

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

Efeitos da reologia de polpa e avaliação de dispersantes como aditivos de moagem na
remoagem de um concentrado de minério de ferro

Autor: Marcos Gomes Vieira

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres

Junho/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

EFEITOS DA REOLOGIA DE POLPA E AVALIAÇÃO DE DISPERSANTES COMO
ADITIVOS DE MOAGEM NA REMOAGEM DE UM CONCENTRADO DE MINÉRIO DE
FERRO

Marcos Gomes Vieira

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

DEDICATÓRIA

A Deus,
à minha mãe Policena (em memória),
à minha esposa Jaqueline e ao meu filho Matheus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho e, em especial:

A Mauro Carvalho e João Pedro em nome da SAMARCO, pelo incentivo e oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao professor Antônio Clark Peres, pela orientação e amizade.

Aos professores Paulo Brandão e Roberto Galéry, Joaquim Donda, Paulo Mapa, Henrique Turrer e Eliomar Ferreira, pelas sugestões, ensinamentos e orientação profissional.

A toda equipe dos laboratórios de Controle de Processo e Químico, sobretudo a Márcio Cruz, Leônidas Ângelo, Pedro Mendes e Alan Castro, pelo profissionalismo e dedicação na execução dos ensaios.

A equipe da engenharia de processo da Gerência do Mineroduto, em especial a Tatiana Silva, Edna Maria e Nathan Marcos, por toda a ajuda e ensinamentos com relação aos testes reológicos.

A Caroline Belisário, pelo acompanhamento dos testes e organização das planilhas.

Aos engenheiros Ricardo Vargas, da BASF e Silvio Alberto, da BUCKMAN, pelo fornecimento das amostras.

Aos colegas das Gerências de Engenharia de Processo e Automação e Beneficiamento, pelo companheirismo e constante estímulo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Reologia de suspensões minerais	20
3.1.1	Conceitos de reologia e viscosidade.....	20
3.1.2	Classificação reológica dos fluidos	22
3.1.3	Modelos empíricos.....	25
3.1.4	Variáveis que afetam a reologia de suspensões	27
3.2	Efeito da reologia no desempenho da moagem	29
3.3	Aditivos de moagem	33
3.3.1	Principais dispersantes e seus mecanismos de atuação	33
3.3.2	Dispersantes utilizados como aditivos de moagem.....	39
3.4	Descrição das etapas de moagem da SAMARCO	48
3.4.1	Concentrador I	48
3.4.2	Concentrador II	50
3.5	Método para previsão do consumo específico de energia na remoagem	53
3.6	Técnicas para análise de dispersão / agregação de uma polpa	56
4	METODOLOGIA.....	58
4.1	Materiais.....	58
4.1.1	Amostras minerais	58
4.1.2	Reagentes.....	59
4.2	Métodos	61

