

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais.

Autora: Ana Paula Resende Bisco
Orientador: Professor Dr. George Eduardo Sales Valadão

Maio, 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS

Ana Paula Resende Bisco

A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Dr. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2009

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	1
2.0	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo Geral	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Reologia.....	4
3.2	Elasticidade linear.....	6
3.3	Viscosidade linear.....	9
3.4	Reologia de suspensões.....	11
3.5	Classificação dos fluidos viscosos	17
3.4	Influência da concentração de sólidos	27
3.5	Influência da reologia na formação de pastas.....	29
3.6	Teste de Abatimento (“Slump”)	31
3.7	Dupla camada elétrica	33
3.8	Medidas da viscosidade e da tensão de escoamento.....	35
4.0	METODOLOGIA.....	45
4.1	Composição e preparação das amostras.....	45
4.2	Caracterização da amostra	46
4.3	Caracterização das propriedades reológicas	49
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Análise química da amostra.....	52
5.2	Análise mineralógica da amostra sólida.....	52
5.3	Análise granulométrica.....	53
5.4	Densidade do sólido.....	57
5.5	Ponto de Carga Zero (PCZ).....	58
5.6	Caracterização das Propriedades Reológicas	59
6.0	CONCLUSÕES	68
7.0	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	70
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
9.0	ANEXOS	75
9.1	Resultados da viscosidade para polpa com 64% de sólidos em massa (pH natural).....	75
9.2	Resultados da viscosidade para polpa com 68% de sólidos em massa (pH natural).....	76
9.3	Resultados da viscosidade para polpa com 70% de sólidos em massa (pH natural).....	77
9.4	Resultados da viscosidade para polpa com 72% de sólidos em massa (pH natural).....	78
9.5	Resultados da viscosidade para polpa com 74% de sólidos em massa (pH natural).....	79

9.6	Resultados da viscosidade para polpa com 76% de sólidos em massa (pH natural).....	80
9.7	Resultados da viscosidade para polpa com 78% de sólidos em massa (pH natural).....	81
9.8	Resultados da viscosidade para polpa com 80% de sólidos em massa (pH natural).....	82
9.9	Resultados da viscosidade para polpa com 80% de sólidos em massa (pH = 11)	83
9.10	Resultados da viscosidade para polpa com 82% de sólidos em massa (pH natural).....	84
9.11	Resultados da viscosidade para polpa com 82% de sólidos em massa (pH = 11).....	85
9.12	Resultados da viscosidade para polpa com 84% de sólidos em massa (pH natural).....	86
9.13	Resultados da viscosidade para polpa com 84% de sólidos em massa (pH = 11).....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1: Frações passantes acumuladas da amostra sólida utilizada.....	30
Tabela III.2: Correlações entre adensamento de sólidos e reologia da pasta	31
Tabela IV.1: Procedimentos utilizados para caracterização das amostras	46
Tabela V.1: Análise química da amostra	52
Tabela V.2: Resultado análise granulométrica peneiramento retirando-se a fração < 38 µm.	54
Tabela V.3: Planilha de dados calculados e corrigidos do ensaio do Cyclosizer.	55
Tabela V.4: Dados da curva granulométrica composta da amostra.....	56
Tabela V.5: Valores experimentais obtidos através da picnometria simples.....	57
Tabela V.6: Valores experimentais obtidos através da picnometria a gás	57
Tabela V.7: Resultados de altura de abatimento de cone (Hs) das polpas.....	60
Tabela V.8: Resultados de altura de abatimento de cone (Hs) das polpas com adição de soda cáustica.	61
Tabela V. 9: Resultados experimentais dos testes de tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa estudada.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Modelo de uma simples mola “Hookeana” (Gandur, 2001).....	9
Figura 3.2 – Modelo de um amortecedor viscoso (Gandur, 2001)	10
Figura 3.3 - Modelo de placas paralelas utilizadas por Newton para explicar a viscosidade de um líquido (Ferreira <i>et al</i> ,2005)	11
Figura 3.4 - Volume elementar de um líquido fluindo com velocidade v (Hiemenz & Rajagopalan,1997).....	12
Figura 3.5 - Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de suspensões (Kawatra <i>et al</i> , citado por Ferreira <i>et al</i> , 2005).....	19
Figura 3.6 - Comportamento da viscosidade independente do tempo (Boger, 2003 citado por Barreda, 2008).....	20
Figura 3.7 - Comportamento tixotrópico da viscosidade (dependente do tempo). (Boger, 2003 citado por Barreda, 2008).	21
Figura 3.8 - O “yield stress” para uma polpa de calcopirita (69% em massa de sólidos) em função do pH usando (■) HCl, (●) HNO ₃ e (▲) H ₂ SO ₄ para ajustar o pH. (Huynh <i>et al</i> , 2000)	22
Figura 3.9 – Bomba GEHO, deslocamento positivo. (www.weirminerals.com)	23
Figura 3.10 – Corte de uma seção da bomba GEHO, deslocamento positivo. (www.weirminerals.com).	24
Figura 3.11 – Figura esquemática do teste do ângulo de repouso: a) deslizamento do material em direção á parte baixa do tubo resultando em formação de “plug” e b) leve deslocamento do sedimento sem formação de “plug” no tubo (Bragança e Silva, 2004)	
26	
Figura 3.12 - Efeitos da concentração de sólidos nas propriedades reológicas de uma polpa de calcário (He, <i>et al</i> , 2006).....	28
Figura 3.13 - Representação esquemática do teste de “Slump” (Clayton et al, 2003) .	31
Figura 3.14 - Representação esquemática da dupla camada elétrica (DCE) e do potencial na interface sólido-líquido. (Fuesternau <i>et al</i> , 2005).....	34
Figura 3.15 - Diagrama de vane de quatro paletas em operação. (Nguyen et al, citado por Barreda).....	36

Figura 3.16. Tipos de geometria mais usuais nos projetos de viscosímetros: (a) em torno de esferas, (b) entre placas paralelas, (c) entre cilindros, (d) interior de tubos, (e) entre cone-placa circulares, (f) entre placas circulares (Machado, 2002)	37
Figura 3.17 - Características de líquidos viscosos e elásticos sob agitação (Machado, 2002) 38	
Figura 3.18 - Esquema mostrando o viscosímetro de bola rolando sobre a parede (Machado, 2002)	39
Figura 3.19 - Esquema simplificado de um viscosímetro de tubo-capilar (Machado, 2002). 39	
Figura 3.20 - Esquema de um viscosímetro capilar de vidro (Machado, 2002).....	40
Figura 3.21 - Esquema de três viscosímetros de orifício: (A) Saybolt; (B) Funil-Marsh; (C) vaso Ford (Machado, 2002).....	41
Figura 3.22 - Sistemas: (I) Searle e (II) Couette, para viscosímetros rotativos de cilindros coaxiais (Machado, 2002)	42
Figura 3.23 - Viscosímetro Brookfield modelo DV-III com os “spindles” LV-1, LV-2, LV-3 e LV-4.	43
Figura 3.24 - Reômetro Brookfield, modelo YR-1 (www.brookfieldengineering.com).....	43
Figura 3.25 - Esquema de um viscosímetro rotativo Brookfield (Machado, 2002)	44
Figura 4.1 – Fluxograma dos ensaios programados.....	45
Figura 4.2 – Fluxograma esquemático da representação da amostra	46
Figura 4.3 – Cyclosizer Warman de laboratório. (www.weirminerals.com)	47
Figura 4.4 – Picnômetros de laboratório. (www.particletechlabs.com).....	48
Figura 4.5 – Zeta-Metern Systema 3.0+	49
Figura 4.6 – Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III. (www.brookfieldengineering.com). 50	
Figura 4.7 – Representação teste de “slump”. (Barreda, 2007).....	51
Figura 4.8 – Reômetro Digital Brookfield, modelo YR-1. (www.brookfieldengineering.com)	51
Figura 5.1 – Difratoograma da amostra, onde H = hematita e Q = quartzo.....	53
Figura 5.2 – Curva granulométrica da análise por peneiramento.....	54
Figura 5.3: Distribuição granulométrica da amostra para a fração < 38 µm.	55
Figura 5.4: Curva granulométrica da amostra utilizada para os ensaios reológicos.....	56
Figura 5.5 – Determinação do Ponto de Carga Zero através do Zetameter (microeletroforese).	58

Figura 5.6 – Determinação do Ponto de Carga Zero através do Método de Mular e Roberts.	59
Figura 5.7 – Porcentagens de Abatimento obtidas para as amostras.	60
Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre os resultados do teste de “slump” para polpa com pH natural e polpa com pH alterado.	61
Figura 5.9 – Ciclo reológico da amostra: 1 - 20 – 1 rpm, 64% a 76% de sólidos em massa.	62
Figura 5.10 – Ciclo reológico da amostra: 1 – 20 – 1 rpm, 76% a 84% de sólidos em massa.	63
Figura 5.11 – Comportamento reopético da viscosidade para a polpa estudada com 72% de sólidos.	63
Figura 5.12 – Ciclo reológico da amostra: 1 -20 -1 rpm para a polpa com 80% de concentração de sólidos com pH natural e pH = 11.	64
Figura 5.13 – Valores de “yield stress” para as diferentes concentrações da polpa com pH natural.	65
Figura 5.14 – Valores de “yield stress” para polpa com pH natural (pH = 8,1) e polpa com pH alterado (pH = 11)	66
Figura 5.15 – Relação entre teste de abatimento (“slump”) e Tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa estudada no pH natural.	67

Resumo

O estudo do comportamento reológico de polpas minerais tem demonstrado grande importância devido à utilização de minérios cada vez mais finos. Atualmente, com o processamento de minérios mais pobres, a polpa está presente em várias etapas durante o beneficiamento. Com o conhecimento das características reológicas é possível melhorar o desempenho de operações como: moagem, ciclonagem, e de transporte por tubulação.

Quando se trata de transporte de polpa em longas distâncias, a determinação das características reológicas torna-se fundamental para dimensionar bombas e tubulações. Atualmente, a utilização de mineroduto como alternativa ao transporte por ferrovia tem sido bastante estudada. Outra aplicação semelhante é o bombeamento de rejeitos com altas porcentagens de sólidos em massa (pasta mineral) para barragens, diminuindo a área necessária para disposição de rejeitos.

A reologia estuda a maneira como os fluidos se comportam quando se aplica uma tensão. Os fluidos podem ser classificados em Newtonianos e Não-Newtonianos. Além desta classificação, os fluidos Não-Newtonianos podem ser classificados em: dilatante, pseudoplástico, pseudoplástico com “yield stress” e plástico de Bingham.

Outra classificação dos fluidos é em função da dependência com o tempo: eles podem ser tixotrópicos ou reopéticos. Os fluidos tixotrópicos são aqueles que apresentam uma diminuição na viscosidade com o tempo quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante. Já os fluidos reopéticos apresentam um aumento da viscosidade com o tempo.

O trabalho tem como objetivo estudar o comportamento reológico de uma polpa contendo hematita, com elevado grau de pureza, através da determinação de valores de viscosidade, “slump” e “yield stress” para polpas em diferentes concentrações de sólidos em massa. A amostra mineral foi caracterizada em termos de composição química e mineralógica, de densidade e distribuição granulométrica. Foram realizados ensaios para a determinação do ponto de carga zero e para estudo de características reológicas.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que: a) a amostra mineral possui alta pureza (97% de hematita), apresenta 85% passante em 44 μ m, tem densidade de sólidos de 5 g/cm³; b) o ponto de carga zero foi obtido no pH de 6,8 (usando zetameter) e pH 6,9 (pelo método de Mular e Roberts); c) comportamento das polpas foi, em geral, semelhante ao de um fluido de Bingham, tendo também um comportamento reopético; d) há dependência entre o “yield stress” e a concentração de sólidos da polpa, não sendo esta relação linear; e) os valores de “yield stress” foram influenciados pela mudança no valor de pH.

Abstract

The study about slurry's rheology behavior has been showing a great importance due to the utilization of ores more and more slender. Nowadays, the slurry is present in several stages during processing due to the poor ore that has been processed. With the knowledge about the rheological characteristics, it's possible to improve the performance of operations as: milling, cycloning and pipeline transport.

When the topic is about slurry's transport from large distances, the determination of the rheological characteristics becomes primordial to project pumps and pipelines. Currently, the utilization of pipeline as an alternative way for the railways transport has been studied a lot. Another similar application is the rejects pumping with high percentages of solids in mass (mineral paste) for the barrages, decreasing the necessary area to the rejects arrangement, avoiding the water recirculation and economizing energy.

Rheology studies the fluids behavior when a tension is putting in practice. Fluids can be classified as Newtonians or Non-Newtonians. Besides this classification, Non-Newtonians fluids can be classified in: dilatant, pseudoplastic, pseudoplastic with "yield stress" e Bingham's plastic.

Another fluid's classification is the function of dependence with time: It could be thixotropic or rheopectics. The thixotropics fluids are those that present a viscosity decrease with time, when subdue constant shear rate. Meantime, rheopectics fluids present a viscosity increase with time.

This dissertation has the purpose of study the rheological behavior of a slurry that contain hematite, with a high degree of purity, through the determination of viscosity's values, "slump" and "yield stress" for slurries with different solids concentration in weight. The mineral sampler was described with chemistry and mineralogy composition, density and size distribution. Tests was done to determine the zero charge's point, and for rheological characteristics study.

About the results obtained, can be concluded: the studied slurry has high purity (97% of hematite), owns 85% of pass in 44 μm , the solid's density is high (5 g/cm^3), the zero

point's charge is in pH 6,8. About the rheological behavior, slurry showed characteristics of a rheopetic fluid. Besides, have knowledge of dependence between slurry's solids concentration and "yield stress" and this relation isn't linear. Just slurries with solid's concentration in mass above 78% obtained "yield stress" results. For slurries with solid's concentration above 78%, pH was changed to 11, using caustic soda. The addition of a base to increase pH causes a dispersion of the slurry and herewith tension necessary for shear ("yield stress") is smaller. When pH of the slurry with solid's concentration in 78% had been changed, it didn't obtained results for "yield stress", but with natural slurry (pH 8,18) obtained result was close to 10,9 Pa.

1.0 INTRODUÇÃO

Reologia é a ciência que estuda a deformação dos fluxos, sendo medida através da viscosidade e tensão de escoamento. Estas são propriedades importantes a serem medidas principalmente quando se trata de bombeamento de polpas. Ressalta-se ainda que cada minério possui um comportamento reológico diferente, não existindo uma padronização. Isso ocorre porque as propriedades reológicas são afetadas por vários fatores, tais como: forma da partícula, granulometria, temperatura, pressão, etc.

Durante as etapas de processamento mineral, há o envolvimento de suspensões, ou seja, mistura de material fino com uma fase líquida. Muitas vezes, esta fase líquida é a água. No tratamento de minérios, essas suspensões estão presentes desde a moagem até o transporte de rejeitos, portanto, o estudo do comportamento reológico se torna relevante para a otimização de processos.

Essas suspensões podem ter comportamento de fluidos Newtonianos ou não-Newtonianos. Na maioria das suspensões, os fluidos são não-Newtonianos. Suspensões com baixo percentual de sólidos por volume tem comportamento de um fluido Newtoniano, ou seja, a viscosidade é constante com a variação da taxa de cisalhamento.

Já os fluidos não-newtonianos (pseudoplástico, dilatante, plástico de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento) não apresentam uma viscosidade constante, ou seja, a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento, por isso, quando se tratar de fluidos não-newtonianos a viscosidade é dita aparente.

Além dessas classificações, os fluidos podem ser classificados de acordo com sua dependência com o tempo em reopéticos e tixotrópicos. Eles são reopéticos quando a viscosidade aumenta com o tempo, mantendo-se a mesma taxa de deformação. Já os fluidos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade com tempo de aplicação a uma mesma taxa de cisalhamento.

Sabe-se que a etapa de moagem é responsável por grande parte da energia utilizada na usina. Atualmente, a energia requerida é calculada em função da concentração de

sólidos presente na polpa. Através da reologia, com modificações nas superfícies das partículas, uso de dispersantes, há um ganho energético.

Além da moagem, a reologia está presente também no transporte de polpas, podendo ser calculado o “yield stress” e a porcentagem de finos necessária para que não ocorra segregação da polpa tornando o bombeamento mais eficiente.

No processo de ciclonagem, sabe-se que a viscosidade da polpa é responsável pela forma de descarga do ciclone.

Além disso, a reologia é de extrema importância quando se fala de transporte de polpas por mineroduto e transporte de pastas minerais.

As pastas têm se constituído um grande interesse para as indústrias, uma vez que elas geram grandes quantidades de rejeitos. Atualmente, as mineradoras utilizam à disposição tradicional de rejeitos, ou seja, lançam rejeitos com baixa porcentagem de sólidos na barragem. Com a utilização da reologia e modificações nas superfícies das partículas, os rejeitos serão lançados na barragem na forma de pasta (alta concentração de sólidos), ocupando menos áreas para disposição do rejeito.

Além do bombeamento de pastas, o bombeamento de concentrado por longas distâncias (mineroduto) está sendo bastante estudado devido ao menor custo de investimento e custo operacional quando se comparado com o transporte de concentrado através de ferrovia. Nesse caso, o estudo do comportamento reológico da polpa torna-se imprescindível para uma operação segura.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Analisar a influência da concentração de sólidos e o do pH no comportamento reológico da polpa utilizando teste de “slump” (abatimento), medidas de viscosidade e tensão de escoamento (“yield stress”).

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características físicas e químicas da amostra estudada: composição química, granulometria, densidade e ponto de carga zero.

- Determinar os valores de viscosidade, “yield stress” e “slump” em várias condições.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reologia

O processamento mineral compreende as operações de fragmentação, classificação, concentração, separação sólido/líquido, manuseio e transporte. Todas essas operações, na maioria dos casos, são realizadas a úmido, ou seja, com a utilização de uma fase líquida, normalmente a água. Logo, essas operações podem ser influenciadas pela resistência dessas suspensões em se deformar ou fluir, quando submetidas à força de cisalhamento ou pressão, ou seja, a viscosidade da suspensão influenciará nas etapas de processamento (Ferreira *et al*, 2005).

De acordo com Lázaro (2003), a reologia estuda o modo como os materiais deformam ao longo do tempo quando submetidos a tensões. Para determinação das propriedades reológicas de um material, deve-se medir a deformação provocada por uma dada tensão ou medir a tensão requerida com a finalidade de se produzir uma dada deformação num tempo determinado. Há dois desafios principais na reologia: o primeiro é o estabelecimento de uma relação quantitativa entre deformação e tensão ao longo do tempo para o material em questão. O segundo é o desenvolvimento de relações entre o comportamento reológico de um material e sua estrutura, composição e condições ambientais, tais como temperatura e pressão.

Segundo Shi e Zheng (2003), reologia é a ciência de deformação e de escoamento de materiais. Cisalhamento é um tipo de deformação típica na reologia. Comportamento reológico é geralmente apresentado graficamente plotando-se a tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento (chamada curva do fluido ou reograma).

O conhecimento das propriedades reológicas da polpa tem uma importância primordial no transporte em tubulações, classificação, filtração e na determinação das condições de lixiviação, tais como temperatura, densidade da polpa, pré-tratamento da polpa, etc. A relação tensão de cisalhamento-taxa de cisalhamento no caso de dispersão de finos em um meio líquido é bastante complicada, pois depende de vários fatores como temperatura, tamanho das partículas, distribuição granulométrica, forma de partículas,

interações interpartículas e a natureza do meio de suspensão (Bhattacharya *et al*, 1998).

De acordo com Shi e Napier-Munn (1996), a reologia de polpa é uma importante propriedade em vários processos minerais, mas sua influência não é bem compreendida e é raramente incorporada na análise e otimização de processos. Uma razão para isso é a dificuldade de medir a reologia (particularmente em usinas) e de interpretar os resultados como medidas.

A reologia tem como principal objetivo o estudo da deformação e fluxo da matéria, os quais envolvem fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade. Já a reologia de suspensões abrange o estudo do comportamento do fluxo de suspensões de sólidos utilizando, principalmente, a determinação da viscosidade aparente e da tensão de cisalhamento ou “yield stress”.

Os materiais em estado coloidal são preferidos quando utilizados no processamento industrial por causa da ampla área superficial por unidade de volume, melhorando assim, a reatividade química, a capacidade de absorção e a taxa de transferência de calor. Entretanto, não se pode relevar a importância do comportamento do fluxo e as propriedades dos colóides já que os mesmos exercem influência significativa no desempenho, eficiência e economia do processo. Além disso, geralmente são utilizadas as propriedades do fluxo e o comportamento dos produtos como uma medida da microestrutura dos produtos e também como controle de qualidade (Hiemenz e Rajagopalan, 1997).

Do ponto de vista técnico, é importante notar que colóides apresentam uma ampla faixa do comportamento reológico. Dispersões carregadas (e até mesmo em uma fração volumétrica pequena) e colóides estabilizados demonstram comportamento elástico como os sólidos. Quando as interações inter-partículas não são importantes, eles se comportam como um líquido comum (isto é, eles fluem facilmente quando submetidos a pequenas forças), sendo conhecido como comportamento viscoso. Frequentemente, o comportamento se apresenta entre esses dois extremos; a dispersão é dita então viscoelástica. Portanto, torna-se importante o entendimento das forças de interação e os mecanismos do fluido que afetam o comportamento da dispersão (Hiemenz e Rajagopalan, 1997).

Atualmente, o beneficiamento de partículas finas tornou-se de extrema importância para os tratamentistas minerais. Com a redução das partículas, a atuação das forças de origem mecânica sobre as partículas fica reduzida e passam a atuar as forças de origem eletrostática e aquelas devido à descontinuidade do meio (viscosidade). Por isso, o conhecimento da reologia tornou-se importante para o estudo do comportamento de partículas finas em suspensão (Possa e Lima, 2000).

