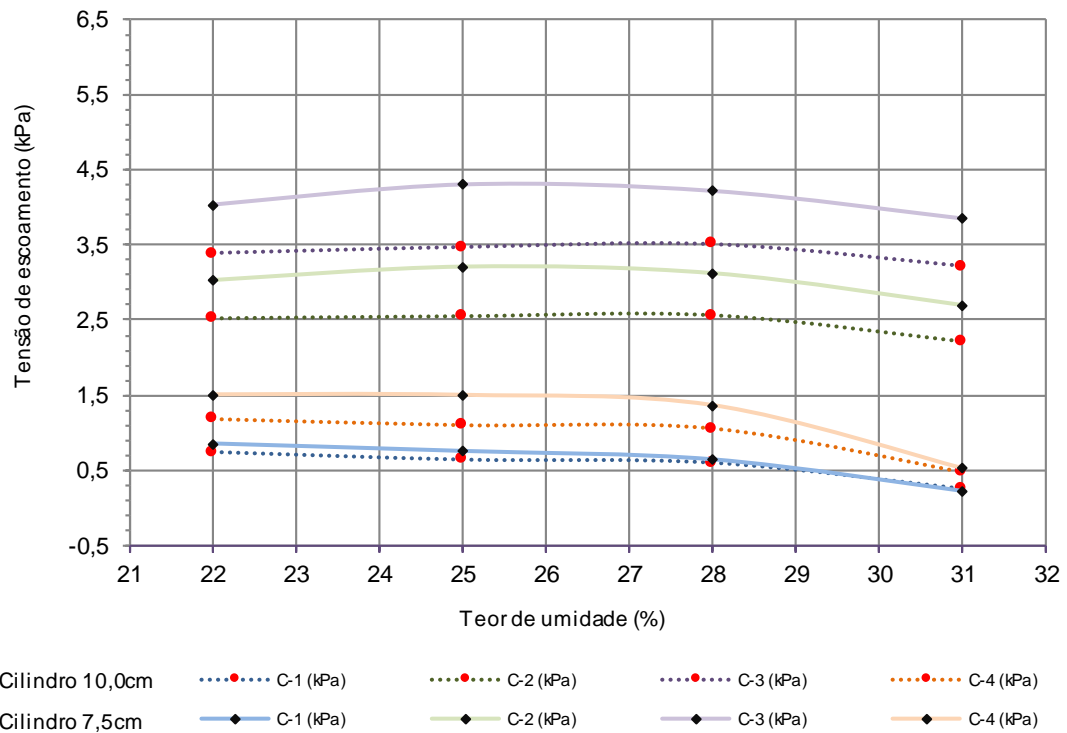


Figura 4.30 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

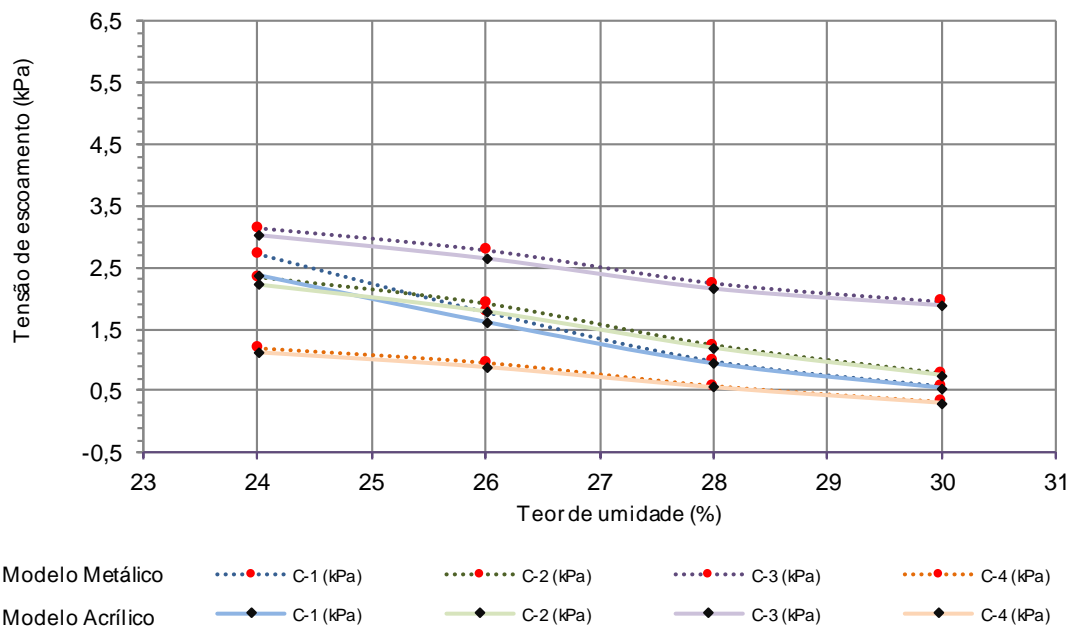


Figura 4.31 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).

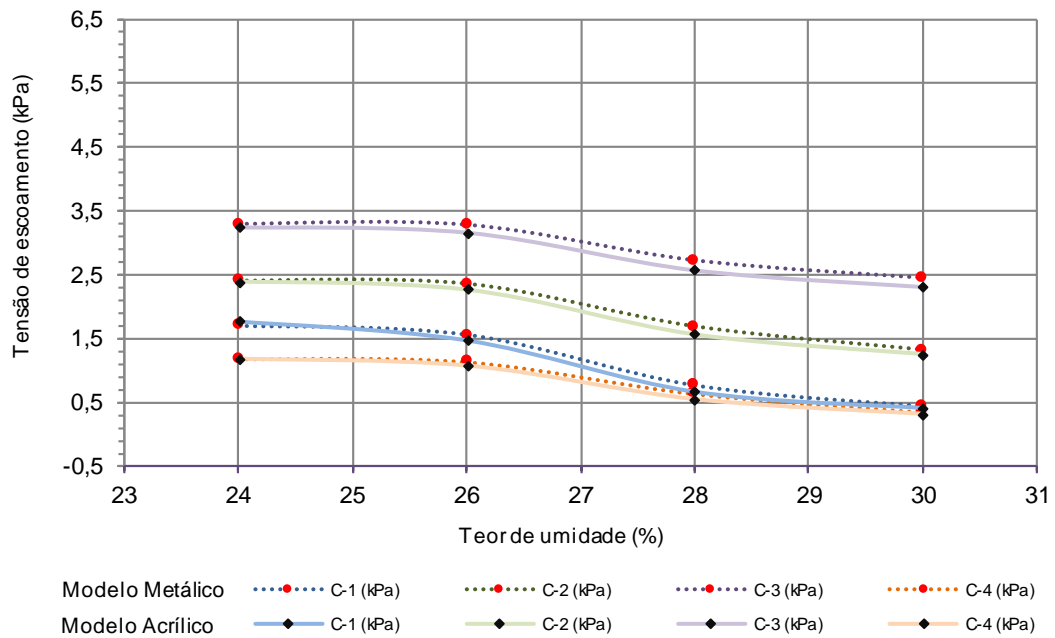


Figura 4.32 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura.

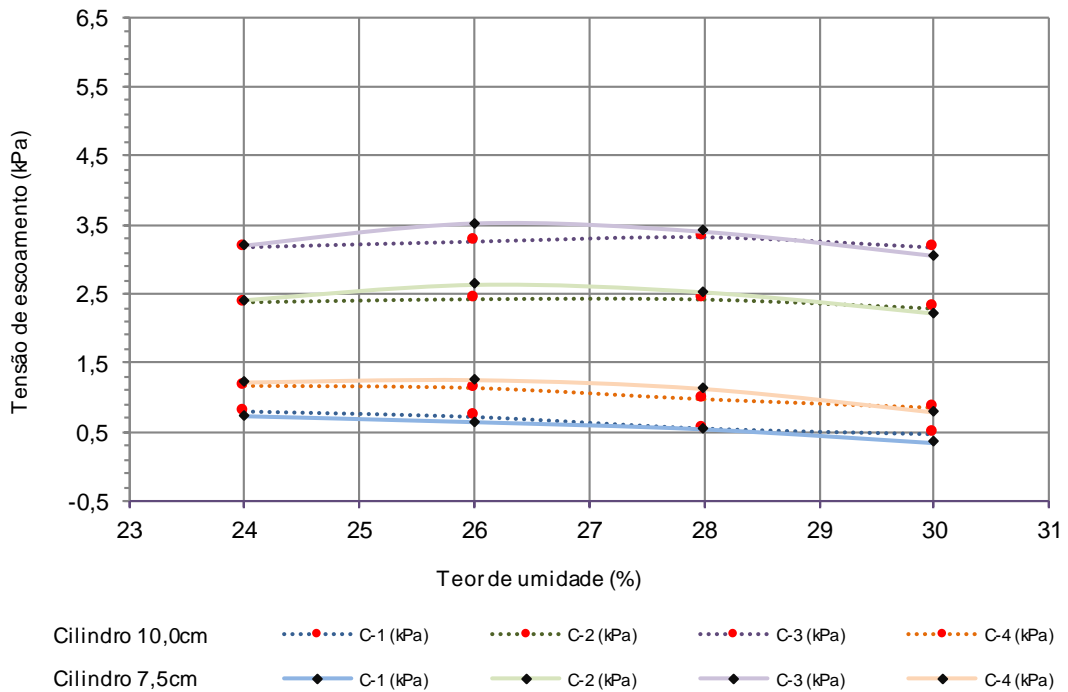


Figura 4.33 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura composta de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde cilíndrico (Do autor, 2019).

Comparando os resultados obtidos inicialmente, considerando o molde tipo tronco de cone com 30 cm de altura, percebe-se pouca influência nos resultados quando se observa do tipo de material usado na fabricação. Para o rejeito de flotação estudado e para a dimensão do tronco de cone mostrada na Figura 4.19, praticamente há uma coincidência nas curvas dos modelos metálico e acrílico.

Por outro lado, quando se realiza essa comparação para o tronco de cone menor (23,5 cm de altura), o mesmo não pode ser afirmado, sendo que os resultados obtidos com o modelo acrílico seguiram uma tendência de apresentação de valores menores quando comparados ao modelo metálico (Figura 4.20). No entanto, há uma convergência de valores, considerando a mesma metodologia, para as maiores umidades.

Outra observação é que nos dois gráficos, há uma variação dos valores de tensão obtidos, considerando as diferentes metodologias. Para os dois moldes (30 e 23,5 cm de altura), as metodologias apresentaram valores crescentes, na seguinte ordem: C-4, C-1, C-2 e C-3. Ou seja, para uma mesma umidade, o menor valor de tensão foi observado para a metodologia C-4 e o maior estava associado à metodologia C-3.

As mesmas observações foram percebidas nas Figuras 4.21 e 4.22, relacionadas ao rejeito ultrafino, considerando a apresentação de valores crescentes, na ordem: C-4, C-1, C-2 e C-3. No entanto, percebeu-se uma coincidência dos valores obtidos para o molde tipo tronco metálico e acrílico com 30 cm de altura, bem como para o molde de 23,5 de altura. Em relação ao molde cilíndrico, as Figuras 4.21 e 4.24 mostram que há uma alteração do menor valor de tensão de escoamento observado, para uma mesma umidade. Nos dois rejeitos, a metodologia C-1 foi a que apresentou menor valor. A metodologia C-4 ainda manteve-se como associada aos maiores valores. Para os rejeitos de flotação, houve pouquíssima variação dos valores de tensão de escoamento, mesmo quando foi aumentado o teor de umidade, para uma mesma metodologia.

Para as misturas (Figuras 4.25 a 4.26), observou-se a mesma tendência observada para os rejeitos sendo estudados de forma separada, tanto para os moldes tipo tronco de cone, bem como para os moldes cilíndricos.

