

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

ISRAEL DA SILVEIRA CAVALCANTE

REOLOGIA DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO

São Paulo

2021

ISRAEL DA SILVEIRA CAVALCANTE

REOLOGIA DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de graduação.

Orientador: Prof. Jean Carlo Grijó Louzada
Coorientador: Prof. Laurindo de Salles Leal Filho

São Paulo

2021

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

CAVALCANTE, ISRAEL

REOLOGIA DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO / I.

CAVALCANTE -- São Paulo, 2021.

60 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Reologia 2. Minério de Ferro 3. Pseudoplástico 4. Dilatante 5. Bombeamento I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t. o II.t.

*À Deus,
aos meus pais Genival e Raquel
e à minha esposa Cassia Romena.*

Agradecimentos

O autor através dessa página, descreve um singelo agradecimento a todos aqueles que contribuíram diretamente ou indiretamente para a construção desse trabalho.

À Deus, seja dada toda honra e toda a glória.

Aos meus pais, pois sem eles, não poderia ter sucesso acadêmico.

À minha esposa Cassia Romena, que sempre me entusiasmou, por mais que estivesse difícil, sempre me animou e me apoiou.

Ao meu irmão Ismael, que todos esses anos foi meu: irmão, amigo e colega.

Aos meus outros Irmãos: Gabriel, Abner e Ester que fizeram parte da minha história.

Ao Prof. Jean Louzada pela ajuda, companheirismo, que sempre esteve disposto ao máximo para ensinar, na qual foi a base para esse trabalho ser construído.

Ao Prof. Dr. Laurindo de Salles Leal Filho por ter me dado a oportunidade de ser meu coorientador e por suas valiosas sugestões.

À graduando Matheus Barbaresco, por sua colaboração.

À técnica de mineração, Ivani Villa Nova e Doutorando Jose Tadeu, por suas colaborações.

À engenheira e doutoranda Elaine Andrade, por suas dicas e colaborações.

À empresa Vale S.A por fornecer as amostras utilizadas nos experimentos.

Aos que não se mede esforço, não há conquista
que não se pode ser alcançada.

RESUMO

A reologia de polpas minerais encontra-se praticamente indissociável do beneficiamento e manuseio de minérios, uma vez que estes, em geral, são processados a úmido como suspensões particuladas. Estas devem ser transportadas, por bombeamento a curta distância, às diversas operações unitárias de processamento mineral. Além disso, o concentrado é enviado ao seu destino final, transportado principalmente por ferrovias ou por bombeamento a longas distâncias via minerodutos. Estes últimos, carecem de conhecimentos relacionados à reologia da polpa que transportam. No presente trabalho foi investigada a reologia de suspensões de minério de ferro com elevadas concentrações sólidos (50, 60 e 70% de sólidos em massa), compatíveis com as concentrações praticadas pela indústria mineral nas operações de beneficiamento e transporte em minerodutos. As investigações foram conduzidas em um reômetro rotacional com uma geometria do tipo cilindros concêntricos. Os dados experimentais foram ajustados pelos modelos de Ellis e Tscheuschner. Os resultados reológicos mostraram que as suspensões a 50% de sólidos em massa apresentaram comportamento dilatante nas condições experimentais estudadas. Para polpa a 60% de sólidos e pH=6,7, o comportamento pseudoplástico ocorreu na faixa de cisalhamento de $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151\text{s}^{-1}$ e dilatante em $151\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450\text{s}^{-1}$. Para a suspensão a 60% de sólidos e pH = 10,3, o comportamento pseudoplástico se fez presente em $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 101\text{s}^{-1}$ e dilatante nas taxas acima de 101s^{-1} . As polpas preparadas a 70% de sólidos em pH = 6,5 exibiu características pseudoplásticas em $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 301\text{s}^{-1}$ e dilatantes em $301\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450$. Nesta mesma concentração de 70% de sólidos e pH = 10,6, o caráter pseudoplástico se fez presente em $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151\text{s}^{-1}$ e o dilatante em $151\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450\text{s}^{-1}$. Os resultados de potencial zeta mostraram que a hematita se tornou cada vez mais negativa com o aumento do pH, exceto em pH = 10. O aumento do potencial zeta neste pH ocorreu em virtude da presença do magnésio e do manganês no minério, na forma de hidroxocomplexos $\text{Mg}(\text{OH})^+$ e $\text{Mn}(\text{OH})^+$. O comportamento do número de Taylor permitiu compreender a influência dos efeitos inerciais no comportamento reológico das suspensões. Deste modo, foi possível avaliar as melhores condições físico-químicas para a reologia e, por conseguinte, para as operações de bombeamento de polpas de minério de ferro em elevadas concentrações de sólidos.

Palavras-chave: Reologia, Minério de ferro, Pseudoplástico, Dilatante, Bombeamento.

ABSTRACT

The rheology of mineral pulps is practically inseparable from the processing and handling of ores, since these, in general, are wet processed as particulate suspensions. These must be transported, by pumping over a short distance, to the various unit mineral processing operations. In addition, the concentrate is shipped to its final destination, transported, mainly by rail or by pumping over long distances via pipelines. The latter lack knowledge related to rheology of the pulp they transport. In the present work, the rheology of iron ore suspensions with high solids concentrations (50, 60 and 70% solids by mass) were investigated, compatible with the concentrations practiced by the mineral industry in processing and transport operations in pipelines. The investigations were conducted in a rotational rheometer with a concentric cylinder-type geometry. Experimental data were fitted by Ellis and Tscheuschener models. The rheological results showed that suspensions at 50% solids by mass exhibited shear thickening behavior under the experimental conditions studied. For pulp at 60% solids and pH= 6.7, the shear thinning behavior occurred in the shear range of $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151\text{s}^{-1}$ and shear thickening in $151\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450\text{ s}^{-1}$. For the suspension at 60% solids and pH= 10.3, the shear thinning behavior was present in $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 101\text{s}^{-1}$ and shear thickening at rates above 101s^{-1} . The pulps prepared at 70% solids at solids at pH= 6.5 exhibited shear thinning characteristics in $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 301\text{s}^{-1}$ and shear thickening in $301\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450$. At this same concentration of 70% solids and pH= 10.6, the shear thinning character was present in $51\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151\text{s}^{-1}$ and the shear thickening character in $151\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450\text{ s}^{-1}$. The zeta potential results shoed that hematite became increasingly negative with increasing pH, except at pH= 10. The increase in zeta potential at this pH was due to the presence of magnesium and manganese in the ore in the form of $\text{Mg}(\text{OH})^+$ and $\text{Mn}(\text{OH})^+$ hydroxocomplexes. The behavior of the Taylor number allowed us to understand the influence of inertial effects on the rheological behavior of suspensions. In this way, it was possible to evaluate the best physicochemical conditions for rheology and, therefore, for pumping operations of iron ore slurries at high solids concentrations.

Keyword: Rheology, Iron ore, Shear thickening, Shear thickening, Pumping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Energia de interação entre duas partículas.....	22
Figura 2 - Representação esquemática da dupla camada elétrica.....	22
Figura 3 - Reogramas referentes aos fluidos com comportamento independente do tempo.	26
Figura 4 - Efeito da concentração de sólidos e do tamanho de partícula na reologia de suspensões particuladas	27
Figura 5 - Efeito do pH no grau de dispersão de partículas de uma polpa de minério de ferro.	28
Figura 6 - Pilha longitudinal do minério de ferro de Carajás.....	33
Figura 7 - Homogeneização da amostra para realização dos experimentos de reometria.	33
Figura 8 - Caracterização granulométrica do minério de Carajás.	34
Figura 9 - Reômetro Anton Paar e geometrias do tipo cilindros concêntricos e cilindros com duplo gap.....	36
Figura 10 - Equipamento Zetasizer, monitor e cubeta.....	37
Figura 11 - Potencial zeta do minério de ferro de Carajás em função do pH. ..	38
Figura 12 - Diagrama de especiação dos íons Mg^{2+} e Mn^{2+}	39

Figura 13 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para as suspensões de minério de ferro.	41
Figura 14 - Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as suspensões de minério de ferro.	41
Figura 15 - Número de Taylor em função da taxa de cisalhamento para as suspensões de minério de ferro em pH natural.	45
Figura 16 - Número de Taylor em função da taxa de cisalhamento para as suspensões de minério de ferro em pH alcalino.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constante de Hamaker para diferentes minerais.	21
Tabela 2 - Modelos reológicos de fluidos não-Newtonianos.	25
Tabela 3 - Pontos de carga zero para os minerais quartzo e hematita.	28
Tabela 4 - Resultado da análise química do minério de Carajás.	34
Tabela 5 - Modelos reológicos obtidos para as suspensões preparadas com o minério de ferro de Carajás.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

pH	Potencial hidrogeniônico
PZ	Potencial zeta
DLVO	Derjaguin - Landau - Verwey – Overbeek
TDCE	Teoria da dupla camada elétrica
DCE	Dupla camada elétrica
PCZ	Ponto de carga zero
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
PMI	Engenharia de Minas e de Petróleo
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LFQI	Laboratório de Fenômenos de Transporte e Química de Interfaces Aplicados à Engenharia Mineral
KCl	Cloreto de potássio
HCl	Ácido clorídrico
KOH	Hidróxido de potássio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mg(OH) ⁺	Hidróxido de magnésio
Mn(OH) ⁺	Hidróxido de manganês
C _{m/m}	Concentração em massa

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de cisalhamento
F	Força
A	Área
μ	Viscosidade
v	Velocidade
y	Distância vertical
r	Distância radial
m	Índice de consistência
n	Índice de comportamento
τ_0	Tensão de escoamento inicial
τ_0^H	Tensão de escoamento inicial de Herschel – Bulkley
τ_c	Tensão de escoamento inicial de Casson
μ_B	Viscosidade de Bingham
ρ	Densidade do fluido
v	Velocidade média do fluido
D	Diâmetro do tubo
μ	Viscosidade aparente
V_T	Energia potencial de interação total
V_E	Energia de interação da dupla camada elétrica
V_w	Energia de atração de van der Waals
Re	Número de Reynolds
V	Volume
R_e	Raio efetivo do capilar
h_e	Diferença de nível
g	Aceleração da gravidade
t	Tempo
η	Viscosidade
l_e	Comprimento do capilar
$\tau_{r\theta}$	Tensão de cisalhamento
M	Torque
L	Comprimento do cilindro interno
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento

ω_1	Velocidade angular
$\bar{R}$	Raio médio
R_1	Raio do cilindro interno
R_2	Raio do cilindro externo
h	Distância entre as placas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	17
3. REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1 Reologia e sua Relevância em Tecnologia Mineral	18
3.2 Interações entre as Partículas e a Teoria DLVO Clássica	20
3.3 Fluidos Newtonianos e não-Newtonianos	23
3.4 Modelos Reológicos	24
3.5 Reologia de Polpas Minerais	26
3.6 Tipos de Viscosímetros e Reômetros	29
3.6.1 Viscosímetros Tubulares	29
3.6.2 Viscosímetros e Reômetros Rotacionais	30
3.6.2.1 Cilindros concêntricos.....	30
3.6.2.2 Cone e placa	31
3.6.2.3 Placas paralelas	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 Amostra de Minério de Ferro.....	32
4.2 Caracterização Tecnológica do Minério	33
4.3 Equipamentos e Metodologias	35
4.3.1 Reologia.....	35
4.3.2 Potencial Zeta.....	37

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 Potencial Zeta	37
5.2 Reologia e Número de Taylor	39
6. CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS.....	49
APÊNDICE A.....	54
APÊNDICE B.....	60

1. INTRODUÇÃO

O transporte hidráulico de suspensões particuladas se faz presente em diversos segmentos industriais (FANGARY, ABDEL GHANI, *et al.*, 1997); (CLEARY, HILTON e SINNOTT, 2017), sobretudo na indústria mineral, onde o minério é processado a úmido, na forma de polpas. Estas devem ser transportadas, por bombeamento a curta distância, às diversas operações unitárias de processamento mineral. Além disso, concentrados e rejeitos, também em forma de polpas e provenientes do processamento, devem ser conduzidos aos seus destinos finais. A polpa de rejeito, após desaguardamento, é conduzida ao seu local de destino. O concentrado segue para o mercado consumidor transportado principalmente por ferrovias ou por bombeamento a longas distâncias via minerodutos (RUSCONI, LAKHOUAJA e KOPUZ, 2016). Estes últimos, carecem de conhecimentos relacionados à reologia da polpa que transportam. Este cenário justifica a relevância assumida pela reologia no âmbito da indústria mineral tendo sido a principal fonte de motivação para a realização deste trabalho.

2. OBJETIVOS

No presente trabalho são propostos os seguintes objetivos:

2.1. Investigar o comportamento reológico de suspensões de minério de ferro em elevadas concentrações de sólidos. Para isso foi estudada a reologia de suspensões de minério de ferro nas concentrações de 50, 60 e 70% de sólidos em massa. Tal investigação foi conduzida em um reômetro rotacional e os dados experimentais foram ajustados pelos modelos reológicos de Ellis e Tscheuschner. Este último permitiu a determinação da tensão de escoamento;

2.2. Avaliar as melhores condições físico-químicas capazes de conferir uma reologia adequada ao transporte hidráulico de polpas de minério de ferro. O comportamento reológico das suspensões em pH natural e em $\text{pH} \approx 10,5$ foi avaliado, uma vez que a reologia de sistemas particulados é fortemente influenciada pelo estado de dispersão das partículas. Experimentos para a determinação do potencial zeta do minério foram conduzidos, tendo sido

relevantes para compreender a influência do estado de dispersão das partículas na reologia da polpa mineral.