4.2.1	Análise química quantitativa (AQQT)	61
4.2.2	Análise granulométrica (AG)	63
4.2.3	Microscopia ótica de luz refletida (MOLR)	63
4.2.4	Área específica (Blaine).....	64
4.2.5	Determinação do grau de dispersão	65
4.2.5.1	Determinação do grau de dispersão em função do pH	65
4.2.5.2	Determinação do grau de dispersão em função da dosagem de reagente ..	66
4.2.6	Testes de remoagem e determinação do consumo específico de energia... 66	
4.2.7	Determinação das curvas reológicas	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	Análise química, granulométrica e mineralógica das amostras	71
5.2	Avaliação dos potenciais aditivos de moagem	73
5.3	Avaliação dos testes de remoagem	91
5.3.1	Efeito da porcentagem de sólidos da polpa	91
5.3.2	Influência da adição dos reagentes selecionados na etapa I.....	97
5.3.3	Influência do pH.....	104
5.3.4	Influência da adição de cal	110
6	CONCLUSÕES	116
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
8	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	119
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
10	ANEXOS.....	126
	Anexo I – Curvas de fluxo obtidas para a etapa I	126
	Anexo II – Ajustes das curvas de fluxo usando os modelos reológicos de Herschel-Bulkley e Bingham	132
	Anexo III – Testes de remoagem.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Tipos de comportamento reológico de polpas (adaptado de STEFFE, 1996).....	22
Figura 3.2 - Viscosidade em função do tempo (para uma dada taxa de cisalhamento) e curvas de histerese para fluidos tixotrópicos e reoéticos (adaptado de HE, 2007).....	24
Figura 3.3 - Taxa de produção passante em uma determinada malha e viscosidade em função do percentual de sólidos em testes de moagem <i>batch</i> padronizados (KLIMPEL, 1982, 1997).....	30
Figura 3.4 - Modelo de dupla camada elétrica (BRANDÃO, 2009).....	34
Figura 3.5 - Estabilização estérica de partículas devido à adsorção de dispersantes poliméricos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).	37
Figura 3.6 - Tipos comuns de configurações de adsorção de polímeros nas superfícies das partículas (KLIMPEL, 1999).	38
Figura 3.7 - Fórmula química do ácido lignossulfônico utilizado como aditivo de moagem (KLIMPEL, 1999).....	41
Figura 3.8 - Fórmulas químicas de polímeros solúveis em água utilizados como aditivos de moagem (KLIMPEL, 1999).	41
Figura 3.9 - Viscosidade de uma polpa de minério de cobre com ganga silicatada em função da adição de duas bases: soda cáustica x cal (KLIMPEL e HANSEN, 1989).	42
Figura 3.10 - Viscosidade de uma polpa de minério de cobre em função do percentual de sólidos e dosagem de sulfoetilmacrilato (KLIMPEL e HANSEN, 1989).....	43
Figura 3.11 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e peso molecular de polímeros aniônicos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).	44

Figura 3.12 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e da proporção de polímeros aniônicos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).....	45
Figura 3.13 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e do grau de hidrólise de uma poliacrilamida (KLIMPEL e HANSEN, 1989).	46
Figura 3.14 - Redução da viscosidade de uma polpa de minério de cobre em função do tipo de dispersante, dosagem e concentração de íon cálcio (KLIMPEL e HANSEN, 1989).	47
Figura 3.15 - Fluxograma simplificado do concentrador I.....	48
Figura 3.16 - Fluxograma do concentrador II.....	51
Figura 3.17 - Exemplo de curvas para determinação do consumo específico de energia.....	56
Figura 4.1 - Fluxograma macro para o estudo.....	62
Figura 4.2 - Fluxograma dos ensaios de remoagem para determinação do consumo específico de energia e do comportamento reológico.....	68
Figura 4.3 - Reômetro de cilindro coaxial utilizado no estudo.....	69
Figura 5.1 - Distribuições granulométricas das amostras.....	73
Figura 5.2 - Grau de dispersão em função do pH.....	74
Figura 5.3 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610) e da dosagem de poliacrilato de sódio e fosfatos (AG Disper).	76
Figura 5.4 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de polietileniminas.	78

Figura 5.5 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de polivinil de amina.	80
Figura 5.6 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de óxidos de polietileno.	81
Figura 5.7 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de copolímero sílico acrilato.	83
Figura 5.8 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio.	85
Figura 5.9 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de poliácridamidas.	86
Figura 5.10 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de ácido cítrico, hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio.	88
Figura 5.11 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de hidróxido de sódio e de hidróxido de cálcio.	90
Figura 5.12 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, para três níveis de percentual de sólidos na polpa: 70%, 75% e 80%.	92
Figura 5.13 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem estudados em três níveis de porcentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.	93
Figura 5.14 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, para três níveis de porcentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.	94
Figura 5.15 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, para três níveis de porcentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.	95