A Figura 4.34 apresenta os valores de tensão de escoamento em função do teor de umidade das amostras de rejeito de flotação, obtidos pelo teste de abatimento utilizando modelos tipo tronco de cone, fabricados em material metálico e acrílico. Os valores iniciais de tensão de escoamento foram obtidos a partir das primeiras amostras que apresentaram deformação nos ensaios. Deste modo, observa-se que valores de tensão de escoamento referentes a umidades inferiores a 23,2% não puderam ser determinados, devido à limitação do teste de abatimento em materiais de baixa umidade. Entretanto, o teste de abatimento mostrou ser capaz de abranger valores maiores de umidade (entre 30% a 40%), em comparação ao ensaio de palheta.

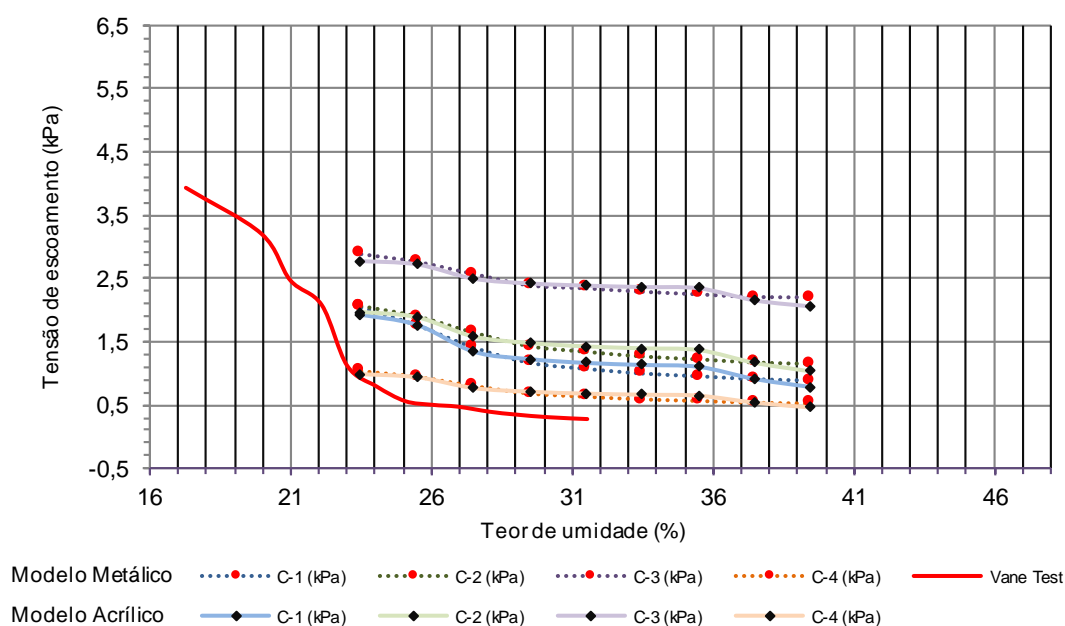


Figura 4.34 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).

As metodologias de cálculo mostraram resultados diferentes de tensão de escoamento utilizando-se os mesmos parâmetros de abatimento medidos nos testes de abatimento, conforme já apresentado nas figuras anteriores. Em síntese, os resultados dos ensaios utilizando-se moldes de diferentes materiais não apresentaram grandes alterações. Quando percebidas, não foram significativas.

A Figura 4.35 apresenta os resultados obtidos para amostradores reduzidos do tipo metálico e acrílico (altura 21,5 cm), sendo essa redução uma modificação inserida no ensaio de abatimento convencional. Os resultados para estes moldes de menor altura permitiram analisar a evolução dos valores de tensão de escoamento em teores de umidade acima dos realizados pelo modelo convencional, conforme já destacado e, agora, analisados conjuntamente com os resultados obtidos no ensaio de palheta. As tensões de escoamento obtidas para as amostras de rejeito de flotação mostraram diferenças entre os resultados dos testes de abatimento e os valores obtidos através dos ensaios de palheta, este último apresentando um resultado mais conservador, também percebido nos resultados do molde maior (30 cm).

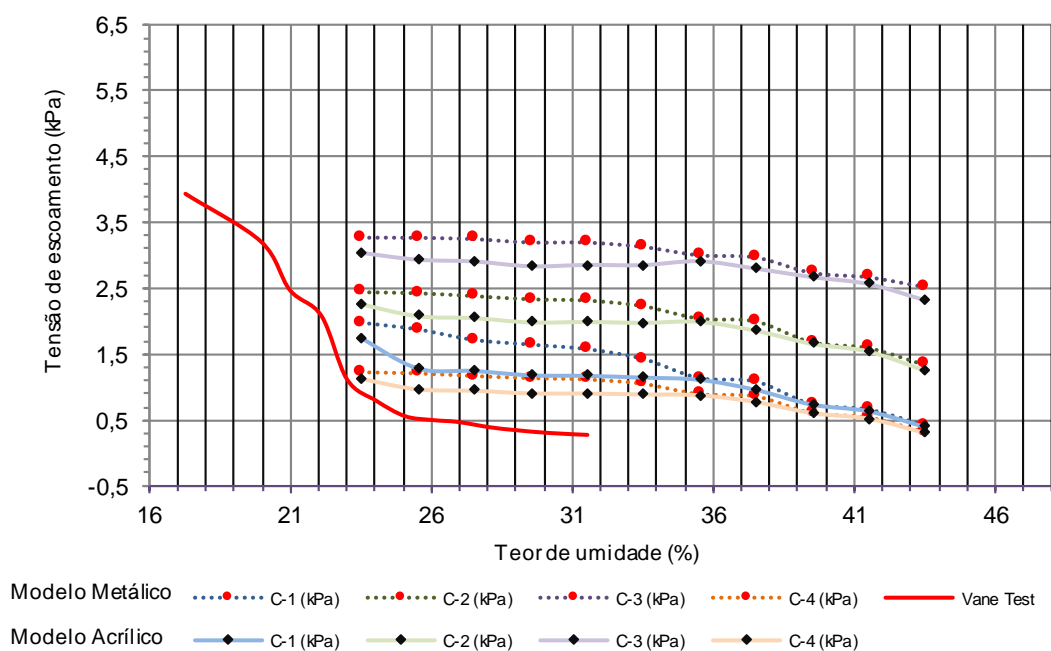


Figura 4.35 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Molde tipo tronco de cone com 23,5cm de altura (Do autor, 2019).

A Figura 4.36 ilustra os resultados tensão de escoamento determinados a partir dos ensaios de abatimento utilizando-se moldes cilíndricos com razão de 1:1 em duas dimensões (7,5 e 10 cm de altura e diâmetro), comparando-os aos resultados obtidos no ensaio de palheta. Conforme já destacado, os modelos obtiveram parâmetros similares. Historicamente, pesquisadores utilizam estes tipos de amostradores para realizar suas

determinações, o modelo apresentado inicialmente por (Pashias *et al.*, 1996) foi adotado por grande parte dos pesquisadores. Machado (2017) fez uso deste modelo para caracterizar rejeitos coletados após a ruptura da Barragem de Fundão e obteve excelentes resultados quanto ao método estudado. Deste modo, os resultados apresentados indicam que moldes de diferentes dimensões podem ser utilizados, desde que seja considerada a razão entre suas dimensões em 1:1. Comparado os resultados dos ensaios de abatimento realizados no cilindro, apresentados na faixa de umidade coincidente com os resultados dos ensaios de palheta, percebe-se que estes, mais uma vez, apresentaram valores menores, aproximando-se mais daqueles obtidos por meio da metodologia C-1 (Pashias *et al.*, 1996).

Com base na observação das de tensão de escoamento para o rejeito de flotação pode-se afirmar que, apesar dos resultados não terem comportamento similar aos obtidos nos ensaios de palheta, atendem de maneira satisfatória à regressão linear dos dados.

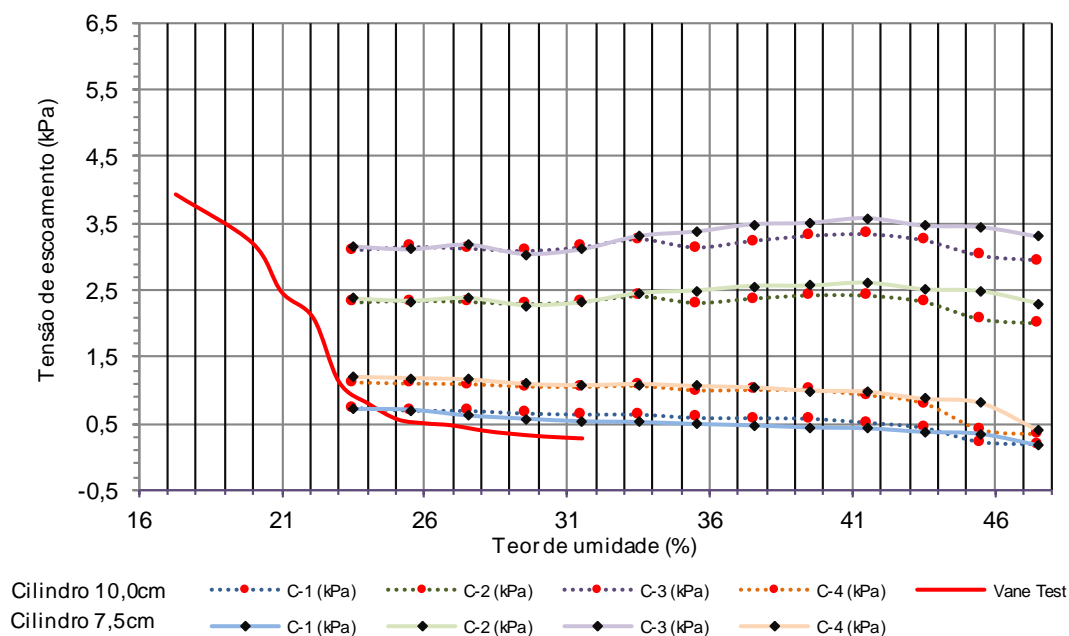


Figura 4.36 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos de flotação – Moldes cilíndricos com duas dimensões diferentes (Do autor, 2019).

As curvas de tensão de escoamento *versus* umidade dos rejeitos ultrafinos, obtidas pelos testes de abatimento, são mostradas na Figura 4.37, comparadas aos resultados dos

ensaios de palheta. Os ensaios apresentaram comportamento semelhante ao do rejeito de flotação. A análise dos gráficos foi feita traçando-se curvas de regressão para cada curva de tensão de escoamento. Na comparação com os resultados dos ensaios de palheta, observou-se uma tendência de aproximação da média dos resultados dos ensaios de abatimento, a partir do teor de umidade de 45%.

No ajuste dos pontos relacionados aos ensaios de abatimento, as equações correspondentes às funções das curvas foram polinomiais de segundo grau, cujo menor valor de coeficiente de correlação (R^2) encontrado foi igual a 0,94. Este parâmetro é fundamental para classificação dos fluidos e modelagem dos dados de entrada para os diversos *softwares* utilizados na previsão dos fluxos de lama hidráulica (*Dambreak*).

Apesar das amostras de rejeito ultrafino e rejeito de flotação possuírem granulometrias distintas, o manuseio das amostras para moldagem é consideravelmente igual. O que as difere é a umidade de moldagem inicial, em que os rejeitos ultrafinos apresentam maior demanda no acréscimo de água comparados aos rejeitos de flotação. Percebeu-se, no entanto, uma melhor apresentação dos resultados dos ensaios de abatimento com o tronco de cone (altura de 30 cm), quando aplicados aos rejeitos ultrafinos.