2.3. Investigar a influência de possíveis efeitos inerciais no comportamento reológico das polpas. Tal investigação foi realizada a partir da determinação do número de Taylor correspondente à cada taxa de cisalhamento aplicada.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reologia e sua Relevância em Tecnologia Mineral

A reologia estuda o escoamento e a deformação da matéria quando a mesma é submetida a forças externas (ESHTIAGHI, MARKIS, *et al.*, 2013).

As principais grandezas reológicas de fluidos são: tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e viscosidade. A tensão de cisalhamento resulta de uma força tangencial que atua em um determinado elemento de fluido (ÁVILA e BRETAS, 2005). A taxa de cisalhamento é a deformação a qual o fluido é submetido. No caso do escoamento em dutos, a taxa de cisalhamento é definida como sendo a variação da velocidade em relação à distância radial. No que se refere à viscosidade, esta foi definida por Isaac Newton como sendo “*a resistência ao deslizamento das moléculas do fluido à ficção interna*”. Uma vez que a viscosidade representa a resistência do fluido ao escoamento, é uma propriedade inerente ao material, sendo também denominada viscosidade Newtoniana. Todavia, além de ser uma característica intrínseca do fluido, a viscosidade depende também do seu estado de escoamento. Neste caso, é denominada viscosidade aparente.

Newton foi quem primeiro estabeleceu a relação entre as grandezas reológicas, postulando que, para uma determinada classe de fluidos, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, sendo a constante de proporcionalidade definida como viscosidade (μ). Os fluidos que obedecem à relação funcional estabelecida por Newton, são denominados fluidos Newtonianos. Todos os demais que não seguem a lei de Newton são classificados como não-Newtonianos (BARNES, WALTERS e HUTTON, 1993).

Como já mencionado, a reologia é importante no beneficiamento mineral, visto que os minérios, em geral, são processados a úmido como suspensões particuladas. O dimensionamento de sistemas de transporte hidráulico demanda o conhecimento das propriedades reológicas de polpa. O emprego da clássica equação de Darcy (MARTINS e GUKOVAS, 2010) para o cálculo da perda de carga distribuída necessita da determinação do fator de atrito (f), conforme demonstrado pela Equação 1.

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{\bar{u}^2}{2g} = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (1)$$

Em que:

f é o fator de atrito;

L é a distância;

$\bar{u}$ é a velocidade média de escoamento;

Q é a vazão volumétrica;

D é o diâmetro interno do tubo;

g é a aceleração da gravidade.

O fator de atrito é calculado com base na consagrada equação de Colebrook-White (ROBAINA, 1992), definida pela Equação 2.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{k}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

Sendo:

f o fator de atrito;

Re o número de Reynolds;

k a rugosidade do tubo;

D o diâmetro interno do tubo.

Todavia, a determinação do número de Reynolds requer o conhecimento da viscosidade aparente da polpa (μ_a). Deste modo, fica demonstrada a importância da reologia para o projeto de quaisquer sistemas de bombeamento incluindo aqueles relacionados ao beneficiamento mineral.

3.2 Interações entre as Partículas e a Teoria DLVO Clássica

Pawlik e Laskowhki (1999) descreveram os três principais tipos de interações entre as partículas:

- a) Interações de natureza coloidal: resultam das interações eletrostáticas entre as partículas;
- b) Interações decorrentes do movimento Browniano: são interações fortemente influenciadas pelo movimento randômico das partículas e pelas colisões entre as elas;
- c) Interações de natureza viscosa: estão associadas à diferença entre as velocidades da partícula e do fluido (BARNES, HUTTON e WALTERS, 1989).

A teoria DLVO abrange as interações de Lifshitz - van der Waals e da dupla camada elétrica, entre as partículas.

As forças de van der Waals entre as partículas de mesma natureza em solução, são de atração e não sofrem influência da carga de superfície, dos eletrólitos e do pH. Elas dependem da natureza das partículas e da distância entre as mesmas. No que se refere ao tamanho, (KITCHENER, 1978) afirma que partículas de tamanho menores que 1 μm sofrem grande influência de forças superficiais, interagindo com forças inerciais e gravitacionais. No tocante à forma, (LINS, 2000) afirma que partículas com formas não esféricas e lamelares apresentam maiores intensidade de forças superficial em relação as partículas esféricas, pois apresentam uma relação maior superfície/massa.

A Teoria da Dupla Camada Elétrica (TDCE) também busca explicar as interações entre as partículas. Conforme a abordagem apresentada pela TDCE, a atração ou repulsão entre as partículas é influenciada pela intensidade de carga ou potencial de superfície, pH, eletrólitos em solução e distância entre partículas (LYKLEMA, 1989).

A energia potencial de interação total (V_T) entre duas partículas é a soma da energia de interação da dupla camada elétrica (V_E) e da energia de atração de Van der Waals (V_W), de acordo com a Equação 3.

$$V_T = V_E + V_W \quad (3)$$

A contribuição V_E é analisada através do potencial zeta e a componente V_W é um parâmetro característico de cada material, denominado constante de Hamaker, cuja magnitude varia entre de 10^{-20} a 10^{-19} J. Na Tabela 1 são apresentados valores da constante de Hamaker de alguns materiais.

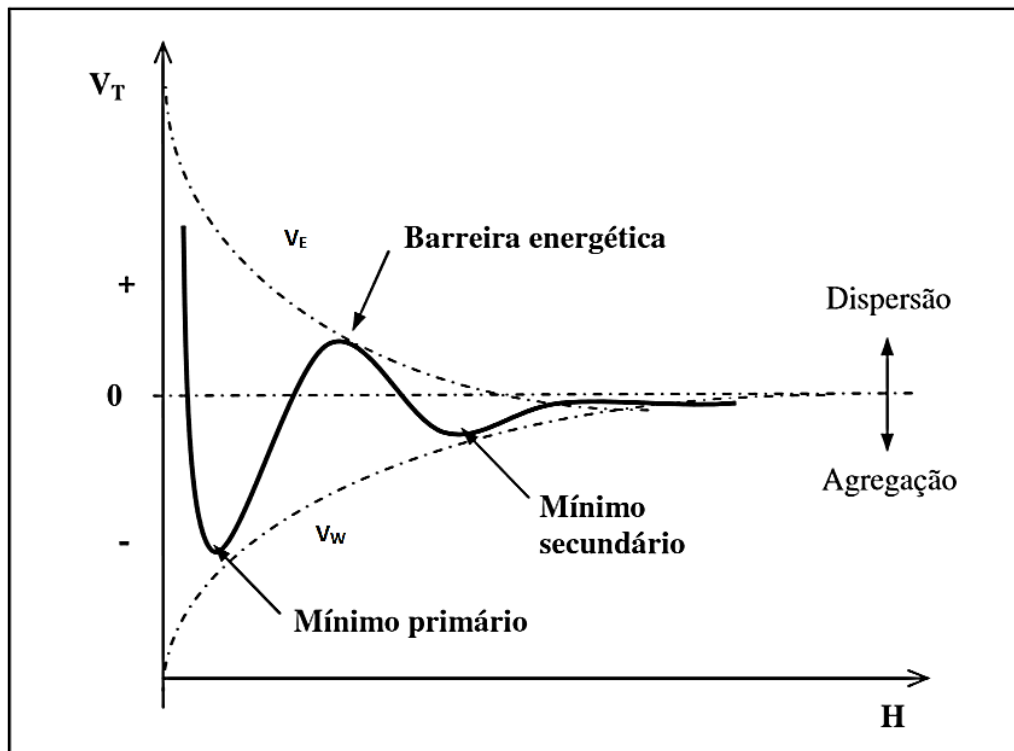
Tabela 1 - Constante de Hamaker para diferentes minerais.

Minerais naturalmente hidrofóbicos e alguns sulfetos (10^{-20}) J		Metais e Minerais Hidrofílicos (10^{-20}) J	
Teflon	3,8	Cobre	28,3
Diamante	28,3	Ouro	15,3
Grafita	27,5	Prata	39,8
Molibdenita	9,1	Anastásio	13
"Orpiment"	14	Rutilo	16,1
Realgar	12	Cassiterita	12
Enxofre	23	Ilmenita	
Estibinita	16	Cromita	14
Talco	9,1	Hematita	25
Calcopirita	3,3	Apatita	11
Galena	33	Calcita	10,1
Pirrotita	8,4	Scheelita	10
Pentlandita	3,3	Wolframita	13
Covelita	2,8	Fluorita	7,2
Bornita	7,4	Mica	10
Calcosita	21	Quartzo	8,83
Esfarelita	14	Safira	15,6
Pirita	12		
Arsenopirita	27		
"Greenockite"	15,3		

(LINS, 2000).

A Figura 1 mostra a influência da distância entre as partículas nas interações entre as mesmas. No ponto de mínimo primário as partículas estão separadas por uma distância muito pequena, o que possibilita a agregação. A barreira energética está associada à dupla camada elétrica (DCE). Quanto maior a concentração dos íons em solução maior será a compressão da DCE. No ponto de mínimo secundário, ocorre uma fraca interação entre as partículas (LYKLEMA, 1989).

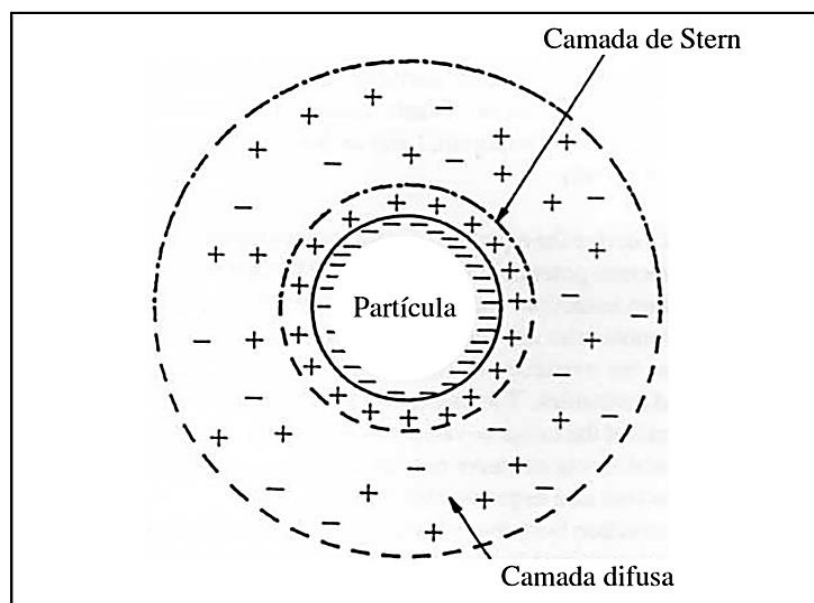
Figura 1 - Energia de interação entre duas partículas.



(BRAGANÇA, 2008)

A dupla camada é constituída por duas regiões, uma interna chamada de camada de Stern e outra difusa, mais externa, denominada camada de Gouy-Chapman, conforme apresentado na Figura 2 (KIM, 1995).

Figura 2 - Representação esquemática da dupla camada elétrica.



(KIM, 1995)

A camada interna de Stern, mais compacta, é constituída por íons de cargas opostas às da superfície do mineral. Nela predominam as forças de Van der Waals e/ou forças eletrostáticas. O potencial zeta se localiza próximo a camada de Stern, no plano de cisalhamento, onde ocorre a ruptura da camada difusa. Muito embora o potencial zeta não seja o potencial medido na superfície da partícula, fornece informações importantes sobre a carga da superfície.

3.3 Fluidos Newtonianos e não-Newtonianos

Como já mencionado, fluido Newtoniano é aquele em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, sendo a constante de proporcionalidade igual à viscosidade. Para o sistema constituído por fluido confinado entre placas paralelas a lei de Newton da viscosidade é definida de acordo com a Equação 4.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dx} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

Entretanto, no âmbito da engenharia, o sistema mais comumente verificado é o escoamento de fluidos em dutos circulares. Nestes casos, o gradiente de velocidade é expresso em função da distância radial, o que faz com que a lei de Newton seja definida de acordo com a Equação 5.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dr} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (5)$$

Sendo:

τ a tensão de cisalhamento;

μ a viscosidade;

v a velocidade;

y a distância vertical;

r a distância radial;

$\left(\frac{dv}{dy} \right)$ o gradiente de velocidade (ou a taxa de cisalhamento) para o fluido confinado entre placas paralelas;

$\left(\frac{dv}{dr} \right)$ o gradiente de velocidade (ou a taxa de cisalhamento) para o fluido escoando em dutos circulares;

Para fluidos Newtonianos, a viscosidade é constante, não sendo influenciada pela taxa nem tampouco pela tensão de cisalhamento. Entretanto, é importante mencionar que a viscosidade é dependente da temperatura e da pressão (TANNER, 1988).