Figura 5.16 - Efeito do percentual de sólidos nas curvas percentual retido em 10 μ m em função da energia e percentual passante em 10 μ m em função do Blaine.	96
Figura 5.17 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, com adição de 300g/t do potencial aditivo selecionado previamente.	98
Figura 5.18 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem efetuados com 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente. .	99
Figura 5.19 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, com adição de 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente.	100
Figura 5.20 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, com adição de 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente.	101
Figura 5.21 - Efeito da adição de 300g/t dos reagentes selecionados na etapa I nas curvas do percentual retido em 10 μ m em função da energia e do percentual passante em 10 μ m em função do Blaine.	103
Figura 5.22 - Efeito do pH nas curvas de fluxo obtidas após remoagem.	105
Figura 5.23 - Efeito do pH nos coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem.	106
Figura 5.24 - Efeito do pH nas curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada.	107
Figura 5.25 – Efeito do pH nas curvas de Blaine em função da energia aplicada.	108
Figura 5.26 - Efeito do pH nas curvas do percentual retido em 10 μ m em função da energia e do percentual passante em 10 μ m em função do Blaine.	109
Figura 5.27 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.	111
Figura 5.28 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica para testes de remoagem efetuados com 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.	112

Figura 5.29 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo...	113
Figura 5.30 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.....	114
Figura 5.31 - Efeito da utilização de água de processo ou da adição de 300g/t de cal nas curvas do percentual retido em 10µm em função da energia e do percentual passante em 10µm em função do Blaine.	115
Figura 10.1 - Curvas de fluxo para testes com ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610) e para poliacrilato de sódio e fosfato (AG Disper).....	126
Figura 10.2 - Curvas de fluxo para testes com polietileniminas.....	127
Figura 10.3 - Curvas de fluxo para testes com polivinilis de amina.....	128
Figura 10.4 - Curvas de fluxo para testes com óxidos de polietileno.....	129
Figura 10.5 - Curvas de fluxo para testes com copolímero sílico acrilato.....	129
Figura 10.6 - Curvas de fluxo para testes com copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio.	130
Figura 10.7 - Curvas de fluxo para testes com poliacrilamidas.....	130
Figura 10.8 - Curvas de fluxo para testes com ácido cítrico, hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Modelos reológicos mais comuns (KLEIN, 2002)	25
Tabela III.2 - Propriedades químicas e físicas que afetam o comportamento reológico de suspensões (KLEIN, 2002)	28
Tabela III.3 - Principais reagentes dispersantes (RABELO, 1994; BRANDÃO, 2009) .	36
Tabela III.4 - Alguns reagentes orgânicos e inorgânicos utilizados como aditivos de moagem (KLIMPEL, 1999).....	40
Tabela III.5 - Características dos moinhos do concentrador I	49
Tabela III.6 - Características dos moinhos do concentrador II	52
Tabela III.7 - Estabelecimento das condições para realização dos ensaios de previsão de consumo específico de energia (DONDA, 2003)	54
Tabela IV.1 - Reagentes testados como aditivos de moagem	60
Tabela IV.2 – Condições para realização dos ensaios de remoagem para 70%, 75% e 80% de sólidos	67
Tabela V.1 – Distribuição granulométrica e teores das frações retidas simples para a amostra alimentação da remoagem	71
Tabela V.2 - Distribuição granulométrica e teores das frações retidas simples da amostra produto da remoagem.....	72
Tabela V.3 - Fases mineralógicas presentes nas amostras estudadas (MOLR, % em peso).....	72

LISTA DE NOTAÇÕES

Blaine	área de superfície específica das partículas (cm^2/g), determinada em um permeômetro de Blaine
BSA	<i>Blaine surface area</i>
Da	unidade de peso molecular (Dalton)
DCE	dupla camada elétrica
EEUFMG	Escola de Engenharia da UFMG
F ₈₀	abertura em malha quadrada que deixa passar 80% da alimentação
G	goethita
HC	hematita compacta (hematita lamelar + hematita especular + hematita granular)
HP	hematita porosa (martita)
IDP	íon determinador de potencial
k	índice de consistência do fluido
MA	magnetita
MOLR	microscopia ótica de luz refletida
MSDS	<i>material safety data sheet</i>
n	índice de comportamento do fluido
OF	<i>overflow</i>
OT	outros minerais
PPC	perda por calcinação
P ₈₀	abertura em malha quadrada que deixa passar 80% do produto
QL	quartzo livre
QM	quartzo misto
UF	<i>underflow</i>
YS	<i>yield stress</i> (tensão limite de escoamento)
τ	tensão de cisalhamento (Pa)
γ	taxa de cisalhamento (s^{-1})
μ	viscosidade absoluta (mPa.s)
μ_{ap}	viscosidade aparente (mPa.s)

RESUMO

Este trabalho investigou os efeitos do comportamento reológico da polpa e da utilização de dispersantes na remoagem de um concentrado de minério de ferro.