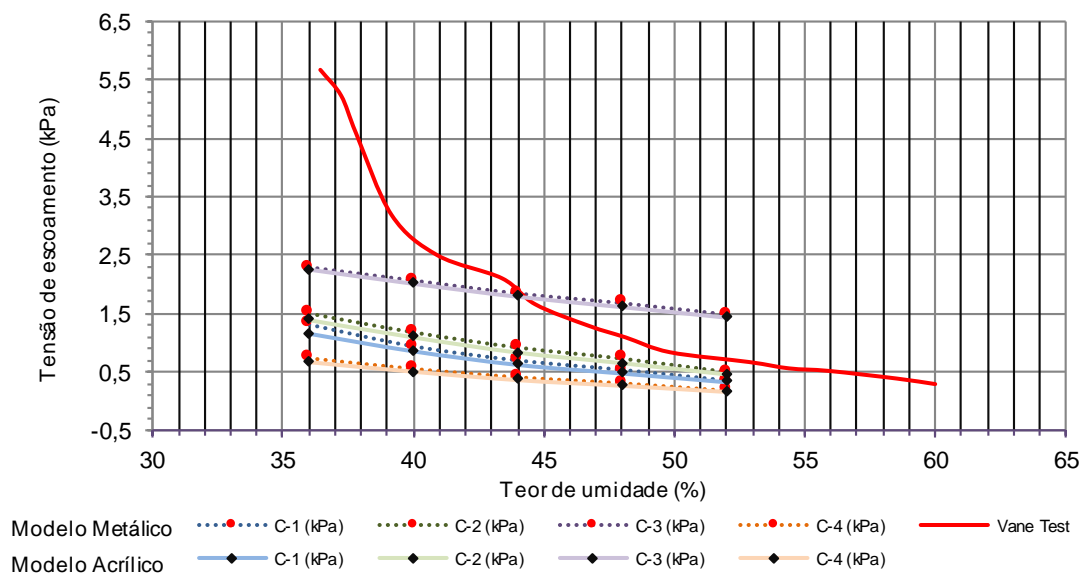


Figura 4.37 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Moldes do tipo tronco de cone com 30,0cm de altura (Do autor, 2019).

A Figura 4.38 mostra os resultados obtidos na realização do teste de abatimento, utilizando-se o molde do tipo tronco de cone reduzido com 23,5 cm de altura, fabricado em materiais metálicos e acrílicos. Os valores de tensão de escoamento calculados, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de abatimento, foram similares aos testes realizados com o molde do tipo tronco de cone de altura igual a 30 cm.

No entanto, pode observar-se que o molde com menores dimensões possibilitou realizar modelagem de amostras em teores de umidade mais elevados. Deste modo, a utilização do molde reduzido possibilitou conhecer valores de tensão de escoamento com umidades superiores a 55%, em relação ao molde convencional, e superiores a 60%, em relação ao ensaio de palheta.

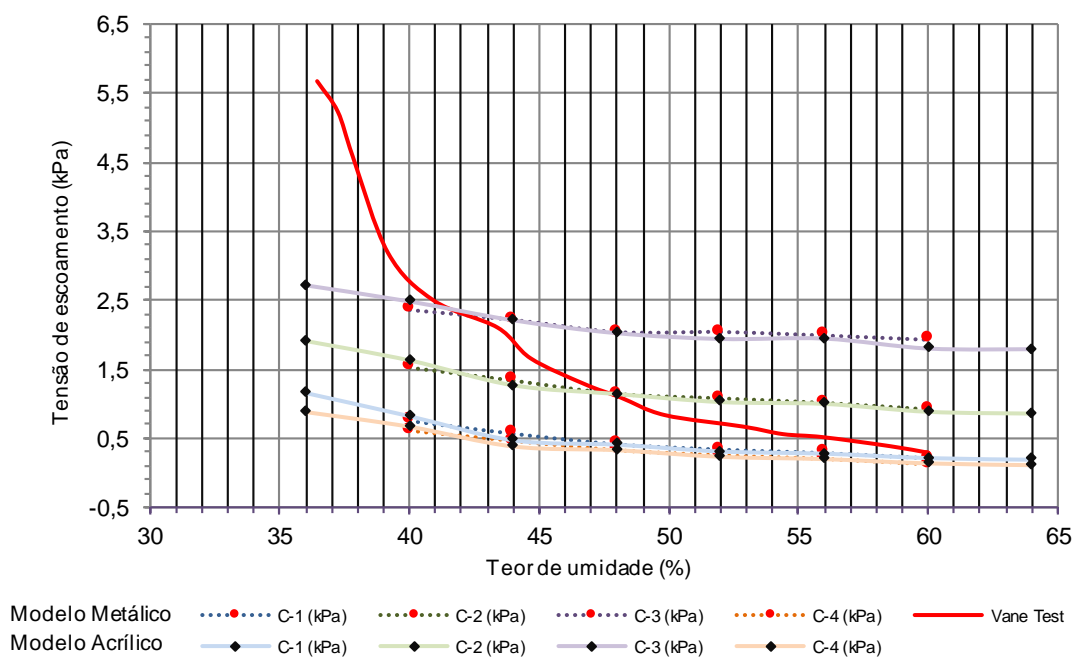


Figura 4.38 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).

Os ensaios desenvolvidos nos amostradores cilíndricos, fabricados em materiais diferentes e em duas dimensões distintas pelo método do abatimento, demonstraram comportamentos similares de tensão de escoamento. No entanto, conforme já destacado, os resultados obtidos a partir de diferentes metodologias de cálculo diferem

consideravelmente. A aproximação com os resultados dos ensaios de palheta ocorreu após a umidade de 45%.

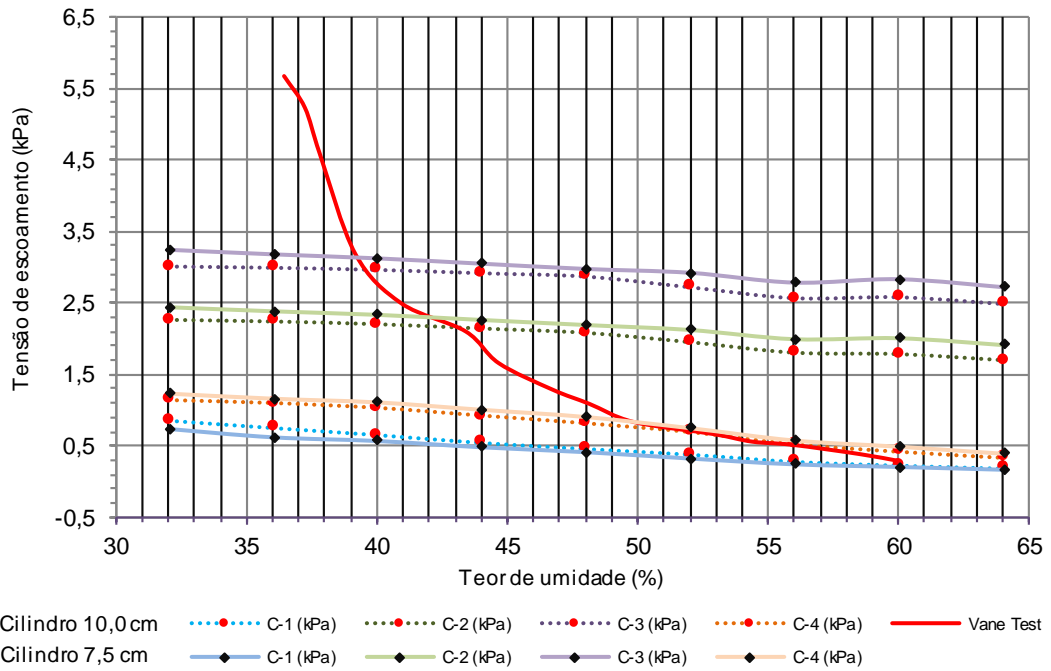


Figura 4.39 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta para os rejeitos ultrafinos – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

Nos resultados apresentados a seguir, as misturas de rejeitos de flotação + rejeitos ultrafinos, apresentaram resultados mais consistentes quando correlacionados com ensaios de palheta. Essa consideração é aplicada aos resultados obtidos para os rejeitos de flotação, bem como para os rejeitos ultrafinos.

A Figura 4.40 apresenta os valores de tensão de escoamento *versus* teor de umidade para a mistura de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino obtidos nos ensaios de abatimento, utilizando moldes fabricados em metal e acrílico, do tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura. Como podem ser observados, os valores de tensão de escoamento calculados pela metodologia descrita por C-4 (Pereira *et al.*, 2018) apresentou resultados próximos aos obtidos pelo ensaio de palheta, considerando uma faixa maior de umidade. Observou-se também que as metodologias propostas por Pashias *et al.* (1996) e Castro (2007) não ficaram muito distantes da curva associada ao ensaio de palheta.

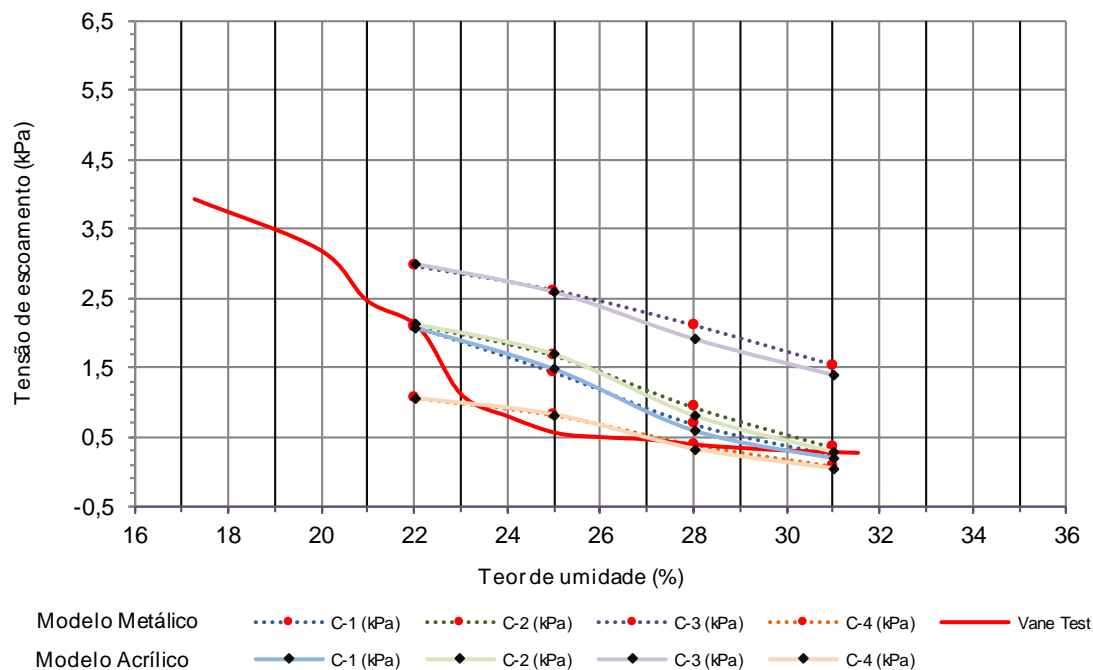


Figura 4.40 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).

A Figura 4.41, mostrada a seguir, apresenta os resultados obtidos utilizando o cilindro de abatimento reduzido associado à mistura que contém 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino. Pode ser observado, nesse gráfico, que os resultados obtidos para a mistura foram próximos aos apresentados na Figura 4.40, quando se comparam os resultados oriundos da metodologia C-4 (Pereira *et al.*, 2018) e C-1 (Pashias *et al.* 1996). No entanto, há um distanciamento maior da curva obtida com a metodologia C-2 (Castro, 2007).

Já na Figura 4.42, são apresentados os resultados de tensão de escoamento obtidos para mistura, em percentual de massa, de 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino, utilizando-se moldes cilíndricos em duas dimensões e dois tipos de material. Os resultados também apresentaram similaridades para os dois modelos de cilindros (de diferentes dimensões), realizados a partir das metodologias de cálculo definidas por C-4 (Pereira *et al.*, 2018) e C-1 (Pashias *et al.*, 1996).