Todo fluido que não obedece à lei de Newton da viscosidade é classificado como não-Newtoniano. Para esses fluidos, a relação entre a tensão e taxa de cisalhamento não é linear (VLIET e LYKLEMA, 2005). Polímeros, pastas e suspensões particuladas são exemplos de fluidos não-Newtonianos.

3.4 Modelos Reológicos

Diferentes modelos reológicos para fluidos não-Newtonianos têm sido reportados na literatura (CHHABRA e RICHARDSON, 1999); (AGWU, AKAPABIO, *et al.*, 2021); (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012). Dentre os vários modelos, os principais são apresentados na Tabela 2.

O modelo Lei da Potência foi proposto por Ostwald de Waale e seus parâmetros, m e n , são denominados índice de consistência e índice de comportamento, respectivamente. O primeiro indica a resistência que o fluido oferece ao escoamento e o segundo indica o quão próximo o fluido está do comportamento Newtoniano. Quando $n < 1$ o fluido é classificado como pseudoplástico e quando $n > 1$ o fluido é denominado dilatante. Nos fluidos pseudoplásticos, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Em relação aos fluidos dilatantes, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa.

O modelo reológico de Herschel – Bulkley difere do modelo lei da Potência pela existência da tensão de escoamento τ_0^H , a qual é definida como sendo a tensão a partir da qual tem início o escoamento do fluido. Esta mesma tensão de escoamento está contemplada no modelo de Casson.

Assim como o modelo reológico de um fluido Newtoniano, o modelo de Bingham mostra uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, todavia, este último contempla a tensão de escoamento.

Um modelo reológico mais recente foi proposto por Tscheuchner no ano de 2006 e também engloba a tensão de escoamento. O modelo de Ellis consiste de uma

“combinação” dos modelos Newtoniano e de Ostwald de Waale), tendo sido desenvolvido com o objetivo de suprir as limitações do modelo de Ostwald em taxas de cisalhamento muito baixas e consideravelmente elevadas. Na equação apresentada na Tabela 2; A, B, C e τ_0 são os parâmetros de ajuste do referido modelo.

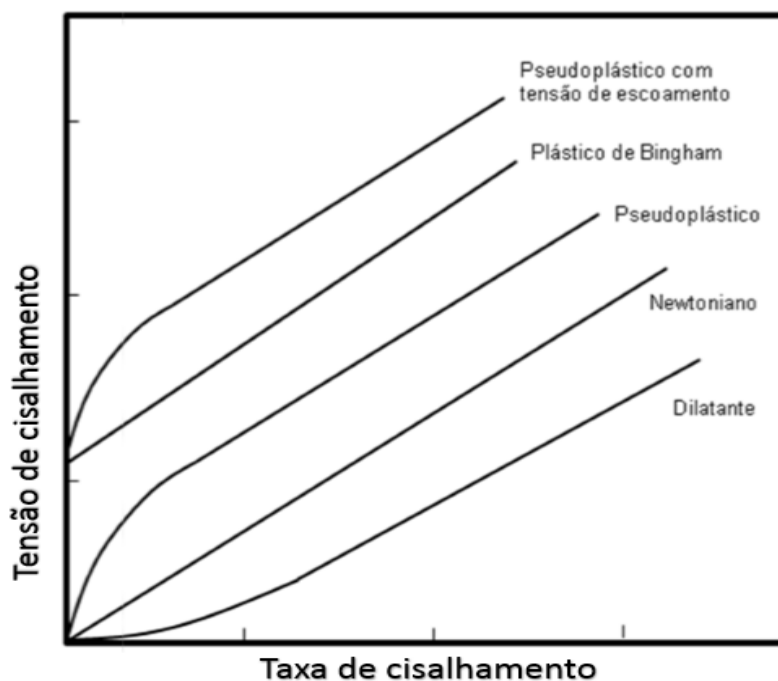
Tabela 2 - Modelos reológicos de fluidos não-Newtonianos.

Modelo Reológico	Equação Constitutiva
Lei da Potência	$\tau = m(\dot{\gamma})^n$
Herschel – Bulkley	$\tau = \tau_0^H + m(\dot{\gamma})^n$
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_C^{0,5} + (m \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$
Bingham	$\tau = \tau_0^B + \mu_B(\dot{\gamma})$
Tscheuchner	$\tau = \tau_0 + A\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}^C$
Ellis	$\tau = A\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}^C$

Na Figura 3 são apresentados os reogramas dos fluidos com comportamento independente do tempo.

Os fluidos não-Newtonianos também podem exibir comportamentos dependentes do tempo. Estes fluidos se subdividem em: tixotrópicos e reopéticos. Um fluido é tixotrópico quando sua viscosidade aparente diminui gradativamente com o tempo, quando o fluido é submetido a um cisalhamento constante. Quando a força cisalhante cessa o fluido retorna às características de origem. Por outro lado, nos fluidos reopéticos ocorre um aumento da viscosidade aparente com o tempo quando uma força cisalhante é aplicada.

Figura 3 - Reogramas referentes aos fluidos com comportamento independente do tempo.

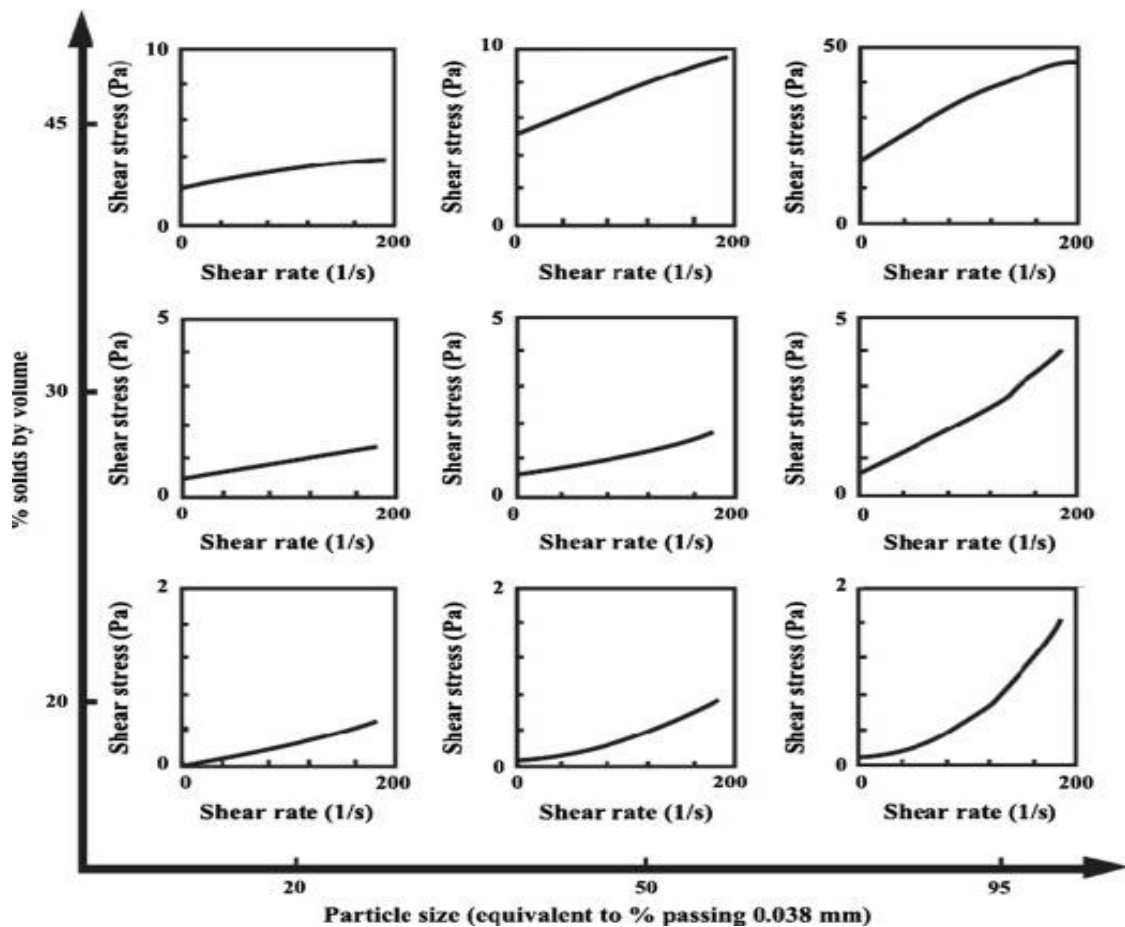


(MORAES , SILVA e MORAES, 2011)

3.5 Reologia de Polpas Minerais

Polpas minerais são sistemas muito complexos, sendo constituídas por partículas com diferentes tamanhos e formas, imersas em um fluido carreador. Por essa razão, a reologia de polpas é fortemente influenciada pelo tipo de minério, concentração de sólidos, granulometria e forma das partículas (BARNES, HUTTON e WALTERS, 1989); (PRESTIDGE, 1997). A Figura 4, oriunda do trabalho de Shi e Napier-Munn (1996), exhibe os diferentes aspectos dos reogramas, nos quais estão evidenciadas as influências da concentração de sólidos e do tamanho das partículas no comportamento reológico de suspensões minerais. Polpas com concentrações de sólidos muito baixas apresentam comportamento próximo do Newtoniano. Segundo (MEZGER, 2006), suspensões com frações volumétricas entre 0,2 e 0,4 exibem, em geral, comportamento pseudoplástico em baixas taxas de cisalhamento. Para taxas de cisalhamento médias e altas podem apresentar comportamento dilatante.

Figura 4 - Efeito da concentração de sólidos e do tamanho de partícula na reologia de suspensões particuladas



(SHI e NAPIER-MUNN, 1996)

Os mecanismos responsáveis pelos comportamentos reológicos de suspensões têm sido amplamente estudados (PETERS, MAJUMDAR e JAEGER, 2016), (GURGEN, KUSHAN e LI, 2017), visto que os mesmos ainda não foram profundamente compreendidos. De acordo com Hoffman (1972), taxas de cisalhamento baixas e moderadas permitem a interação entre as forças de atração-repulsão das partículas e as forças de cisalhamento. Tal interação possibilita o arranjo das partículas em camadas ordenadas que se deslocam mais facilmente. Esta situação oferece uma menor resistência ao escoamento e promove uma menor viscosidade, favorecendo o comportamento pseudoplástico. Em relação ao comportamento dilatante, (BOSSIS e BRADY, 1989) e (GURGEN, KUSHAN e LI, 2017) argumentam que o mesmo pode ocorrer em virtude da formação de aglomerados de partículas, denominados *clusters*, ou ainda pelo atrito e efeitos de lubrificação que ocorrem entre as

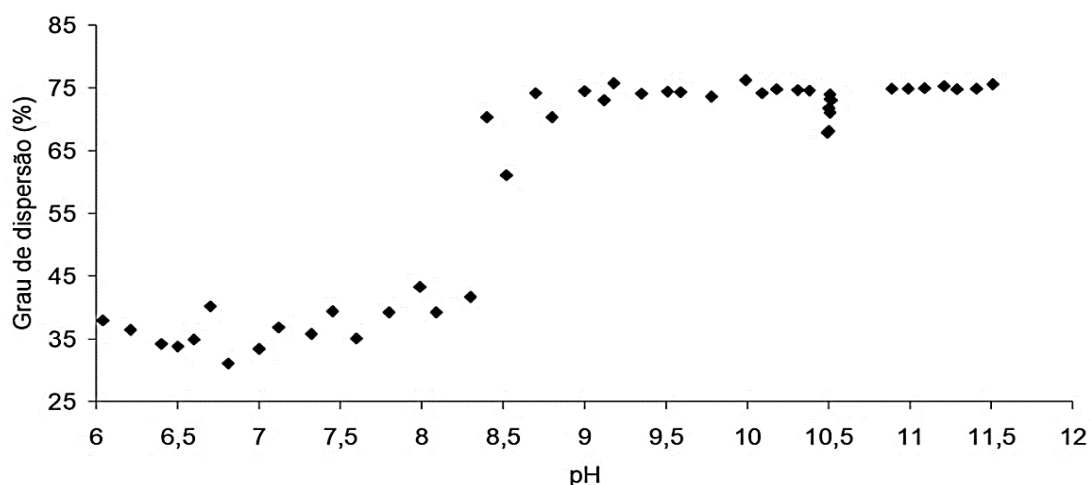
partículas. A carga superficial das partículas influencia significativamente nos estados de agregação e dispersão das partículas e, conseqüentemente, afeta o comportamento reológicos das suspensões. Em geral a carga superficial é determinada a partir do potencial zeta. No caso da hematita e do quartzo, os principais minerais presentes em minérios de ferro, os pontos de carga zero (PCZ) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Pontos de carga zero para os minerais quartzo e hematita.

Autores	Mineral	PCZ
Zhou <i>et al.</i> (2014)	Quartzo	pH = 2,4
Wood <i>et al.</i> (2017)	Quartzo	pH = 2,2
Bisco (2009)	Hematita	pH = 6,8 – 6,9
Wood <i>et al.</i> (2017)	Hematita	pH = 6,9
Engwayu e Pawlik (2020)	Hematita	pH = 6,7

Se o pH da polpa estiver próximo do PCZ das partículas, não haverá repulsão entre elas. Souza Jr (1994) investigou o grau de dispersão das partículas de minério de ferro em função do pH. Os resultados apresentados na Figura 5 revelaram que o grau de dispersão das partículas aumentou consideravelmente para valores de pH superiores a 8,5

Figura 5 - Efeito do pH no grau de dispersão de partículas de uma polpa de minério de ferro.