A influência da adição de alguns reagentes no comportamento reológico e no estado de agregação e dispersão de uma polpa de concentrado foi avaliada pela determinação do grau de dispersão utilizando tubo de sedimentação, em conjunto com a análise das curvas de fluxo, obtidas em um reômetro de cilindros coaxiais. Estas curvas foram ajustadas segundo os modelos de Herschel-Bulkley e Bingham. O objetivo desta etapa foi selecionar os reagentes que promovessem aumento da estabilidade termodinâmica da polpa, em pH 10 (pH de trabalho da remoagem da SAMARCO).

Nenhum dos vinte reagentes avaliados nesta primeira etapa promoveu aumentos significativos no grau de dispersão da polpa. Dos vinte reagentes, seis reduziram o índice de consistência do fluido e da viscosidade plástica, com dosagem de 300g/t: três ácidos poliacrílicos, copolímero sílico acrilato, ácido cítrico e hexametáfosfato de sódio. O ácido poliacrílico de menor peso molecular, juntamente com os outros três reagentes, foram selecionados para a segunda etapa do trabalho, cujo objetivo foi avaliar a influência do percentual de sólidos, da adição de reagentes (selecionados previamente na etapa I), do pH e da adição de cal no consumo específico de energia previsto em moinhos de bolas industriais, através de testes de moagem em laboratório.

Os reagentes selecionados na etapa I não promoveram redução no consumo específico de energia, uma vez que não afetaram de forma significativa o grau de dispersão da polpa em pH 10. Entretanto, a adição desses reagentes promoveu a redução na geração de Blaine por energia aplicada, sendo mais eficiente para o hexametáfosfato de sódio (redução de 26% no índice BSA/kWh/t).

O aumento do pH de 7,3 para 10,0 aumentou o grau de dispersão da polpa, proporcionando menores valores de tensão limite de escoamento e viscosidade aparente, e uma redução no consumo específico de energia de 17,4%. Portanto o

hidróxido de sódio, adicionado às etapas anteriores de remoagem, já atua como aditivo de moagem.

Não houve diferenças significativas no consumo específico de energia para os testes executados com 70 e 75% de sólidos, porém o consumo específico de energia para o teste com 80% de sólido foi 22% superior aos demais.

A adição de 300g/t de cal provocou um aumento de 27% no consumo específico de energia, com aumentos significativos na tensão limite de escoamento e no índice de consistência do fluido, principalmente para a condição de 18kWh/t.

ABSTRACT

This work investigated the effects of the slurry's rheological behavior and use of dispersants on wet ultra-fine grinding of an iron ore concentrate.

The influence of the addition of some reagents on the rheological behavior and state of aggregation and dispersion of concentrate slurry was evaluated by determining the degree of dispersion using a settling tube, together with the analysis of flow curves obtained in a concentric cylinder rheometer. These curves were fitted according to models of Herschel-Bulkley and Bingham. The objective was to select reagents that promote a higher slurry thermodynamic stability, at pH 10 (pH used in SAMARCO's regrinding circuit).

None of the twenty reagents evaluated in this first stage caused significant increases in the slurry's degree of dispersion. Of the twenty reagents, six reduced the fluid consistency index (k coefficient) and apparent viscosity, with the dosage of 300g/t: three polyacrylic acid, silicone acrylate copolymer, citric acid and sodium hexametaphosphate. The polyacrylic acid of lower molecular weight, together with the other three reagents, were selected for the second stage of this work, aiming at to evaluate the influence of solids content, the addition of reagents (previously selected in step I), pH and the addition of lime in the specific energy consumption in industrial ball mills, through laboratory grinding tests.

The reagents selected in step I did not promote reduction in specific energy consumption, since it does not significantly affect the dispersion of slurry at pH 10. However, the addition of these reagents caused a reduction in the generation of Blaine surface per applied energy, being more efficient for sodium hexametaphosphate (26% reduction in the index BSA/kWh/t).