O adensamento em sólidos das polpas resulta em uma elevada tensão necessária para o escoamento, que cresce exponencialmente a partir de uma determinada percentagem de sólidos e, usualmente, em valores de tensão de escoamento acima de 80Pa. Esta característica indica um ponto de equilíbrio entre a energia necessária para o bombeamento e o máximo adensamento possível no espessamento. O incremento da viscosidade das pastas de rejeitos associado com o desaguamento requer normalmente a utilização de bombas de deslocamento positivo para o transporte em tubulações. Na maioria das vezes, a tensão de escoamento decresce com o manuseio e/ou bombeamento da polpa ou pasta (Barreda, 2008).

Muitas pastas minerais apresentam-se como pseudo-plásticas, ou seja, a viscosidade diminui quando são aplicadas elevadas velocidades de bombeamento, propriedade que é benéfica para o transporte em tubulações (Osorio, 2007).

3.2 Elasticidade linear

A elasticidade é a característica de materiais que retornam ao seu formato original imediatamente após a remoção da carga e cessam as tensões no material. Além do mais, a deformação é diretamente proporcional a esta tensão associada, e independente da taxa de deformação. A constante de proporcionalidade entre tensão e deformação elástica é chamada Módulo de Young, definida pela Lei de Hooke (Ward & Hadley, 1993) pela Equação (1):

$$\sigma_{elastica} = \frac{E(L - L_0)}{L_0} = E.\varepsilon \quad (1)$$

Onde:

σ elástica = tensão desenvolvida no regime elástico

E = módulo de Young

L = comprimento final do espécime

L_0 = comprimento inicial do espécime

$$\frac{(L - L_0)}{L_0} = \varepsilon = \text{deformação unitária}$$

Nota-se que, em um material de comportamento puramente elástico como descrito pela equação acima, todo o trabalho feito para deformá-lo é armazenado como energia elástica, que será devolvida quando lhe for permitido retornar a sua forma original.

Um material elástico é aquele que quando sofre um esforço provoca um deslocamento dos átomos de suas posições primitivas no espaço, de modo que ao cessar esse esforço, os átomos voltam à suas posições originais sem deixar qualquer deformação permanente (Souza, 2000).

Há três condições que definem um comportamento elástico ideal: (1) existe apenas uma única relação de equilíbrio entre deformação e tensão aplicada e existe capacidade de recuperação completa; (2) o equilíbrio entre tensão e deformação é atingido instantaneamente; e (3) a relação entre tensão e deformação é linear (Nowick & Berry, 1972).

Segundo a teoria da elasticidade ideal de Robert Hooke (1678):

$$F = k\Delta C \tag{2}$$

Onde:

F = força resultante da tração de um corpo elástico

ΔC = deslocamento do corpo

K = constante elástica (propriedade extensiva do material)

Leonard Euler (1727) sugeriu que a expressão original de Hooke fosse alterada da seguinte maneira, Equação (3):

$$\frac{F}{AB} = \frac{E \cdot \Delta C}{C} \tag{3}$$

Onde:

AB = área da seção transversal do material

C = comprimento original do material

E = Módulo de Young (propriedade intensiva)

As razões F/AB e $\Delta C/C$ são denominadas tensão (σ) e deformação (ϵ) respectivamente. Assim, a equação básica da elasticidade linear é expressa pela Equação (4):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4)$$

Tensão é definida genericamente como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. Deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer (Souza, 2000).

Se o limite de proporcionalidade não for excedido, a razão entre tensão e deformação será constante e a lei de Hooke é então equivalente à afirmativa de que dentro do limite de proporcionalidade o Módulo de Young de um dado material é constante, dependendo apenas da natureza do material (Sears; Zemansky; Young, 1984).

Diz-se que um corpo de prova responde elasticamente se ele retorna à sua forma ou comprimento original quando a carga é removida. Este comportamento elástico ocorre quando as deformações no corpo de prova situam-se na região elástica do material. Quando isto ocorre, o diagrama tensão x deformação é realmente uma linha reta ao longo de quase toda a região elástica, assim, a tensão é proporcional à deformação. Em outras palavras, diz-se que o material é linearmente elástico (Hibbeler, 2000).

Para projetos onde a deformação deve permanecer baixa, o módulo de Young ou elasticidade é um valor importante a se levar em conta, devendo-se escolher um material que tenha esse valor suficientemente alto para suportar grandes tensões com pequena deformação elástica. Isto porque este módulo representa a rigidez do material e quanto maior for seu valor, menor será sua deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão (Souza, 2000).

Pode-se ilustrar o comportamento elástico linear ideal com o auxílio de um modelo mecânico como o apresentado na Figura 3.1. Trata-se de uma simples mola que, de acordo com o postulado de Hooke, responde linear e instantaneamente a aplicação de uma tensão, deslocando-se até uma nova posição de equilíbrio. Com a remoção da tensão, o estado inicial é resgatado, recuperando-se assim, toda a energia absorvida anteriormente (Gandur, 2001).

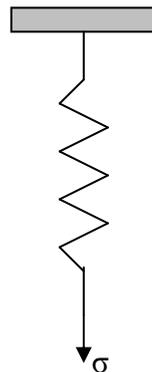


Figura 3.1 – Modelo de uma simples mola “Hookeana” (Gandur, 2001)

3.3 Viscosidade linear

Segundo o postulado de Newton (1687), a tensão observada na deformação por esforços de cisalhamento em um líquido é diretamente proporcional à taxa de deformação imposta a ele; o que é expresso pela Equação (5):

$$\sigma = \eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (5)$$

Onde:

η = constante de proporcionalidade denominada viscosidade

Observa-se que a viscosidade de um líquido decresce com um aumento de temperatura, enquanto que, em um gás ocorre o oposto. A pressão, entretanto, tem apenas um pequeno efeito sobre a viscosidade – efeito usualmente desprezado (Shames, 1999).

Fluidos que apresentam comportamento viscoso de acordo com a Equação (5) são chamados fluidos Newtonianos. Neles, a viscosidade não depende da taxa ou da quantidade de deformação, mas é uma constante de proporcionalidade entre tensão e taxa de deformação, característica de cada material. A maioria dos líquidos de baixo peso molecular são exemplos de fluidos Newtonianos. No entanto, em suspensões, emulsões e polímeros em fase líquida, a relação entre tensão e taxa de deformação já não é linear; ou, em outras palavras, não há proporcionalidade direta entre taxa de deformação e tensão de cisalhamento ou deformação. Assim, a viscosidade não pode ser descrita como uma constante, devendo ser uma função da taxa de cisalhamento (Ward & Hadley, 1993; Fox & McDonald, 2001).

Um leve aumento na tensão acima do limite elástico de um material resultará em uma acomodação do mesmo causando uma deformação permanente. Este comportamento é chamado de escoamento (Hibbeler, 2000).

Contrariamente à mola (modelo Hookeano), a energia empregada na deformação de um corpo viscoso é completamente dissipada. Pode-se visualizar esta situação com o auxílio de um modelo mecânico como o ilustrado pela Figura 3.2. Aqui, tem-se um amortecedor representado por um pistão que se move (em resposta à aplicação de uma tensão σ) no interior de um cilindro preenchido por um fluido newtoniano. De acordo com o postuldo de Newton sobre a viscosidade, observa-se um aumento linear da deformação em função do tempo. Com a remoção da tensão, o pistão deixa de se mover, permanecendo na posição atingida imediatamente antes. Desta maneira, toda a energia fornecida ao sistema é dissipada na forma de calor devido ao atrito do fluido, durante o deslocamento do pistão (Gandur, 2001).

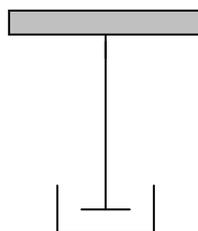


Figura 3.2 – Modelo de um amortecedor viscoso (Gandur, 2001)

O postulado de Newton sobre viscosidade diz que para um fluido bem ordenado (em escoamento laminar), onde as partículas se movem retilineamente, em linhas paralelas a tensão de cisalhamento numa interface tangente à direção do escoamento é proporcional à razão de variação da velocidade na direção normal à interface (Shames, 1999).

3.4 Reologia de suspensões

A viscosidade de um fluido é definida pela resistência ao deslocamento (deslizamento) de suas moléculas devido ao atrito interno e quanto maior esse atrito, maior será a viscosidade do fluido.

Newton utilizou o modelo de duas placas de áreas A , separadas por uma distância h , movimentadas através da aplicação de uma força F , como mostra a Figura 3.3. De acordo com esse modelo, a força requerida por unidade de área (F/A) para manter uma diferença de velocidade entre as placas (dv/dx) é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade através do líquido. Assim, o coeficiente de proporcionalidade é igual à viscosidade (η). A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento (σ) e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento (γ) (Barnes *et al.*, citado por Ferreira 2005).

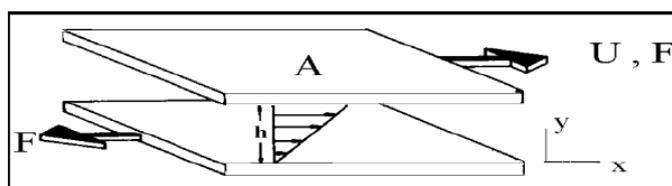


Figura 3.3 - Modelo de placas paralelas utilizadas por Newton para explicar a viscosidade de um líquido (Ferreira *et al.*, 2005)

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (6)$$

Substituindo (F/A) por (σ) e (dv/dx) por (γ), tem-se a equação de Newton para a viscosidade de um fluido.

$$\eta = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (7)$$

De acordo com Hiemenz & Rajagopalan (1997), é impossível entender a viscosidade sem referenciar à equação do movimento. A equação do movimento (Equação de Navier-Stokes) descreve a velocidade de um elemento do fluido com o fluido em escoamento em função da localização do mesmo. Esta equação permite que se considere como função tanto da localização como do tempo e essa consideração é utilizada para resolver problemas no estado não-estacionário. Como é o caso de todas as equações diferenciais, estabelecer as condições limites do problema é uma consideração importante já que determina a solução do mesmo. Muitos problemas são criados com um alto nível de simetria e deste modo simplificam suas descrições de limites. A equação do movimento é frequentemente encontrada em coordenadas cilíndricas e esféricas o que complica sua aparência, mas simplifica sua resolução, porque geralmente o problema é resolvido com uma geometria simétrica.

A Figura 3.4 mostra um pequeno volume elementar retangular Δx , Δy , Δz localizado no escoamento do fluido. O fluido passa através deste elemento com uma velocidade v , a qual pode ser resolvida com os componentes x , y e z – representados por v_x , v_y e v_z .

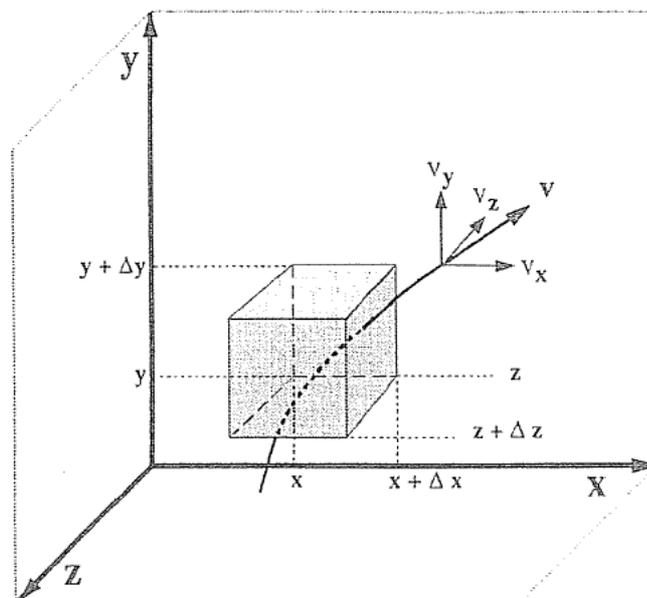


Figura 3.4 - Volume elementar de um líquido fluído com velocidade v (Hiemenz & Rajagopalan, 1997).

Primeiro, admite-se que a taxa da variação do momentum é igual à força F:

$$\frac{d(mv)}{dt} = m \left(\frac{dv}{dt} \right) = ma = F \quad (8)$$

Onde:

a: aceleração do fluido.

Além do mais, a taxa de variação do momentum por unidade de volume é dada por:

$$\frac{d(\rho v)}{dt} = F_{ext} + F_{press} + F_{vis} \quad (9)$$

Onde:

F_{ext} : forças externas, tais como gravidade;

F_{press} : forças de pressão;

F_{vis} : forças viscosas.

Tratando a densidade como uma constante, para fluidos incompressíveis, tem-se:

$$\frac{d(\rho v)}{dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (10)$$

Foi utilizada a regra da cadeia para diferenciação para expandir a equação na forma mostrada acima. As forças externas, de pressão e viscosas atuando no volume do elemento podem ser desenvolvidas totalmente, chegando-se a seguinte equação:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} v_x + \frac{\partial v}{\partial y} v_y + \frac{\partial v}{\partial z} v_z + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = \rho g - i \frac{\partial p}{\partial x} - j \frac{\partial p}{\partial y} - k \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

Onde g indica a aceleração vetorial devido à gravidade e i , j e k são os vetores unitários nas direções x , y e z , respectivamente. A Equação (11) é a equação do movimento para fluidos incompressíveis e é uma equação vetorial. Reescrevendo a

Equação (11) em notação vetorial condensada e combinando termos com importância similar, tem-se:

$$\rho(v \cdot \nabla v) + \rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho g - \nabla p + \eta \nabla^2 v \quad (12)$$

Onde:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Simplificações a serem realizadas na Equação (12):

- O primeiro termo do lado direito da equação descreve a força da gravidade atuando sobre o volume do elemento, considerando que a gravidade é a única força externa no sistema. A força gravitacional por unidade de volume é dada por ρg .
- O segundo termo do lado direito da equação descreve a força sobre o volume do elemento devido à pressão. A força na direção x devida à pressão é dada por: $(p_{x+\Delta x} - p_x) \Delta y \Delta z$. Dividindo por $\Delta x \Delta y \Delta z$ tem-se que a força por unidade de volume na componente x é: $[(p_{x+\Delta x} - p_x) / \Delta x]$ ou $\partial p / \partial x$ no limite $\Delta x \rightarrow 0$. Expressão similar é aplicada para os componentes y e z.
- O terceiro termo do lado direito descreve as forças viscosas atuando na área $\Delta x \Delta y$ do volume do elemento na direção y é dada por: $\eta \Delta x \Delta y (\partial v_y / \partial z)_{z+\Delta z}$ de um lado do volume do elemento e por: $\eta \Delta x \Delta y (\partial v_y / \partial z)_z$ do outro lado. Dividindo a diferença desses dois termos pelo volume do elemento e tirando o limite $\Delta z \rightarrow 0$, tem-se a contribuição para a força viscosa.
- O primeiro termo do lado esquerdo da equação é chamado de termo de inércia, e o segundo termo surge da variação temporal da velocidade em dadas posições. Para baixas velocidades, o primeiro termo pode ser negligenciado. Com essas simplificações, a Equação (12), torna-se:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho g - \nabla p + \eta \nabla^2 v \quad (13)$$

A Equação (13) é chamada de *Aproximação de Stokes* para a equação do movimento. Para condições de estado permanente, a equação pode ser escrita como:

$$-\rho g + \nabla p = \eta \nabla^2 v \quad (14)$$

A Equação (14) é chamada de *Equação de Stokes*. Sobre condições de estado estacionário, a velocidade é independente do tempo e a Equação (14) torna-se:

$$\rho g - \nabla p + \eta \nabla^2 v = \rho(v \cdot \nabla v) \quad (15)$$

A Equação (15) é conhecida como *Equação de Estado Estacionário de Navier-Stokes*. Há também a Teoria de Einstein para a viscosidade de dispersões que diz que a presença de partículas de tamanho coloidal no líquido aumenta a viscosidade por causa do efeito que têm sobre o fluxo padrão. O aumento da viscosidade é esperado com o aumento da concentração das partículas (Hiemenz e Rajagopalan, 1997).

Segundo Machado (2005), a deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos:

- Deformação espontânea e reversível, conhecida como elasticidade; e
- Deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento.

O trabalho utilizado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo voltar ao seu estado original enquanto que o trabalho necessário para manter o escoamento é dissipado na forma de calor.

Existe um estado transitório entre o perfeitamente elástico e o escoamento (viscosidade) que é o estado viscoelástico. Este quando submetido à tensão de cisalhamento sofrerá deformação reversível, ou seja, ele se comportará como um sólido perfeitamente elástico e um líquido viscoso.

Inicialmente, a tensão de cisalhamento provocará uma deformação. Após a retirada dessa força, acontecerá a reversão da deformação, mas essa não é totalmente

completa. Assim, o trabalho necessário para manter essa tensão é em parte recuperado e em parte dissipado na forma de calor.

A viscoelasticidade é um ramo da mecânica que aumentou de importância com a crescente introdução de certos materiais, tais como a borracha, silicone, plásticos, argilas e tintas, cujo comportamento não é explicado nem pela teoria da elasticidade nem pela teoria de escoamento dos fluidos puramente viscosos, isoladamente (Machado, 2002).

O comportamento reológico de suspensões minerais pode ser controlado pelo entendimento das forças interpartículas. O valor de pH e da concentração de eletrólitos pode ser usado para controlar as características de superfície propiciando condições de agregação e dispersão que terão efeito marcante sobre a reologia das polpas. (Johnson *et al*, 2000).

De acordo com Hiemenz & Rajagopalan (1997), a carga da partícula complica a análise da viscosidade. Como o fenômeno osmótico, a viscosidade das dispersões com partículas carregadas é altamente sensível à concentração de eletrólitos. Eletro neutralidade requer que uma quantidade igual de cargas opostas esteja presente não tão distante da superfície da carga. A superfície de carga da partícula e os contra-íons são referenciados com a dupla camada elétrica. Os contra-íons são distribuídos a partir da região que estende uma distância da superfície das partículas por causa do movimento térmico (difuso) dos contra-íons. Esta região é conhecida como região difusa da dupla camada e depende da concentração e carga dos contra-íons e do potencial elétrico na superfície das partículas. É conveniente pensar que a região difusa da dupla camada é uma atmosfera iônica que fica ao redor da partícula. Qualquer movimento da partícula afeta a atmosfera iônica. O resultado da contribuição elétrica para resistir ao movimento da partícula se manifesta como um efeito adicional viscoso, conhecido como efeito eletro viscoso.

Duas partículas carregadas aproximando-se uma da outra percebem a presença uma da outra através da sobreposição de suas duplas camadas elétricas. Esta sobreposição resulta em uma força repulsiva entre partículas com cargas parecidas.

As partículas dispersas também são atraídas através das forças de Van der Waals a qual diminui com o aumento da separação interpartículas.

O efeito eletro viscoso é classificado em três categorias dependendo da origem do mecanismo latente.

- 1) Desde que uma taxa de fluxo para uma pressão idêntica caia ao longo do comprimento do capilar será grande a ausência do efeito da dupla camada, a presença da dupla camada elétrica faz o líquido parecer ter um aumento de viscosidade. O efeito é um aumento na viscosidade de dispersões, sendo conhecido como primeiro efeito eletro viscoso.
- 2) O segundo efeito eletro viscoso se refere a uma mudança no comportamento reológico de uma dispersão carregada resultado da interação interpartículas.
- 3) O termo efeito eletro viscoso terciário é aplicado para mudanças na conformação de polieletrólitos que são causados por interações intramoleculares da dupla camada. É habitual estender a definição para todos os efeitos os quais a geometria do sistema é alterada como um resultado das interações da dupla camada.

As propriedades reológicas são importantes para estabelecer a condição ótima de manuseio e transporte por tubulação de polpas, sem que ocorra sedimentação das partículas (Nguyen e Boger, 1998).

É sabido que partículas finas menores que $1\mu\text{m}$ em suspensão podem ser atraídas umas pelas outras através das forças de Van der Waals para formarem agregados ou flocos, o que evidentemente aumenta a viscosidade da suspensão (He *et al*, 2006).

3.5 Classificação dos fluidos viscosos

Os fluidos viscosos podem ser classificados em função de seu comportamento reológico. Este envolve a determinação experimental e análise da relação entre taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento. Essencialmente, os fluidos podem ser classificados em **Newtonianos** e **não-Newtonianos**.

Segundo Ferreira *et al* (2005), fluidos Newtonianos são aqueles que apresentam uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, ou seja, apresentam viscosidade constante, de acordo com a Figura 3.5. Como exemplos de fluidos Newtonianos, podem-se citar os óleos, soluções de polímeros e a água.

De acordo com Hiemenz & Rajagopalan (1997), desvios do comportamento Newtoniano ocorrem por várias razões, mas interessa principalmente dois efeitos: aqueles devido às interações hidrodinâmicas interpartículas e aqueles devido às forças coloidais como os efeitos eletrostáticos. Os efeitos hidrodinâmicos existem mesmo para partículas neutras embora elas se tornem importante a partir de concentrações de sólidos mais elevadas. As forças coloidais podem exercer influência significativa até mesmo em pequenas frações de volume se a faixa de atração e repulsão coloidal é significativa.

Os fluidos que apresentam uma viscosidade aparente dependendo da taxa de cisalhamento, ou seja, a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não é constante, são denominados fluidos não-Newtonianos e podem ser classificados em: pseudoplástico com tensão de escoamento, plástico de Bingham, pseudoplástico e dilatante (Possa e Lima, 2000).

Para Hiemenz & Rajagopalan (1997), os fluidos não-Newtonianos são aqueles onde a viscosidade não é constante mesmo em temperatura e pressão constante. A viscosidade depende da taxa de cisalhamento ou, mais precisamente, de um histórico cinético prévio. Relação linear entre a taxa de cisalhamento e a força de cisalhamento não é suficiente. O coeficiente de viscosidade é significativo apenas para fluidos newtonianos, neste caso sendo o ângulo do gráfico força de cisalhamento versus taxa de cisalhamento. Para fluidos Não-Newtonianos, o gráfico geralmente é não linear, portanto o ângulo varia ponto a ponto, sendo chamado de viscosidade aparente.

De acordo com Ferreira (2005), os fluidos não-Newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, isto é, o valor da viscosidade mudará de acordo com a variação nos valores da taxa de cisalhamento. Estes valores de viscosidades são considerados como viscosidade aparente, podendo aumentar ou diminuir, de acordo com as características do fluido.