Adaptado de (SOUZA JR., 1994)

De fato, tal resultado é esperado uma vez que para $\text{pH} > 8,5$, as partículas de hematita e quartzo encontra-se negativas, tendo como consequência a repulsão entre elas.

3.6 Tipos de Viscosímetros e Reômetros

Os viscosímetros são dispositivos mais simples, aplicados em investigações de fluidos com comportamento independente do tempo. Por outro lado, os reômetros são equipamentos mais sofisticados e permitem investigar o comportamento reológicos de fluidos com comportamentos independente e dependente do tempo. Além disso, possibilitam realizar experimentos oscilatórios, sendo estes muito relevantes para a determinação da tensão de escoamento.

3.6.1 Viscosímetros Tubulares

Nestes dispositivos a viscosidade é determinada a partir do tempo de escoamento do fluido, quando o mesmo é submetido à ação da gravidade. No Neste tipo de dispositivo, como o clássico viscosímetro capilar de Ostwald, a viscosidade é determinada a partir das dimensões do equipamento, da velocidade e do tempo de escoamento do fluido, de acordo com a Equação 6 (ALMEIDA, SILVA, *et al.*, 1995).

$$V = \frac{\pi R_e^4 \rho h_e g}{8 \eta l_e} \cdot t \quad (6)$$

Onde:

V é o volume;

R_e é o raio efetivo do capilar;

ρ é a massa específica do fluido;

h_e é a diferença de nível;

g é a aceleração da gravidade;

t é o tempo;

η é a viscosidade;

l_e é o comprimento do capilar.

3.6.2 Viscosímetros e Reômetros Rotacionais

A concepção desses equipamentos baseou-se nos movimentos circulares e suas respectivas variáveis tais como: rotação, velocidade angular e torque. Estes dispositivos operam com diferentes sensores, dentre os quais se destacam os cilindros concêntricos, cone-placa, placas paralelas e vane. Uma breve descrição de cada um destes sensores é apresentada nas seções subsequentes.

3.6.2.1 Cilindros concêntricos

Esta geometria é constituída por dois cilindros coaxiais, na qual o fluido é inserido na região anular e submetido ao movimento rotacional. No sistema Searle, o cilindro interno é rotacionado e o externo permanece fixo. O sistema Couette é caracterizado pela rotação do cilindro externo, permanecendo fixo o cilindro interno (FONTANA, 2018). Nestes dispositivos, a tensão e taxa de cisalhamento são determinadas a partir das Equações 7 e 8, respectivamente.

$$\tau_{r\theta} = \frac{M}{2\pi R_1^2 L} \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega_1 \bar{R}}{R_2 - R_1} \quad (8)$$

Sendo:

$\tau_{r\theta}$ a tensão de cisalhamento;

M o torque;

L o comprimento do cilindro interno;

$\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento;

ω_1 a velocidade angular;

$\bar{R}$ o raio médio;

R_1 o raio do cilindro interno;

R_2 o raio do cilindro externo.

Altas rotações podem aumentar os efeitos da força centrífuga e favorecer o surgimento dos vórtices de Taylor (MEZGER, 2006); (SHI, 2016). Estes efeitos podem afetar a acurácia das medidas. Para um sistema do tipo cilindros

concêntricos que opera com sistema Searle, a instabilidade do escoamento pode ser aferida a partir do número de Taylor (Ta), definido como sendo a razão entre as forças centrífugas e as forças viscosas, o qual é expresso a partir da Equação 9 (SHI, 2016).

$$Ta = \frac{(R_e - R_i)u_{ci}\rho}{\eta} \sqrt{\frac{R_e - R_i}{R_i}} \quad (9)$$

A velocidade periférica u_i , expressa em m/s, é determinada de acordo com a Equação 10.

$$u_{ci} = \Omega R_i = 2\pi N R_i = \pi D_i N \quad (10)$$

Sendo:

R_e o raio do cilindro externo;

R_i o raio do cilindro interno;

u_{ci} a velocidade periférica do cilindro interno;

ρ a massa específica do fluido;

η a viscosidade aparente do fluido;

Ω a velocidade angular do cilindro interno;

N a rotação do cilindro interno;

D_i o diâmetro do cilindro interno.

Segundo Shi (2016), os regimes de escoamento em um reômetro com geometrias do tipo cilindros concêntricos, podem ser classificados de acordo com a magnitude do número de Taylor em:

- i. Regime Laminar quando $Ta < 41,3$;
- ii. Regime Laminar com a presença de vórtices quando $41,3 < Ta < 400$;
- iii. Regime Turbulento quando $Ta > 400$.

3.6.2.2 Cone e placa

A geometria cone e placa é constituída por uma placa fixa sobre a qual opera um cone em movimento rotacional. A tensão e a taxa de cisalhamento são determinadas a partir das Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^2} \quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\tan \beta} \quad (12)$$

Sendo:

M o torque;

R o raio do cone;

ω a velocidade angular;

B o ângulo do cone.

3.6.2.3 Placas paralelas

Esta geometria é caracterizada pela existência de uma placa fixa e outra móvel, entre as quais o fluido é inserido. Esta geometria é indicada para investigações reológicas de suspensões e emulsões (FONTANA, 2018). Nesta geometria, a tensão e a taxa de cisalhamento são determinadas a partir das Equações 13 e 14, respectivamente.

$$\tau = \frac{M}{2\pi R^3} \left(3 + \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}} \right) \quad (13)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R\omega}{h} \quad (14)$$

Sendo h a distância entre as placas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostra de Minério de Ferro

No presente trabalho os estudos foram realizados com o minério de ferro proveniente de Carajás, fornecido pela empresa Vale S.A. Após recebimento da amostra no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Química de Interfaces (LFQI/EPUSP), procedeu-se a preparação e homogeneização do mesmo em pilha longitudinal, conforme ilustrado na Figura 6. Uma alíquota representativa do minério homogeneizado foi obtida para a caracterização tecnológica do mesmo que contemplou: granulometria, mineralogia, análise química e picnometria. Uma segunda alíquota de 5Kg foi obtida, a qual foi homogeneizada em pilha e separada em alíquotas menores (Figura 7), para os experimentos de reologia.

Figura 6 - Pilha longitudinal do minério de ferro de Carajás.



Figura 7 - Homogeneização da amostra para realização dos experimentos de reometria.



Para a realização dos experimentos de potencial zeta, uma alíquota da amostra foi pulverizada de modo a se obter uma granulometria inferior a 20 μ m.

4.2 Caracterização Tecnológica do Minério

A mineralogia qualitativa, a análise química e a granulometria foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo (LCT/PMI/EPUSP). Os resultados da análise mineralógica, realizada por difração de raios X (método do pó), revelaram a presença dos minerais hematita, goethita, quartzo, magnetita, silimanita e caulinita.

A análise química foi realizada por fluorescência de raios X, em um espectrômetro Malvern Panalytical modelo Zetium. Os teores dos elementos são apresentados na Tabela 4.

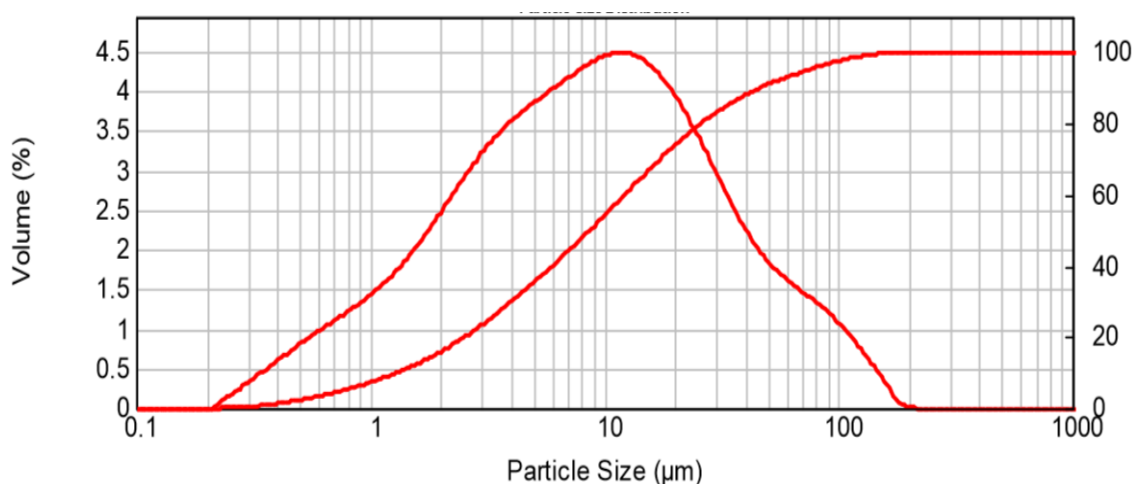
Tabela 4 - Resultado da análise química do minério de Carajás.

Elemento	Teor (%)
Fe	58,90
SiO ₂	3,55
Al ₂ O ₃	4,93
P	0,09
Mn	0,45
TiO ₂	0,39
CaO	< 0,10
MgO	< 0,10
PF	4,96

A análise granulométrica foi realizada no equipamento Malvern Panalytical e seu resultado é reportado na Figura 8. Os resultados revelaram um $d_{90} = 46,072 \mu\text{m}$ e um $d_{50} = 8,635 \mu\text{m}$.

A determinação da massa específica das partículas foi feita por picnometria a gás nitrogênio. Para tal objetivo utilizou-se um picnômetro fabricado pela Quantachrome Instruments modelo 1200eT, instalado no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Físico-Química de Interfaces do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (LFQI/PMI/EPUSP). A análise foi realizada na temperatura de 21,8°C e a massa específica do minério determinada foi de 4,8046 g/cm³.

Figura 8 - Caracterização granulométrica do minério de Carajás.



4.3 Equipamentos e Metodologias

4.3.1 Reologia

Os experimentos de reologia foram realizados em um reômetro rotacional Anton Paar, modelo MCR 92, equipado com o software RheoCompas. A geometria utilizada nos experimentos foi do tipo cilindros concêntricos (código CC39). Os cilindros interno e externo exibem diâmetros de 38,716 mm e 42,010 mm, respectivamente. A altura do cilindro interno é 60,014 mm e o ângulo da superfície cônica é de 120°. Para a geometria CC39, utilizada no presente trabalho, a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento determinadas a partir das são Equações 15 e 16, respectivamente.

$$\dot{\gamma} = \omega \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} \frac{T'}{2\pi L R_i^2 C_L} \quad (16)$$

Sendo:

ω a velocidade angular;

δ a razão entre os raios dos cilindros externo e interno;

T' o torque;

L a altura do cilindro interno;

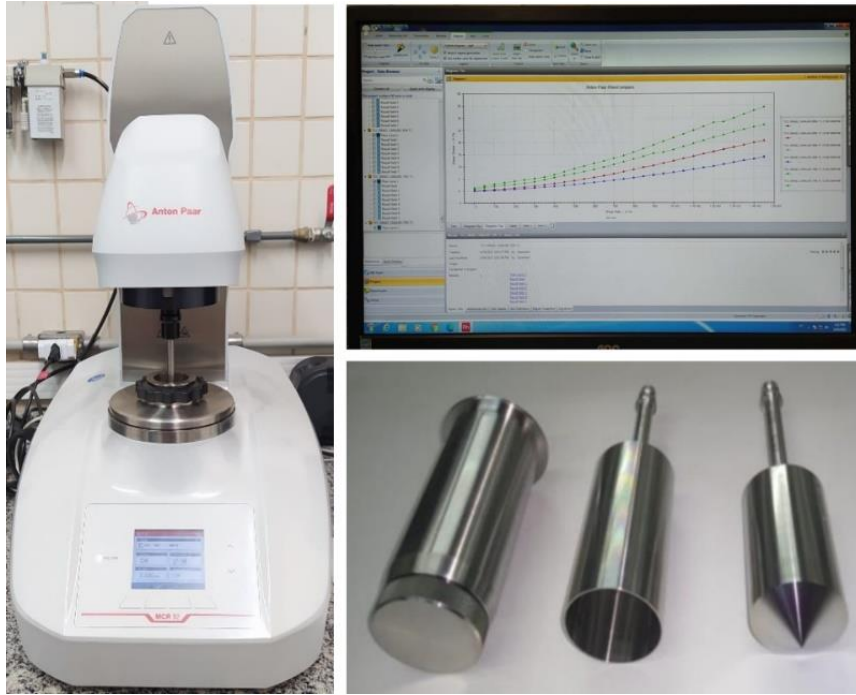
R_i o raio do cilindro interno;

C_L o fator de correção.

A Figura 9 apresenta o reômetro Anton Paar e as geometrias empregadas no presente trabalho.

As investigações reológicas foram conduzidas com polpas do minério de ferro de Carajás preparadas nas concentrações de 50%, 60% e 70% de sólidos em massa. O volume de água e a massa de minério, necessários à preparação das polpas, foram determinados a partir das Equações 17 e 18, respectivamente.