The increase of pH from 7.3 to 10.0 increased the slurry dispersion degree, providing lower values of yield stress and apparent viscosity, and a reduction in specific energy consumption by 17.4%. So sodium hydroxide, added to previous steps, has acted as a grinding aid.

There were no significant differences in specific energy consumption for the tests performed with 70 and 75% solids, but the specific energy consumption for the test with 80% of solid was 22% higher than the others.

The addition of 300 g/t of lime caused an increase of 27% in specific energy consumption, with significant increases in yield stress and consistency index of the fluid, especially for the condition of 18kWh/t.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de cominuição representam um desafio para a indústria mineral, uma vez que apresentam baixa eficiência mecânica e são grandes consumidores de energia, respondendo pelos maiores custos dos concentradores.

A fração passante em 44 μ m e a área específica (medida indiretamente por permeâmetros de Blaine) são especificações de concentrados de minérios de ferro para a produção de pelotas. Para estas especificações serem alcançadas, os concentrados passam por etapas de (re)moagem que, na maioria dos casos, são efetuadas em moinhos de bolas (DONDA, 2003).

Na SAMARCO, as etapas de moagem representam cerca de 80% do consumo de energia dos concentradores. Desse total, a remoagem do concentrado representa 60% do consumo de energia. Importantes trabalhos de otimização visando aumento de produtividade e redução do consumo específico de energia já foram realizados, mas nenhum atentando para a influência da reologia no desempenho dessa etapa.

A influência da reologia não é bem compreendida e, em vista disso, ela é raramente incorporada como uma variável em projetos, análises e otimização. Uma das principais razões é a dificuldade de estudar a reologia de suspensões que sedimentam, que ocorrem em grande parte dos processos de beneficiamento.

MOYS (1989) enfatizou que a viscosidade (e não a porcentagem de sólidos) é a variável que governa a interação entre a polpa e os corpos moedores dentro do moinho.

Alguns trabalhos descritos na literatura técnica, e discutidos no capítulo revisão bibliográfica, demonstraram ganhos de produtividade na moagem com a utilização de certos dispersantes (denominados aditivos de moagem). Esses reagentes promoveram redução de viscosidade da polpa ou redução da tensão limite de escoamento (*yield stress*), permitindo maiores porcentagens de sólido no moinho. Os principais aditivos de moagem utilizados são polímeros solúveis em água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Correlacionar o comportamento reológico de polpas de um concentrado de minério de ferro com o consumo específico de energia previsto em moinhos de bolas industriais, através de testes de moagem em laboratório.

2.2 Objetivos específicos

Verificar a influência das seguintes variáveis no comportamento reológico e na remoagem de polpas de concentrado de minério de ferro: porcentagem de sólidos, reagentes modificadores de comportamento reológico, pH, estado de agregação e dispersão e adição de cal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre reologia de suspensões e sua influência no desempenho da moagem. Serão abordados aspectos conceituais sobre reologia de suspensões, classificação reológica dos fluidos, modelos empíricos e variáveis que afetam a reologia de suspensões. Com relação à influência da reologia no desempenho da moagem, será feita uma revisão dos principais trabalhos nessa área e dos principais dispersantes utilizados como aditivos de moagem. Por fim, será apresentada uma descrição das etapas de moagem da SAMARCO, e do método de laboratório utilizado para previsão do consumo específico de energia na remoagem.

3.1 Reologia de suspensões minerais

3.1.1 Conceitos de reologia e viscosidade

O termo reologia vem do grego *rheo* (fluxo) e *logos* (ciência) e foi sugerido por Bingham e Crawford para descrever as deformações de sólidos e a fluidez de líquidos (LABA, 1993). Foi definida por KLEIN (2002) e STEFFE (1996) como a ciência da deformação do fluxo da matéria. POSSA e de LIMA (2000) definiram reologia como a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais sob a ação de uma força.