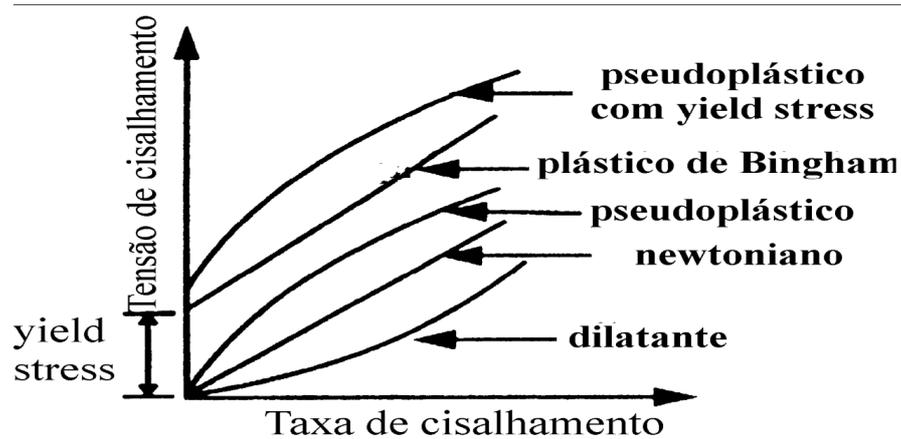


Figura 3.5 - Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de suspensões (Kawatra *et al*, citado por Ferreira *et al*, 2005)

Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento; nesse caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico. Entre as várias causas para esse comportamento, Shaw (1975) cita, para o caso de um sistema agregado, que a diminuição da quantidade de líquido retido pelos agregados, através da agitação, provoca uma diminuição na viscosidade.

Quando o contrário acontece, ou seja, a viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento, diz-se que o material possui comportamento dilatante e, de acordo com Shaw (1975), esse comportamento está relacionado à quebra do empacotamento formado por essas partículas e, como o sistema possui uma alta concentração de sólidos, o líquido presente não é suficiente para preencher todos os espaços vazios (Ferreira, 2005).

Ainda segundo Ferreira *et al* (2005), os fluidos plásticos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento ou “yield stress”, para que ocorra o movimento das partículas (Figura 3.5). Esse tipo de comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas e ultrafinas.

De acordo com Hiemenz & Rajagopalan (1997), os fluidos Não-Newtonianos podem ser classificados em três tipos:

- 1) Fluidos que possuem uma força de cisalhamento e que em qualquer ponto dependem apenas da taxa de cisalhamento e são independentes do tempo.

Estes incluem: a) os fluidos que são conhecidos como Plásticos de Bingham, materiais que requerem uma força de cisalhamento mínima, conhecida como “yield stress” antes de se deformarem; b) fluidos pseudoplásticos sendo aqueles em que a força de cisalhamento (“yield stress”) diminui com a taxa de cisalhamento e; c) fluidos dilatantes, aqueles em que a força de cisalhamento aumenta com a taxa de cisalhamento.

- 2) Fluidos em que a razão força de cisalhamento/ taxa de cisalhamento têm um comportamento dependente do tempo. Estes caem em uma das categorias: a) tixotrópico ou b) reopético. Nos fluidos tixotrópicos, a microestrutura do fluido progressivamente se rompe e a viscosidade diminui. Em fluidos reopéticos, a força aplicada promove uma formação gradual de uma estrutura local e a viscosidade aparente aumenta.
- 3) Materiais viscoelásticos que apresentam um comportamento em algum lugar entre um sólido e um líquido.

Como cita Hiemenez e Rajagopalan (1997), em relação à mudança da viscosidade com o tempo, existem dois tipos de fluidos, o tixotrópico e o reopético. Os fluxos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade com o tempo e os fluxos reopéticos, apresentam um aumento da viscosidade com o tempo, mantendo-se a mesma taxa de deformação. (Machado, 2000).

A Figura 3.6 abaixo indica o comportamento de um fluido em que a viscosidade independe do tempo e a Figura 3.7 indica o comportamento de um fluido em que a viscosidade depende do tempo (fluido tixotrópico).

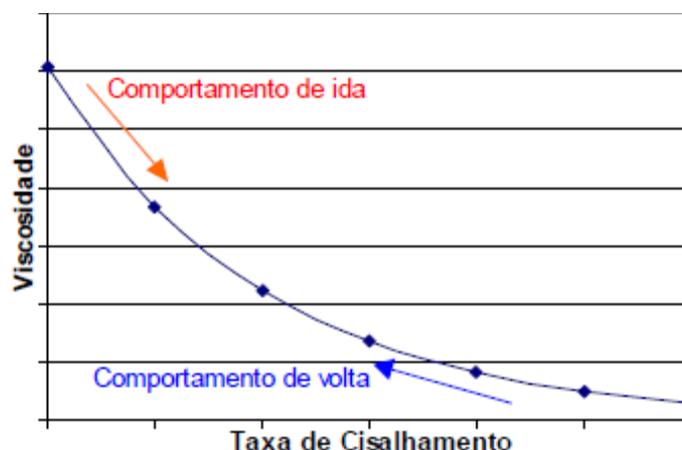


Figura 3.6 - Comportamento da viscosidade independente do tempo (Boger, 2003 citado por Barreda, 2008)

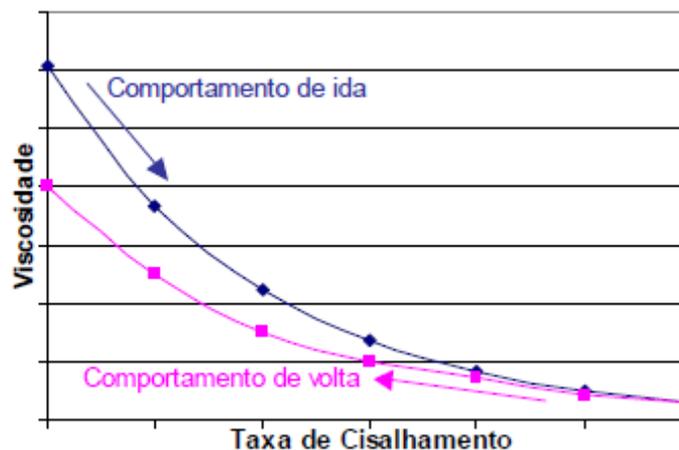


Figura 3.7 - Comportamento tixotrópico da viscosidade (dependente do tempo). (Boger, 2003 citado por Barreda, 2008).

As propriedades reológicas, em termos macroscópicos, serão influenciadas pelas interações, em nível microscópico, devido a transferências de energia nessas interações. Os efeitos são: movimento Browniano, hidrodinâmicos, de empacotamento, coloidal e efeito de inércia (Ferreira *et al*, 2005).

É sabido que vários fatores podem influenciar o comportamento reológico de polpas. Estes incluem: porcentagem de sólidos, granulometria e as propriedades químicas das superfícies das partículas. Forças interpartículas, as quais surgem na interface química sólido-solução, cada vez mais domina as interações entre as partículas vizinhas enquanto os tamanhos das partículas da polpa diminuem. Assim, manipulando a química da superfície das partículas pode-se alterar o comportamento reológico da polpa. Uma descrição do comportamento reológico da polpa é importante para identificar as condições ótimas de transporte hidráulico. Por exemplo, a energia requerida para bombear uma polpa pode ser prevista através do “yield stress” e da viscosidade da polpa. Como bombeamento é um processo energeticamente intenso, há, obviamente, um ganho financeiro se a energia requerida para transportar partículas de polpa for reduzida (Huynh *et al*, 2000).

De acordo com Huynh *et al* (2000), o comportamento do “yield stress” é consistente com o aumento da estabilidade da dispersão da polpa quando o pH é reduzido (para uma polpa de calcopirita). Então para uma polpa com uma porcentagem de sólidos

fixa, a tendência do comportamento reológico observado pode ser atribuída somente às diferentes condições químicas empregadas. A Figura 3.8 mostra o “yield stress” de uma polpa (calcopirita) em função do pH, utilizando ácido clorídrico, nítrico e sulfúrico como modificadores de pH.

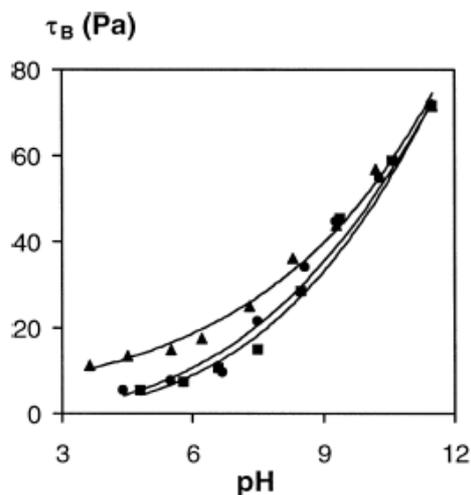


Figura 3.8 - O “yield stress” para uma polpa de calcopirita (69% em massa de sólidos) em função do pH usando (■) HCl, (●) HNO₃ e (▲) H₂SO₄ para ajustar o pH. (Huynh *et al*, 2000)

O comportamento reológico de uma polpa mineral é um indicativo do nível de interações interpartículas ou agregação da polpa. Por isso, é usado como uma variável no controle de processos industriais tais como transporte de polpas, filtragem e moagem a úmido (Muster e Prestidge citado por He e Forssberg, 2007).

Com a crescente demanda de se processar materiais cada vez mais finos nas indústrias, o uso de moinhos para moer ultrafinos tem aumentado em vários campos como na mineração, materiais cerâmicos, pigmentos, produtos químicos, farmacêuticos (He e Forssberg, 2007).

Propriedades físicas e químicas da polpa, como concentração de sólidos, uso de dispersante, tamanho de partículas, pH, taxa de cisalhamento e temperatura da polpa devido à mudança ou modificações nas propriedades da superfície provocam alterações na reologia da polpa. Forças interpartículas, tais como Van der Waals e forças eletrostáticas conduzem à formação de agregados. Isto resulta em mudanças nas propriedades reológicas na operação de moagem a úmido de ultrafinos. A

otimização do comportamento reológico na moagem pode melhorar a eficiência da energia requerida para moagem (He e Forssberg, 2007).

É sabido que a viscosidade de polpas afeta a moagem de minérios a úmido. Moys (1989) enfatizou que a viscosidade, não a porcentagem de sólidos, na polpa é o fator que governa as interações entre o meio e a polpa dentro do moinho, e é a variável que deveria ser medida para controle de moinhos. A reologia da polpa afeta o comportamento de quebra e mecanismo de transporte de massa em um moinho, e também, influencia na eficiência de energia na moagem (Shi e Napier-Munn, 2002).

Além da importância do estudo do comportamento reológico da polpa na etapa de moagem, está sendo bastante estudado o uso de transporte de materiais finos por mineroduto como alternativa ao transporte por ferrovia. Para se prever um transporte seguro da polpa por mineroduto evitando-se altas pressões, revestimento excessivos de tubulações, potência instalada de bombeamento elevada é importante o estudo das características reológicas da polpa para assegurar que o dimensionamento não seja superestimado. O custo de instalação do transporte de polpa por mineroduto é da mesma ordem de grandeza do transporte por ferrovia, tendo como vantagem o menor custo operacional. A Figura 3.9 mostra uma bomba de deslocamento positivo utilizada para bombeamento de polpas a altas pressões, com um alto valor de tensão de cisalhamento (“yield stress”). A Figura 3.10 representa o corte de uma seção da bomba de deslocamento positivo.



Figura 3.9 – Bomba GEHO, deslocamento positivo. (www.weirminerals.com)

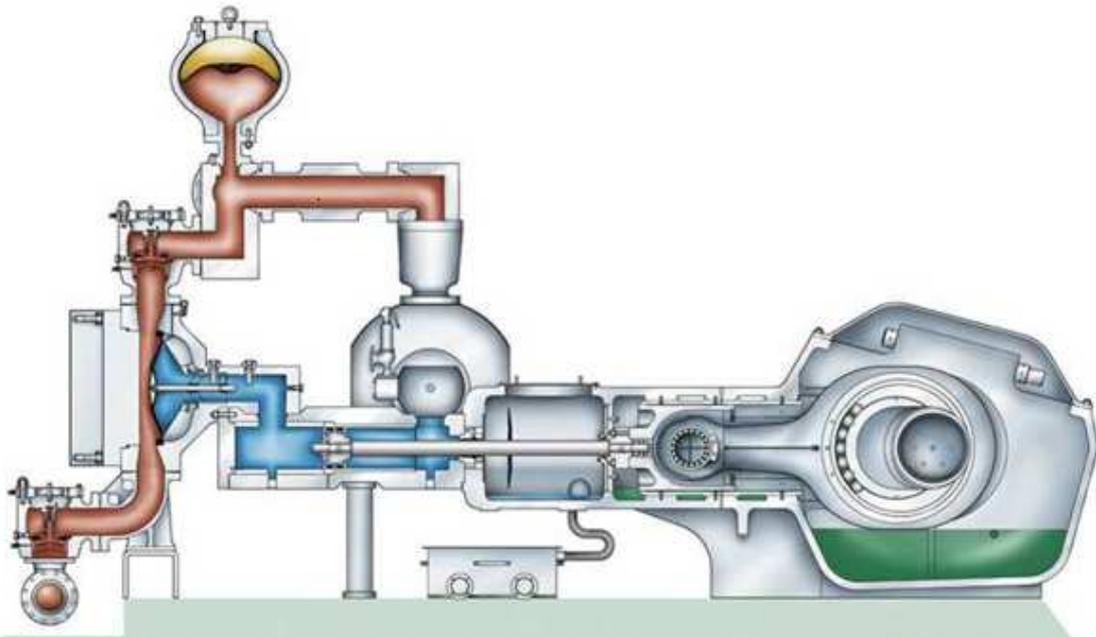


Figura 3.10 – Corte de uma seção da bomba GEHO, deslocamento positivo. (www.weirminerals.com).

Usualmente, o sistema de disposição de rejeitos é realizado através do bombeamento de baixas concentrações de sólidos em suspensão, para uma área determinada, onde os sólidos sedimentam formando uma cama de sólidos e a água sobrenadante é removida através da evaporação ou é bombeada novamente para a usina, para reutilização, como um fluido heterogêneo sob regime turbulento. A natureza desse rejeito faz com que as velocidades de transportes dessas partículas ao longo da tubulação sejam elevadas para manter os sólidos em suspensão. O projeto desse tipo de tubulação é baseado em uma tecnologia desenvolvida na metade do século passado e geralmente é limitada a concentrações em volume de sólidos inferior a 40% (Pullum et al, 2006).

A disposição de rejeitos com um alto teor de sólido diminui a recirculação de água para usina, diminui o diâmetro da tubulação de retorno da água e também, o diâmetro da tubulação de rejeitos que seguirá para a barragem.

Quando se trata de transporte de polpa a longa distância, um dos problemas mais sérios que deve ser evitado é a dificuldade de reinício de operação devido à obstrução da linha pelo próprio material e/ou compactação do material sedimentado de modo a

impedir a repolpagem. As principais condições de operação que determinam à ocorrência de obstrução são: velocidade de bombeamento, distribuição granulométrica da polpa, concentração de sólidos, pH, formato de partículas.

Tem-se como exemplo, o mineroduto da Samarco que está em operação desde 1992 com polpa proveniente do beneficiamento de minérios do Complexo de Alegria, que é um grupo de nove minas de minério de ferro localizadas no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

Os minérios de ferro explorados no Complexo de Alegria sofrem um processo de beneficiamento incluindo flotação catiônica reversa em células mecânicas. Os reagentes utilizados no processo de enriquecimento do concentrado de ferro para remover as impurezas de sílica são: amina (coletor de sílica) e amido gelatinizado (depressor de ferro). O ajuste final das características físicas do minério é realizado em uma moagem secundária para adequar a granulometria de 86% passante em 325 mesh (44 μm). O concentrado remoído segue para o espessamento juntamente com a adição de leite de cal e floculante não-iônico onde a polpa será adensada até uma concentração na faixa de 70% de sólidos em massa. O underflow do espessador (polpa com a porcentagem de sólidos adequada ao transporte) é estocado em tanques onde é adicionado leite de cal novamente para elevar o pH até uma faixa de 11,2 – 11,6 e é então, transportado por aproximadamente 66 horas por mineroduto (Bragança e Silva, 2004).

De acordo com Bragança e Silva (2004), o estudo confirma que o leite de cal é efetivo como modificador reológico para evitar a formação de “plug” (entupimento) depois de uma parada do mineroduto. Os parâmetros viscosidade e “yield stress” foram avaliados e a mudança com o tempo também foi verificada. A amostra sem leite de cal mostrou um comportamento plástico no período inicial de agitação, mas o sistema estabilizado causou um abrupto decréscimo para zero no valor do yield stress. Amostras coaguladas com leite de cal, por outro lado, tiveram um leve decréscimo no “yield stress”, mas mantendo o comportamento de Plástico de Bingham mesmo após 66 horas de agitação. A estrutura formada com a adição de leite de cal previne a sedimentação de partículas em direção ao ponto mais baixo do teste de ângulo de repouso que causa obstrução. A amostra com leite de cal apresenta uma menor probabilidade de formação de “plug” e um menor nível de compactação em relação às

amostras sem adição de leite de cal, o que pode permitir o reinício de operação do mineroduto de forma segura e sobre controle. A Figura 3.11 representa um esquema do teste do ângulo de repouso.

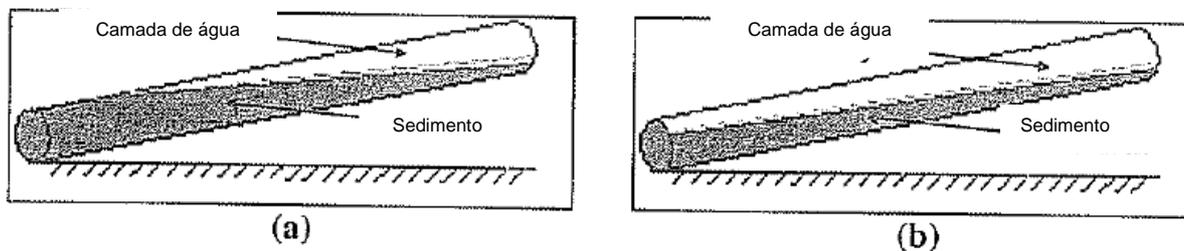


Figura 3.11 – Figura esquemática do teste do ângulo de repouso: a) deslizamento do material em direção à parte baixa do tubo resultando em formação de “plug” e b) leve deslocamento do sedimento sem formação de “plug” no tubo (Bragança e Silva, 2004)

Em estudo posterior de Bragança e Silva (2007), desde o “start-up” da operação do mineroduto da Samarco até o ano de 2000, uma pequena dosagem de leite de cal era adicionada na polpa antes de ser transportada. Em 2000, uma dosagem de leite de cal muito maior foi adotada como uma solução do comportamento do fluido para os diferentes tipos de minérios de ferro os quais formam o Complexo de Alegria. Desde então, a adição de leite de cal tem várias funções: controlador de pH, modificador das propriedades reológicas da polpa e controle da compactação da sedimentação. O controle do pH é importante para proteger a parede interna da tubulação do mineroduto contra corrosão, como recomenda o manual de operação do mineroduto.

O modificador das propriedades reológicas atua modificando as propriedades da polpa para evitar a obstrução do mineroduto após uma parada. A adição de leite de cal permite a formação de uma fina camada de água sob a cama de sólidos formada durante a parada do mineroduto, facilitando o reinício da operação, conforme estudos anteriores de Bragança e Silva (2004).

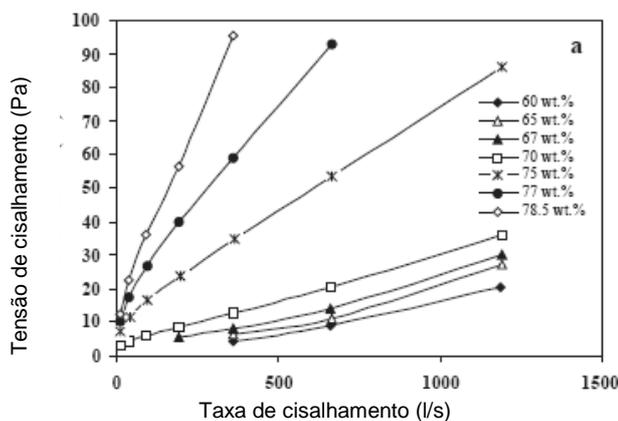
Outro aspecto importante para o reinício da operação é a compactação do sedimento algumas horas depois da parada do mineroduto. A falta de obstrução faz o repolpamento possível, mas inviável se os sólidos sedimentados estão muito compactados. O teste do ângulo de repouso dá uma indicação se a polpa tem tendência à formação de “plugs”, já para indicação da compactação da cama de sólidos formada após a parada do mineroduto é o teste de penetração.

De um lado, a adição de leite de cal no mineroduto da Samarco é essencial para uma parada adequada e um reinício de operação seguro e efetivo. Por outro lado, a presença de íons de cálcio no sistema causa descamação de equipamentos importantes como os tanques de estocagem de polpa, tubulações de água de processo e degrada o meio filtrante do estágio subsequente que é a filtragem. Portanto, Bragança e Silva (2007) estudaram a utilização de um sal de amônia quaternário o qual afeta as propriedades de transporte da polpa. Após os testes experimentais, Bragança e Silva (2007) concluíram que o sal de amônia quaternário pode substituir o leite de cal, pois o teste do ângulo de repouso e o teste de penetração indicaram que não há tendência à formação de “plugs” e nem da formação de uma cama de sólidos muito compactada o que favorece o repolpamento.

A utilização de leite de cal como modificador das propriedades reológicas tem sua efetividade comprovada pelos diversos anos de operação do mineroduto da Samarco e, economicamente, é um dos coagulantes mais baratos no Brasil. Apesar dos testes experimentais demonstrarem que o sal de amônio quaternário pode substituir o leite de cal, deve ser realizado um teste industrial para validar esses resultados experimentais. Além disso, o sal de amônio quaternário não oferece uma solução econômica para a substituição do leite de cal.