Figura 9 - Reômetro Anton Paar e geometrias do tipo cilindros concêntricos e cilindros com duplo gap.



$$V_a = \frac{\rho_s V_t (C_s - 1)}{(\rho_s C_s - \rho_a C_s - \rho_s)} \quad (17)$$

$$m_s = \frac{(\rho_s \rho_a V_t C_s)}{[\rho_s (1 - C_s) + \rho_a C_s]} \quad (18)$$

Todos os experimentos de reologia foram realizados na temperatura de 22°C. Uma etapa prévia de agitação, durante dois minutos a uma taxa de cisalhamento de 1450 s⁻¹, foi necessária para manter as partículas homogeneamente suspensas. Para cada taxa de cisalhamento aplicada foram obtidas a tensão de cisalhamento e a viscosidade aparente das suspensões minerais. Os testes tiveram início a partir da taxa de 1450s⁻¹, sendo esta reduzida gradativamente até o valor de 1s⁻¹. O software RheoCompas possibilitou o ajuste dos dados experimentais de tensão de cisalhamento em função da taxa a partir dos modelos reológicos de Ellis e Tscheuschner.

A partir dos dados de rotação e das dimensões da geometria utilizada (CC39), determinou-se o número de Taylor para cada condição experimental.

4.3.2 Potencial Zeta

A determinação do potencial zeta do minério foi realizada através da mobilidade eletroforética. Os experimentos foram conduzidos no equipamento Zetasizer modelo nano ZS90, fabricado pela Malvern Panalytical, instalado no LFQI, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Equipamento Zetasizer, monitor e cubeta



Uma solução de KCl numa concentração de 10^{-3} mol/L foi utilizada para garantir a força iônica adequada e soluções de HCl e KOH foram empregadas no ajuste do pH.

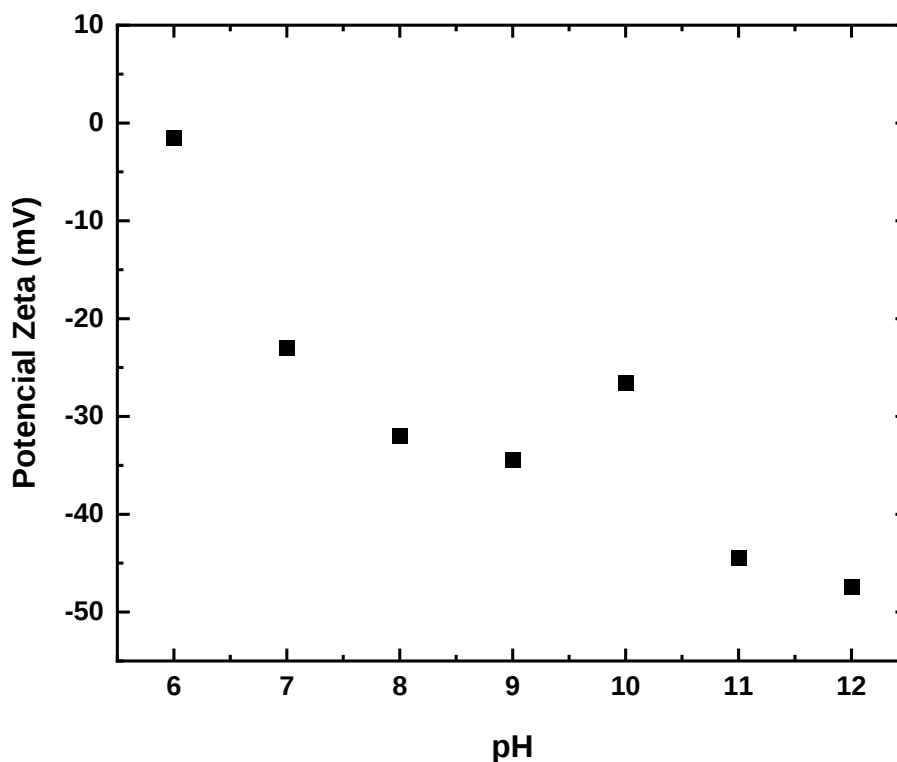
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Potencial Zeta

Os resultados de potencial zeta do minério de ferro são apresentados na Figura 11. É fundamental mencionar que, muito embora a investigação do potencial zeta seja realizada para minerais puros, o minério em questão é constituído predominantemente por hematita. Portanto, será o comportamento deste mineral que efetivamente irá influenciar na reologia da polpa. Os resultados mostram que o potencial zeta se torna cada vez mais negativo com o aumento do pH,

exceto em pH = 10. O aumento do potencial zeta neste pH se deve à presença do magnésio e do manganês no minério.

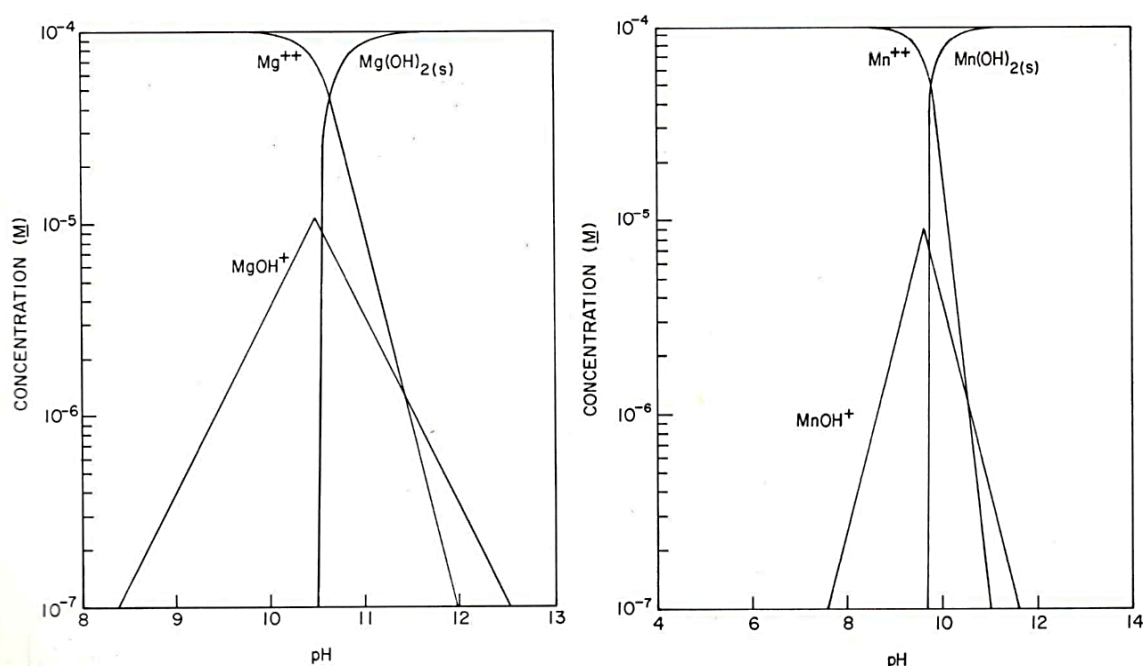
Figura 11 - Potencial zeta do minério de ferro de Carajás em função do pH.



O diagrama de especiação dos íons Mg^{2+} e Mn^{2+} apresentados na Figura 12, mostram que em pH~10 ocorre um pico associado à presença dos hidroxocomplexos $Mg(OH)^+$ e também $Mn(OH)^+$. Estas espécies são capazes de diminuir a magnitude do potencial zeta e, no caso de altas concentrações, podem até reverter a carga dos minerais hematita e quartzo de positiva para negativa.

Para valores de pH próximos de 6,0 o potencial zeta da hematita se aproxima de zero, indicando desta forma a proximidade do ponto de carga zero (PCZ). De fato, a literatura indica que o PCZ da hematita ocorre em valores de pH próximos de 7, conforme reportado na Tabela 3. No presente trabalho, o PCZ da hematita em pH próximo de 6 certamente sofre influência da presença do quartzo, cujo PCZ ocorre em valores de pH próximos de 2, conforme apresentado na Tabela 3.

Figura 12 - Diagrama de especiação dos íons Mg^{2+} e Mn^{2+} .



Adaptado, (CRUZ, 2015)

5.2 Reologia e Número de Taylor

Os resultados da tensão de cisalhamento e viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as suspensões de minério de ferro são apresentados nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Os resultados reológicos mostraram que as suspensões a 50% de sólidos em massa apresentaram comportamento dilatante nas condições experimentais estudadas. Por outro lado, as polpas a 60 e 70% de sólidos em massa exibiram comportamento pseudoplástico em baixas taxas de cisalhamento e dilatante em taxas mais elevadas. No caso específico da polpa a 60% de sólidos e $pH=6,7$, o comportamento pseudoplástico ocorreu na faixa de cisalhamento de $51s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151s^{-1}$ e dilatante em $151s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450 s^{-1}$. Para a suspensão a 60% de sólidos e $pH = 10,3$, o comportamento pseudoplástico se fez presente em $51s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 101s^{-1}$ e dilatante nas taxas acima de $101s^{-1}$. Em relação às polpas a 70% de sólidos, em $pH = 6,5$ as características pseudoplásticas ocorreram em $51s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 301s^{-1}$ e as dilatantes em $301s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450$. Nesta mesma concentração de 70% de sólidos e $pH = 10,6$, o caráter pseudoplástico se fez presente em $51s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 151s^{-1}$ e o dilatante em $151s^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450 s^{-1}$. Em taxas de cisalhamento mais baixas pode ter ocorrido a estratificação das partículas e, por conseguinte, o fluido intersticial escoar mais facilmente. Tal situação pode explicar a ocorrência do comportamento

pseudoplástico. No que se refere ao comportamento dilatante exibido pelas suspensões, alguns autores (BOSSIS e BRADY, 1989) atribuem tal comportamento em taxas de cisalhamento mais elevadas à formação de *hidroclusters*, ou seja, aglomerados de partículas que oferecem maior resistência ao escoamento. Outros autores (GURGEN, KUSHAN e LI, 2017), no entanto, argumentam que o comportamento dilatante pode ocorrer em decorrência do atrito e lubrificação entre as partículas.

No que se refere à influência da concentração de sólidos na reologia, os resultados mostram que a viscosidade das suspensões aumenta com o aumento da concentração tanto em pH natural como em pH alcalino. Evidentemente, a presença de sólidos particulados aumenta a resistência ao escoamento e, conseqüentemente, eleva a viscosidade da polpa.

A partir dos resultados, observa-se também que na concentração de 70% de sólidos em massa, a polpa com pH = 6,5 exibiu maiores valores de viscosidade em relação à polpa de mesma concentração com pH = 10,6. É fundamental destacar que neste valor de pH mais elevado, as partículas de hematita estão consideravelmente negativas, conforme revelam os resultados de potencial zeta exibidos na Figura 11. Portanto, ocorrerá uma repulsão entre as partículas e a consequente dispersão entre elas. Estando as partículas mais dispersas, haverá uma menor resistência ao escoamento em virtude do fluxo do fluido carreador ser favorecido pelo estado de dispersão. O efeito imediato, portanto, será uma menor viscosidade exibida pela polpa. Por outro lado, na polpa a 70% de sólidos e pH = 6,5, não haverá repulsão considerável entre as partículas de hematita, uma vez que este pH está próximo do ponto de carga zero do mineral.

No que se refere à repulsão das partículas de quartzo, muito embora as partículas de quartzo possam estar negativas em pH = 6,5, o minério é constituído predominantemente por hematita, de modo que será o estado de dispersão das partículas do mineral portador de ferro que irá influenciar o comportamento reológico da polpa.

Figura 13 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para as suspensões de minério de ferro.