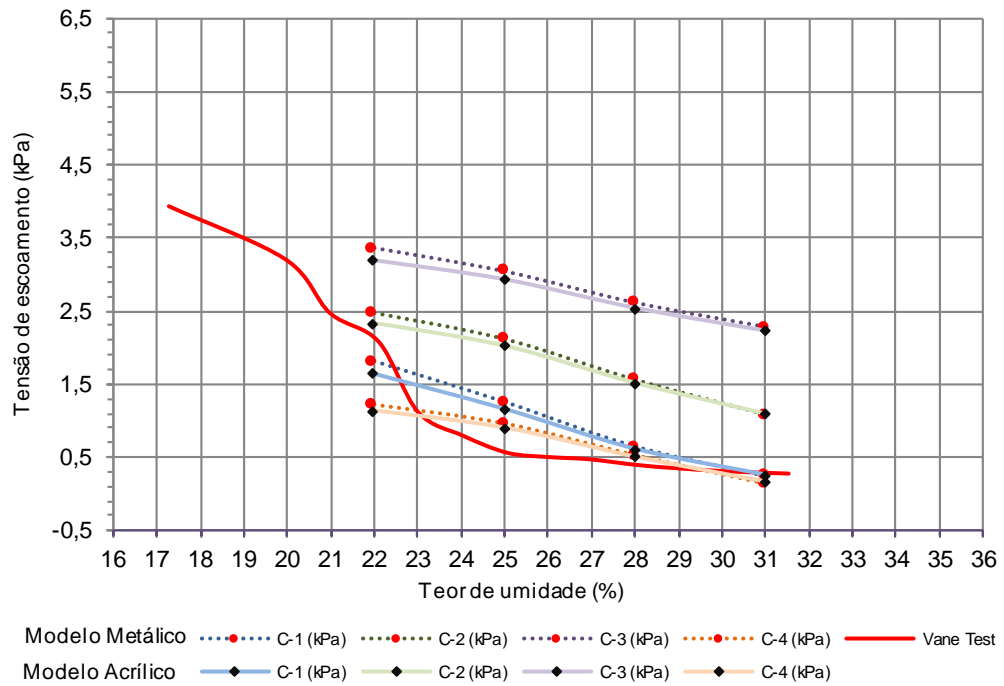


Figura 4.41 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).

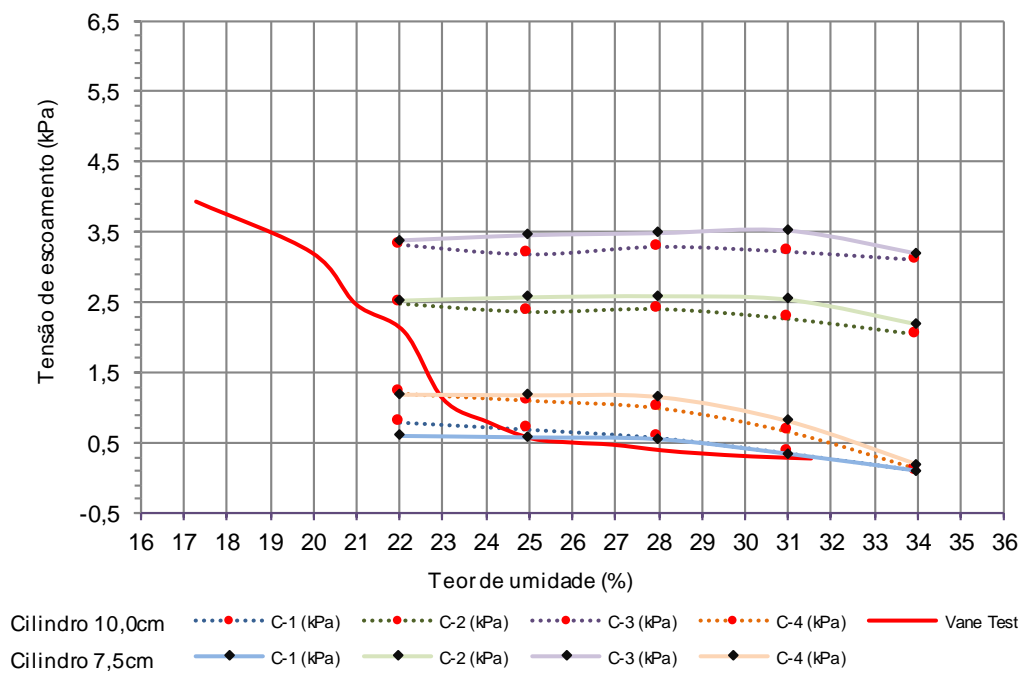


Figura 4.42 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 90% de rejeito de flotação + 10% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

A Figura 4.43 mostra os resultados de tensão de escoamento da mistura de 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino, obtidos a partir dos ensaios de abatimento, realizados em molde tipo tronco de cone de 30,0 cm de altura. Os resultados, especialmente ajustados pela metodologia C-1, proposta por Pashias *et al.*, (1996), apresentaram muita aproximação dos resultados obtidos por meio do ensaio de palheta. A Figura 4.44, mostra os resultados obtidos com tronco de cone de 23,5 cm de altura. Os resultados mostram comportamentos similares, para as metodologias de cálculo C-1 e C-4 definida por Pashias *et al.* (1996) e Pereira *et al.* (2018).

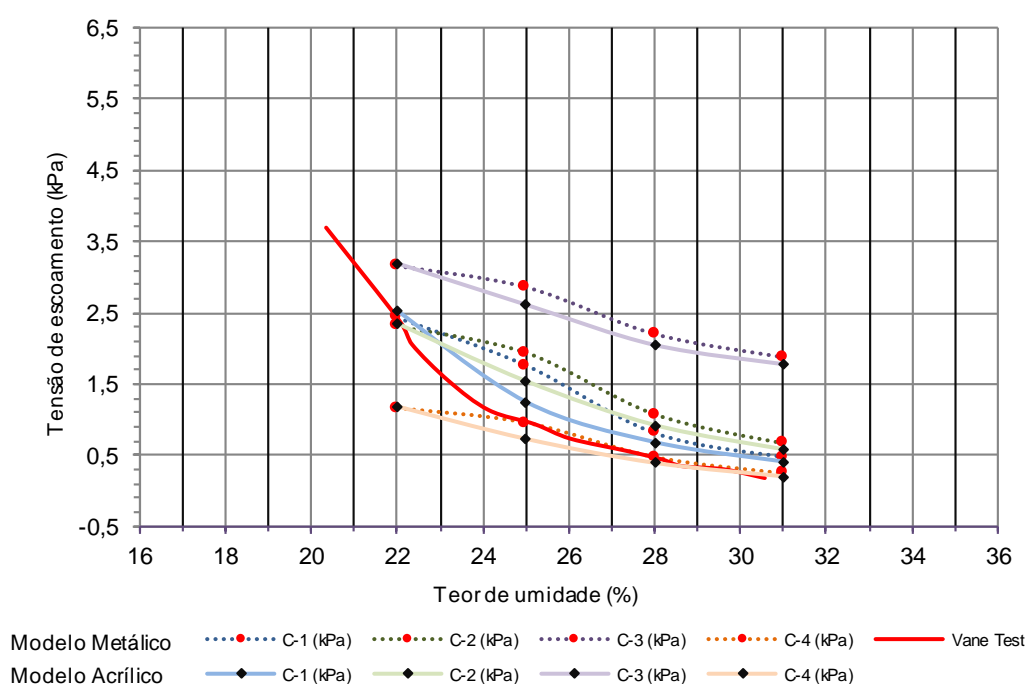


Figura 4.43 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).

Destaca-se que o método desenvolvido por Pashias *et al.*, (1996) até hoje vem sendo usado, de forma extensa, em ensaios de obra e ainda hoje apresenta alta confiabilidade para obtenção da tensão de escoamento em materiais de interesses atuais como os rejeitos de mineração com características de materiais ultrafinos. Com base nas informações disponíveis na Figura 4.44, nota-se que, com o aumento do teor de umidade das amostras, a mistura escoou com maior facilidade, ou seja, os valores de tensão de escoamento diminuem. Os resultados utilizando-se cilindros com duas dimensões para a mistura

composta por 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino são apresentados na Figura 4.45.

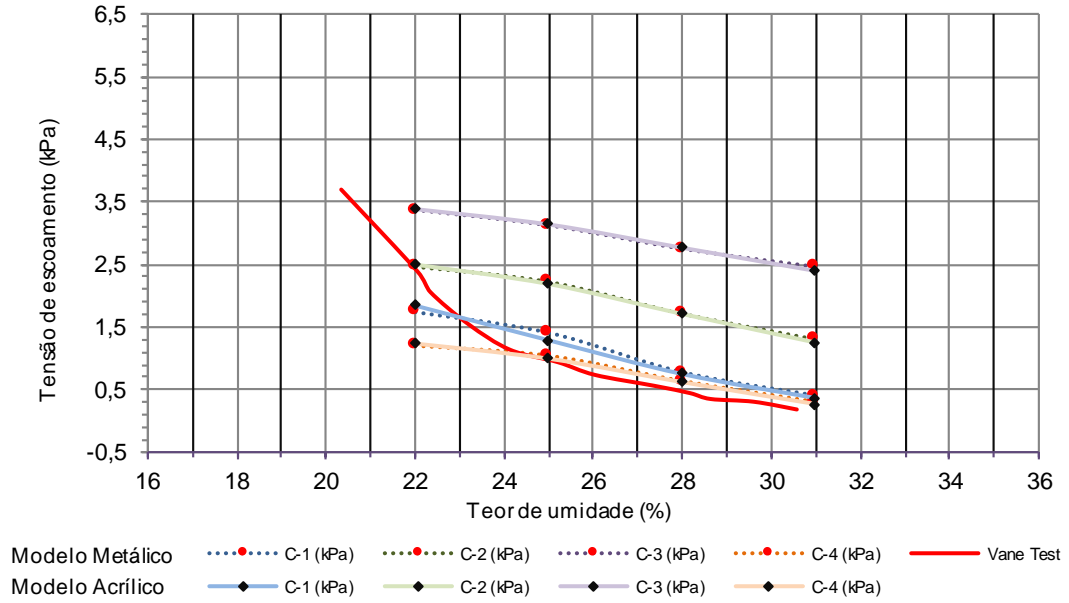


Figura 4.44 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).

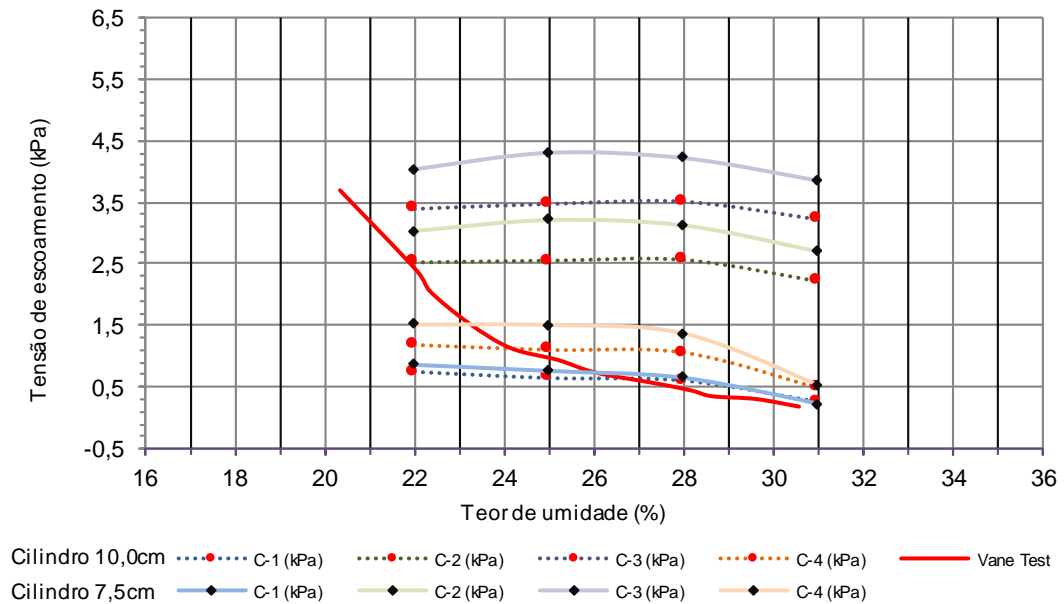


Figura 4.45 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 80% de rejeito de flotação + 20% de rejeito ultrafino – Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

Na Figura 4.45, os ensaios com moldes cilíndricos de dimensões diferentes (com alturas de 10,0 cm e 7,5 cm) apresentaram maior divergências em relação aos mesmos teores de umidade. Os resultados de tensão de escoamento mostram comportamentos similares, para as metodologias de cálculo C-1 e C-4 definida por Pashias *et al.* (1996) e Pereira *et al.* (2018). No entanto há um afastamento maior dos ajustes propostos pelas metodologias C-2 (Castro, 2007) e C-3 (Ferraris e De Larrard, 1998).