A operação fundamental em um teste reológico é aplicar uma força no material a ser investigado e medir a sua deformação, ou, igualmente, aplicar uma deformação e medir a resistência (VANDRESEN, 2007). A viscosidade de um fluido pode ser definida como sendo a propriedade que o mesmo apresenta em oferecer uma maior ou menor resistência à deformação, quando sujeito a esforços de escorregamento (POSSA e de LIMA, 2000).

A viscosidade de um fluido foi definida por Isaac Newton como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna. Quanto maior o grau de fricção interna de um fluido, maior é a sua viscosidade (FERREIRA *et al.*, 2005). Em

sua abordagem matemática, Newton utilizou o modelo de duas placas de áreas A, separadas por uma distância h, movimentadas através da aplicação de uma força F. 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 (μ). A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento (τ) e o gradiente de velocidade como taxa de cisalhamento (γ) (BARNES *et al.*, 1989, *apud* FERREIRA, 2002). Assim:

$$\tau = \mu\gamma \quad (1)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

A unidade de viscosidade mais utilizada é o mPa.s (1mPa.s = 1cP = 0,001kg/m.s).

A viscosidade da água varia entre 2cP próximo ao congelamento e 0,3cP perto da ebulição. A 16°C o valor é de 1,1cP, que é o valor usado para efeito de projeto. Polpas de minério de ferro e polpas de calcário com 60% de sólidos em peso apresentam viscosidades em torno de 20cP. Rejeitos de bauxita chegam a apresentar valores de 600cP (CHAVES *et al.*, 2006).

Segundo FERREIRA *et al.* (2005), a reologia de suspensões compreende o estudo do comportamento de fluxo de suspensões de sólidos, utilizando, principalmente, a determinação da viscosidade aparente (τ/γ) e da tensão limite de escoamento ou *yield stress*. A presença da tensão limite de escoamento implica que a suspensão apresenta uma estrutura que precisa ser vencida para começar a fluir (KLEIN, 2002). Uma das formas de caracterização do comportamento reológico de suspensões consiste na realização de ensaios de medidas da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, reportados como curvas de fluxo. Esses ensaios são realizados através de viscosímetros de tubo ou rotacionais (FERREIRA *et al.*, 2005).

3.1.2 Classificação reológica dos fluidos

A figura 3.1 apresenta as principais relações entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento. A forma de cada curva depende dos tipos e magnitudes das interações entre os componentes particulados e aquosos (KLEIN, 2002).