3.4 Influência da concentração de sólidos

A influência da concentração de sólidos na reologia da polpa é significativa desde que várias faixas de concentrações de sólidos podem levar a diferentes tipos de curvas de fluido, como mostrado na Figura 3.12 (He *et al*, 2006).



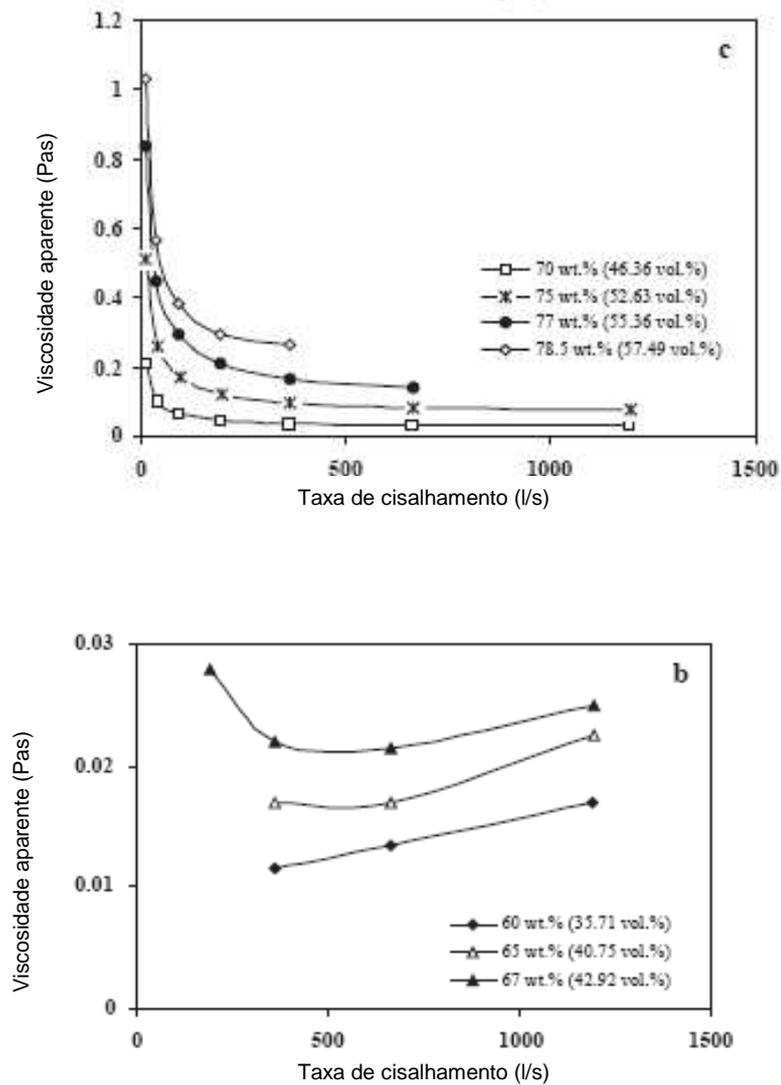


Figura 3.12 - Efeitos da concentração de sólidos nas propriedades reológicas de uma polpa de calcário (He, *et al*, 2006).

O comportamento da reologia da polpa é transformado de um fluido com característica levemente dilatante para um pseudoplástico com “yield stress” quando a concentração de sólidos varia de 60% (em massa) para 78,5% (em massa). Polpas de calcário com concentração de sólidos abaixo de 65% (em massa) apresentam fluidos fracamente dilatante. Isto é devido à diluição da polpa, pois, a distância entre as partículas é grande, então as partículas dos sólidos na polpa não estarão sujeitas às forças de Van der Waals, mas estarão livres para se moverem. O local de acumulação de partículas sólidas provoca na polpa um comportamento de um sistema sólido. Em um sistema

dilatante, entretanto, este estado não é estável. Assim que as forças externas são removidas, as partículas sem nenhuma tendência a se aderirem, são distribuídas uniformemente na suspensão. Em concentrações de sólidos acima de 67% (em massa), o escoamento de polpas exibe características de um fluido pseudoplástico sem um “yield stress”, ou de um fluido dilatante ou de um plástico de Bingham dependendo da taxa de cisalhamento. Isto indica que em pequenas faixas de taxa de cisalhamento, as forças de atração interpartículas são predominantes sobre as forças hidrodinâmicas (He *et al*, 2006).

O comportamento hidrodinâmico da polpa é função da concentração de sólidos em volume, do tamanho das partículas e da temperatura da polpa (Shi e Napier-Munn, 1996).

Em suspensões com baixos percentuais de sólidos, a maioria das polpas apresenta comportamento newtoniano (Kawatra *et al*, 1996).

3.5 Influência da reologia na formação de pastas

A disposição de rejeitos na forma de pastas minerais apresenta inúmeras vantagens em relação à forma tradicional de disposição de rejeitos. Além de ser mais seguro, necessita de menores áreas para disposição, podendo ser utilizada a cava para esta finalidade.

Na forma tradicional de disposição de rejeitos, os mesmos eram dispostos nas barragens com um pequeno percentual de sólidos. Após algum tempo, o rejeito sedimentava e a água sobrenadante era bombeada novamente para reuso no processo e parte desta evaporava. Com a disposição de rejeitos na forma de pasta, tem-se um ganho energético e não há perdas de água por evaporação.

Uma pasta não pode ser definida pelo valor percentual de sólidos, pois o ponto avaliado é aquele no qual não há excesso de água e isso depende de cada material. Uma pasta deve conter suficientes partículas finas, nas quais a água é retida, especialmente quando o objetivo da pasta é ser transportada por tubulação. Considerando dados empíricos e experiência operacional, mostra que uma pasta de

rejeitos deverá ter, ao menos, 15% (em massa) de partículas menores que 20 μm . Os finos permitem que a pasta escoe através da tubulação sem segregação das partículas, enquanto retém suficiente água coloidal para prevenir o escoamento de água. Com o aumento da proporção de finos, mais água é necessária para a maior área superficial dos mesmos. Se o material possui alta porcentagem de sólidos e uma grande resistência para escoar, ele não vai espalhar e será empilhado diretamente abaixo do ponto de descarga. Já se a porcentagem de sólidos é pequena e o material é mais diluído, ele escoará muito rápido e não formará a pilha desejada (Kwah *et al*, 2005).

Para o bombeamento de pastas a aplicação da reologia é de extrema importância para se conhecer as condições ótimas de operação, tais como o “yield stress” e a viscosidade aparente para que não ocorra sedimentação de partículas, a quantidade de finos presentes para melhor escoamento e, com isso, obter um menor gasto energético.

Nas Tabelas III.1 e III.2 são mostradas a caracterização granulométrica e a correlação entre adensamento de sólidos e reologia de pastas, respectivamente. Os rejeitos de zinco da mina Greens Creek localizada no Alaska-USA tinham, na realidade, quantidades de cimento portland entre 3 e 5% em massa, sendo testados “pastefill” com 5% de cimento para concentrações de sólido entre 74 e 80%.

Da Tabela III.1 pode ver-se a distribuição de tamanho de partículas a qual apresenta um percentual elevado de material fino (60% < 25 μm). Da Tabela III.2 observa-se a correlação entre a variável adensamento de sólidos da pasta e as respostas reológicas viscosidade de Bingham e tensão de cisalhamento, as quais mostram uma variação do tipo exponencial com a fração volumétrica de sólidos (Shou, 2002 citado por Osorio, 2007).

Tabela III.1: Frações passantes acumuladas da amostra sólida utilizada

Tamanho da partícula μm	Fração passante acumulada %
74	85,02
25	59,38

Tabela III.2: Correlações entre adensamento de sólidos e reologia da pasta

Cw	η (Pa.s)	τ_Y (Pa)
74	1,12	18,89
75	1,52	16,44
76	1,55	27,96
78,1	2,23	20,98
$\tau_Y = A.\Phi B$	A = 41153; B = 4,6144	
$\eta = 10Vt.B'$	B' = 3,595	

Onde:

Cw: é a concentração de sólidos em massa;

Φ : é a fração em volume de sólidos;

τ_Y : é a tensão de escoamento do material;

η : é a viscosidade de Bingham;

A, B e B': são parâmetros reológicos característicos.

3.6 Teste de Abatimento (“Slump”)

O teste de abatimento (“slump”) foi originalmente utilizado para determinar a consistência do concreto fresco e foi então adaptado para a indústria mineral. O teste de slump encontra extensiva aplicação para monitoramento da consistência de rejeitos nas operações de disposição. A Figura 3.13 mostra uma representação esquemática do teste de “slump” (Clayton et al, 2003).

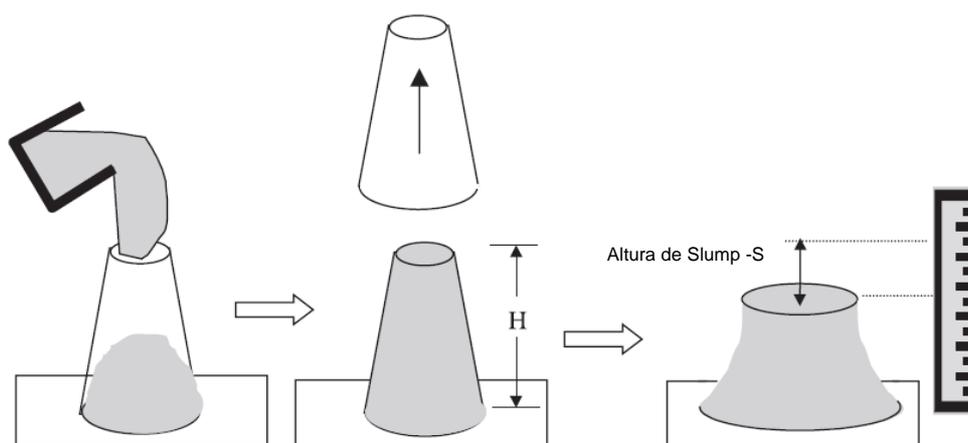


Figura 3.13 - Representação esquemática do teste de “Slump” (Clayton et al, 2003)

A altura de "slump" é utilizada como parâmetro de controle, para avaliação da consistência de uma pasta. Esta altura é dependente tanto da tensão de escoamento

quanto da densidade do material. No contexto mineiro, estes fatores poderiam variar com as mudanças na origem do minério ou mudanças em seu processamento. Como resultado, a utilização da altura de "slump" como o único parâmetro para avaliação da consistência para o sistema de disposição de rejeitos pode não ser suficiente (Barreda, 2008).

De acordo com Clayton, Grice e Boger (2003), a medida da altura de "slump" é independente da estrutura da amostra, do material, da taxa de deformação e do tempo de medição. Segundo o estudo realizado por Clayton *et al* (2003), o modelo cilíndrico de slump é mais preciso quando o valor do yield stress é relativamente baixo e a altura de slump é alta.

Segundo Barreda, 2008, para aplicações industriais, o teste cilíndrico tem várias vantagens sobre o teste de cone de "slump", algumas delas são as seguintes:

- determinação mais precisa da tensão de escoamento, com respeito à simetria do cone;
- o modelo cilíndrico, é matematicamente mais fácil para o desenvolvimento de modelos;
- maior facilidade para o enchimento com menor quantidade de bolhas de ar que podem afetar os resultados;
- a forma do material que passou pelo teste de "slump" é mais consistente, especialmente para valores elevados de tensão de escoamento;
- as medições do teste de cilindro podem ser completadas usando uma seção do tubo, enquanto as medições de cone só podem ser feitas com um cone manufaturado com um maior número de especificações.

Um aumento na altura do cilindro manterá um valor de yield stress adimensional e uma altura de slump dentro de uma região de precisão. Para verificar essa previsão, testes cilíndricos de slump foram realizados variando a altura dos cilindros (mantendo a razão entre altura e diâmetro igual a 1). Com o aumento da altura do cilindro, o valor de yield stress predito com o modelo de slump desvia do resultado do yield stress de Vane com o aumento do valor do yield stress, ou seja, quanto maior for o valor do yield stress, maior será o desvio com o yield stress "real". (Clayton *et al*, 2003).

Na indústria mineral, o teste de slump é utilizado mais extensivamente para aplicações em operações de “paste fill” as quais utilizam o rejeito gerado para preencher as cavas subterrâneas. Para maximizar a disposição de rejeitos e minimizar o uso de cimentos, sistemas de “paste fill” operam na faixa de concentração de sólidos de 70% a 90% em massa.

Para aplicações de polpa em mineroduto, a utilização do teste de “slump” como medida do valor de “yield stress” não se aplica, pois normalmente a faixa de operação desses bombeamentos de longa distância está ao redor de 2 bar não sendo precisa a relação do “yield stress” medido com o “yield stress” adimensional predito pelo teste de “slump”.

3.7 Dupla camada elétrica

As propriedades elétricas das interfaces são estudadas através do modelo da dupla camada elétrica – DCE. A importância das interações coulômbicas levou Parks (1975) a classificar a adsorção em não específica e específica, conforme a predominância de mecanismos eletrostáticos, respectivamente. Adsorção estritamente não específica é incapaz de reverter o sinal da carga do sólido (Chaves, 2006).

A carga superficial influencia a distribuição dos íons no meio polar, de modo que as partículas sólidas ficam rodeadas por uma nuvem de íons. Íons de carga oposta (contra-íons) são atraídos pela superfície e íons de carga de mesmo sinal (co-íons) são repelidos para mais longe da superfície, garantindo a eletroneutralidade da suspensão. A teoria da dupla camada elétrica descreve a distribuição dos íons e, portanto, a intensidade dos potenciais elétricos gerados pela superfície carregada (Shaw, 1992, citado por Bragança, 2007)

A imersão de um sólido em uma solução aquosa produz uma região não homogênea na interface sólido-líquido. O excesso de carga positiva ou negativa, originada da superfície mineral é balanceado por contra-íons formando uma região difusa com mesma intensidade de carga, porém de sinal oposto (Fuesternau *et al.*, 2005). A dupla camada elétrica é representada pela Figura 3.14.

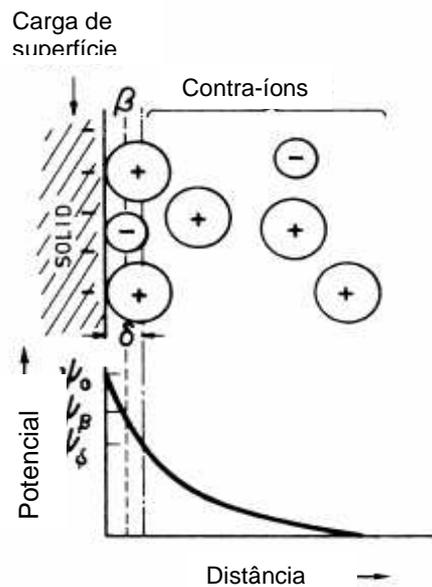


Figura 3.14 - Representação esquemática da dupla camada elétrica (DCE) e do potencial na interface sólido-líquido. (Fuesternau *et al.*, 2005)

O parâmetro mais importante para descrever a DCE de um mineral em solução aquosa é o Ponto de Carga Zero (PCZ). O PCZ expressa o pH no qual a mobilidade eletroforética da substância é zero. Nos óxidos minerais o sinal e a intensidade da carga superficial são determinados pelos íons H^+ ou pela hidroxila OH^- . Esses íons são denominados íons determinadores de potencial (IDP) e são influenciados diretamente pelo pH da solução. A adsorção/dissociação de íons H^+ na superfície da hidroxila (OH^-) determinará a carga superficial da partícula.

O potencial zeta é medido no plano de cisalhamento, portanto há a necessidade de se adicionar íons para preencher a camada difusa que anulará a carga.

De acordo com Chaves, 2006 a medida direta de potencial somente é possível em um plano de localização indefinida, no interior da camada difusa, provavelmente muito próximo ao plano externo de Helmholtz, conhecido como Plano de Cisalhamento. A expressão vem do fato da interface sólido – líquido se cisalhar ou romper quando ocorre movimento relativo entre uma partícula sólida carregada e o líquido em que ela está imersa, na presença de um campo elétrico. Esse deslocamento diferencial das partes da dupla camada elétrica leva ao aparecimento de um potencial eletrocinético, medido através dos quatro fenômenos eletrocinéticos:

- eletroforese;
- eletrosmose;
- potencial de escoamento;
- potencial de sedimentação.

A determinação do ponto isoelétrico (PI), que determina o pH onde o óxido é isoelétrico, é importante para o processo de flotação, pois conhecendo o PI, determina-se se o coletor aniônico ou catiônico será mais efetivo como reagente da flotação.

Quando um óxido relativamente insolúvel é colocado em uma solução aquosa, há uma redistribuição das espécies iônicas na interface sólido – líquido resultando na formação da dupla camada elétrica. No ponto isoelétrico há um número igual de superfícies complexas positivas e negativas.

Para determinação do ponto isoelétrico (PI) através do método de Mullar e Roberts (1966), suponha que dez béqueres contenham quantidades iguais de pó de óxido (material abaixo de 38 μm), suspensos em uma solução eletrolítica. O pH em cada béquer será alterado para novos valores, hipoteticamente, como 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Se o pH_1 é o pH inicial e pH_2 é o pH final, então $\Delta\text{pH} = \text{pH}_1 - \text{pH}_2$ será positivo para pH alto e negativo para pH baixo. O ponto isoelétrico (PI) deve ser pH_1 , ou pH_2 onde ΔpH é zero. O procedimento descrito pode ser utilizado para medir o ponto isoelétrico quando não há o equipamento para medir o pontencial zeta ou até mesmo para comparar os resultados gerados pelos dois métodos.

3.8 Medidas da viscosidade e da tensão de escoamento

A tensão de escoamento de suspensões concentradas pode ser determinada através de varias técnicas. Infelizmente, vários métodos existentes são tediosos para a execução ou limitados na sua aplicabilidade, com resultados dependendo das condições experimentais empregadas.

A avaliação da tensão de escoamento mediante o método do “vane” (pás), mostrou ser adequada quando comparada com métodos reológicos mais convencionais. O

princípio do método de vane consiste basicamente de quatro pás como se apresenta na Figura 3.15 a seguir.

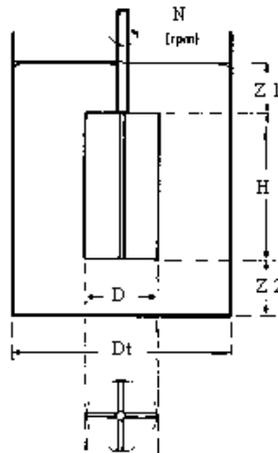


Figura 3.15 - Diagrama de vane de quatro paletas em operação. (Nguyen et al, citado por Barreda).

Estas pás são imersas na amostra e iniciando-se a sua rotação lentamente até uma rotação constante em que se procura detectar o momento de rendimento em que o esforço de torsão exercido pelas pás alcança um valor máximo.

É sabido que suspensões reológicas afetam muitas operações minerais tais como moagem e classificação. Entretanto, medidas de características reológicas da polpa usando viscosímetros comuns se tornam mais difíceis porque as polpas minerais contêm uma velocidade de sedimentação alta. Se precauções apropriadas não forem tomadas, as observações realizadas em instrumentos padrão podem induzir as determinações errôneas das características do fluido, e correlações entre reologia e o desempenho do processo e não poderão ser determinadas (Kawatra e Bakshi, 1995).

De acordo com Akroyd e Nguyen, 2003, uma importante característica de qualquer reômetro é que ele é usado para medir as propriedades de uma polpa para manter as partículas sólidas em uma suspensão homogênea. Uma variedade de viscosímetros foi desenvolvida recentemente para medir as propriedades do fluido. O mais simples e mais popular utiliza de impelidores para misturar as partículas em suspensão e manter a polpa homogênea. O torque requerido para girar o impelidor a certa velocidade é medido a partir do qual se obtém uma medida da viscosidade.

A viscosimetria é um segmento da mecânica dos fluidos que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, onde a componente elástica possa ser desprezada. Os viscosímetros medem apenas os parâmetros viscosos do fluido sob cisalhamento contínuo. Já o reômetro mede as propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos (Machado, 2002).

Os viscosímetros se baseiam em escoamentos de fluxo permanente laminar, através de geometrias definidas. Estes escoamentos são:

- a) em torno de uma esfera;
- b) entre placas planas paralelas;
- c) entre cilindros coaxiais;
- d) através de tubos de seção circular;
- e) entre cone e placa circular;
- f) entre placas circulares.

A Figura 3.16 abaixo representa a geometria de fluxos mais usuais para desenvolvimento de viscosímetros.

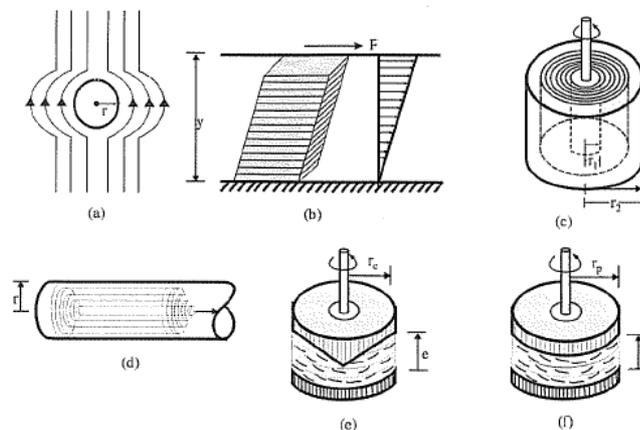


Figura 3.16. Tipos de geometria mais usuais nos projetos de viscosímetros: (a) em torno de esferas, (b) entre placas paralelas, (c) entre cilindros, (d) interior de tubos, (e) entre cone-placa circulares, (f) entre placas circulares (Machado, 2002)

De acordo com Machado (2002), os fluidos são puramente viscosos quando são regidos por uma lei simples da viscosimetria. A energia total fornecida à amostra gera um fluxo bem desenvolvido, sendo esta convertida integralmente em energia calorífica. Nas amostras viscoelásticas, uma parcela da energia fornecida é armazenada elástica

e temporariamente. Quando a componente elástica é relevante, os resultados não podem ser interpretados apenas como viscosidade. Pode-se perceber a existência de uma reação elástica quando, durante a agitação da amostra, esta acende através do eixo, devido ao aparecimento de forças normais, conforme a Figura 3.17.