As Figura 4.46, 4.47 e 4.48 mostram os resultados dos ensaios realizados com o molde tipo tronco de cone de 30,0 cm de altura, com o molde amostradores de tronco de cone reduzido (23,5cm de altura) e com os cilindros, respectivamente. As metodologias de cálculo C-1 e C-4 foram as que mais se aproximaram aos valores de tensão de escoamento obtidos pelo ensaio de palheta. Independentemente do molde utilizado mostraram um aumento nos valores de tensão de escoamento comparando-se com os resultados obtidos para o rejeito ultrafino nas mesmas condições de ensaio. Este aumento se deve ao aumento da proporção de material ultrafino na mistura. Como consequências da diminuição média no tamanho dos grãos do material, um maior teor de umidade nas amostras foi necessário ser acrescido para realizarem-se as medições.

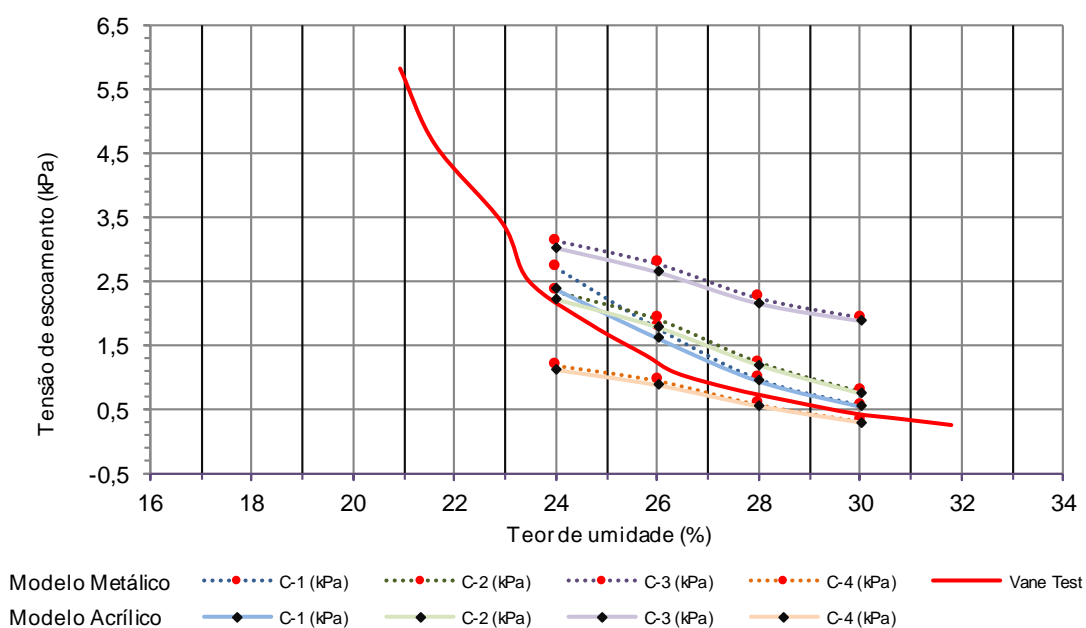


Figura 4.46 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 30,0 cm de altura (Do autor, 2019).

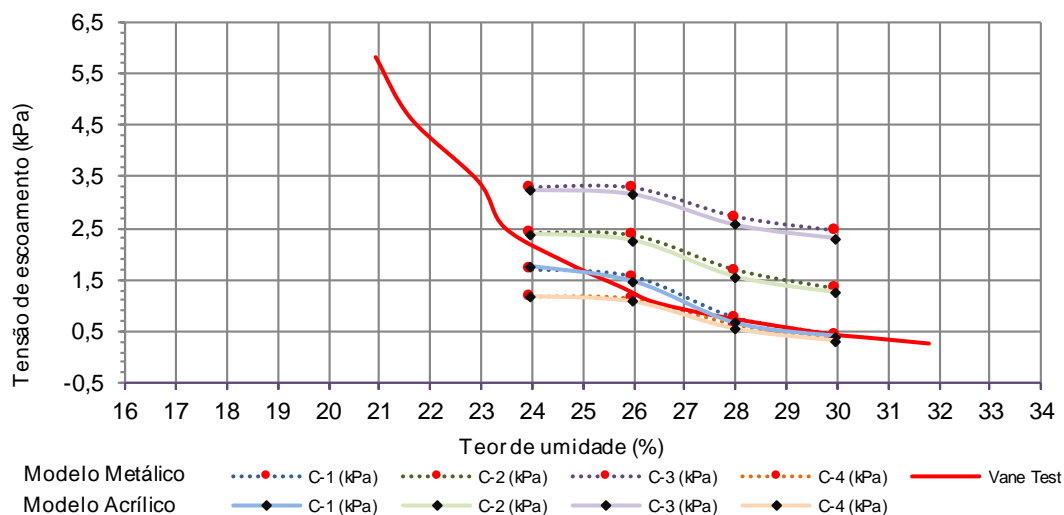


Figura 4.47 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Molde tipo tronco de cone com 23,5 cm de altura (Do autor, 2019).

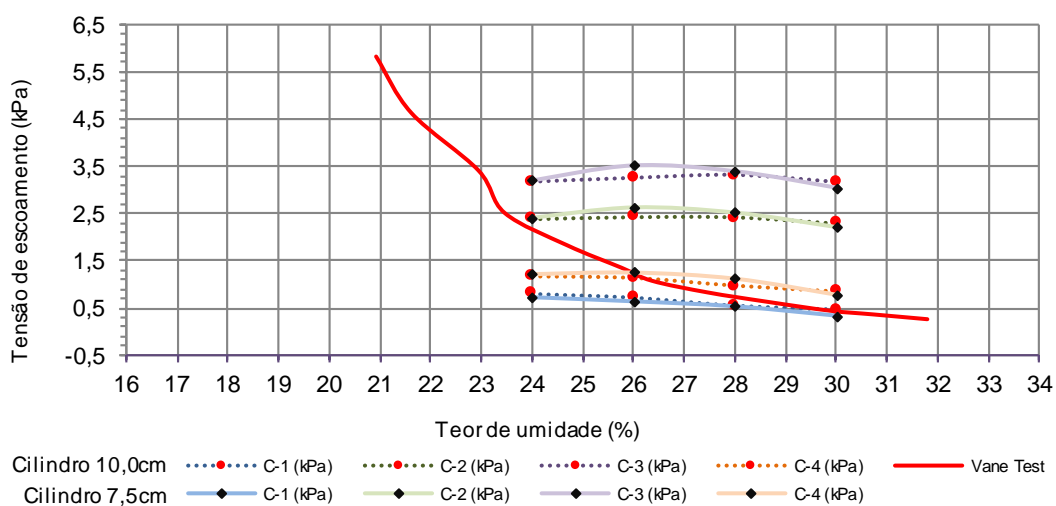


Figura 4.48 – Comparação entre os resultados dos ensaios de abatimento e de palheta - 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino - Moldes cilíndricos (Do autor, 2019).

4.5.2 Resultados dos ensaios de abatimento com água do processo

Os resultados de tensão de escoamento *versus* teor de umidade apresentados a seguir foram determinados utilizando-se a metodologia de cálculo definida por C-1 (Pashias *et al.*, 1996) a partir de ensaios de abatimento, realizados em moldes do tipo tronco de cone de acrílico reduzido (21,5 cm de altura) e moldes cilíndricos de PVC em duas dimensões (10

cm e 7,5 cm de altura). A metodologia de cálculo escolhida (C-1) foi a que mais se aproximou dos valores de tensão de escoamento entre os resultados obtidos anteriormente nos ensaios de abatimento com água destilada, bem como nos ensaios de palheta. As curvas de tensão de escoamento, obtidas nos ensaios de abatimento com água destilada, foram adicionadas aos gráficos apresentados a seguir para melhor comparação com os resultados obtidos utilizando-se água de processo.

A Figura 4.49 apresenta o comportamento das tensões de escoamento das amostras de rejeitos de flotação obtidas nos ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo. Ao analisar os resultados do amostrador tronco de cone de acrílico observa-se menores valores de tensão de escoamento quando a amostra está submetida à água utilizada no processo de deslamagem. Entretanto, a maior variação nos valores de tensão de escoamento em relação aos ensaios com água destilada e água de processo foi de 0,4 kPa, ou seja, pouco representativo. Deste modo, pode-se considerar que a tensão de escoamento obtida utilizando a água de processo não apresentou alterações significativas para o rejeito de flotação. A Figura 4.50 apresenta as tensões de escoamento das amostras de rejeitos ultrafinos obtidas nos ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo, mantendo similaridade com o comportamento do rejeito de flotação.

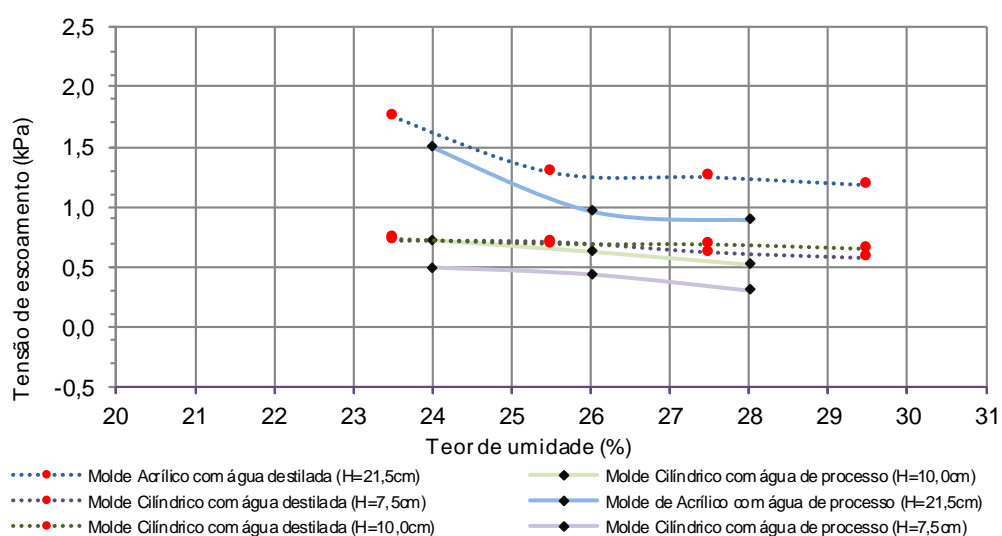


Figura 4.49 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos de flotação, obtidos com ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo

(Do autor, 2019).