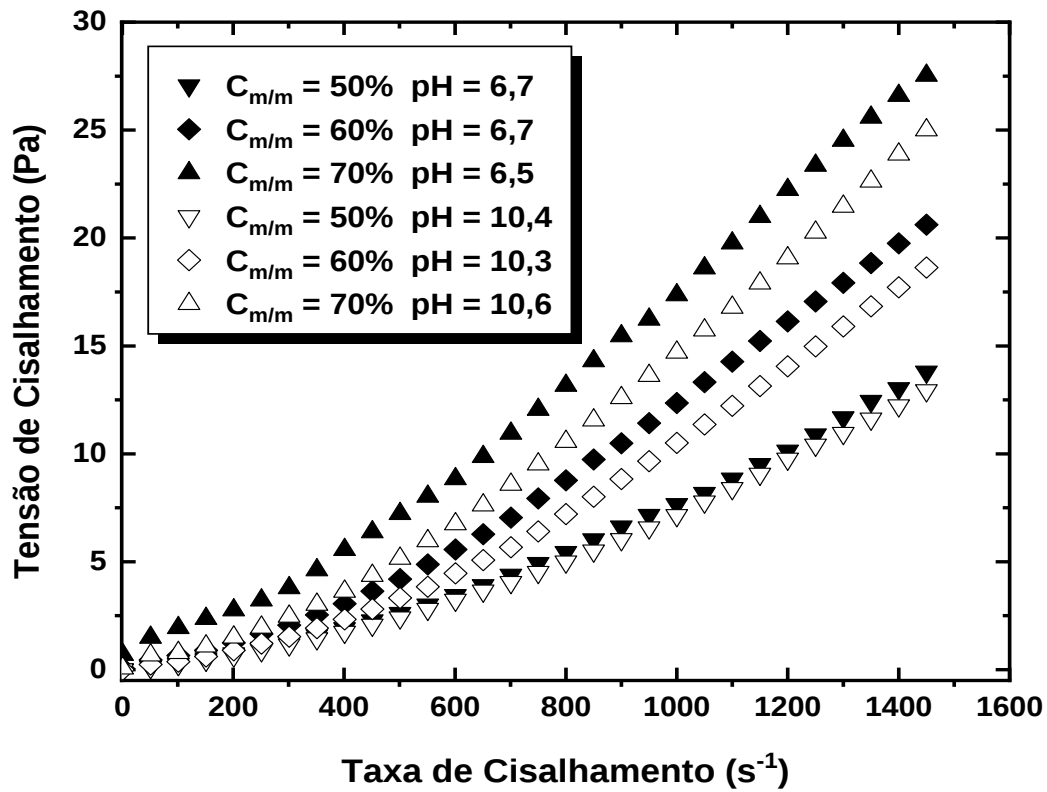
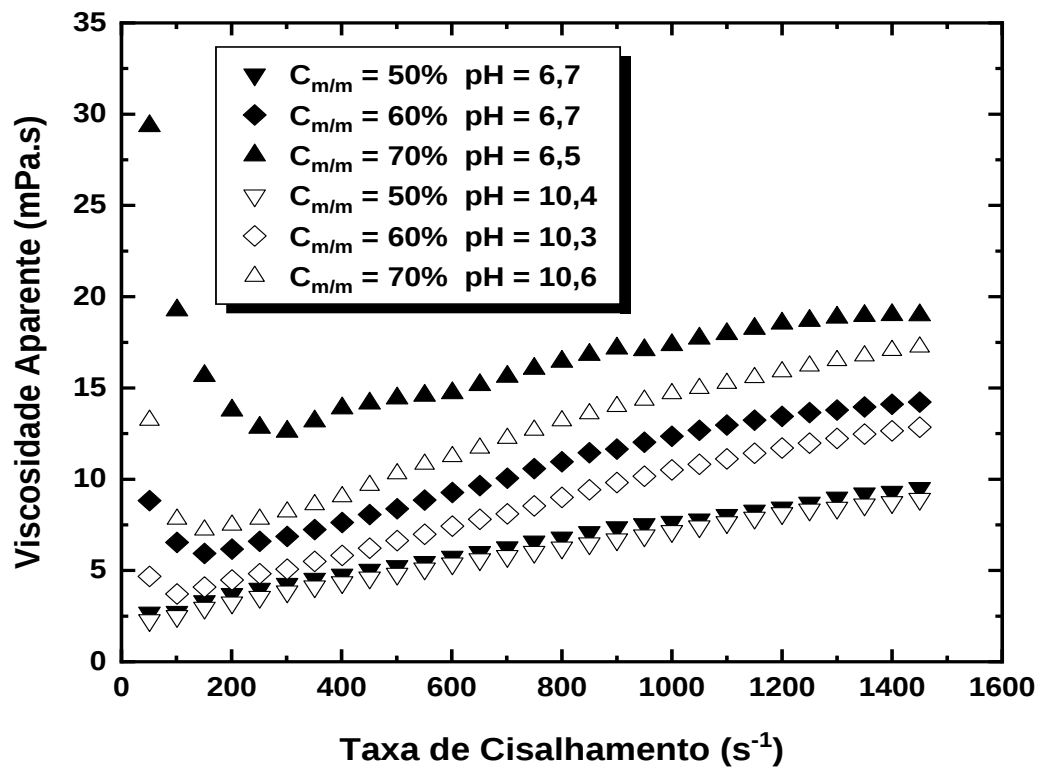


Figura 14 - Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as suspensões de minério de ferro.



Portanto, para a polpa a 70% de sólidos e $\text{pH} = 6,5$ a polpa exibirá uma maior viscosidade em relação à mesma suspensão com pH alcalino. O mesmo comportamento é verificado para as suspensões a 60% de sólidos em massa, ou seja, a viscosidade da polpa nesta concentração e $\text{pH} = 6,7$ é superior à viscosidade de polpa a 60% de sólidos e $\text{pH} = 10,3$.

Diferentemente das suspensões a 70% e 60% de sólidos em massa, para a polpa a 50% de sólidos o pH não exerce a mesma influência no comportamento reológico. Os reogramas apresentados nas Figuras 13 e 14, para as suspensões a 50% de sólidos correspondentes aos valores de pH iguais a 6,7 e 10,4, são muito próximos. Em concentrações de sólidos mais elevadas (70% e 60% de sólidos em massa), as partículas estão muito próximas, os efeitos inerciais são menores e a influência das forças de superfície é mais significativa. Por essa razão a carga de superfície terá influência no estado de dispersão das partículas. Por outro lado, em concentrações de sólidos menores, como é o caso das suspensões a 50% de sólidos, os efeitos inerciais predominam em relação às forças de superfície, de modo que estas não influenciam efetivamente no estado de dispersão. Por essa razão, as curvas da viscosidade correspondentes às suspensões a 50% de sólidos em valores de pH iguais a 6,7 e 10,4 são muito próximas, conforme se observa na Figura 14.

Os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento ($1\text{s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1450\text{ s}^{-1}$) foram ajustados satisfatoriamente a partir dos modelos reológicos de Ellis e Tscheuschner conforme apresentado na Tabela 5. É importante mencionar que o transporte hidráulico de polpas minerais requer o conhecimento da tensão de escoamento (*yield stress*) que corresponde à tensão mínima requerida para o escoamento do fluido, e também no conhecimento do comportamento do fluido ao longo de uma taxa de cisalhamento.

Por essa razão o modelo de Tscheuschner foi utilizado em substituição aos modelos de Bingham e Herschel – Bulkley, visto que estes últimos são empregados para taxas mais baixas de cisalhamento e uma faixa mais restrita de valores. No presente trabalho, taxas mais elevadas foram aplicadas a fim de evitar a sedimentação das partículas. A Tabela 5 mostra que para as polpas a 50, 60 e 70% de sólidos em pH natural, os valores da tensão de escoamento foram 0,0095, 0,0906 e 0,8061Pa, respectivamente. A magnitude da referida

tensão aumenta com o aumento da concentração de sólidos. De fato, quanto maior a concentração de sólidos, maior deverá ser a tensão requerida para fazer a polpa escoar. Para as polpas a 50, 60 e 70% de sólidos em pH alcalino a tensão de escoamento exibiu valores de 0,0077, 0,0128 e 0,0869Pa, respectivamente.

Devido o modelo de Ellis possuir melhor índice de correlação (0,99, para todas as concentrações), ele representa melhor matematicamente o comportamento do fluido ao longo de uma taxa de cisalhamento. O modelo de Ellis, trata-se de uma combinação de dois modelos (Newtoniano e Modelo de Ostwald e de Waale), na qual corrige a deficiência da lei da potência por não considerar valores de viscosidade em taxa de cisalhamento zero e infinita. Na Tabela 2, descreve o modelo de Ellis, na qual sendo o índice (C) que descreve a intensidade do comportamento dilatante da polpa para cada concentração. A Tabela 5, ilustra que quanto maior a concentração da polpa, maior o índice (C), ou seja, maior o comportamento dilatante a polpa, tanto para as concentrações do pH natural como o pH alcalino. Ao alcalinizar o pH das concentrações, o comportamento dilatante diminuiu, sendo que, em pH natural, o valor do índice C: 1,98, 2,33 e 3,24 para as devidas concentrações de 50, 60 e 70%, respectivamente, mudaram para 1,80, 2,20 e 2,37. A partir destes resultados, observa-se que o estado de dispersão também influenciará na tensão de escoamento e no comportamento da polpa. De fato, com as partículas mais dispersas, o fluxo do fluido carreador é favorecido, o que requer uma tensão de cisalhamento menor que seja capaz de iniciar o escoamento do fluido, e a melhor fluidez da polpa ao longo do transporte hidráulico.

Tabela 5 - Modelos reológicos obtidos para as suspensões preparadas com o minério de ferro de Carajás.

C _{m/m} (%)	pH	Ellis	Tscheuschner
50	6,7	$\tau = 0,0026\dot{\gamma} + 5,50E^{-6}\dot{\gamma}^{1,986}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,0095 + 0,1920\dot{\gamma} - 0,1981\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,95
60	6,7	$\tau = 0,0062\dot{\gamma} + 5,68E^{-7}\dot{\gamma}^{2,332}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,0906 + 0,2965\dot{\gamma} - 0,3046\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,96
70	6,5	$\tau = 0,0144\dot{\gamma} + 4,67E^{-10}\dot{\gamma}^{3,241}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,8061 + 0,3808\dot{\gamma} - 0,3907\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,99
50	10,6	$\tau = 0,00176\dot{\gamma} + 2,05E^{-5}\dot{\gamma}^{1,807}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,0077 + 0,1815\dot{\gamma} - 0,1874\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,94
60	10,3	$\tau = 0,00378\dot{\gamma} + 1,51E^{-6}\dot{\gamma}^{2,208}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,0128 + 0,2564\dot{\gamma} - 0,2654\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,92
70	10,4	$\tau = 0,00765\dot{\gamma} + 4,70E^{-7}\dot{\gamma}^{2,380}$ R ² = 0,99	$\tau = 0,0869 + 0,3467\dot{\gamma} - 0,3571\dot{\gamma}^{0,99}$ R ² = 0,96

Os resultados do número de Taylor para as polpas de minério de ferro em pH natural e alcalino são apresentados nas Figuras 15 e 16, respectivamente. Em relação aos resultados relacionados ao pH natural e apresentados na Figura 15, as maiores magnitudes de Taylor verificadas nas concentrações de 50, 60 e 70% de sólidos foram 183,25, 141,09 e 124,45, respectivamente. Deste modo, conclui-se que regimes puramente laminares ocorreram até $Ta < 41,3$ e regimes laminares com a presença de vórtices se verificaram a partir de 41,3 até os valores máximo supracitados. Para os experimentos realizados em pH alcalino, cujos resultados são reportados na Figura 16, os maiores valores de Ta para as concentrações de 50, 60 e 70% de sólidos foram 195,55, 156,15 e 137,03, respectivamente. Portanto, regimes puramente laminares e laminares com vórtices também ocorreram.

Figura 15 - Número de Taylor em função da taxa de cisalhamento para as suspensões de minério de ferro em pH natural.

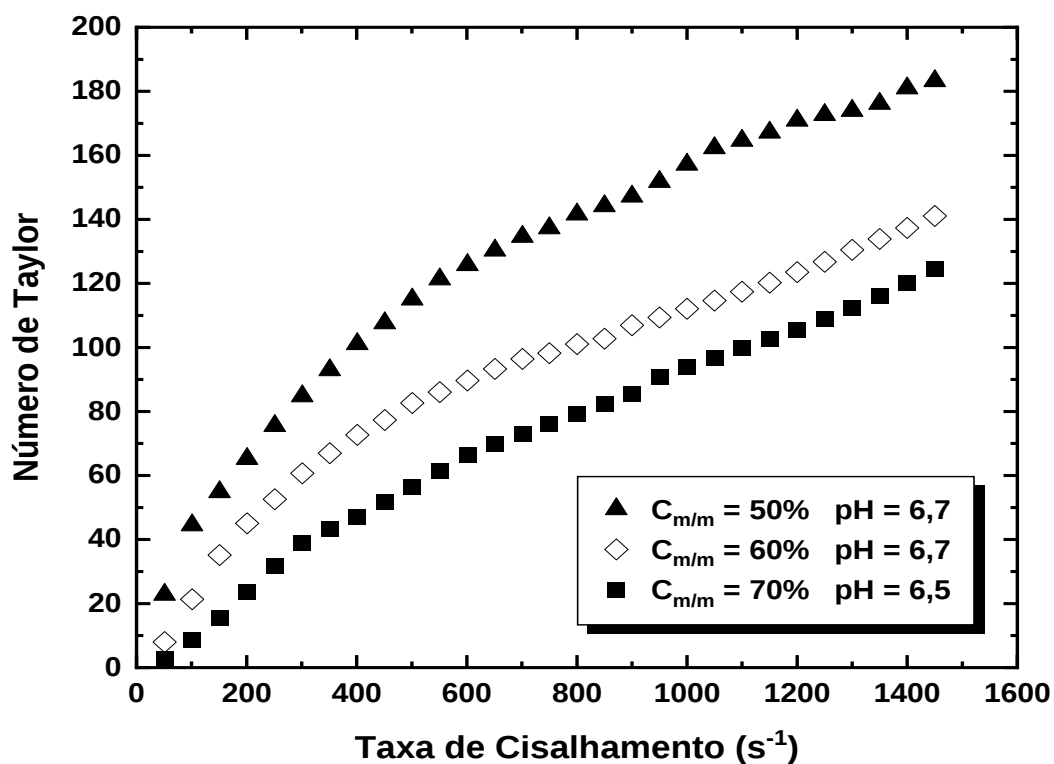
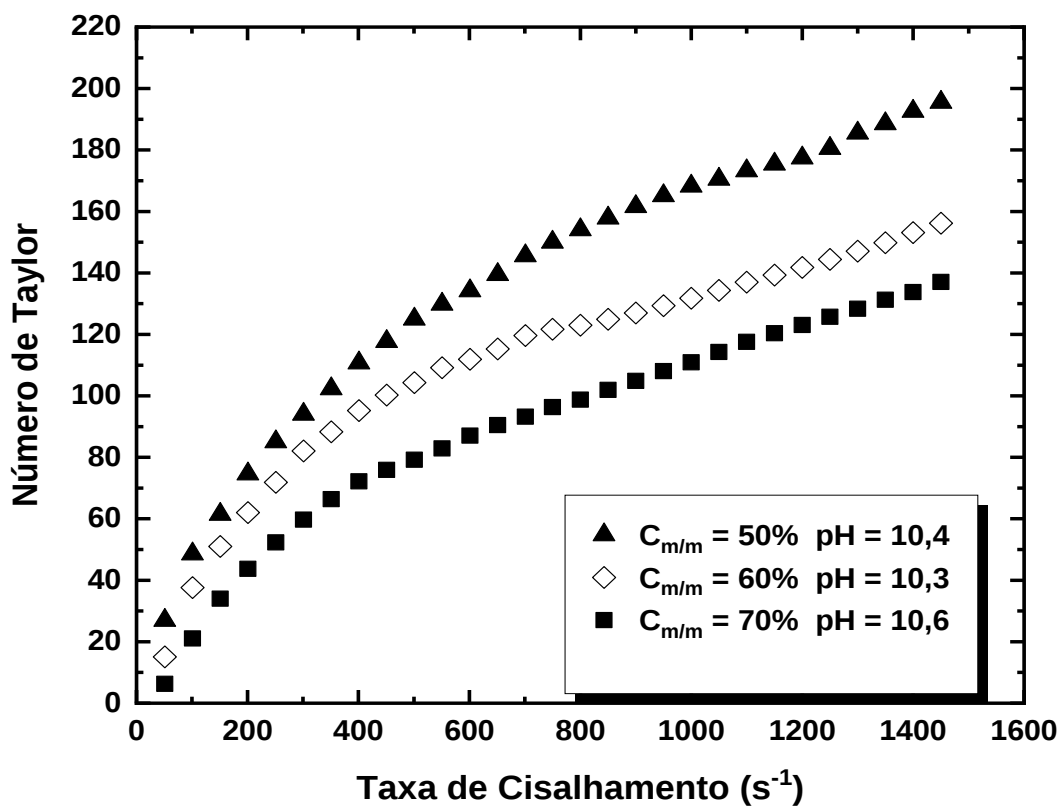