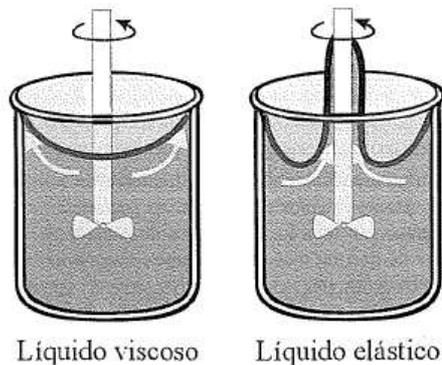


Figura 3.17 - Características de líquidos viscosos e elásticos sob agitação (Machado, 2002)

Tipos de Viscosímetros

A) Viscosímetro de bola

O fluxo de um fluido ao redor de uma esfera é um problema físico de completo entendimento da mecânica dos fluidos. O equipamentos que reproduz este modelo é de construção simples, sendo que o princípio do projeto se baseia na Lei de Stokes, que relaciona a viscosidade de um fluido newtoniano com a velocidade terminal de queda de uma esfera em queda livre, em escoamento muito lento. Este viscosímetro, entretanto, está limitado ao estudo e caracterização de fluidos Newtonianos de baixa viscosidade (1 a 20 cP). A Figura 3.18 a seguir representa o esquema de um viscosímetro de bola.

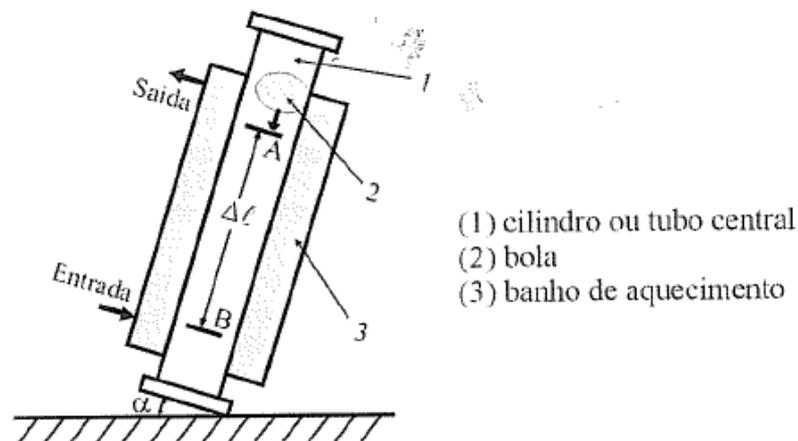


Figura 3.18 - Esquema mostrando o viscosímetro de bola rolando sobre a parede (Machado, 2002)

B) Viscosímetro tubular ou de tubo-capilar

O método consiste em forçar uma amostra de líquido a escoar através de um tubo de diâmetro pequeno, empregando um pistão, extrusor, bomba de deslocamento positivo, ou qualquer outra fonte de pressão. A resistência da amostra em escoar através do tubo, causa uma queda de pressão entre dois pontos. Estes pontos estão espaçados pelo comprimento ΔL e devem estar localizados a uma distância razoável da entrada e da saída do tubo-capilar, onde será medida a queda de pressão. O deslocamento do pistão ou o volume de fluido dividido pelo tempo define a vazão, portanto, a viscosidade da amostra está relacionada com as medidas de vazão, queda de pressão e dimensões do tubo. A Figura 3.19 abaixo representa um esquema de um viscosímetro tubo-capilar.

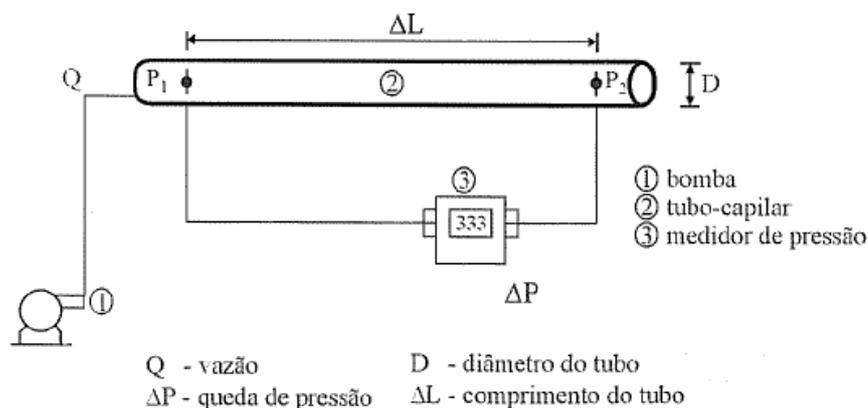


Figura 3.19 - Esquema simplificado de um viscosímetro de tubo-capilar (Machado, 2002).

C) Viscosímetro capilar de vidro

O viscosímetro capilar de vidro é um caso particular de viscosímetro de tubo-capilar onde o escoamento do fluido é causado por uma coluna do próprio líquido. O parâmetro viscoso determinado a partir da medida do tempo de escoamento é, geralmente, a viscosidade cinemática. De um modo geral, esses viscosímetros são adequados para líquidos Newtonianos. É possível, também, com algumas dificuldades operacionais, estudar o comportamento de fluidos não-Newtonianos. A Figura 3.20 abaixo apresenta um esquema de um viscosímetro capilar de vidro.

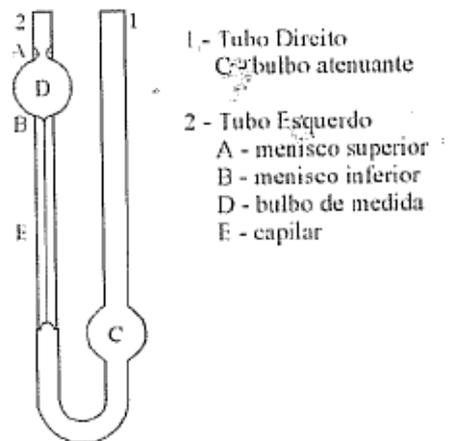


Figura 3.20 - Esquema de um viscosímetro capilar de vidro (Machado, 2002)

D) Viscosímetro de orifício

É composto de um tubo ou orifício, geralmente disposto na vertical, com comprimento pequeno quando comparado ao seu diâmetro. Esse tipo de instrumento não se presta para estudos reológicos, uma vez que a correlação entre as características do fluido e as variáveis geométricas não são boas. Como consequência, os resultados são inexatos e bastante variáveis. Estes viscosímetros são utilizados devido à simplicidade e rapidez na operação, tornando-os úteis para determinações relativas de fluidos Newtonianos e não-newtonianos. A Figura 3.21 a seguir representa o esquema de viscosímetro de orifício.

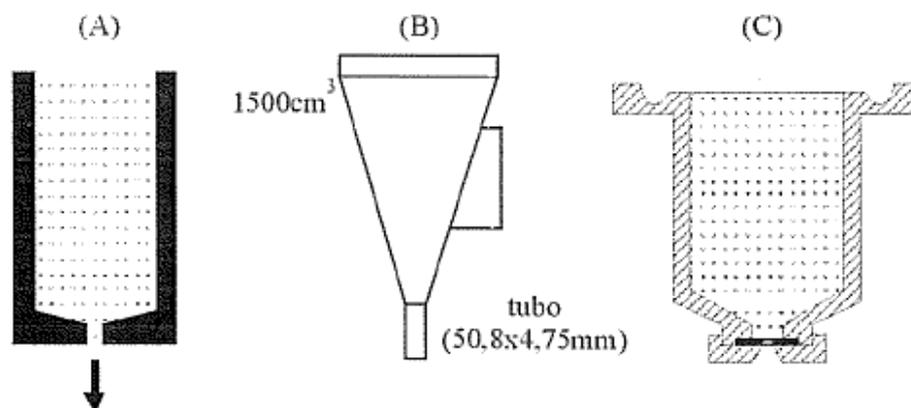


Figura 3.21 - Esquema de três viscosímetros de orifício: (A) Saybolt; (B) Funil-Marsh; (C) vaso Ford (Machado, 2002)

E) Viscosímetro rotativo

O princípio dos viscosímetros rotativos com sensor cilíndrico, cone-placa ou placa-placa, baseia-se na rotação do corpo cilíndrico, cônico ou circular, imerso em um líquido, o qual experimenta uma força de resistência viscosa, quando se impõe uma velocidade rotacional ao sistema. Essa força é função da velocidade de rotação do corpo e da natureza do fluido. A grande vantagem desses viscosímetros é que as medidas podem ser efetuadas de modo contínuo por longos períodos de tempo, para certa condição de tensão e de taxa de cisalhamento.

O viscosímetro rotativo pode ser classificado em dois tipos:

- de tensão controlada, quando se impõe uma tensão pré-definida e determina-se a taxa de cisalhamento resultante;
- de taxa de cisalhamento controlada, quando se impõe uma taxa de cisalhamento e determina-se uma tensão resultante.

Em relação à geometria do sensor, os viscosímetros rotativos podem ser classificados em três tipos:

- de cilindros coaxiais;
- de cone-placa;
- de placa-placa.

Quando os sensores são cilíndricos, concêntricos ou coaxiais, existem ainda dois tipos de sistemas:

- a) o Searle: aquele sistema em que o cilindro interno é que é rotacionado, girando a uma velocidade definida e o cilindro externo é mantido em repouso;
- b) o Couette: aquele sistema em que a rotação é imposta ao cilindro externo, o qual gira a uma velocidade definida, provocando um fluxo de amostra do líquido entre os cilindros. Neste sistema, a resistência do líquido cisalhado transmite um torque ao cilindro interno, que é induzido a girar.

A Figura 3.22 apresenta os dois tipos de sistemas para os sensores cilíndricos dos viscosímetros rotativos.

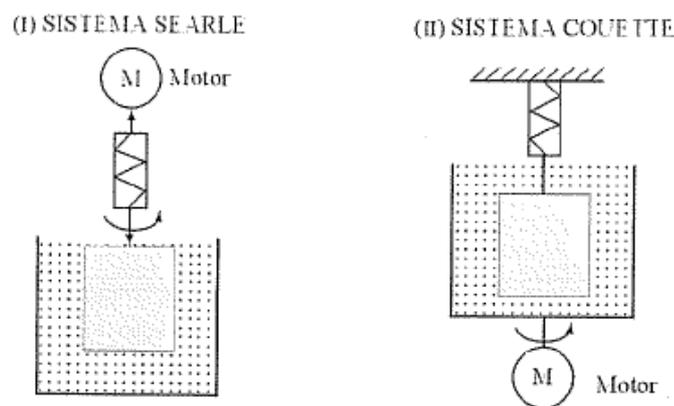


Figura 3.22 - Sistemas: (I) Searle e (II) Couette, para viscosímetros rotativos de cilindros coaxiais (Machado, 2002)

Para determinar a viscosidade para as diferentes porcentagens de sólido da polpa foi utilizado um viscosímetro Brookfield, modelo DV-III, conectado a um computador utilizando o software Rheocalc (ver Figura 3.23). Já para determinar a tensão de escoamento (“yield stress”) para as diversas porcentagens de polpa, foi utilizado um reômetro que dispõe de um set de Vane, modelo YR-1 Brookfield (ver Figura 3.24).

No viscosímetro rotativo Brookfield de cilindros coaxiais (utilizados durante o desenvolvimento do projeto) é um instrumento do tipo Searle, isto é, um corpo cilíndrico interno (ou em forma de disco) gira imerso em um fluido, e mede o torque necessário para vencer a resistência viscosa do fluido devido ao cisalhamento provocado. A leitura de deflexão, transmitida por uma mola espiralada conectada ao corpo cilíndrico através do eixo principal, é lida em uma escala circular ou dial, ou através de painel digital. A deformação da mola, indicada pela posição do dial ou cursor, é proporcional à viscosidade do fluido para uma velocidade de rotação do

corpo imerso. A Figura 3.25 a seguir representa o esquema de um viscosímetro rotativo Brookfield.



Figura 3.23 - Viscosímetro Brookfield modelo DV-III com os “spindles” LV-1, LV-2, LV-3 e LV-4.



Figura 3.24 - Reômetro Brookfield, modelo YR-1 (www.brookfieldengineering.com)

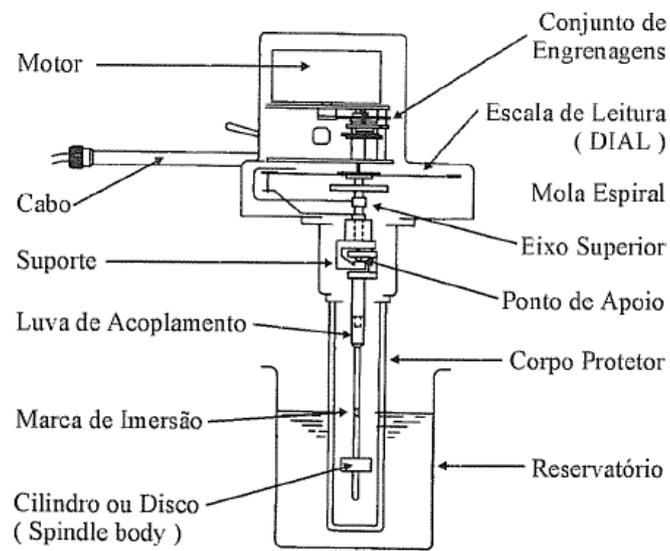


Figura 3.25 - Esquema de um viscosímetro rotativo Brookfield (Machado, 2002)

4.0 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos e materiais utilizados no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

As amostras utilizadas foram caracterizadas em termos de composição química e mineralógica, distribuição granulométrica, densidade, e ponto de carga zero.

A Figura 4.1 a seguir representa o fluxograma dos ensaios realizados.

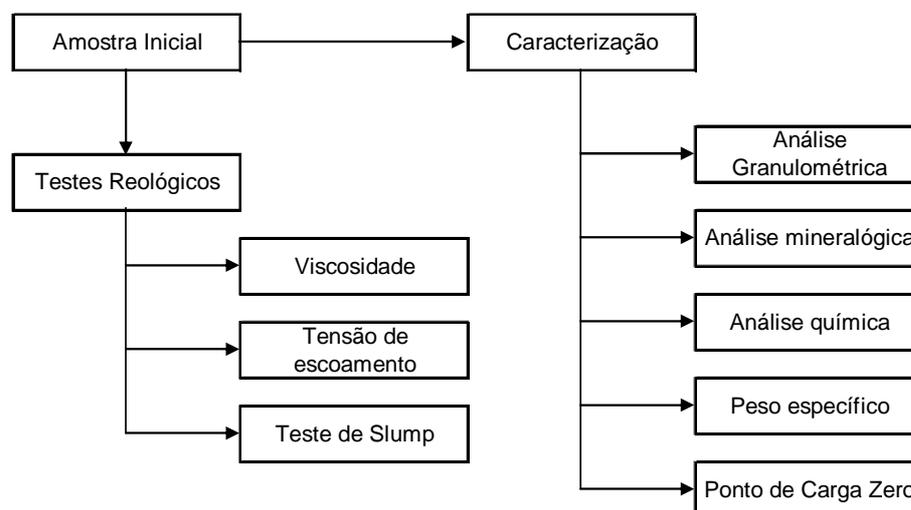


Figura 4.1 – Fluxograma dos ensaios programados

4.1 Composição e preparação das amostras

As amostras utilizadas representam hematita, proveniente da Mina do Pico (MG) de propriedade da empresa Vale. Estas foram tratadas em laboratórios onde o processo de beneficiamento foi simulado. A figura 4.2 a seguir representa o fluxograma esquemático da preparação da amostra.

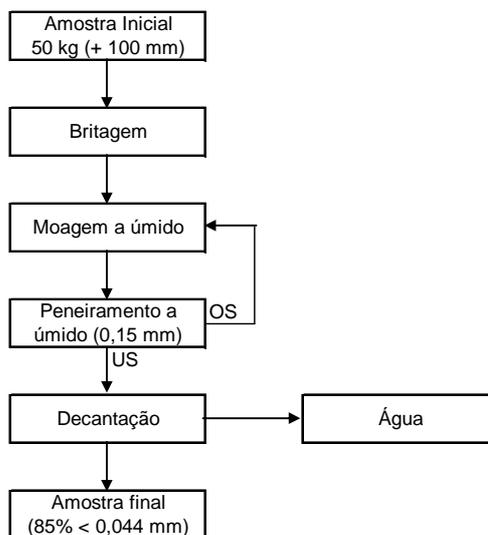


Figura 4.2 – Fluxograma esquemático da representação da amostra

4.2 Caracterização da amostra

As amostras foram caracterizadas conforme apresentado na Tabela IV.1.

Tabela IV.1: Procedimentos utilizados para caracterização das amostras

Propriedade	Técnica
Distribuição granulométrica	Peneiramento e Cyclosizer
Densidade	Picnometria simples Picnometria a Hélio
Composição química	Métodos via úmida
Composição mineralógica	Difração de RX
Ponto de Carga Zero	Potencial Zeta Mular e Roberts

4.2.1 Análise química e análise mineralógica

Para determinação da composição química dos componentes da amostra do sólido em estudo, foi utilizado o método via úmida.

Para determinação da composição mineralógica dos componentes da amostra do sólido, foi utilizada a seguinte técnica:

- Difração de raios X (qualitativa).

4.2.2 Análise granulométrica

Como para realização dos testes é necessário um material mais fino, cerca de 85% < que 44 μm , a análise granulométrica foi realizada utilizando-se peneiras e o aparelho Cyclosizer Warman, mostrado na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Cyclosizer Warman de laboratório. (www.weirminerals.com)

4.2.3 Densidade

A determinação da densidade do material sólido foi realizada por meio de picnometria simples e a gás (hélio). A Figura 4.4 apresenta uma fotografia de picnômetros de uso normal em laboratório.



Figura 4.4 – Pícnômetros de laboratório. (www.particletechlabs.com)

Utiliza-se a equação básica da picnometria simples para determinar a densidade - Equação (16).

$$\rho = \frac{(b - a)}{(d - a) - (c - b)} \quad (16)$$

Onde:

- a: peso do pícnômetro vazio (g)
- b: peso pícnômetro + sólidos (g)
- c: peso pícnômetro + sólidos + líquido (g)
- d: peso pícnômetro + líquido (g)
- ρ : densidade

4.2.4 Potencial Zeta

O equipamento utilizado para medir o potencial zeta foi o modelo ZM3-D-G, Zeta-Meter System 3.0+, com imagem direta por vídeo, pertencente ao Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Zeta-Metern Systema 3.0+

A amostra de hematita foi reduzida a $-38\mu\text{m}$ e usada na preparação de suspensões. Essas suspensões foram preparadas com o uso de um eletrólito indiferente, neste caso, o nitrato de sódio (NaNO_3) na concentração de $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ e em ampla faixa de pH.

Os valores de pH foram ajustados com a adição de soluções 1% p/v e 5% p/v de ácido clorídrico (HCl) e soluções 1% p/v e 5% p/v de hidróxido de sódio (NaOH). As suspensões ficaram em repouso por 24 horas. Após o repouso, mediu-se o potencial zeta.

Para efeito de comparação do ponto de carga zero da hematita estudada, foi utilizado também o método potenciométrico simplificado (Mular e Roberts, 1966). Este método se baseia na medida do pH inicial da amostra e do pH final, obtendo a variação do pH. Com os resultados obtidos, gera-se um gráfico do valor do pH final versus a variação de pH. O ponto de carga zero será aquele em que a variação de pH é zero.

4.3 Caracterização das propriedades reológicas

Na tabela IV.2 são apresentados os métodos e equipamentos utilizados para a caracterização das propriedades reológicas de polpas e pastas minerais.

Tabela IV.2: Técnicas e equipamentos utilizados para determinação das propriedades reológicas.

Propriedade	Técnica	Equipamento requerido
Viscosidade	Viscosimetria	Viscosímetro Brookfield com interface ao computador
Consistência	Teste de Abatimento (Slump)	Cilindro slump de laboratório
Tensão de Escoamento	Vane	Reômetro Brookfield com interface ao computador

4.3.1 Medição da viscosidade

A Figura 4.6 mostra o viscosímetro digital Brookfield, modelo DV-III que dispõe de interface para computador. Este equipamento foi utilizado para as medições de viscosidade da polpa nas diferentes porcentagens de sólidos. Este equipamento pertence ao Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.



Figura 4.6 – Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III. (www.brookfieldengineering.com).

A utilização do viscosímetro Brookfield possibilitou estudar o comportamento reológico de uma polpa com diferentes porcentagens de sólidos, até a obtenção de uma pasta. Para determinação da viscosidade, o pH da polpa estava em torno de 8,1.

4.3.2 Teste de abatimento (Slump)

Os testes de slump foram realizados considerando-se a norma NBR N M67, utilizando um cilindro de PVC de 10 centímetros de diâmetro e 10 centímetros de altura. O teste de slump só foi possível para as polpas mais adensadas. A Figura 4.7 representa testes de slump para pastas minerais.



Figura 4.7 – Representação teste de “slump”. (Barreda, 2007).

O comportamento desta polpa foi estudado em diversas porcentagens de sólidos, a partir de 64% até 84% em massa.

Durante a realização do teste de “slump” a polpa estava em pH próximo a 8,1.

4.3.3 Medição da Tensão de Escoamento

A Figura 4.8 mostra o reômetro digital Brookfield, modelo YR-1 que dispõe de interface para computador. Este equipamento foi utilizado para as medições de tensão de escoamento (“yield stress”) da polpa nas diferentes porcentagens de sólidos. Este equipamento pertence ao Laboratório de Fenômenos de Interface do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.



Figura 4.8 – Reômetro Digital Brookfield, modelo YR-1.
(www.brookfieldengineering.com)

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos segundo os testes apresentados na metodologia. Também se apresenta a análise e/ou discussão correspondente a cada situação.

5.1 Análise química da amostra

A amostra foi submetida à análise química onde foram determinados quantitativamente os principais elementos presentes. A Tabela V.1 apresenta o resultado da análise química.