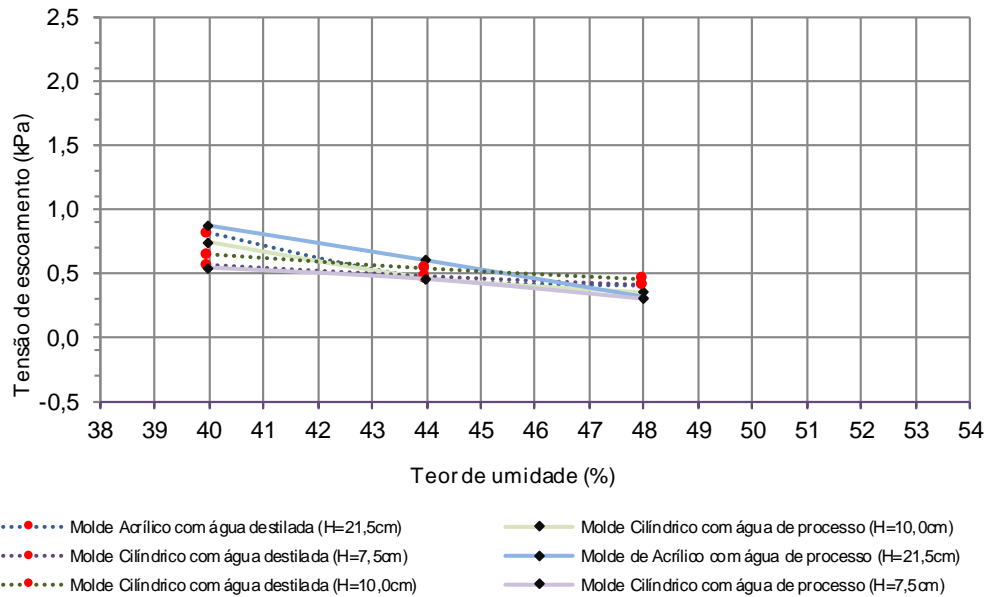


Figura 4.50 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para os rejeitos ultrafinos, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).

A Figura 4.51 mostra os resultados obtidos, a partir dos ensaios de abatimento, para as amostras de mistura com 90% de rejeito flotação + 10% de rejeito ultrafino, utilizando-se água destilada e água de processo.

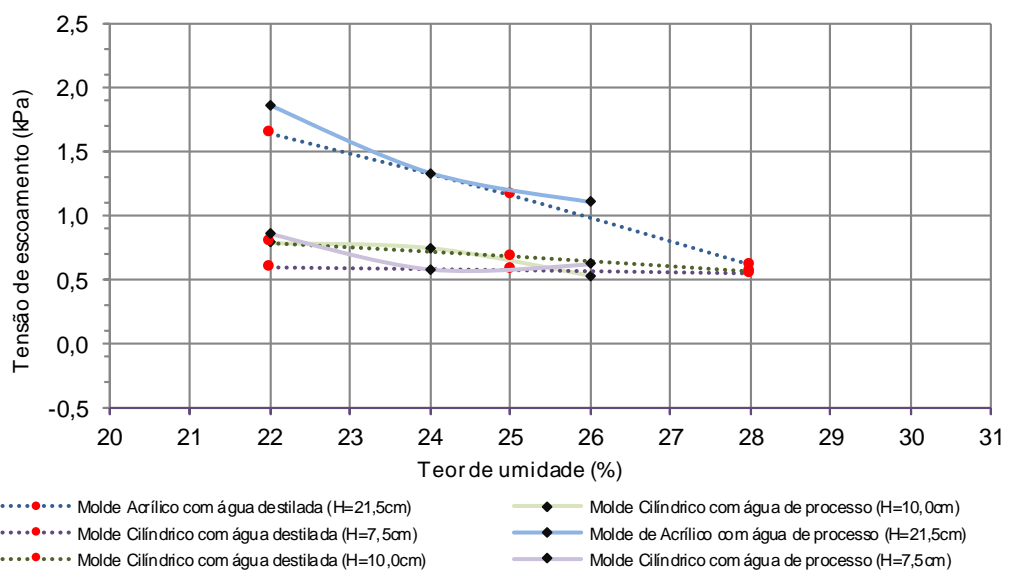


Figura 4.51 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura de 90% de rejeito de flotação + 10% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).

Os resultados apresentados na Figura 4.51 também indicam que para a mistura nessas proporções, o líquido utilizado não interferiu nos resultados dos ensaios analisados. As pequenas discordâncias das curvas, quando comparadas, estão associadas aos procedimentos de obtenção. Por se caracterizar como essencialmente metodologias experimentais, é comum essa pequena variação, ou seja, desprezível do ponto de vista representativo.

A Figura 4.52 apresenta os resultados das tensões de escoamento das amostras de mistura com 80% de rejeito flotação + 20% de rejeito ultrafino obtidas nos ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo. Observa-se que, para a mistura avaliada, os resultados de tensão de escoamento foram aproximados, mesmo quando realizados com três tipos de amostradores diferentes. A Figura 4.53 mostra os resultados associados à mistura com 70% de rejeito flotação + 30% de rejeito ultrafino. Da mesma forma, as correlações obtidas não apresentaram alterações significativas quando comparados os ensaios realizados utilizando água de processo e aqueles realizados com água destilada.

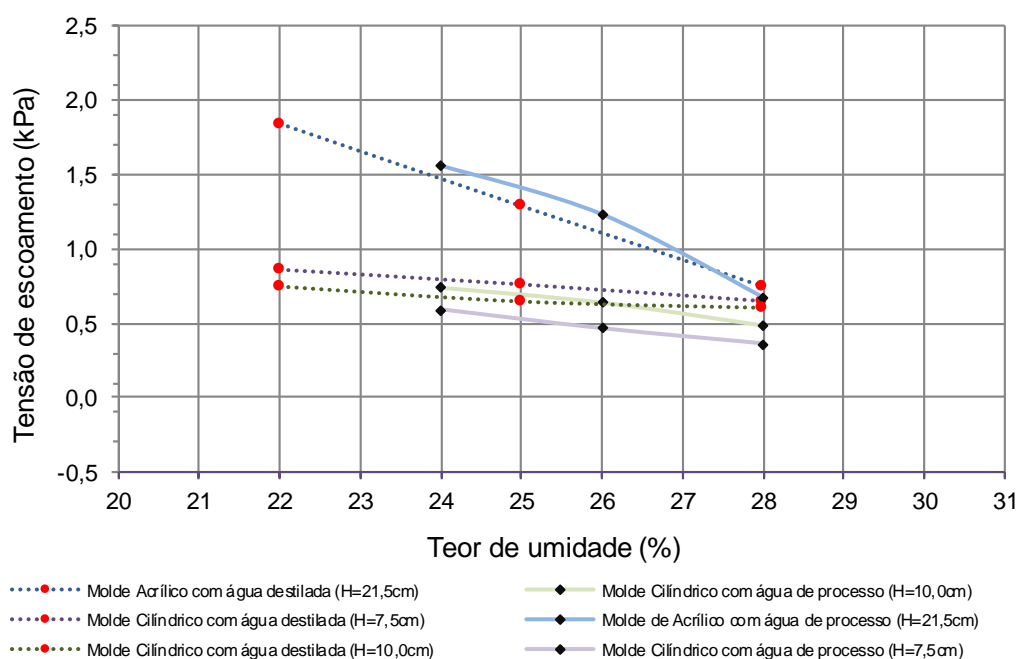


Figura 4.52 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura de 80% de rejeito de flotação + 20% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).

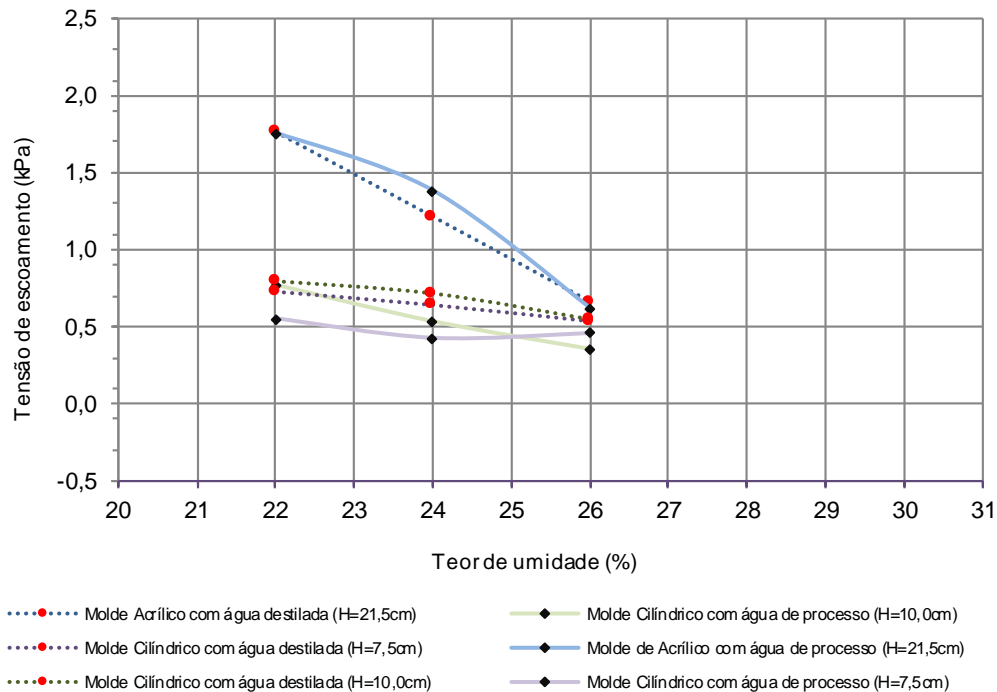


Figura 4.53 – Curvas tensão *versus* teor de umidade para a mistura de 70% de rejeito de flotação + 30% rejeito ultrafino, obtidos em ensaios de abatimento utilizando-se água destilada e água de processo (Do autor, 2019).

Dentro das análises efetuadas nesta dissertação, foi avaliada a influência dos tempos de leitura dos ensaios de abatimento (*Slump Test*), utilizados na determinação da tensão de escoamento. Considerando-se que variações nos tempos de leitura podem ocorrer em função de atrasos não desejados, durante a execução destes ensaios, constatou-se que estes valores não influenciaram de maneira significativa nas análises efetuadas. Este comportamento está relacionado às propriedades físicas das amostras utilizadas no programa experimental.

Desta forma, em se tratando de rejeito de minério de ferro, um fluido não newtoniano, em que a viscosidade somente sofre alterações no momento da retirada do mole (ensaio de abatimento) e, em seguida, sua viscosidade é restaurada imediatamente após o repouso da amostra, o tempo de leitura após a retirada do molde não interferiu nos resultados obtidos nos ensaios. Reforça-se que fluidos não newtonianos a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Conseqüentemente, fluidos não newtonianos podem não ter uma viscosidade bem definida

4.5.3 Análise comparativa dos resultados

Os valores de tensão de escoamento obtidos através dos resultados dos ensaios de laboratório de palheta e de abatimento, adotados nesta dissertação, apresentaram relativas divergências. As diferenças nos valores da tensão de escoamento foram observadas nas análises interpretativas dos gráficos apresentados nesta pesquisa, podendo-se observar, claramente, que os ensaios de abatimento apresentaram tensões de escoamento inferiores, quando comparados aos resultados obtidos nos ensaios de palheta.

Deste modo, para maior confiabilidade nos resultados faz-se necessário associar outros ensaios laboratoriais para convergir os valores da tensão de escoamento do material, dado que este parâmetro é de grande importância no estudo de *Dambreak*, bem como em cálculos do sistema de bombeamento das plantas minerárias, entre outros. Logo, abordagens mais conservadoras podem ser melhores estudadas, assim como foi proposto neste trabalho.

Estudos comparativos com pesquisas realizadas em rejeitos minerários, que apresentam semelhança com os utilizados nesta pesquisa foram realizados e são apresentados a seguir.

Inicialmente destaca-se o trabalho desenvolvido por Ribeiro (2015). O autor apresenta estudos de tensão de escoamento a partir de análises de abatimento (Figura 4.54) e palheta (Figura 4.55). Em seu trabalho, foram utilizados moldes do tipo cilíndrico e amostras de rejeitos com características granulométricas semelhantes em relação às amostras misturadas em peso na proporção de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino consideradas nesta pesquisa. É possível realizar uma análise comparativa com resultados obtidos nos testes de tensão de escoamento e confrontá-los com os resultados aqui obtidos. É importante ressaltar que, apesar de os rejeitos apresentarem comportamentos granulométricos semelhantes para as amostras de mistura em peso de 70% de rejeito de flotação + 30% de rejeito ultrafino, não foi possível correlacionar o processo de formação dos rejeitos, formação mineral, bem como as suas formas e textura dos grãos após o beneficiamento minerário.