Figura 16 - Número de Taylor em função da taxa de cisalhamento para as suspensões de minério de ferro em pH alcalino.



A utilização de taxas de cisalhamento menores que evitariam ou minimizariam o surgimento dos vórtices seria impraticável em virtude da forte tendência de sedimentação das partículas. Das Figuras 15 e 16 observa-se também que os valores de Taylor aumentam com a diminuição da concentração de sólidos. De fato, para uma mesma taxa, quanto menor a população de partículas, maiores serão os efeitos inerciais, os fluxos secundários e os vórtices de Taylor.

Esta discussão corrobora os resultados de reologia referentes às polpas na concentração de 50% de sólidos, cujos reogramas são muito próximos nos dois valores de pH investigados. Conforme os resultados do número de Taylor indicam, na concentração de 50% de sólidos os efeitos inerciais e os fluxos secundários são mais significativos e predominam em relação às forças de superfície.

Os resultados de potencial zeta aliados ao comportamento dos reogramas e aos valores do número de Taylor obtidos, permitem concluir que as condições de reologia mais favoráveis ao transporte hidráulico de polpas de minérios de ferro em concentrações de sólidos elevadas (50, 60 e 70% de sólidos) ocorrem em valores de pH próximos de 10,5.

6. CONCLUSÕES

No âmbito da reologia de polpas minerais e em conformidade com os objetivos do presente trabalho, é possível concluir que:

a) A reologia de polpas minerais é de grande relevância em tratamento de minérios visto que o mesmo, em geral, é conduzido a úmido, razão pela qual o transporte hidráulico se faz presente, seja por meio de bombeamento a curta distância, seja através do bombeamento a longas distâncias por minerodutos;

Foi possível determinar o comportamento reológico das suspensões de minério de ferro em pH natural e em pH alcalino. Os resultados revelaram que as suspensões a 50% de sólidos em massa apresentaram comportamento dilatante nas condições experimentais estudadas. As polpas a 60 e 70% de sólidos em massa exibiram comportamento pseudoplástico em baixas taxas de cisalhamento e dilatante em taxas mais elevadas. Em taxas de cisalhamento mais baixas muito provavelmente ocorreu a estratificação das partículas, que

tende a favorecer o fluxo do fluido intersticial. Esta situação pode explicar a ocorrência do comportamento pseudoplástico. Por outro lado, o comportamento dilatante apresentado pelas suspensões em taxas de cisalhamento mais elevadas, pode ser atribuído à formação dos *hidroclusters* e/ou em decorrência dos efeitos de atrito e lubrificação entre as partículas (BOSSIS, BRADY, 1989; (GURGEN, KUSHAN e LI, 2017).

b) No que se refere à influência do pH, os resultados mostraram que em pH natural, a viscosidade das suspensões aumenta com o aumento da concentração de sólidos. O mesmo comportamento foi observado em pH alcalino. De fato, o aumento da população de partículas implica em uma maior resistência ao escoamento. Utilizando o modelo de Ellis, pode contemplar a alteração da intensidade do comportamento dilatante, conforme a variação da concentração da polpa e da variação do pH para um pH alcalino. Para as polpas de 50, 60 e 70% de sólidos em pH natural, os do índice C (intensidade do comportamento dilatante) foram 1,986, 2,332 e 3,241, respectivamente e para pH alcalino em concentração de sólidos de 50, 60 e 70%, os valores do índice C, foram 1,807, 2,209 e 2,380, respectivamente; assim, as polpas de minério de ferro em um pH mais alcalino, escoam-se com maior fluidez sendo assim, menos viscosas. As investigações permitiram determinar também a tensão de escoamento das suspensões a partir do modelo reológico de Tscheuschner. Para as polpas a 50, 60 e 70% de sólidos em pH natural, os valores da tensão de escoamento foram 0,0095, 0,0906 e 0,8061Pa, respectivamente. Em relação às suspensões preparadas a 50, 60 e 70% de sólidos em pH alcalino a tensão de escoamento exibiu valores de 0,0077, 0,0128 e 0,0869Pa, respectivamente. Deste modo, foi possível cumprir o primeiro objetivo deste trabalho.

c) A investigação das condições físico-químicas, que fornecem um comportamento reológico amigável ao transporte hidráulico de minérios, foi conduzida a partir de experimentos para determinação do potencial zeta do minério de ferro em função do pH. Os resultados mostraram que o potencial zeta apresentou valores cada vez mais negativos com o aumento do pH, exceto em pH = 10, no qual se verificou um aumento. Este comportamento peculiar de aumento da magnitude do zeta em pH = 10,5 ocorreu em virtude da presença dos hidroxocomplexos $Mg(OH)^+$ e $Mn(OH)^+$. Os resultados de potencial zeta

mostraram que as condições físico-químicas das polpas capazes de proporcionar um comportamento reológico favorável ao bombeamento, ocorrem em valores de pH próximos de 10,5, nos quais as partículas se encontram em um estado de maior dispersão. Deste modo foi possível cumprir o segundo objetivo apresentado no trabalho.

d) A presença de efeitos inerciais teve influência no comportamento reológico das suspensões, conforme evidenciado pelas magnitudes do número de Taylor determinadas. Os valores de Taylor aumentam com a diminuição da concentração de sólidos, mostrando que, quanto menor for a população de partículas, maiores serão os efeitos inerciais, os fluxos secundários e os vórtices de Taylor. Com base nas magnitudes do número de Taylor, para as polpas a 50% de sólidos, os efeitos inerciais e os fluxos secundários são mais significativos e predominam em relação às forças de superfície. Isso justifica o fato de que na concentração de 50% de sólidos, as curvas reológicas ficaram tão próximas nos dois valores de pH investigados. Deste modo, cumpriu-se o terceiro objetivo proposto no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AGWU, O. E. et al. A critical review of drilling mud rheological models. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 203, p. 1 - 21, 2021.

ALLEN, T. Particle Size Measurement. **Chapman and Hall**, London, n. 5, 1997.

ALMEIDA, C. S. et al. Medida da viscosidade pelo método de Ostwald: Um experimento didático. **Revista Brasileira do ensino de física**, v. 17, p. 279 - 283, 1995.

ALTKOVICH, N. et al. Activated sludge rheology: a critical review on data collection and modelling. **water research**, v. 47, n. Elsevier, p. 463-482, fev. 2013.

ANTON,, **Anton Paar**, 2021. Disponível em: <<https://www.anton-paar.com/br-pt/servicos-e-suporte/servico-certificado-anton-paar/>>. Acesso em: 29 set. 2021.

ÁVILA, M. A. D.; BRETAS, R. E. S. **Reologia de Polímeros Fundidos**. 2°. ed. São Paulo: EdUFScar, v. I, 2005.

BARNES, H. A. Non-Newtonian Fluid Mech. **Elsevier**, v. 70, n. 1 - 2, p. 1 - 33, 1997.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. An introduction to rheology. **Elsevier**, v. III, p. 11 - 35, 1989.

BARNES, H. A.; WALTERS, K.; HUTTON, J. F. An Introduction to Rheology. **Elsevier**, Amsterdam, n. 3°, 1993.

BAUDEZ, J. C.; COUSSOT, P. Rheology of ageing, concentrated, polymeric suspensions: application to pasty sewage sludges. **Journal of Rheology**, n. 45, p. 1123 - 1139, 2001.

BOSSIS, G.; BRADY, J. F. The rheology of Brownian suspensions. **Journal of Chemical Physics**, v. 91, p. 1866 - 1874, 1989.

BRAGANÇA, A. C. C. R. **Avaliação de reagentes alternativos para substituição de cal em sistema de bombeamento de longa distância de**

polpa de minério de ferro. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 102. 2008.

CAMPOS, A. F. **Introdução aos sistemas coloidais.** Brasília: UbB, 2017.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow in the process industries:** fundamentals and engineering applications. [S.I.]: Oxford, 1999.

CLEARY, P. W.; HILTON, J. E.; SINNOTT, M. D. Modelling of industrial particle and multiphase flows. **Elsevier**, Australia, p. 232 - 252, 2017.

CRUZ, D. G. D. Influência dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} na flotação catiônica de minério de ferro. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 1, p. 74, 2015.

ENGWAYU, J.; PAWLIK, M. Adsorption of anionic polymers on hematite - a study of zeta potential distributions. **Minerals Engineering**, v. 148, p. 1 - 10, 2020.

ESHTIAGHI, N. et al. Rheological characterisation of municipal sludge: A review. **Water Research**, v. 47, n. Elsevier, p. 5493 - 5510, 2013.

FANGARY, Y. S. et al. The effect of fine particles on slurry transport processes. **Minerals Engineering**, v. 10, n. 4, p. 427-439, 1997.

FERNANDO, L. A. Freitas Minerais Coloidais, teoria DLVO estendida e força estruturais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, v. 78, 2000. p. 4.

FONTANA, É. **Determinação da Viscosidade de Fluidos Newtonianos.** USFSC. São Carlos, p. 9. 2018.

GURGEN, S.; KUSHAN, M. C.; LI, W. Shear thickening fluids in protective applications. **Progress in Polymer Science**, v. 75, p. 48 - 72, 2017.

GURGEN, S.; KUSHAN, M. C.; LI, W. Shear thickening fluids in protective applications. **Progress in Polymer Science**, v. 75, p. 48 - 72, 2017.

HEISKANEN, K. Particle Classification. **Chapman & Hall**, New York, n. 1, p. 336, 1993.

JÚNIOR, S. M. **Caracterização mineralógica e tecnológica do minério**. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. Belo Horizonte. 1994.

KIM, Y. H. **Coagulants and flocculants; theory and practice**. Tall Oaks Publishing. [S.I.]: 1º Ed. Littleton. 1995. p. 85.

KITCHENER, J. A. Flocculation in mineral processing. 1. ed. [S.I.]: The Netherlands, 1978. p. 283 - 328.

KURATH, S. F.; LARSON, W. S. Capillary viscosimetry on a rheologically complex coating color. **Journal Tappi**, n. 79, p. 235 - 241, 1990.

LAREO, C.; FRYER, P. J.; BARIGOU, M. The Fluid mechanic os two-phase solid-liquid food flowds. **Trans ChemE**, v. 75, p. 73 - 105, 1997.

LINS, F. A. F. Teoria DLVO estendida e forças estruturais. **CETEM/MCT**, Rio de Janeiro, n. RUOEN ADAMIAN, p. 28, 2000.

LUZ, A. ; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Eds.). **Tratamento de Minério**. 5º. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LYKLEMA, J. The colloidal background of flocculation and dewatering. New York: Eng. Fundation, 1989.

MARTINS, R.; GUKOVAS, M. Hidraulica Basica, Guia de Estudo. **Condutos Forçados de instalações de Recalque**, 2010. 35.

MEZGER, T. G. The Rheology Handbook. **Hannover**, n. Vicentz Network, p. 299, 2006.