Tabela V.1: Análise química da amostra

Teores - %					
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC*
68,09	1,77	0,35	0,031	0,05	0,32

* PPC: Perda por Calcinação

Como se pode observar pelo teor de ferro, a amostra apresenta pureza alta. Considerando-se que todo o ferro seja proveniente da hematita, chega-se a cerca de 97% de pureza ($68,09\% / 0,7 = 97,27\%$). Além disso, pode-se observar que sendo a sílica (constituída predominantemente por quartzo) somada à hematita alcança mais de 99%.

5.2 Análise mineralógica da amostra sólida

O resultado da difração de raios-X é mostrado na forma de difratograma na Figura 5.1 sendo possível detectar picos característicos de hematita. Além da hematita, foi possível detectar a presença de quartzo. Os resultados estão de acordo com aqueles de composição química apresentados anteriormente.

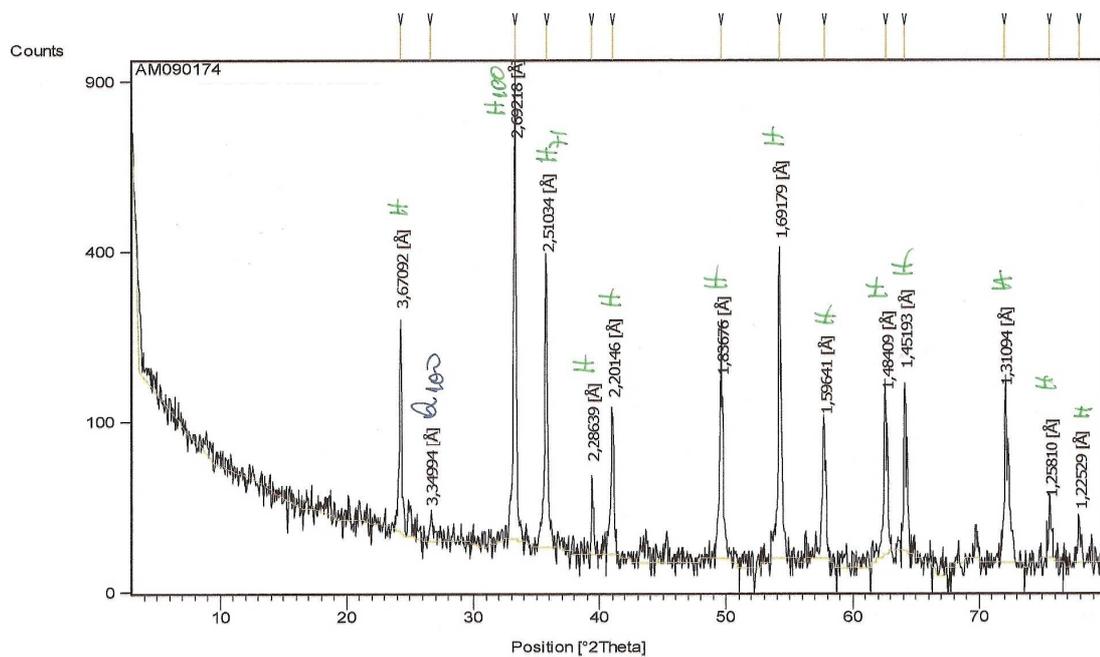


Figura 5.1 – Difratoograma da amostra, onde H = hematita e Q = quartzo.

5.3 Análise granulométrica

A amostra foi recebida com a granulometria de 100% passante em 100 mm. Para realizar os testes de caracterização reológica foi necessária a obtenção de material com granulometria fina que representaria o concentrado final de flotação adensado, o qual apresenta granulometria fina por ter um processo de beneficiamento que envolve britagem e moagem, que são etapas de cominuição. Após a adequação da granulometria, obteve-se a seguinte curva granulométrica retirando-se a fração < 38 µm representada na Figura 5.2. A Tabela V. 2 apresenta os resultados da análise granulométrica por peneiramento.

Tabela V.2: Resultado análise granulométrica peneiramento retirando-se a fração < 38 μm .

Abertura (μm)	Massa (g)	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
150	2,7	3,99%	96,01%
105	5,6	8,27%	87,74%
75	10,0	14,77%	72,97%
53	10,3	15,21%	57,75%
44	11,1	16,40%	41,36%
38	22,5	33,23%	8,12%
-38	5,5	8,12%	0,00%
	68	100,00%	

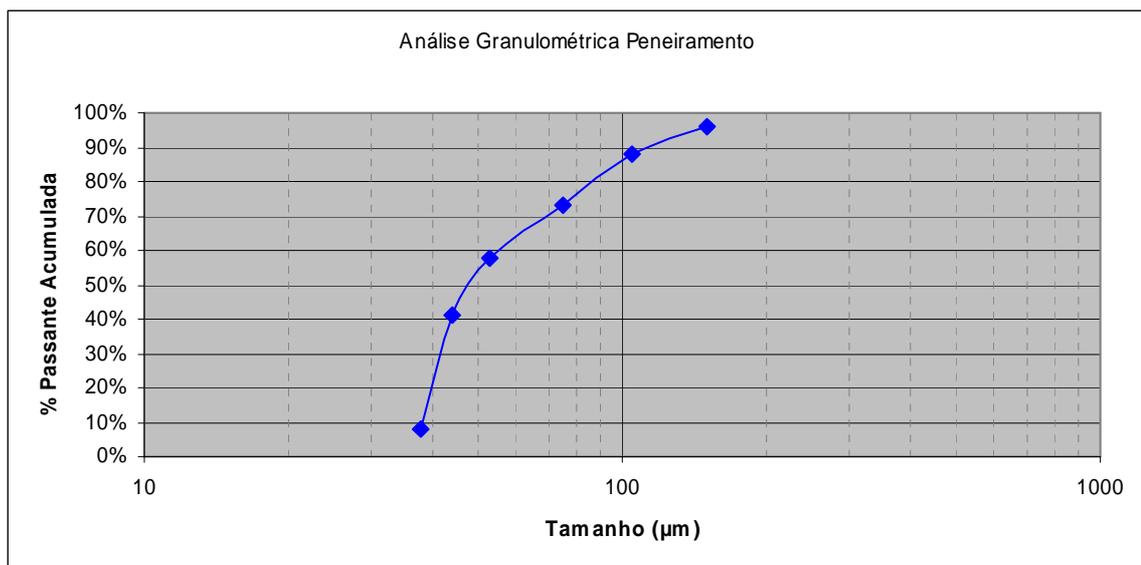


Figura 5.2 – Curva granulométrica da análise por peneiramento

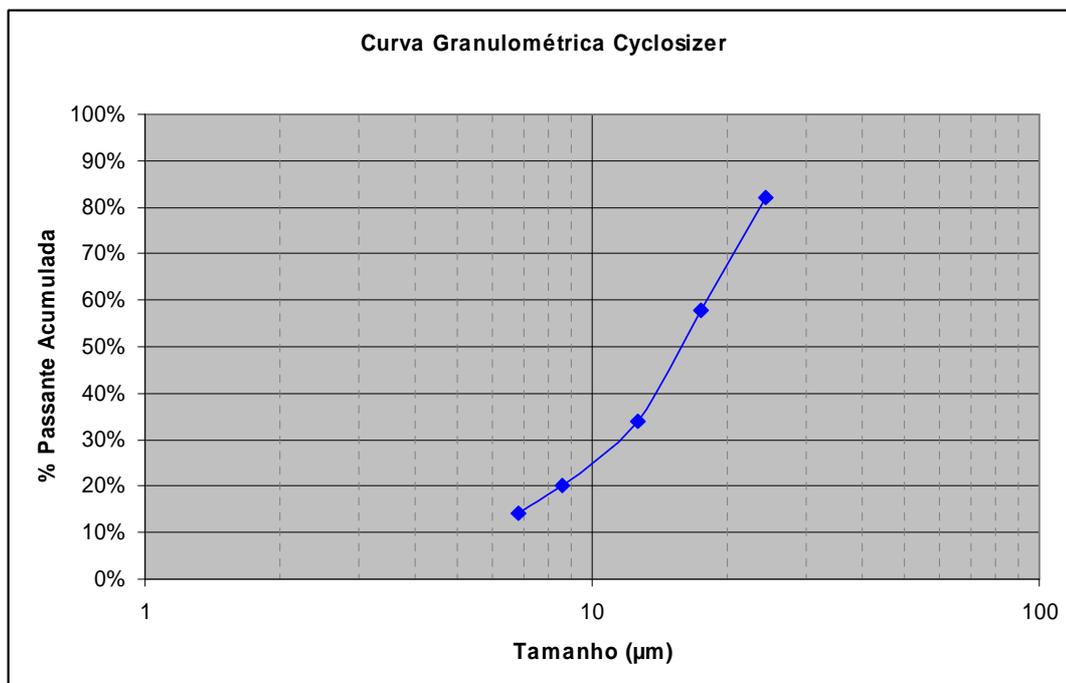
A curva granulométrica do material passante em 38 μm foi determinada através de cyclosizer. A Tabela V.3 apresenta os dados da granulometria determinada no cyclosizer. A Figura 5.3 apresenta a curva granulométrica determinada no teste do cyclosizer. Apenas 50 g do material < 38 μm foi enviada para o teste do Cyclosizer. Entretanto, em relação à massa total da amostra (< 150 μm , conforme se observa na Figura 5.2) a fração fina (< 37 μm) representa aproximadamente 76% da massa total.

Tabela V.3: Planilha de dados calculados e corrigidos do ensaio do Cyclosizer.

Abertura (μm)	Tamanho de corte (μm)	Peso retido (g)	% Retida Simples	% Passante Acumulada
42,7	24,42	9	18%	82%
30,5	17,44	12	24%	58%
22,1	12,64	12	24%	34%
15	8,58	7	14%	20%
12	6,86	3	6%	14%
-12	-6,86	7	14%	0%
		50		

O fator de correção, ao considerar as variáveis de operação (temperatura, vazão, massa específica do sólido e tempo de elutriação), foi de 0,572.

Da tabela V.3 observa-se que 82% da fração < 38 μm tem granulometria inferior a 24,42 μm e que, aproximadamente 50% desta fração tem partículas com tamanho menor que 17 μm .

Figura 5.3: Distribuição granulométrica da amostra para a fração < 38 μm .

A Tabela V.4 a seguir apresenta os dados da curva granulométrica representativa da amostra, considerando-se os dados obtidos no peneiramento e no teste do Cyclosizer, após ajuste da curva. A figura 5.4 apresenta a curva granulométrica da amostra.

Tabela V.4: Dados da curva granulométrica composta da amostra.

Abertura (μm)	Massa retida (g)	% Retida Simples	% Passante Acumulada
150	2,7	0,94%	99,06%
105	5,6	1,95%	97,12%
75	10,0	3,48%	93,64%
53	10,3	3,58%	90,06%
44	11,1	3,86%	86,20%
38	22,5	7,82%	78,38%
24,42	45,1	15,68%	62,70%
17,44	52,8	18,35%	44,35%
12,64	52,8	18,35%	26,00%
8,58	30,8	10,71%	15,29%
6,86	13,2	4,59%	10,71%
-6,86	30,8	10,71%	0,00%
	287,7	100,00%	

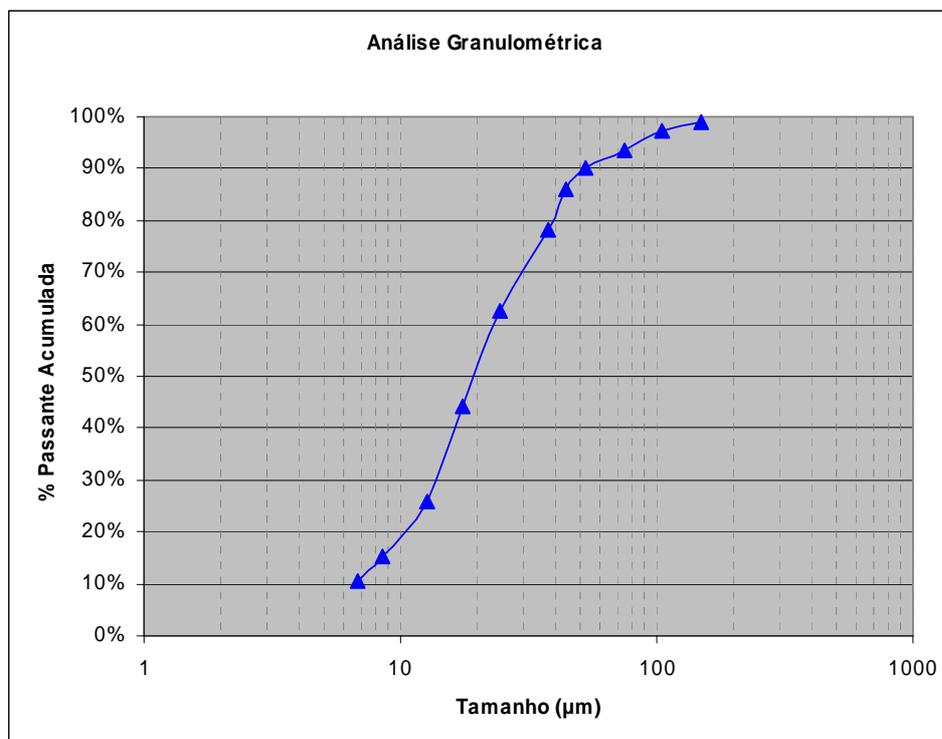


Figura 5.4: Curva granulométrica da amostra utilizada para os ensaios reológicos.

5.4 Densidade do sólido

Foram preparadas três amostras do material sólido (amostras 1, 2 e 3) de aproximadamente 110 g cada uma, com as quais determinou-se o valor da densidade, utilizando-se a metodologia do picnômetro simples. Os dados experimentais são apresentados na Tabela V. 5 a seguir:

Tabela V.5: Valores experimentais obtidos através da picnometria simples.

Elemento / Massas	Código	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Picnômetro vazio (g)	a	119,20	112,40	110,30
Picnômetro + sólido (g)	b	229,20	244,00	218,30
Picnômetro + sólido + líquido (g)	c	456,00	466,30	445,70
Picnômetro + líquido (g)	d	368,30	361,10	358,90
Valor massa específica (g/cm ³)	ρ	4,933	4,985	5,094

Utilizando a equação básica da picnometria simples (Equação 16), pode-se determinar a média dos valores de massa específica para as três amostras. O resultado foi uma densidade de 5,01 g/cm³.

No caso da determinação da densidade através da metodologia de picnometria á gás, obteve-se um valor de massa específica de 5,4 (g/cm³) que é apresentada na Tabela V.6.

Tabela V.6: Valores experimentais obtidos através da picnometria a gás

Número Medida	Parâmetro P2	Parâmetro P3	Parâmetro VP (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Média harmônica
1	17,150	4,364	4,424	5,351	5,406
2	17,136	4,366	4,376	5,409	
3	17,161	4,377	4,336	5,459	

Todo o cálculo onde o valor da densidade do sólido foi utilizado considerou-se o valor obtido pela picnometria simples por apresentar um valor mais real, pois a hematita utilizada para esse experimento possui 97% de pureza, conforme já demonstrado. A

partir do valor da densidade da amostra obtida pela picnometria a gás, conclui-se que a hematita da amostra pode ser bastante porosa razão pela qual o resultado obtido apresentou uma densidade mais elevada. A hematita pura apresenta densidade próxima a 5,3 g/cm³.

5.5 Ponto de Carga Zero (PCZ)

O Ponto de Carga Zero foi determinado através do teste de potencial zeta e através do método de Mular e Roberts para comparação. A partir do resultado do teste de potencial zeta, o ponto de carga zero encontra-se no pH 6,8, conforme mostrado na Figura 5.5, sendo estudada a faixa de valores de pH entre 2 e 12, aproximadamente.

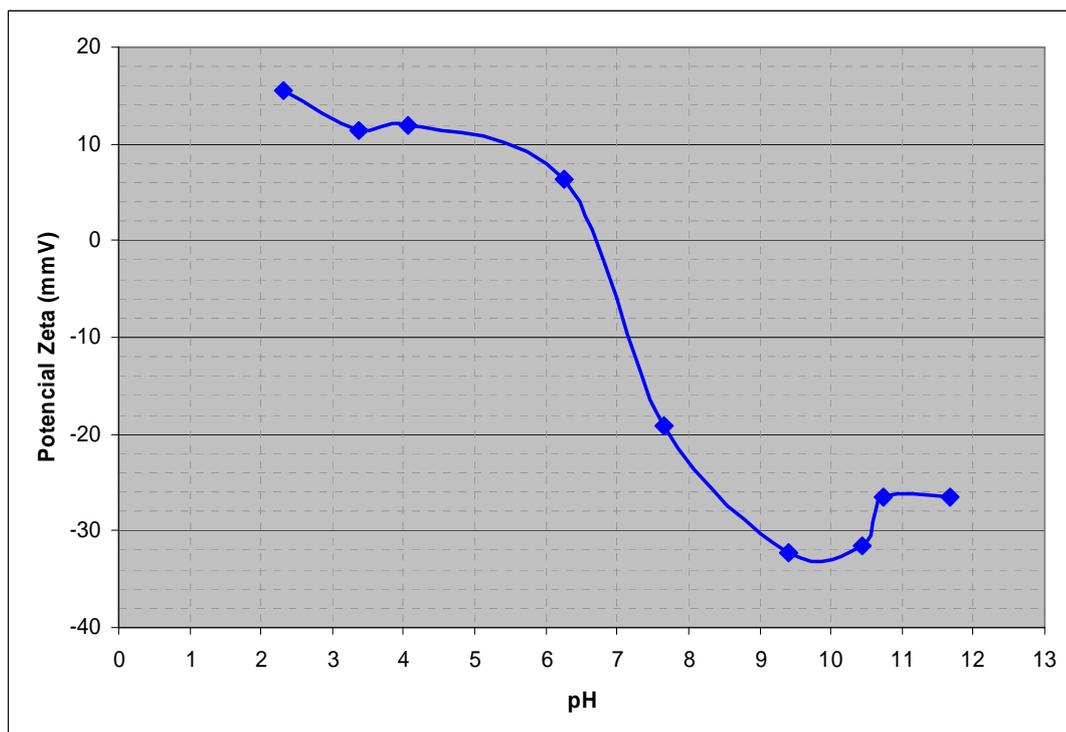


Figura 5.5 – Determinação do Ponto de Carga Zero através do Zetameter (microeletroforese).

A Figura 5.6 a seguir apresenta o resultado obtido para o Ponto de Carga Zero através do método de Mular e Roberts.

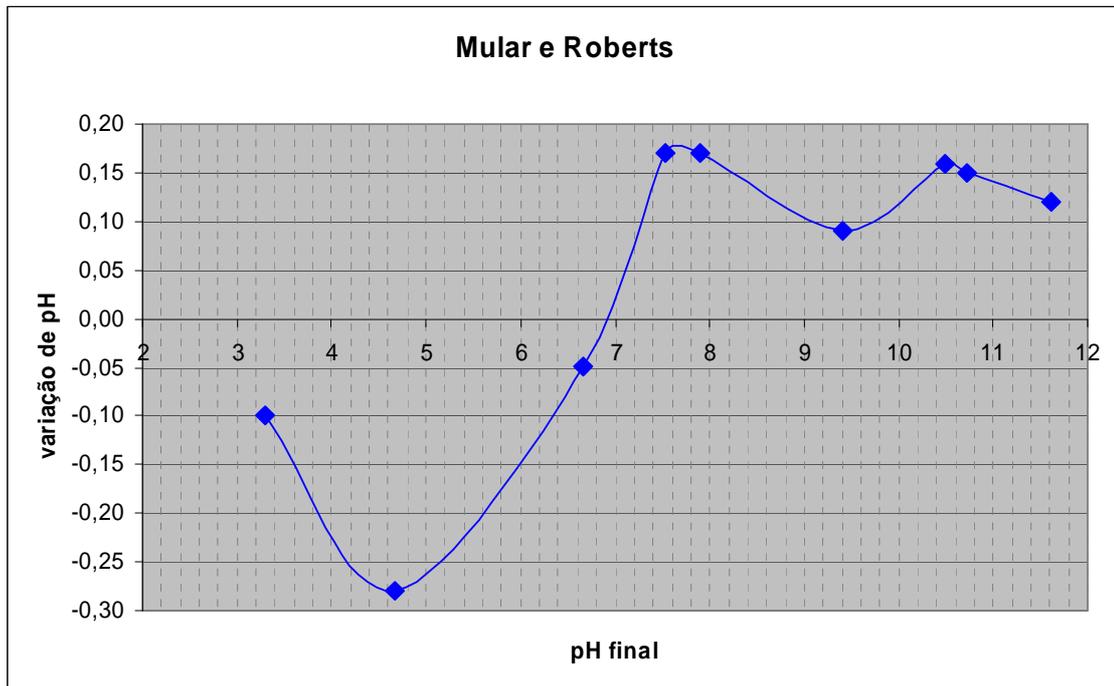


Figura 5.6 – Determinação do Ponto de Carga Zero através do Método de Mular e Roberts.

A partir do resultado do teste utilizando o método de Mular e Roberts, o ponto de carga zero encontra-se no valor de pH de 6,9. Observa-se pequena diferença entre o método simplificado e aquele obtido no Zetameter.

5.6 Caracterização das Propriedades Reológicas

5.6.1 Teste de Abatimento (“slump”)

Os resultados dos testes de abatimento (“slump”) são apresentados na Tabela V.7. O valor de Hs mostrado na Tabela V.7 representa a altura de “slump”, ou seja, a altura de abatimento da polpa. Este pode ser dado em centímetros ou em porcentagem. Quando se diz que uma polpa teve Hs de 10 cm (ou 100%) quer dizer que houve abatimento total.

Tabela V.7: Resultados de altura de abatimento de cone (Hs) das polpas.

% Sólidos	Hs (cm)
64%	10
68%	10
70%	10
72%	10
74%	10
76%	10
78%	10
80%	10
82%	9,0
84%	7,2

Na figura 5.7 são mostradas as porcentagens de abatimento em função das porcentagens de sólidos da polpa.