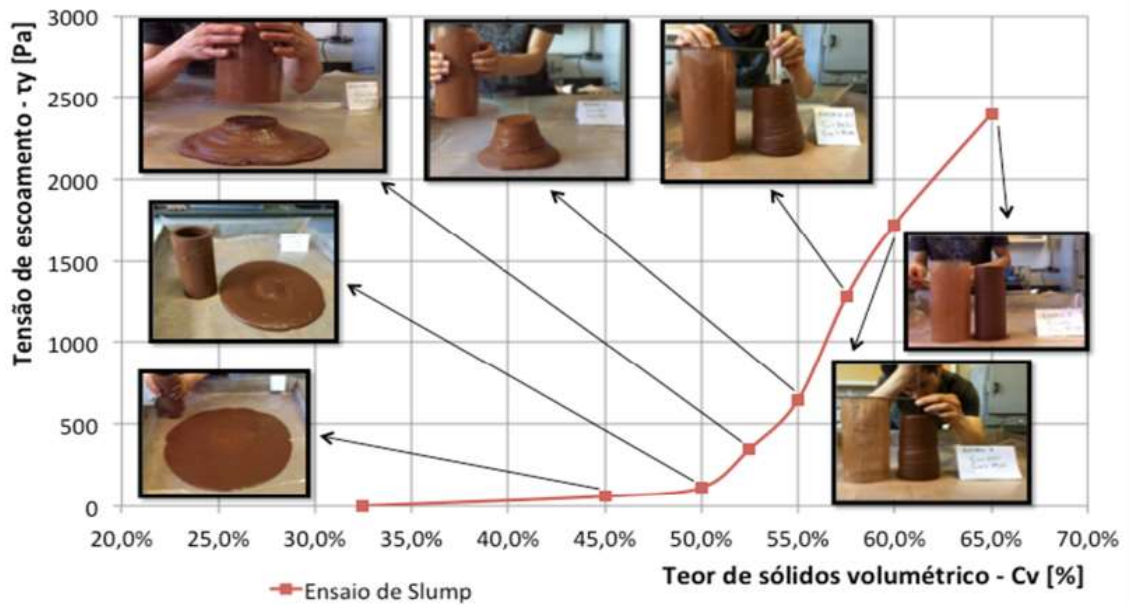


Figura 4.54 – Resultados de tensão de escoamento - ensaio de abatimento (Ribeiro, 2015).

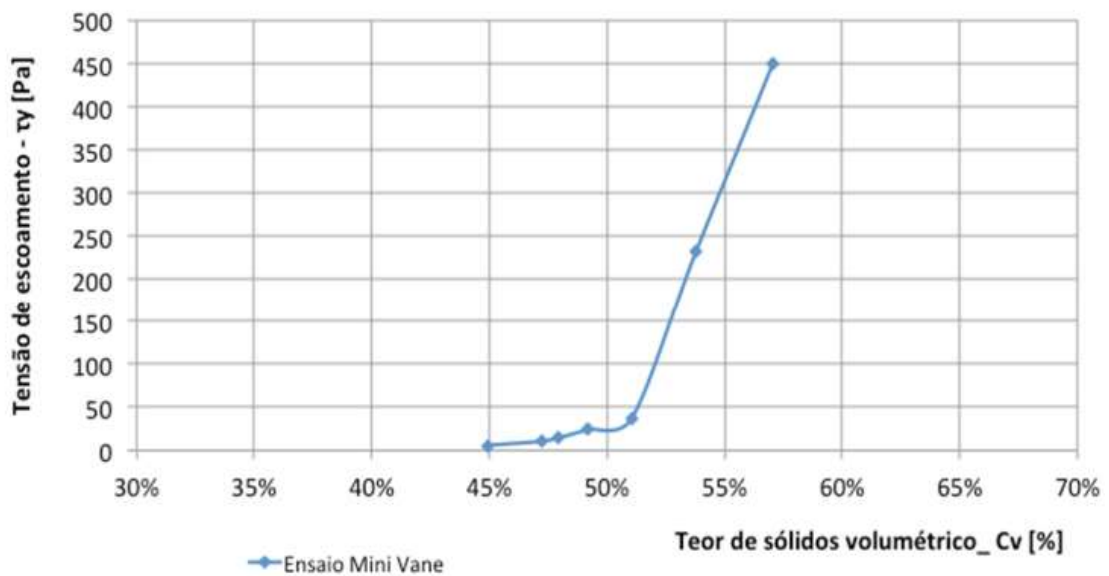


Figura 4.55 – Resultados de tensão de escoamento - ensaio de palheta (Ribeiro, 2015).

A Figura 4.56 apresenta uma correlação dos resultados de tensão de escoamento obtidos por Ribeiro (2015) e obtidos nesta pesquisa para moldes cilíndricos, calculados a partir da metodologia proposta por Pashias *et al.* (1996).

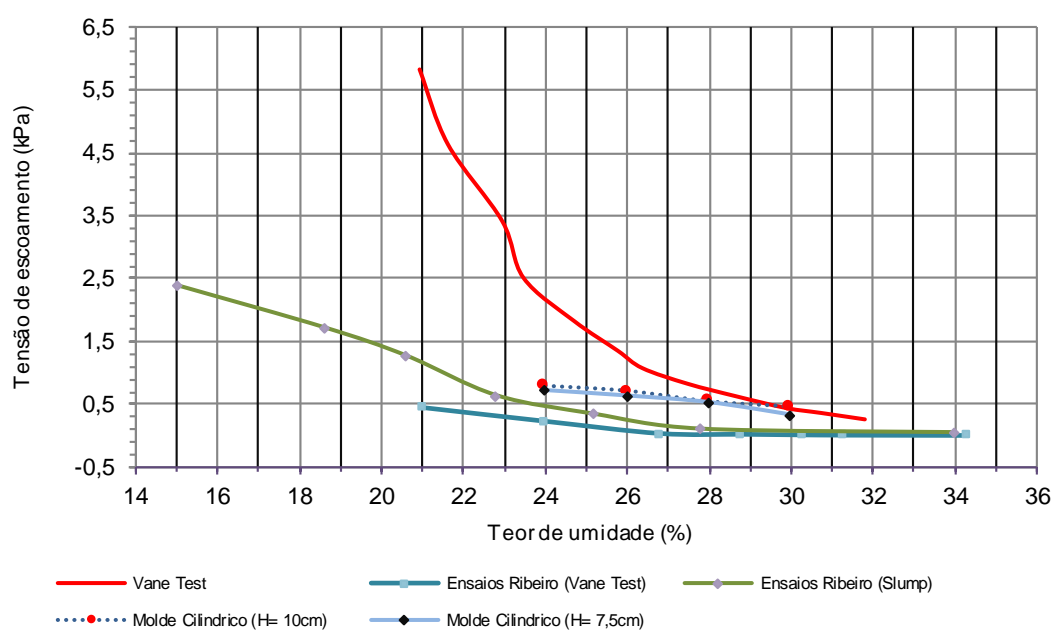


Figura 4.56 – Comparação dos resultados de Ribeiro (2015) com os resultados obtidos nesta pesquisa (Do autor, 2019).

A Figura 4.56 mostra que houve relativa similaridade entre os valores dos resultados dos ensaios de abatimento obtidos nesta pesquisa e os resultados obtidos por Ribeiro (2015). Todavia, é importante ressaltar que os métodos de ensaios escolhidos apresentaram uma maior capacidade na obtenção da tensão de escoamento, dado que foram obtidos valores de tensão de escoamento em amostras de umidades a partir de 15%. Outro aspecto observado, já mencionado anteriormente, refere-se aos ensaios de palheta apresentarem resultados para teores de umidade mais elevados, quando comparados aos ensaios de abatimento.

Um estudo realizado por Machado (2017), em que foram coletadas amostras em áreas impactadas pela ruptura da barragem de Fundão, no Rio Gualaxo do Norte (P2), semelhantes à granulometria do rejeito ultrafino utilizado nesta pesquisa, também possibilitou uma análise comparativa dos resultados. Cabe ressaltar que na pesquisa desenvolvida por Machado (2017) foram utilizados, na determinação dos parâmetros de tensão de escoamento, somente moldes de ensaios de abatimento tipo cilíndricos. A Figura 4.57 apresenta os resultados de tensão de escoamento obtidos por Machado (2017) e obtidos nesta pesquisa para os moldes tipos cilíndricos com duas dimensões.

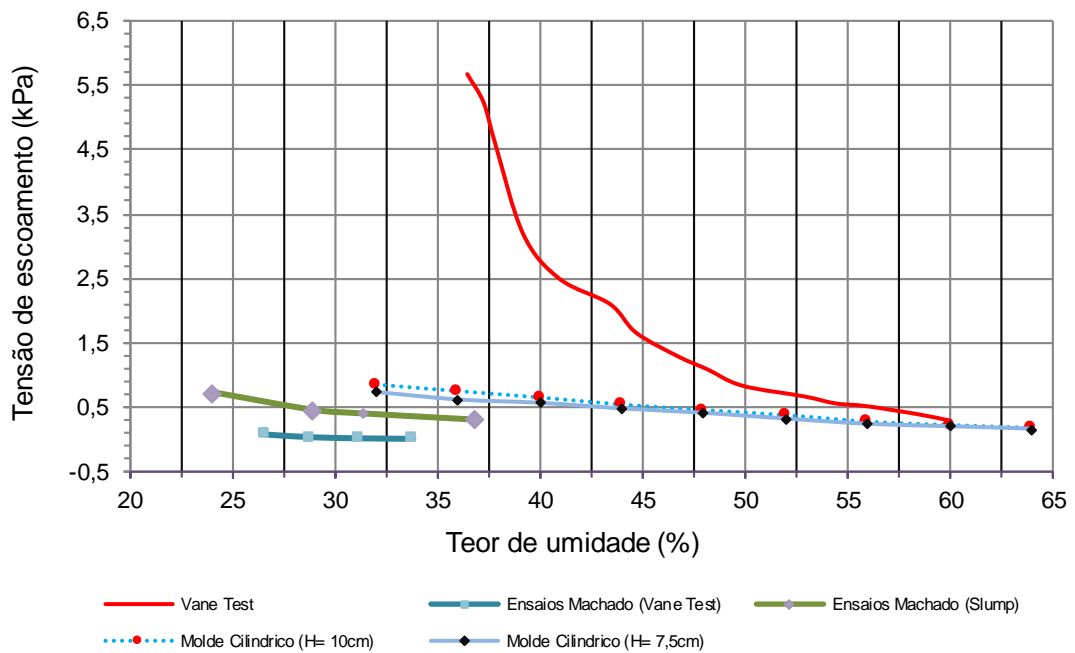


Figura 4.57 – Comparação dos resultados de Machado (2017) com os resultados obtidos nesta pesquisa (Do autor, 2019).

Observa-se certa aproximação dos resultados dos ensaios de abatimento desta pesquisa com os resultados obtidos pelo autor, não só em relação aos seus resultados de abatimento, mas também quando comparados aos valores oriundos do ensaio de palheta. Conforme também observado na comparação com os resultados de Ribeiro (2015), há maior discrepância dos resultados de palheta obtidos nesta dissertação. Outra constatação está associada aos resultados obtidos por Machado (2017), onde os valores determinados com o uso dos ensaios de abatimento foram maiores que os valores determinados pelo ensaio de palheta, diferentemente da tendência observada nesta pesquisa. Este fato pode estar associado às propriedades mineralógicas dos materiais amostrados, já que o material estudado por Machado (2017) é proveniente do rejeito carregado da ruptura da barragem de Fundão em pontos distantes do barramento principal e os utilizados nesta pesquisa foram coletados diretamente nos espessadores de lama da usina de mineração.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho trata de uma abordagem experimental para análise da tensão de escoamento através de ensaios reológicos de palheta e de abatimento. Os estudos relacionados nesta dissertação representam um avanço entre os demais estudos tratados na literatura apresentada, que utilizam o método de abatimento para analisar a tensão de escoamento dos rejeitos. O método de pesquisa ora apresentado consistiu na realização de análises comparativas entre os resultados de tensão de escoamento obtidos em dois tipos de ensaios.