MORAES , J. D.; SILVA, E. L.; MORAES, M. S. Aplicações industriais de estática e dinâmica dos fluidos I, p. 360, 2011.

PAWLIK, M.; LASKOWHKI, J. S. **Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests**. 38º Annual Conference of Metallurgists of CIM. Quebec: Polymers in Mineral Processing. 1999. p. 541 - 55.

PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J. S. **Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests. Polymers in mineral processing.** 38 th Annual Conference of Metallurgists os CIM. Quebec: Canada. 1999. p. 541-55.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Chemical Engineers Handbook. **Mc Graw-Hill**, n. 7, p. 18 - 133, 1999.

PETERS, I. R.; MAJUMDAR, S.; JAEGER, H. M. Direct observation of dynamic shear jamming in dense suspensions. **Nature**, v. 532, p. 214 - 217, 2016.

PRESTIDGE, C. A. Rheological investigations of ultrafine galena particle slurries under flotation - related conditions. **J. Miner**, v. 51(1-4), p. 241 - 254, 1997.

ROBAINA, A. D. Análise de Equações Explícitas para o Cálculo do Coeficiente "f" da Formula Universal de Perda de Carga. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 2, n. 22, p. 157 - 159, 1992.

ROJAS, ; BRICEÑO, M. I.; AVENDAÑO, J. **Fundamentos de reologia.** Universidad de Los Andes. Mérida, p. 44. 2012.

RUSCONI, J.; LAKHOAJA, A.; KOPUZ, M. The design and engineering of the 187 km Khouribga to Jorf Lasfar phosphaste slurry pipeline. **Elsevier**, n. 3, p. 142 - 150, 2016.

SHI, F. Determination of ferrosilicon medium rheology and stability. **Minerals Engineering**, v. 98, p. 60 - 70, 2016.

SHI, F. N.; NAPIER-MUNN, T. J. Measuring the rheology of slurries using an on-line viscometer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, p. 153-76, 1996.

SOUZA JR. **Caracterização mineralógica e tecnológica do minério de ferro itabirito anfibolítico da jazida de Alegria, Mariana, MG. Dissertação de Mestrado.** Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 1994.

SOZANSKI, M. M. et al. The rheological experiment in sludge properties reserch. **Water science ad technology**, n. 36, p. 69 - 78, 1997.

TALBOLT, G. Industrial chocolate manufacture and use. 4°. ed. [S.l.]: Chichester, 2009.

TANNER, R. I. Engineering Rheology. **Oxford University Press**, New York, p. 451, 1988.

VLIET, T. V.; LYKLEMA, H. Fundamentals of interface and colloid science. **Elsevier**, v. IV, p. 6.1-6.88, 2005.

VLIET, T. V.; LYKLEMA, H. Fundamentals of interface and colloid science. **Elsevier**, v. 4, p. 6.1 - 6.88, 2005.

ZHOU, Y. et al. Comparative study on the adsorption interactions of humic acid onto natural magnetite, hematite and quartz: Effect of initial HA concentration. **Powder Technology**, v. 251, 2014.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 50% de sólidos em massa, em pH = 6,7.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (mPa.s)	T (mN.m)	Ta
1450	13,80	9,52	2,32	183,25
1400	13,02	9,30	2,19	180,97
1350	12,44	9,21	2,09	176,17
1300	11,68	8,99	1,96	173,97
1250	10,88	8,71	1,83	172,67
1200	10,13	8,44	1,70	170,92
1150	9,52	8,27	1,60	167,14
1100	8,84	8,04	1,49	164,63
1050	8,17	7,78	1,37	162,28
1000	7,66	7,65	1,29	157,13
950	7,15	7,53	1,20	151,79
900	6,62	7,36	1,11	147,19
850	6,03	7,09	1,01	144,21
800	5,44	6,80	0,91	141,58
750	4,93	6,57	0,83	137,28
701	4,38	6,26	0,74	134,61
651	3,91	6,00	0,66	130,30
601	3,45	5,74	0,58	125,77
551	3,01	5,46	0,51	121,29
501	2,62	5,23	0,44	115,02
451	2,27	5,04	0,38	107,62
401	1,91	4,77	0,32	101,11
351	1,59	4,54	0,27	92,94
301	1,28	4,26	0,22	84,82
251	1,00	3,99	0,17	75,50
201	0,74	3,70	0,13	65,22
151	0,50	3,31	0,08	54,87
101	0,28	2,73	0,05	44,50
51	0,14	2,69	0,02	22,80
1	0,00	3,33	0,00	0,36

Tabela A2 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 50% de sólidos em massa, em pH = 10,6.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (mPa.s)	T (mN.m)	Ta
1450,00	12,93	8,92	2,17	195,55
1400,00	12,24	8,74	2,06	192,62
1350,00	11,62	8,61	1,95	188,56
1300,00	10,96	8,43	1,84	185,53
1250,00	10,41	8,33	1,75	180,52
1200,00	9,76	8,14	1,64	177,39
1150,00	9,07	7,88	1,52	175,43
1100,00	8,40	7,64	1,41	173,24
1050,00	7,78	7,41	1,31	170,48
1000,00	7,15	7,15	1,20	168,28
950	6,58	6,92	1,11	165,17
900	6,03	6,70	1,01	161,59
850	5,51	6,48	0,93	157,84
800	5,00	6,25	0,84	154,03
750	4,52	6,02	0,76	150,00
701	4,05	5,79	0,68	145,57
651	3,65	5,61	0,61	139,49
601	3,23	5,38	0,54	134,19
551	2,81	5,10	0,47	129,85
501	2,41	4,82	0,41	124,97
451	2,08	4,60	0,35	117,71
401	1,74	4,35	0,29	110,74
351	1,45	4,12	0,24	102,28
301	1,16	3,85	0,19	94,02
251	0,89	3,55	0,15	85,05
201	0,65	3,24	0,11	74,61
151	0,45	2,95	0,07	61,48
101	0,25	2,50	0,04	48,59
51	0,12	2,27	0,02	26,96
1	0,00	1,79	0,00	0,67

Tabela A3 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 60% de sólidos em massa, em pH = 6,7.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (mPa.s)	T (mN.m)	Ta
1450	20,62	14,22	3,47	141,09
1400	19,75	14,11	3,32	137,31
1350	18,84	13,96	3,17	133,87
1300	17,93	13,79	3,01	130,47
1250	17,06	13,65	2,87	126,75
1200	16,13	13,44	2,71	123,54
1150	15,23	13,24	2,56	120,23
1100	14,27	12,97	2,40	117,39
1050	13,32	12,68	2,24	114,61
1000	12,36	12,35	2,08	112,06
950	11,43	12,02	1,92	109,39
900	10,49	11,65	1,76	106,95
850	9,74	11,45	1,64	102,76
800	8,77	10,96	1,47	101,05
750	7,94	10,58	1,33	98,19
701	7,04	10,05	1,18	96,42
651	6,28	9,65	1,06	93,28
601	5,57	9,27	0,94	89,65
551	4,88	8,86	0,82	86,02
501	4,20	8,38	0,71	82,66
451	3,63	8,06	0,61	77,34
401	3,06	7,63	0,51	72,67
351	2,54	7,24	0,43	66,99
301	2,06	6,86	0,35	60,66
251	1,66	6,60	0,28	52,57
201	1,24	6,17	0,21	45,03
151	0,90	5,94	0,15	35,16
101	0,66	6,54	0,11	21,37
51	0,45	8,83	0,08	7,99

Tabela A4 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 60% de sólidos em massa, em pH = 10,3.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (mPa.s)	T (mN.m)	Ta
1450,00	18,63	12,85	3,13	156,15
1400,00	17,71	12,65	2,98	153,14
1350,00	16,84	12,47	2,83	149,81
1300,00	15,90	12,23	2,67	147,09
1250,00	14,98	11,98	2,52	144,41
1200,00	14,06	11,71	2,36	141,77
1150,00	13,14	11,42	2,21	139,32
1100,00	12,23	11,11	2,06	136,99
1050,00	11,36	10,82	1,91	134,33
1000,00	10,51	10,51	1,77	131,74
950	9,66	10,17	1,62	129,36
900	8,84	9,81	1,49	126,97
850	8,01	9,42	1,35	124,91
800	7,21	9,00	1,21	123,00
750	6,41	8,54	1,08	121,67
701	5,68	8,10	0,95	119,63
651	5,08	7,81	0,85	115,27
601	4,46	7,43	0,75	111,90
551	3,84	6,98	0,65	109,14
501	3,32	6,64	0,56	104,32
451	2,80	6,22	0,47	100,24
401	2,33	5,83	0,39	95,19
351	1,93	5,50	0,32	88,31
301	1,53	5,07	0,26	82,07
251	1,21	4,83	0,20	71,88
201	0,90	4,48	0,15	62,05
151	0,62	4,09	0,10	51,03
101	0,37	3,71	0,06	37,64
51	0,24	4,68	0,04	15,08

Tabela A5 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 70% de sólidos em massa, em pH = 6,5.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (Pa.s)	T (mN.m)	Ta
1450	27,53	18,99	4,63	124,45
1400	26,60	19,00	4,47	120,08
1350	25,59	18,96	4,30	116,06
1300	24,52	18,86	4,12	112,32
1250	23,36	18,69	3,93	109,01
1200	22,24	18,53	3,74	105,54
1150	20,99	18,25	3,53	102,72
1100	19,76	17,96	3,32	99,82
1050	18,60	17,71	3,13	96,62
1000	17,36	17,36	2,92	93,92
950	16,23	17,08	2,73	90,68
900	15,46	17,17	2,60	85,46
850	14,31	16,82	2,40	82,38
800	13,16	16,44	2,21	79,32
750	12,05	16,05	2,03	76,18
701	10,94	15,62	1,84	73,07
651	9,87	15,17	1,66	69,89
601	8,84	14,72	1,49	66,47
551	8,03	14,58	1,35	61,53
501	7,23	14,44	1,21	56,52
451	6,38	14,16	1,07	51,87
401	5,56	13,89	0,94	47,03
351	4,62	13,17	0,78	43,40
301	3,79	12,61	0,64	38,86
251	3,22	12,83	0,54	31,85
201	2,77	13,77	0,46	23,77
151	2,36	15,66	0,40	15,70
101	1,94	19,26	0,33	8,54
51	1,50	29,35	0,25	2,83

Tabela A6 – Dados de reologia referentes à polpa preparada com o minério de ferro na concentração de 70% de sólidos em massa, em pH = 10,4.

$\dot{\gamma}_w$ (s ⁻¹)	τ_w (Pa)	η (Pa.s)	T (mN.m)	Ta
1450,00	25,00	17,24	4,20	137,03
1400,00	23,88	17,06	4,01	133,77
1350,00	22,63	16,76	3,80	131,27
1300,00	21,46	16,51	3,61	128,33
1250,00	20,26	16,21	3,41	125,71
1200,00	19,07	15,89	3,21	123,07
1150,00	17,91	15,57	3,01	120,38
1100,00	16,78	15,25	2,82	117,54
1050,00	15,73	14,98	2,64	114,29
1000,00	14,70	14,70	2,47	110,93
950	13,62	14,33	2,29	108,05
900	12,60	13,99	2,12	104,87
850	11,56	13,59	1,94	101,96
800	10,57	13,20	1,78	98,79
750	9,53	12,69	1,60	96,34
701	8,58	12,25	1,44	93,20
651	7,62	11,71	1,28	90,50
601	6,75	11,25	1,14	87,03
551	5,96	10,83	1,00	82,86
501	5,16	10,30	0,87	79,22
451	4,36	9,67	0,73	75,93
401	3,63	9,05	0,61	72,16
351	3,02	8,61	0,51	66,37
301	2,47	8,21	0,42	59,70
251	1,96	7,82	0,33	52,29
201	1,50	7,48	0,25	43,73
151	1,09	7,23	0,18	34,03
101	0,79	7,82	0,13	21,04
51	0,67	13,23	0,11	6,28

APÊNDICE B

Parâmetros dos modelos reológicos empregados nos ajustes dos dados experimentais

Tabela B1 – Parâmetros de ajuste do modelo reológico de Ellis.

$C_{m/m}$ (%)	pH	a	b	p	R^2
50	6,7	0,00265	5,504E-06	1,9855	0,9988
60	6,7	0,00621	5,681E-07	2,3316	0,9938
70	6,5	0,0144	4,674E-10	3,2410	0,9958
50	10,4	0,0018	2,05E-05	1,8070	0,9998
60	10,3	0,0038	1,51E-06	2,2085	0,9960
70	10,6	0,0076	4,70E-07	2,3797	0,9949

Tabela B2 – Parâmetros de ajuste do modelo reológico de Tscheuschner.

$C_{m/m}$ (%)	pH	a	B	c	p	R^2
50	6,7	0,0095	0,1920	-0,1981	0,9900	0,9518
60	6,7	0,0906	0,2955	-0,3046	0,9900	0,9638
70	6,5	0,8061	0,3808	-0,3907	0,9900	0,9918
50	10,6	0,0077	0,1815	-0,1874	0,9900	0,9429
60	10,3	0,0128	0,2564	-0,2654	0,9900	0,9233
70	10,4	0,0869	0,3467	-0,3571	0,9900	0,9643