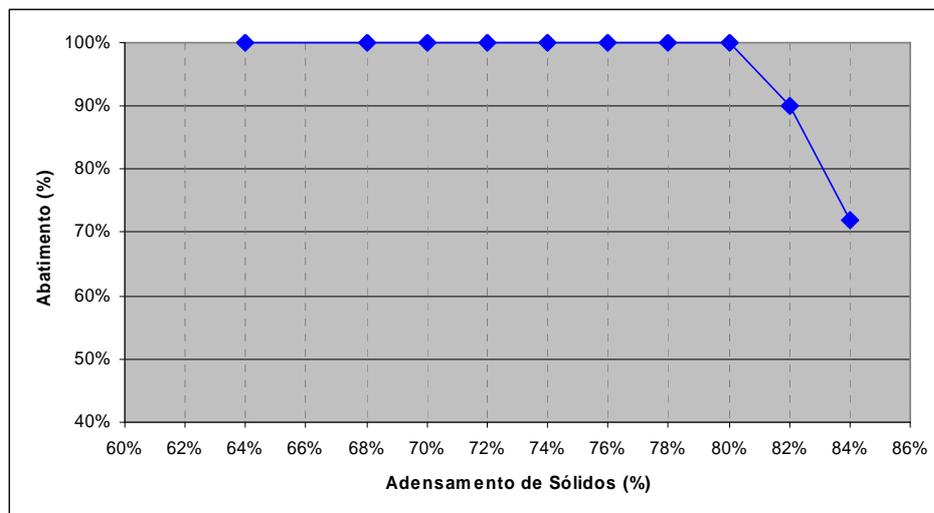


Figura 5.7 – Porcentagens de Abatimento obtidas para as amostras.

De acordo com os dados apresentados na Tabela V. 7 e a Figura 5.7 percebe-se que a amostra (hematita) com granulometria de aproximadamente 85% passante em 44 μm (conforme apresentado na Figura 5.4), se apresenta como pasta a partir de uma concentração de 81% de sólidos em massa aproximadamente, sendo isso observado na porcentagem de sólidos em função do abatimento.

A amostra estudada tem as características granulométricas da alimentação de um mineroduto, ou seja, concentrado final remoído com teor de ferro próximo a 68%

atendendo às especificações granulométricas para transporte de longa distância (85% passante em 44 μm).

Foi realizado o teste de “slump” para as polpas com concentrações de sólidos de 80%, 82% e 84% alterando-se o pH das mesmas através de adição de soda cáustica até atingir o valor de pH de 11. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela V.8.

Tabela V.8: Resultados de altura de abatimento de cone (Hs) das polpas com adição de soda cáustica.

% Sólidos	Hs (cm)	Abatimento (%)
80%	10	100%
82%	10	100%
84%	8,44	84,4%

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o “slump” para as polpas com concentração de sólidos de 80% e 82% apresentaram 100% de “slump”. Já para a polpa com 84% de concentração de sólidos, o “slump” foi de 84,4%, sendo maior que a polpa com pH natural na mesma concentração de sólidos (“slump” de 72%). A Figura 5.8 apresenta a comparação do resultado do teste de “slump” para a polpa com pH natural e para a polpa com pH alterado.

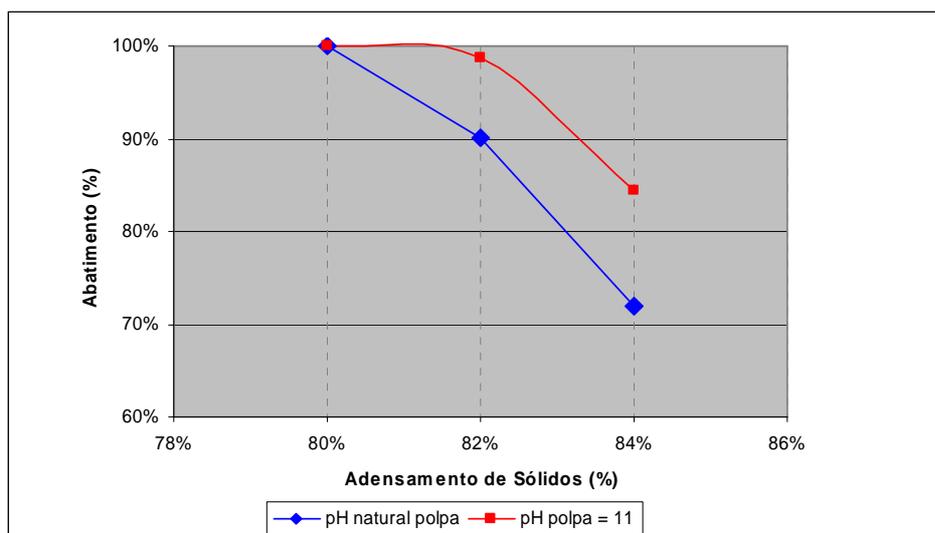


Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre os resultados do teste de “slump” para polpa com pH natural e polpa com pH alterado.

5.6.2 Viscosidade

Estudou-se uma faixa ampla de concentrações de sólidos para a polpa, representando um concentrado remóido adensado até a formação de pasta. Os ciclos reológicos empregados foram de 1-20-1 rpm para baixas rotações da haste. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam o ciclo reológico de 1-20-1 rpm, para a faixa de concentração de sólidos em massa de 64% a 74% e para a faixa de concentração de sólidos em massa de 76% a 84%, respectivamente para a polpa com pH natural.

De acordo com as Figuras 5.9 e 5.10, observa-se que o comportamento da polpa estudada é tixotrópico até a concentração de sólidos de 72% em massa, ou seja, a viscosidade aparente diminui com o tempo, o que já é esperado, pois a maioria das polpas de minério de ferro apresenta esse comportamento. Esse comportamento tem grande importância industrial, pois diminui a energia gasta com bombeamento de polpas. Além disso, verifica-se que a maior viscosidade aparente (aproximadamente 37.500 cP) é para a pasta com 84% de sólidos em massa e os menores valores de viscosidade aparente são para as menores concentrações de sólidos em massa.

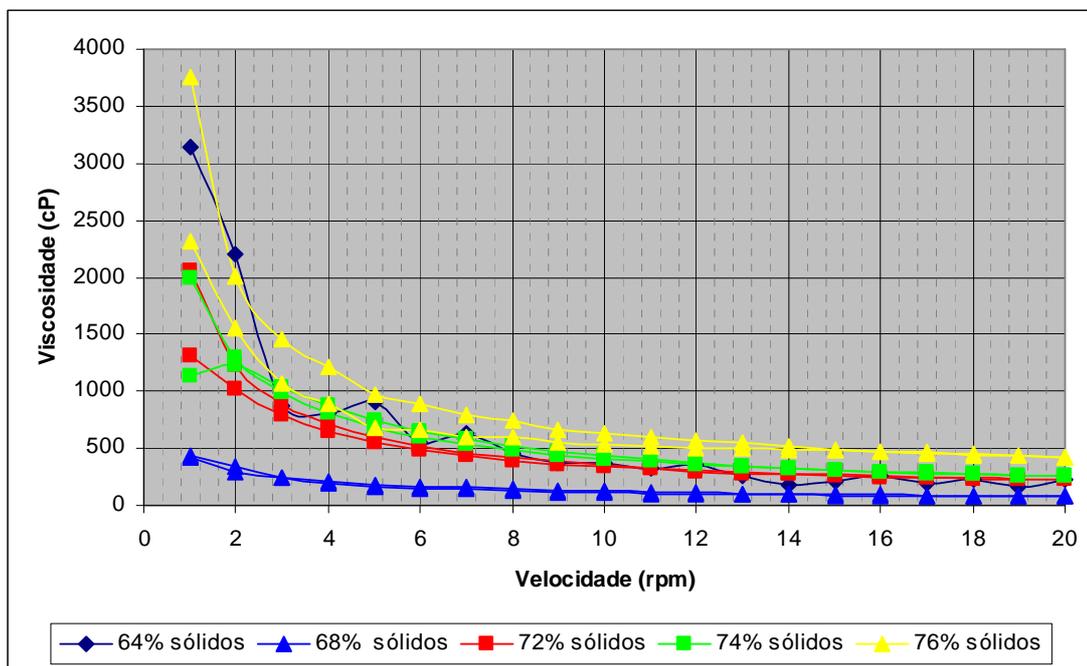


Figura 5.9 – Ciclo reológico da amostra: 1 - 20 - 1 rpm, 64% a 76% de sólidos em massa.

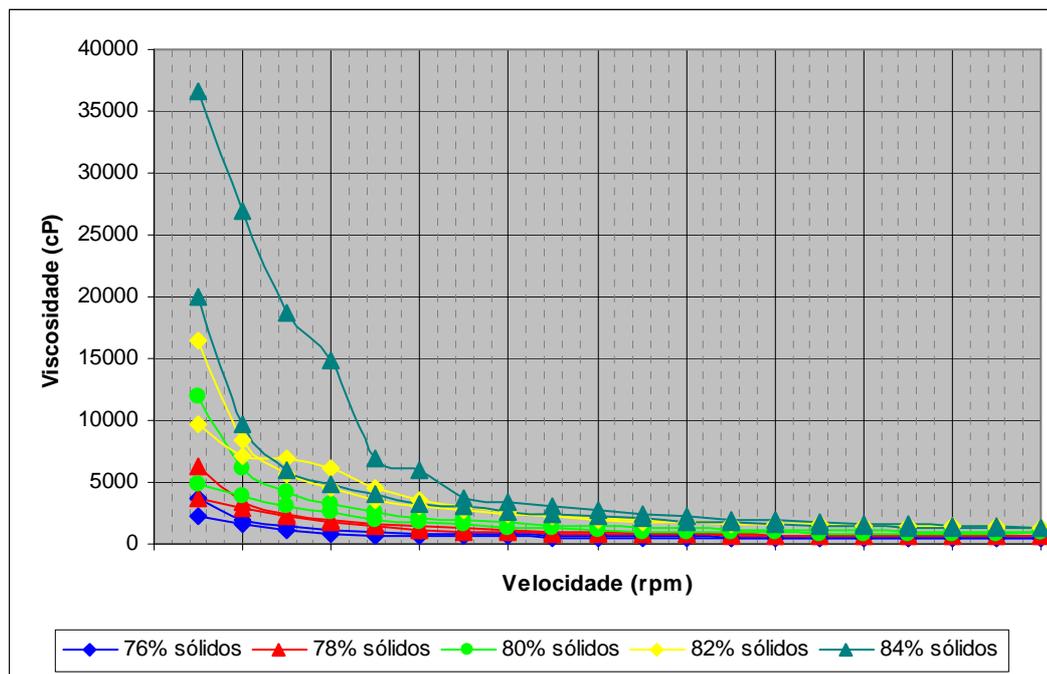


Figura 5.10 – Ciclo reológico da amostra: 1 – 20 – 1 rpm, 76% a 84% de sólidos em massa.

Pode-se observar que a tendência geral do comportamento da viscosidade aparente é de aumentar à medida que aumenta a porcentagem de sólidos.

O gráfico da viscosidade em função da velocidade (rpm) apresenta um comportamento reopético da viscosidade, conforme apresentado na Figura 5.11.

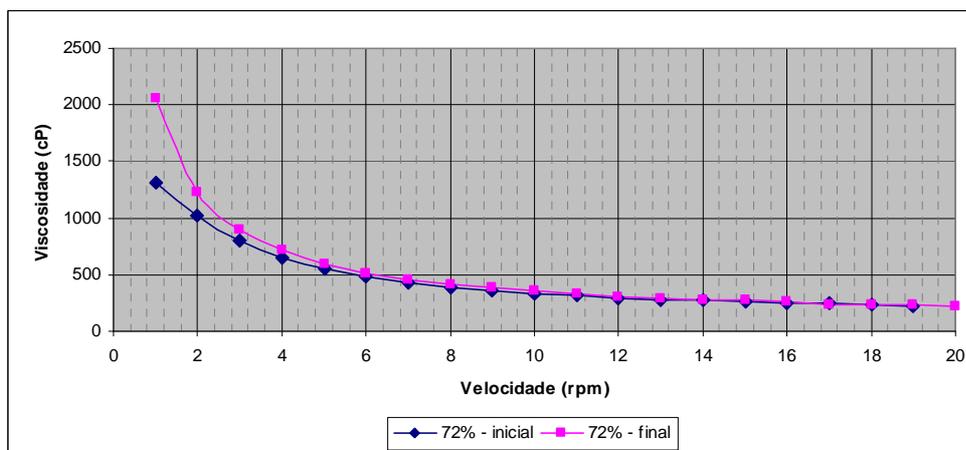


Figura 5.11 – Comportamento reopético da viscosidade para a polpa estudada com 72% de sólidos.

Observa-se na Figura 5.11 que as curvas da viscosidade inicial e final não se sobrepõem. Esse fenômeno é conhecido por histerese, que é a capacidade da polpa em manter suas propriedades na ausência de tensão de cisalhamento. A área entre as duas curvas define a magnitude da reopetia do fluido. Se as mesmas forem coincidentes, a reopetia é nula, ou seja, a viscosidade não depende do tempo.

Foram determinados os valores de viscosidade para polpas com pH em torno de 11. A Figura 5.12 representa o gráfico comparativo para a polpa natural e com pH alterado.

Observa-se na Figura 5.12 que a polpa com pH alterado (pH = 11 e 80% de sólidos) apresenta um valor máximo de viscosidade na ordem de 5.500 cP enquanto que a polpa natural apresenta um valor máximo de 12.000 cP.

Foram determinados os valores de viscosidade para as polpas com concentração de sólidos de 82% e 84%, além de 80% conforme mostra a Figura 5.11, alterando o pH (pH = 11). O resultado foi o mesmo obtido para a polpa com 80% de sólidos, ou seja, a polpa em que há adição de soda cáustica apresenta menores valores de viscosidade do que aquelas que estão no pH natural.

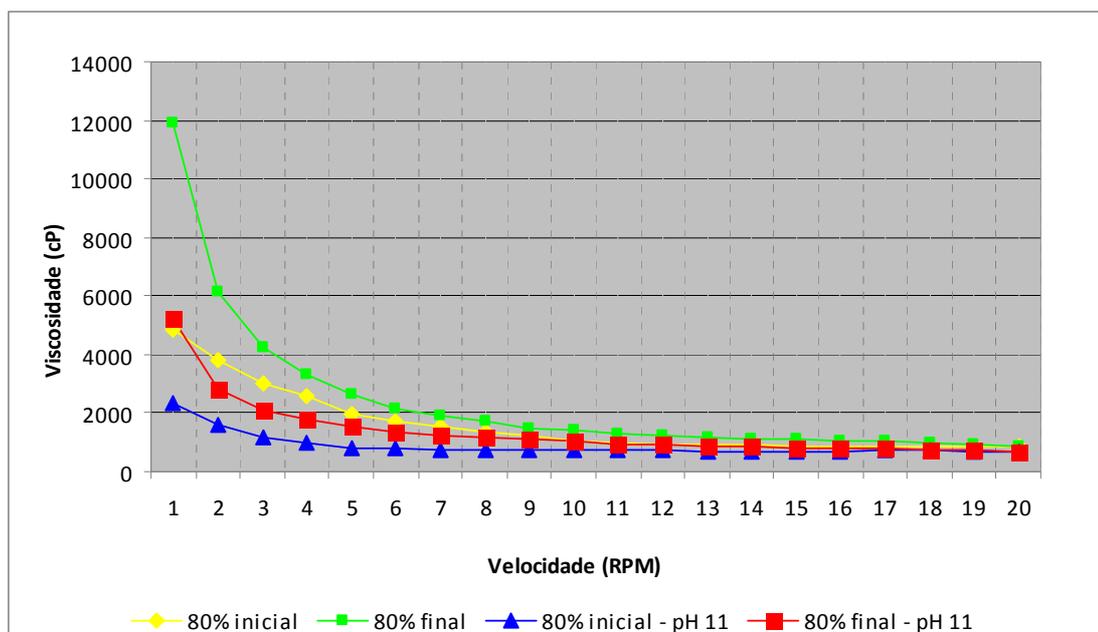


Figura 5.12 – Ciclo reológico da amostra: 1 -20 -1 rpm para a polpa com 80% de concentração de sólidos com pH natural e pH = 11.

Em anexo apresentam-se as tabelas com os valores obtidos no teste de viscosidade para as condições estudadas.

5.6.3 Tensão de escoamento da polpa (“yield stress”)

Os resultados de “yield stress” são apresentados a seguir para diferentes porcentagens de sólidos. A tensão de escoamento foi medida para a faixa de concentração de sólidos em massa de 64% a 84%, apresentando medidas apenas a partir de 76% de sólidos. A Tabela V.9 apresenta os valores experimentais da tensão de escoamento para a polpa estudada.

Tabela V. 9: Resultados experimentais dos testes de tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa estudada.

% de sólidos em massa	76%	78%	80%	82%	84%
Tensão de escoamento (Pa)	2,2	11,01	19,4	33,84	84,88

A Figura 5.13 apresenta os resultados do teste de tensão de escoamento para as polpas com pH natural (pH aproximadamente 8,1) para a faixa de concentração de sólidos avaliada.

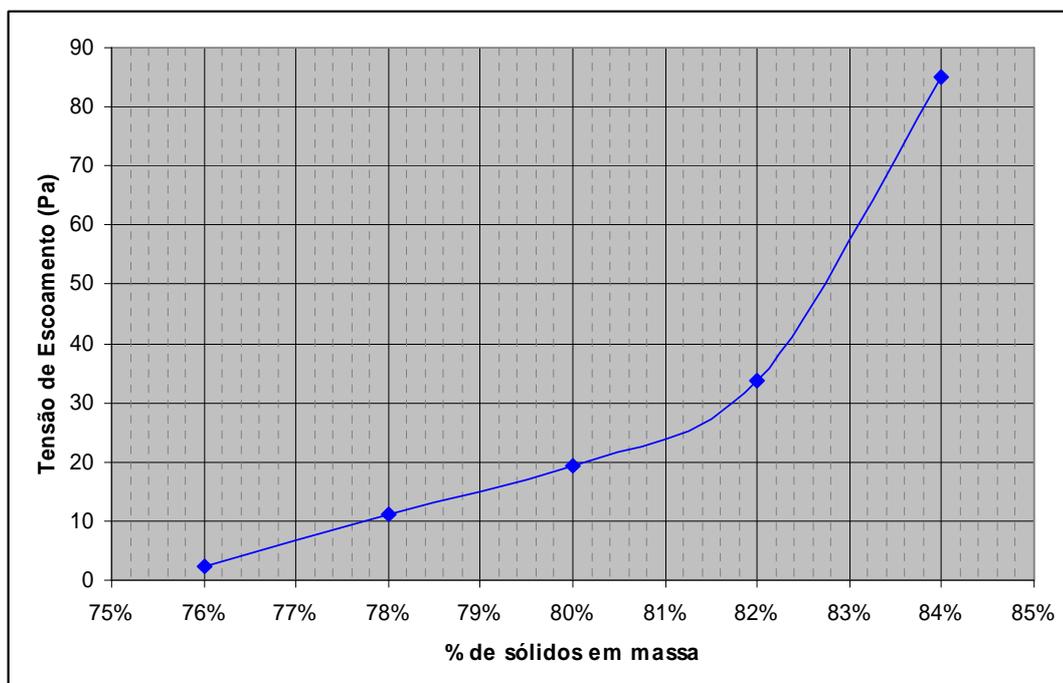


Figura 5.13 – Valores de “yield stress” para as diferentes concentrações da polpa com pH natural.

Observa-se na Figura 5.13 que à medida que a concentração de sólidos em massa aumenta a tensão de escoamento (“yield stress”) também tem um aumento, sendo que este comportamento se ajusta à seguinte equação polinomial de segunda ordem:

$$y = 16163x^2 - 24919x + 9608,6, \text{ com uma correlação de } 0,966.$$

Verifica-se também que o aumento da tensão de escoamento não é proporcional ao aumento da concentração de sólidos em massa.

A Figura 5.14 apresenta os resultados dos testes de tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa com pH natural (pH = 8,1) e para a polpa com pH alterado (pH = 11) para polpas com concentrações de sólidos de 82% e 84% em massa.

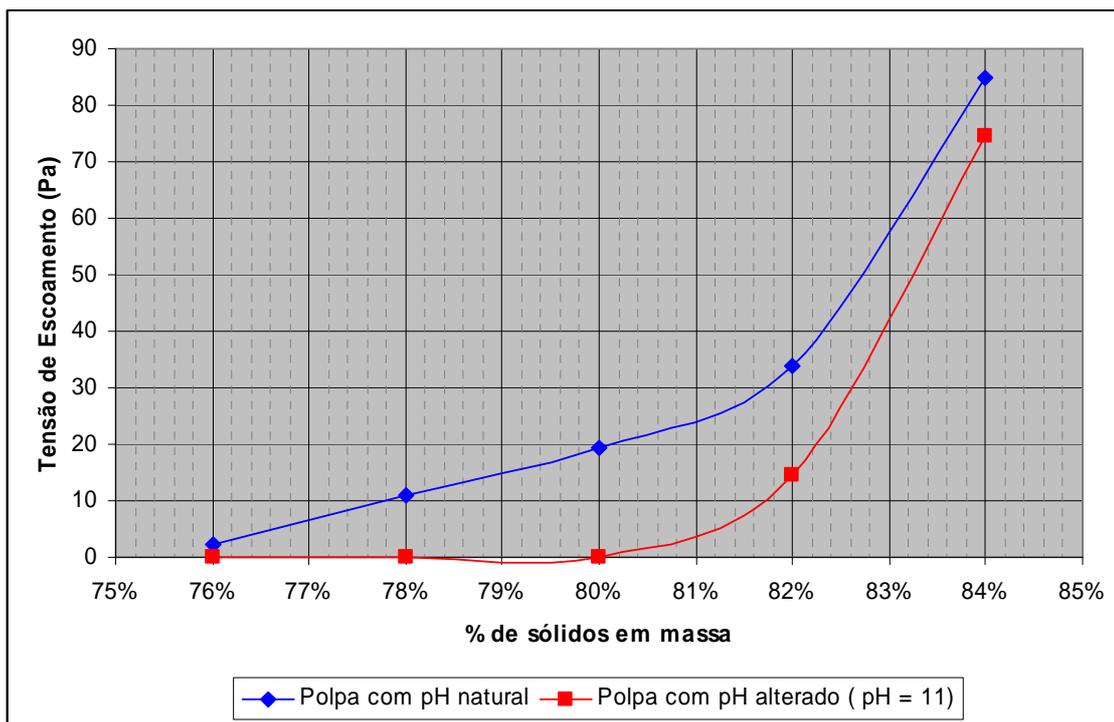


Figura 5.14 – Valores de “yield stress” para polpa com pH natural (pH = 8,1) e polpa com pH alterado (pH = 11)

Observa-se na Figura 5.14 que os valores de tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa com adição de soda cáustica são menores do que quando a polpa está em seu pH natural (pH aproximadamente 8,1).