A tensão de escoamento foi determinada nos ensaios de palheta utilizando, como parâmetro medido, o torque máximo necessário para cisalhar as amostras por rotação. Os ensaios realizados obtiveram bons resultados e valores coerentes com as misturas realizadas, como é possível observar generalizando o comportamento dos rejeitos de flotação e ultrafinos. A contribuição do rejeito ultrafino foi considerável para o aumento da tensão de escoamento nas misturas. Além disso, observou-se que o ensaio de palheta possibilita determinar valores consistentes de tensão de escoamento, mas que deve ser particularizado para cada rejeito.

Nos ensaios de abatimento, foram alterados os parâmetros nos procedimentos. Um desses parâmetros alterados foi o material de fabricação dos moldes de ensaios, em que foram utilizados materiais metálico e acrílico. Observou-se que este parâmetro não influenciou significativamente nos resultados de tensão de escoamento.

Além disso, por meio dos moldes de acrílico, foi avaliada também a influência da rugosidade do material na retirada do molde durante o ensaio. Devido à baixa granulometria do rejeito, ao ser retirado, as paredes internas do molde confeccionado em

material transparente (acrílico) ficaram sujas, impossibilitando a visualização do comportamento da amostra dentro do recipiente. Portanto, o material de fabricação dos amostradores foi irrelevante para os resultados dos ensaios de abatimento.

Dentre as metodologias utilizadas nos cálculos da tensão de escoamento obtidas através dos ensaios de abatimento, para os rejeitos estudados, a C-1 (*Pashias et al.*, 1996) e C-4 (*Pereira et al.*, 2018) foram as que mais se aproximaram dos resultados obtidos por meio dos ensaios de palheta.

Além da variação nos materiais de fabricação, os ensaios de abatimento foram realizados utilizando dois modelos de moldes, sendo o tronco de cone e o cilíndrico, em duas dimensões cada. Considerando os rejeitos estudados, os resultados indicaram diferenças nos valores obtidos entre os dois tipos de moldes, sendo que, os valores de tensão de escoamento foram maiores para aqueles no formato tipo tronco de cone. Em relação aos moldes convencionais e reduzidos (variação nas dimensões dos moldes), observou-se que o comportamento das tensões de escoamento foi similar. Quanto aos valores de tensão de escoamento, entre os moldes tipo tronco de cone, os de dimensões convencionais apresentaram valores maiores que os reduzidos. Já para os moldes cilíndricos, não houve diferenças significativas entre os modelos convencionais e os reduzidos.

A pesquisa realizada nesta dissertação baseou-se em metodologias e procedimentos já existentes na literatura. No entanto, poucos estudos relacionam aos ensaios de palheta e de abatimento para obtenção de um mesmo parâmetro: a tensão de escoamento. Assim, considerando-se a ampla utilização desses ensaios atualmente nos estudos reológicos de materiais, o presente trabalho incorpora relativa contribuição científica. Além disso, foi possível analisar diversos parâmetros com o objetivo de verificar a sua influência nos resultados, o que levou à realização de, aproximadamente, 610 ensaios, entre caracterização do material e ensaios para obtenção da tensão de escoamento. Caracteriza-se também como um significativo banco de dados. As análises realizadas ampliaram significativamente o conhecimento dos parâmetros técnicos utilizados em ensaios reológicos, necessários para a realização de estudos e projetos, especialmente os

realizados na indústria da mineração, como projetos de dutos de transporte de rejeitos e minérios, estudos de ruptura hipotética de barragem de rejeitos, entre outros.

Verificou-se também que a tensão de escoamento não é proporcional ao aumento da concentração de sólidos em massa. Entretanto, o comportamento reológico das polpas estudadas se mostrou bastante complexo, permitindo ainda o estudo da tensão de escoamento por meio de metodologias diferentes das utilizadas neste trabalho, com o objetivo de melhor entendimento dos mecanismos envolvidos. Isso é importante, considerando que o início do escoamento é definido quando o torque atinge seu máximo valor e, conseqüentemente, causa o cisalhamento do material na área ao redor da palheta.

Nesta pesquisa também foi possível realizar diversas misturas entre os rejeitos com granulometrias diferentes, como observado nos resultados foram utilizados rejeitos de flotação e rejeitos ultrafinos comumente denominados no meio técnico como lamas de rejeitos. Tal estudo foi necessário para ampliar o conhecimento das deslamagem que acontecerão na industrial mineral, uma vez que para um melhor aproveitamento do minério de ferro será necessário reduzir ainda mais a granulometria das partículas, facilitando assim a retirada do minério. No presente estudo é possível observar que quanto mais fino for o rejeito, mais água será necessário para reduzir a tensão de escoamento, possibilitando assim realizar o bombeamento dos mesmos para barragens e ou outros métodos de disposição.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa, foi possível alcançar os objetivos propostos no início do projeto. Como exemplo, podemos citar: a grande variabilidade de ensaios realizados utilizando materiais amostrados no processo normal de deslamagem e dosados no laboratório, com variações dos tempos de leitura, objetivando verificar a influência nos resultados, quando executados em tempos alternados.

Como proposta para trabalhos futuros, de acordo com as observações realizadas no decorrer desta dissertação, são sugeridas:

- a realização de ensaios a partir de equipamentos de ensaios de cisalhamento direto, para comparação com os resultados obtidos por meio do método de abatimento, dado que o método de cisalhamento direto define com maior precisão as tensões necessárias para cisalhar amostras com menores teores de umidade, podendo assim ser convertida para tensão de escoamento;
- a investigação de outros métodos de cálculos da tensão de escoamento utilizando-se os resultados obtidos nos ensaios de abatimento utilizando amostradores do tipo tronco de cone, já que esses ensaios foram os que mais apresentaram discordância com os ensaios de palheta;
- a verificação da influência nos preparos das amostras de rejeitos, pois atualmente, no meio técnico, tem sido discutido quanto aos prejuízos nos parâmetros reológicos após o preparo das amostras, sendo necessário alterar as metodologias de secagem e de preparo dos rejeitos e correlacionado os seus respectivos resultados para a mesma metodologia de ensaios realizados;
- a realização de estudos comparativos, com a utilização de outros tipos de rejeitos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro, 2018. Disponível em: < http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf >. Acessado em: 09/04/2019.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-4648: Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil.** West Conshohocken, PA, 2016.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research.** v. 51, n. 5, p. 341-352, 1999. Disponível em: < <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.1999.51.5.341> >. Acessado em: 09/12/2019.

BARNES, H. A.; NGUYEN, Q. D., 2001. Rotating vane rheometry - a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 98, n. 1, p. 1-14, 2001. ISSN 0377-0257. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377025701000957> >. Acessado em: 09/12/2019.

BARREDA, R. H. O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral.** 2008. 120f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2008.

BISCO, A. P. R. A. **Influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais.** 2009. 87f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A., 2005. **Reologia de polímeros fundidos.** 2. ed. São Carlos: Ed. da UFSCar, 2005.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2007.

CHRISTENSEN, G., **Modeling the flow of fresh concrete: The slump test**. 1991. (Ph.D. thesis). Princeton University, Princeton, 1991.

CLAYTON, S.; GRICE, T.; BOGER, D. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. **International journal of mineral processing**, v. 70, n. 1-4, p. 3-21, 2003. ISSN 0301-7516.

DE LARRARD, F.; HU, C.; SEDRAN, T.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; . CLAUX, F.; DERKX, F. A new rheometer for soft-to-fluid concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 234-243, 1997.

DZUY, N. Q.; BOGER, D. V. Direct Yield Stress Measurement with the Vane Method. **Journal of Rheology**, v. 29, n. 3, p. 335-347, 1985. Disponível em: < <https://sor.scitation.org/doi/abs/10.1122/1.549794> >. Acessado em: 09/12/2019.

FERRARIS, C. F.; De LARRARD, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 20, n. 2, p. 241-247, 1998.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C., Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **REM – Revista da Escola de Minas**, v. 58, n. 1, 2005.

GARCIA, L. P. **Obtenção de parâmetros reológicos de polpas minerais contendo partículas grossas a partir de ensaios de bombeamento**. 2014. 105f. Dissertação (Mestrado). Universidade Santa Cecília, Santos, 2014

HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de Caracterização Reológica de Argamassas. **E-Mat (Porto Alegre)**, v. 3, p. 103-120, 2006.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Economia Mineral do Brasil, 2018. Disponível em: < <http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/08/economia-mineral-brasil-set2018.pdf> >. Acessado em: 09/04/2019.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. 2017. 159f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2017.

MACIEL, G. D. F.; BARBOSA, M. P.; PEREIRA, J. P. Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 866-879. 2016. ISSN 1517-7076.

MANRICH, S.; PESSAN, L. **A Reologia: conceitos básicos**. São Carlos UFSCar, 1987.

MELO, D. F. M., **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. 2014. 253f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2014.

MIZANI, S.; SIMMS, P. Method-dependent variation of yield stress in a thickened gold tailings explained using a structure based viscosity model. **Minerals Engineering**, v. 98, p. 40-48, 2016.

MURATA, J. Flow and deformation of fresh concrete. **Mater. Constr. (Paris)**, v. 17, p. 117, 1984.

NGUYEN, N. Q.; BORGER, D. V. Direct yield stress measurement with the vane method. **Journal of Rheology**, v. 29, n. 3, p. 335-347, 1985.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 141f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas - Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo arte editorial, 2000.

OSORIO, C. A. H. **Caracterização de pastas minerais**. 2005. 177f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2015.

PASHIAS, N.; BOGER, D. V.; SUMMERS, J.; GLENISTER, D. J. A fifty-cent rheometer for yield stress measurement. **Journal of Rheology**, v. 40, n. 6, p. 1179-1189. 1996.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F.; TOKMATSU, R. C.; BARBOSA, M. P.; NOGUEIRA, C. A. A. Aparato mecânico para a medida automatizada de slump: estendendo seu uso para materiais de base mineralógica e polimérica. In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2018

PINTO, C. S.. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos. 2006

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências de polpa e torta**. 2013. 154f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado - estudo de caso**. 2008. 178f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos**. 2005. 268f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2005.

ROMANO, R. D. E.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.. **Propriedades do Concreto no Estado Fresco**, In: ISAIA, G. C. ed. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, Cap. 13, p. 453-500. 2011.

SAMPAIO, R. B. **Comportamento reológico de pastas geopoliméricas com uso de aditivos dispersantes**. 2017. 139f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SIQUEIRA, I. S. **Influência da adição de polpas celulósicas de pinho e eucalipto na hidratação e comportamento mecânico de pastas de cimento**. 2014. 190f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco**. 2005. 105f. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

TADROS, Th. F. **Solid/Liquid Dispersions**. Bracknell. England Academic Press Inc., 1987. ISBN: 0-12-682178-X.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete**. London: Pitman, 1983.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**, New York: Chapman Hall, 1991.

TRAMPUS, B. C.; FRANÇA, S. C. A. Rheology applied to the environmental management of mineral tailings: focus on safer disposal and water reuse. **REM – International Engineering Journal**, 2019. On-line version: ISSN 2448-167X. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720117> >. Acessado em: 09/04/2019.

VAN WAZER, J. R. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. New York: Interscience Publishers, 1963. 406p.

VENÂNCIO, P. B. F. **Dosagem de argamassa para estaca raiz**. 2008. 155f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, 2008.