É importante ressaltar que o equipamento utilizado para realizar os testes de “yield stress” pertencente ao Laboratório de Fenômenos de Interface do DEMIM, UFMG, tem uma faixa de medição que se aplica para pastas, por isso polpas com concentrações de sólidos menores não apresentaram valores por estarem fora da faixa medida pelo equipamento.

Pode-se ainda relacionar o valor do teste de abatimento (“slump”) com a tensão de escoamento (“yield stress”), sendo essa relação apresentada na Figura 5.15 a seguir.

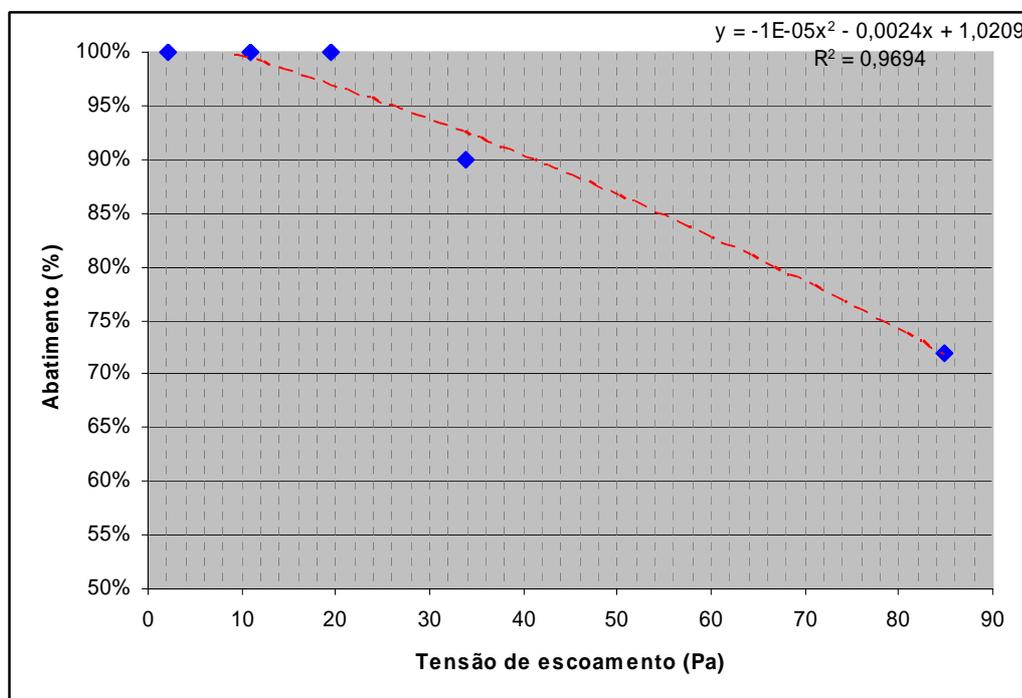


Figura 5.15 – Relação entre teste de abatimento (“slump”) e Tensão de escoamento (“yield stress”) para a polpa estudada no pH natural.

Verifica-se na Figura 5.15 que, para a polpa estudada, a relação entre o teste de slump e a medida do “yield stress” apresenta uma correlação aceitável para maiores concentrações de sólidos em massa. De acordo com o gráfico, a curva se ajusta a uma equação polinomial de segunda ordem, com uma correlação de 0,9694. Ressalta-se que essa relação deve ser utilizada apenas como um teste rápido, na usina. Além disso, apresenta uma melhor correlação quando a polpa apresenta característica de pasta.

6.0 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, conclui-se que a amostra estudada apresenta elevado grau de pureza: 68,09% de Fe e 1,77% SiO₂. Além disso, apresenta baixos teores de contaminantes (Al₂O₃, P e Mn). Os resultados dos testes de difração de Raios X confirmaram a presença predominante de hematita e detectando a presença de quartzo, em menor quantidade.

A densidade da amostra foi obtida através do teste de picnometria simples e picnometria a gás (hélio). O resultado da picnometria simples foi de 5,01 g/cm³ enquanto que a picnometria a gás foi de 5,4 g/cm³, sendo este valor acima do esperado, pois a densidade da hematita pura é de 5,3 g/cm³, indicando que a hematita estudada é porosa.

A determinação do ponto de carga zero pela microeletroforese (zetameter) foi de pH de 6,8, enquanto que através do método de Mular e Roberts indicou o valor de pH de 6,9.

Com relação à reologia da polpa, os resultados dos ensaios apontam para um comportamento semelhante ao de um fluido de Bingham, ou seja, necessita de uma força de cisalhamento mínima antes de se deformarem. Além disso, apresenta um comportamento reopético em que há um aumento da viscosidade aparente (para polpas com concentração de sólidos acima de 72% em massa).

Os resultados dos testes indicaram que aumentando a concentração de sólidos em massa da polpa estudada, há um aumento na tensão de escoamento de forma exponencial.

Como o reômetro utilizado possui uma faixa de medição ideal para pastas, medidas de tensão de escoamento ("yield stress") só foram possíveis a partir de concentração de sólidos em massa a partir de 76%.

Nos testes de abatimento, as medidas de "slump" foram realizadas na faixa entre 80% a 84% de sólidos em massa. Em concentrações de sólidos menores que 80% o valor de "slump" foi 100% e em concentrações maiores que 84% foi 0%. O teste de

abatimento não demonstrou as mudanças reológicas ocorridas na polpa a partir de 76% de sólidos.

A partir dos resultados dos testes de viscosidade e “yield stress” realizados para a polpa com pH natural (pH = 8,1) e para a polpa com pH alterado (pH = 11), através da adição de soda cáustica, fica evidente que a alteração do pH propicia uma menor tensão de escoamento. Quando esta polpa necessita ser bombeada (por exemplo, concentrado remoído transportado por mineroduto), isso significa uma redução do consumo energético.

Entretanto, o comportamento reológico das polpas estudadas se mostrou bastante complexo exigindo novos estudos para o melhor entendimento dos mecanismos envolvidos.

7.0 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Atualmente, a construção de barragens de rejeitos têm se tornado um problema para as mineradoras, uma vez que o teor de alimentação está diminuindo o que demanda maiores quantidades de ROM para manter a produção. Com isso, a geração de rejeitos é cada vez maior.

Uma solução para diminuir o volume necessário para disposição de rejeitos é aumentar a concentração de sólidos dos rejeitos gerados utilizando-se espessadores de pasta. Com o aumento da porcentagem de sólidos em massa dos rejeitos, há alterações no comportamento reológico da polpa o que pode dificultar a operação do bombeamento. Para garantir uma boa operação de manuseio é necessário o estudo do comportamento reológico da polpa. A partir deste estudo é possível determinar as características adequadas para bombeamento, a partir da avaliação da concentração de sólidos da polpa versus tensão de cisalhamento necessária (que determinará o modelo da bomba adotada e a potência).

Outra operação importante é o transporte de concentrado através de minerodutos. Através do estudo do comportamento reológico da polpa há como determinar as melhores condições de operação para evitar a formação de “plugs”, definir a porcentagem de sólidos adequada para o bombeamento e melhorar a tensão de cisalhamento.

É importante ressaltar que a reologia da polpa depende de vários fatores, tais como granulometria, porcentagem de sólidos, forma das partículas, interações interpartículas e a natureza do meio de suspensão.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKROYD, T.J., NGUYEN, Q.D. Continuous on-line rheological measurements for rapid settling slurries. *International Journal of Mineral Processing*, (16) 2003, p. 731 – 738.

BARREDA, R.H.O. *Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral*. 2008. 169. Dissertação (Mestrado – em Engenharia Metalúrgica e de Minas). – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

BHATTACHARYA, I.N., PANDA, D., BANDOPADHYAY,P., Rheological behavior of nickel laterite suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, (53) 1998, p. 251-263.

BOGER, D. V. I Workshop of Minerals Processing and Tailings Rheology. In: 2003 International Seminar on Paste and Thickened Tailings, May-2003, Melbourne - Austrália, *Apresentação digital*. Austrália, May-2003.

BRAGANÇA, A.C.C.R. *Avaliação de reagentes alternativos para controle reológico de polpa de minério de ferro em sistema de bombeamento de longa distância*. 2007. 62. Dissertação (Mestrado – em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

BRAGANÇA, A.C, SILVA, T.A. A study of the effect of lime addition on the behavior of the concentrate of iron ore from the Alegria Complex along the pipeline of Samarco Mineração S.A. *16 th International Conference on Hydrotransport*. Santiago, 2004.

CHAVES, A.P. *Flotação: o estado da arte no Brasil*. 1 ed. São Paulo: Signus Editora, 2006. 444 p.

FERREIRA, E. E, BRANDÃO, P.R.G., KLEIN, B., PERES, A. E. C., Reologia de suspensões minerais: uma revisão. *REM*, Ouro Preto – Brasil, No 58, Jan-Mar 2005, p. 83-87.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 504p.

FUESTERNAU, D.W., PRADIP. Zeta potencial in the flotation of oxide and silicate minerals. *Advances in colloid and Interface Science*. 114 – 115, p 9-26, 2005.

GANDUR, M. C. *Comportamento dinâmico complexo em despelamento de fitas adesivas*. 2001. 153f. Tese (Doutorado – em Engenharia Química). – Universidade de Campinas. Campinas, 2001.

HE, M., FORSSBERG, E., Influence of slurry rheology on stirred media milling of quartzite. *International Journal of Mineral Processing*, (84) 2007, p. 240-251.

HE, M., WANG, Y., FORSSBERG, G. E., Parameter studies on the rheology of limestone slurries. *International Journal of Mineral Processing*, (78) 2006, p. 63-77.

HIBBELER, R.C. *Resistência dos materiais*. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 701p.

HIEMENZ, P.C, RAJAGOPALAN, R., *Principles of Colloid and Surface Chemistry*. 3 ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 1997. 650 p.

HUYNH, L., JENKINS, P., RALSTON, J., Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral-solution interfacial chemistry. *International Journal of Mineral Processing*, (59) 2000, p. 305-325.

JOHNSON, S.B., FRANKS, G.V., SCALES, P.J., BOGER, D.V., HEALY, T.W., Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, (58) 2000, p. 267-304.

KAWATRA, S.K., BAKSHI, A.K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, (47) 1995, p. 275 -283.

KAWATRA, S.K., BAKSHI, A.K., MILLER Jr, T.E., Rheological characterization of mineral suspensions using a vibrating sphere and a rotational viscometer. *International Journal of Mineral Processing*, (44-45) 1996, p. 155-165.

KWAK, M., JAMES, D.F., KLEIN, K.A., Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. *International Journal of Mineral Processing*, (77) 2005, p. 139-153.

MACHADO, J. C. V., Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria de petróleo. *Interciência*, Rio de Janeiro – Brasil, 2002.

MULAR, A.L., ROBERTS, R.B. A Simplified Method to Determine Isoelectric Points of Oxides. *Transactions*. Vol LXIX, 1996. p. 439-439.

NGUYEN, Q.D., BOGER, D.V., Application of rheology to solving tailings disposal problems. *International Journal of Mineral Processing*, (54) 1998, p. 217-233.

NOWICK, A.S.; BERRY, B.S. *Characterization of elastic behavior*. In: PRESS, A. (Org). *Anelastic relaxation in crystalline solids*. New York: [s.n], 1972. p. 2 – 3.

OSORIO, C.A.H. *Efeito da Adição de Reagentes Agregantes e de Ligantes sobre a consistência de Pastas Mineraias*. 2007. 153. Tese (doutorado – em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

POSSA, M. V., LIMA, J. R. B. de, *Comportamento de Reológico de Polpas Mineraias*. CETEM/ MCT, Rio de Janeiro – Brasil, 2000.

PULLUM, L., GRAHAM, L., RUDMAM, R., HAMILTON, R. High concentration suspension pumping. *Minerals Engineering*. (19) 2006, p. 471 – 477.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. *Mecânica dos fluidos – calor e movimento ondulatório*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984. 510p.

SHAMES, I. H. *Mecânica dos fluidos*. v 1. São Paulo: Edgard Blüncher, 1999. 192p.

SHI, F.N., NAPIER-MUNN, T.J., A model for slurry rheology. *International Journal of Mineral Processing*, (47) 1966, p. 103-123.

SHI, F.N., ZHENG, X.F., The rheology of flotation froths. *International journal of Mineral processing*, (69) 2003, p. 115-128.

SHI, F.N., NAPIER-MUNN, T.J., Measuring the rheology of slurries using an on-line viscometer. *International Journal of Mineral Processing*, (47) 1996, p. 153-163.

SHI, F.N., NAPIER-MUNN, T.J. effects of slurry rheology on industrial grinding performance. *International Journal of Mineral Processing*, (65) 2002, p. 125-140.

SOUZA, S. A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos*. 5 ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 2000. 286p.

WARD, I. M.; HADLEY, D.W. *Principles of linear viscoelasticity*. In: SONS, J. W. (Org). *Mechanical properties of solid polymers*. London: [s.n], 1993. p. 45 – 75.

9.0 ANEXOS

9.1 Resultados da viscosidade para polpa com 64% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	3137,3
2	2198,5
3	881,8
4	817,3
5	909,4
6	543,9
7	634,2
8	446,9
9	373,9
10	371,9
11	329,4
12	348,9
13	266,7
14	185,1
15	205,6
16	255,3
17	197,3
18	224,3
19	166,4
20	219,6
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	3071,3
2	1340,7
3	1247,7
4	826,3
5	554,3
6	650,9
7	408,8
8	497,1
9	433,9
10	274,1
11	283
12	247,4
13	223,3
14	204
15	275,9
16	280,4
17	175,4
18	252,9
19	162
20	219,6

9.2 Resultados da viscosidade para polpa com 68% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	431,9
2	332,9
3	245,9
4	193,5
5	165,6
6	142
7	140,5
8	128,2
9	116,6
10	109,2
11	103,6
12	100,5
13	96
14	90,8
15	88,4
16	85,1
17	82,9
18	81,3
19	78,3
20	76,2
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	413,9
2	296,9
3	249,9
4	207
5	180
6	162
7	154,3
8	143,2
9	130
10	124,2
11	117,2
12	110
13	102
14	98,6
15	95,6
16	92,2
17	87,2
18	83,3
19	78,3
20	76,2

9.3 Resultados da viscosidade para polpa com 70% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	1691,6
2	2951,7
3	1583,7
4	1450,2
5	777,4
6	692,9
7	621,3
8	534,7
9	523,9
10	416,9
11	365,9
12	336,9
13	359,5
14	279,8
15	340,3
16	286,1
17	292,9
18	282,9
19	253,2
20	200,1
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	3611,2
2	1844,6
3	1665,8
4	1237,2
5	826,6
6	752,9
7	713
8	431,2
9	403,2
10	400,7
11	402,5
12	466,4
13	440,2
14	302,1
15	305,1
16	210
17	298,9
18	249,9
19	284,5
20	200,1

9.4 Resultados da viscosidade para polpa com 72% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	1313,7
2	1016,8
3	795,8
4	650,9
5	547,1
6	481,9
7	432,8
8	392,9
9	361,9
10	335,9
11	315,8
12	296,4
13	282,9
14	270,4
15	259,5
16	250,4
17	242,8
18	234
19	226,4
20	
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	2051,6
2	1223,7
3	893,8
4	718,3
5	596,3
6	511,9
7	456,8
8	415,4
9	380,6
10	353,3
11	331
12	310,4
13	294,4
14	281,1
15	269,5
16	258,3
17	241,2
18	241,3
19	231,1
20	220,5

9.5 Resultados da viscosidade para polpa com 74% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	1133,8
2	1223,7
3	1035,8
4	869,8
5	742,6
6	647,9
7	575,9
8	516,6
9	467,2
10	430,1
11	397,6
12	368,4
13	346,5
14	327,4
15	309,9
16	295,1
17	282,3
18	271,6
19	262
20	253,1
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	1991,6
2	1292,7
3	987,8
4	808,3
5	676,7
6	594,9
7	533
8	484,4
9	444,6
10	410,9
11	381,2
12	358,9
13	341
14	326,1
15	311,9
16	297,7
17	286,5
18	275,6
19	264,6
20	253,1

9.6 Resultados da viscosidade para polpa com 76% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	2309,5
2	1559,7
3	1069,8
4	884,8
5	677,9
6	669,9
7	599,9
8	596,1
9	553,2
10	530,9
11	526,3
12	504,9
13	498,4
14	486,3
15	487,9
16	468,7
17	453,4
18	449,9
19	434,1
20	425,9
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	3749,2
2	2009,6
3	1449,7
4	1207,2
5	977,8
6	884,8
7	801,3
8	746,1
9	669,9
10	632,9
11	602,6
12	572,4
13	546,8
14	520,6
15	493,9
16	474,3
17	462,3
18	439,9
19	438,9
20	425,9

9.7 Resultados da viscosidade para polpa com 78% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	3749,2
2	2879,4
3	2279,5
4	1814,6
5	1421,7
6	1174,7
7	1019,8
8	911,1
9	823,2
10	818,8
11	798,9
12	734,8
13	719,8
14	687,7
15	661,9
16	650,5
17	638,7
18	621,5
19	609,3
20	595,4
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	6358,6
2	3374,3
3	2399,5
4	1889,6
5	1613,7
6	1439,7
7	1242,6
8	1091
9	1006,5
10	920,8
11	839,8
12	767,3
13	740,6
14	715,6
15	707,8
16	686,1
17	665,2
18	644,9
19	618,8
20	595,4

9.8 Resultados da viscosidade para polpa com 80% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	4859
2	3824,2
3	3039,4
4	2572
5	1985,6
6	1744,6
7	1534
8	1361
9	1209,7
10	1070,8
11	987,1
12	924,8
13	916
14	891,2
15	881,8
16	860,4
17	883,9
18	871,5
19	885,6
20	887,8
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	11937,5
2	6163,7
3	4239,1
4	3291,8
5	2627,4
6	2169,5
7	1932,4
8	1694,6
9	1493
10	1382,7
11	1292,5
12	1212,2
13	1153,6
14	1122,6
15	1075,8
16	1061
17	1032,1
18	988,1
19	947,2
20	887,8

9.9 Resultados da viscosidade para polpa com 80% de sólidos em massa (pH = 11)

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	2310
2	1605
3	1160
4	989,9
5	803,8
6	769,8
7	737
8	761,1
9	749,8
10	749,8
11	736,2
12	707,3
13	689,9
14	687,7
15	701,9
16	701,1
17	714,6
18	723,2
19	696,2
20	689,9
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	5189
2	2819
3	2110
4	1785
5	1506
6	1370
7	1255
8	1188
9	1096
10	1026
11	948,9
12	907,3
13	879
14	850,5
15	817,8
16	800,5
17	778,1
18	758,2
19	729,3
20	689,9

9.10 Resultados da viscosidade para polpa com 82% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	9657,9
2	7168,5
3	6858,5
4	6096,2
5	4529
6	3489,3
7	3059,3
8	2631,9
9	2236,2
10	1943,6
11	1848,7
12	1752,1
13	1652
14	1551,1
15	1541,7
16	1486,6
17	1418,5
18	1383
19	1354,4
20	1330,2
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	16496,5
2	8338,2
3	5688,8
4	4469
5	3617,2
6	3039,4
7	2708
8	2444,5
9	2179,5
10	2018,6
11	1870,5
12	1752,1
13	1668,1
14	1615,4
15	1549,7
16	1525,9
17	1499,7
18	1449,7
19	1401,8
20	1330,2

9.11 Resultados da viscosidade para polpa com 82% de sólidos em massa (pH = 11).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	6509
2	6149
3	4169
4	3067
5	2513
6	2070
7	1817
8	1653
9	1570
10	1548
11	1554
12	1507
13	1504
14	1483
15	1478
16	1473
17	1463
18	1440
19	1427
20	1416
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	12057
2	6389
3	4559
4	3629
5	3113
6	2724
7	2502
8	2306
9	2153
10	2049
11	1955
12	1845
13	1786
14	1712
15	1666
16	1648
17	1583
18	1546
19	1489
20	1416

9.12 Resultados da viscosidade para polpa com 84% de sólidos em massa (pH natural).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	36652,2
2	26874,3
3	18745
4	14876,8
5	6858,5
6	6022,7
7	3736,3
8	3374,3
9	3052,7
10	2675,4
11	2345
12	2199,5
13	1928,8
14	1893,9
15	1807,6
16	1642,1
17	1545,6
18	1466,4
19	1382,9
20	1271,7
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	20035,7
2	9717,9
3	6038,7
4	4859
5	3959,2
6	3279,3
7	2999,4
8	2594,4
9	2359,5
10	2207,5
11	2017,8
12	1839,6
13	1698,1
14	1671,1
15	1527,7
16	1417,2
17	1340,9
18	1319,7
19	1300,8
20	1271,7

9.13 Resultados da viscosidade para polpa com 84% de sólidos em massa (pH = 11).

Speed inicial (rpm)	Viscosidade (cP)
1	36652,2
2	26874,3
3	18745
4	14876,8
5	6858,5
6	6022,7
7	3736,3
8	3374,3
9	3052,7
10	2675,4
11	2345
12	2199,5
13	1928,8
14	1893,9
15	1807,6
16	1642,1
17	1545,6
18	1466,4
19	1382,9
20	1271,7
Speed final (rpm)	Viscosidade (cP)
1	20035,7
2	9717,9
3	6038,7
4	4859
5	3959,2
6	3279,3
7	2999,4
8	2594,4
9	2359,5
10	2207,5
11	2017,8
12	1839,6
13	1698,1
14	1671,1
15	1527,7
16	1417,2
17	1340,9
18	1319,7
19	1300,8
20	1271,7