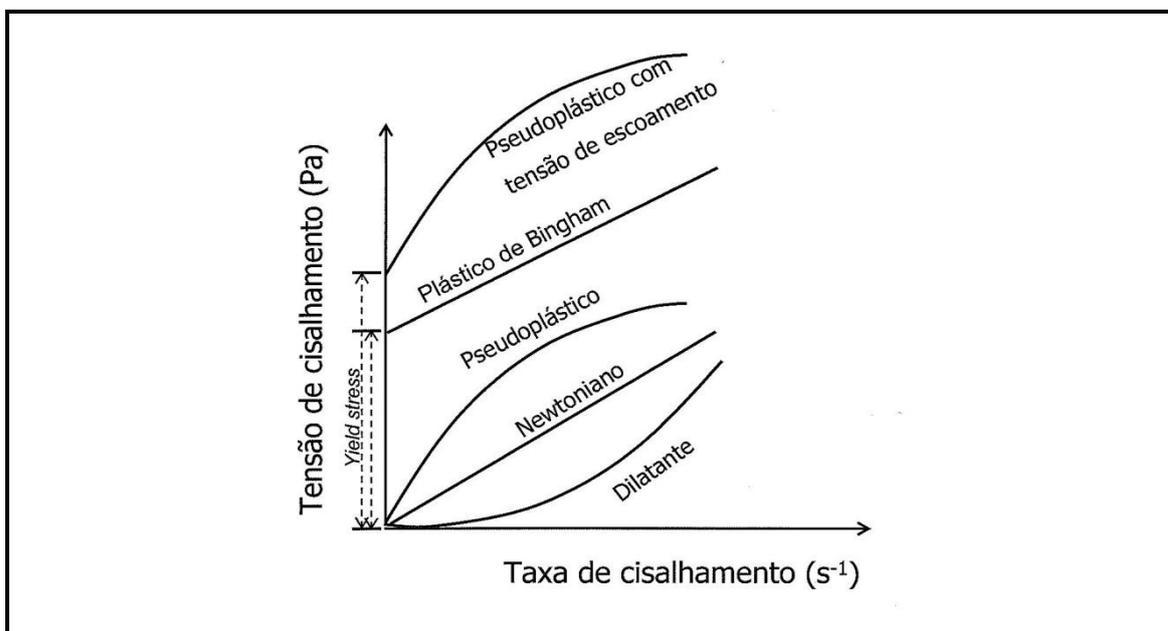


Figura 3.1 - Tipos de comportamento reológico de polpas (adaptado de STEFFE, 1996).

Um fluido newtoniano apresenta uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, conforme equação (1). Dessa forma, apresenta uma viscosidade constante, independentemente da variação da taxa de cisalhamento. FERREIRA *et al.* (2005) citaram como exemplos de fluidos newtonianos óleos e soluções de polímeros.

A maioria das suspensões minerais são não-newtonianas, uma vez que suas curvas não são lineares. As variações nas características físicas e químicas das suspensões minerais geram a ampla gama de curvas mostradas na figura 3.1. Como resultado, a maioria das suspensões não tem um valor único de viscosidade, mas sim uma viscosidade aparente (μ_{ap}) que muda com a taxa de cisalhamento (KLEIN, 2002). Os

fluidos não-newtonianos são classificados em: pseudoplástico, dilatante, pseudoplástico com tensão de escoamento e plástico de Bingham.

Nos fluidos pseudoplásticos a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento pode ser encontrado em sistemas coloidais, onde as partículas assimétricas, com orientação ao acaso, ficam inicialmente emaranhadas, formando uma rede e dificultando o escoamento. Com o aumento da taxa de cisalhamento esta rede se rompe e o escoamento é facilitado, diminuindo a viscosidade (POSSA e de LIMA, 2000).

Nos fluidos dilatantes tem-se um aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. FERREIRA *et al.* (2005) citaram como exemplos de fluidos dilatantes certas suspensões com altas porcentagens de sólido. Segundo SHAW (1992), 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 vazios.

Os fluidos denominados plástico de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento distinguem-se dos outros fluidos por requererem uma tensão inicial, denominada tensão limite de escoamento (*yield stress*), para que o fluido comece a escoar. Quando a tensão de cisalhamento é maior que a tensão limite de escoamento, a estrutura interna colapsa, favorecendo o escoamento do material como um fluido (SKELLAND, 1967). FERREIRA *et al.* (2005) citaram que uma das principais aplicações da tensão limite de escoamento tem sido no projeto e monitoramento do transporte de suspensões através de bombeamento, onde se deseja um valor de tensão limite de escoamento que possibilite o transporte de suspensões sem a ocorrência de sedimentação de partículas e, em caso de uma eventual parada do sistema, não ocorra a sedimentação imediata das partículas.

Todos esses tipos de escoamento citados anteriormente são independentes do tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante. Há casos, por outro lado, de escoamentos de fluido dependentes do tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento. Segundo NASCIMENTO (2007), essa dependência do tempo pode ser encontrada em materiais pseudoplásticos ou dilatantes, podendo ser visualizada quando a curva relativa ao aumento de taxa de cisalhamento não é coincidente com a

curva de decréscimo de taxa de cisalhamento na curva de fluxo, formando a curva de histerese (figura 3.2). Este comportamento ocorre quando as mudanças estruturais são mais lentas que o tempo de realização do teste. A rigor todos os fluidos nos quais ocorrem fenômenos de formação ou destruição de estruturas com a variação da taxa de cisalhamento são dependentes do tempo, pois o processo de mudança estrutural acontece num intervalo de tempo finito. Dá-se o nome de tixotropia ao fenômeno observado quando o processo de recomposição da estrutura é mais lento que o processo de destruição da estrutura inicial. Já os materiais reopéticos, extremamente raros, possuem o processo de recomposição da estrutura mais rápido do que o processo de destruição. Propriedades reopéticas foram relatadas em um trabalho de KLEIN (2001) para suspensões de solos lateríticos.

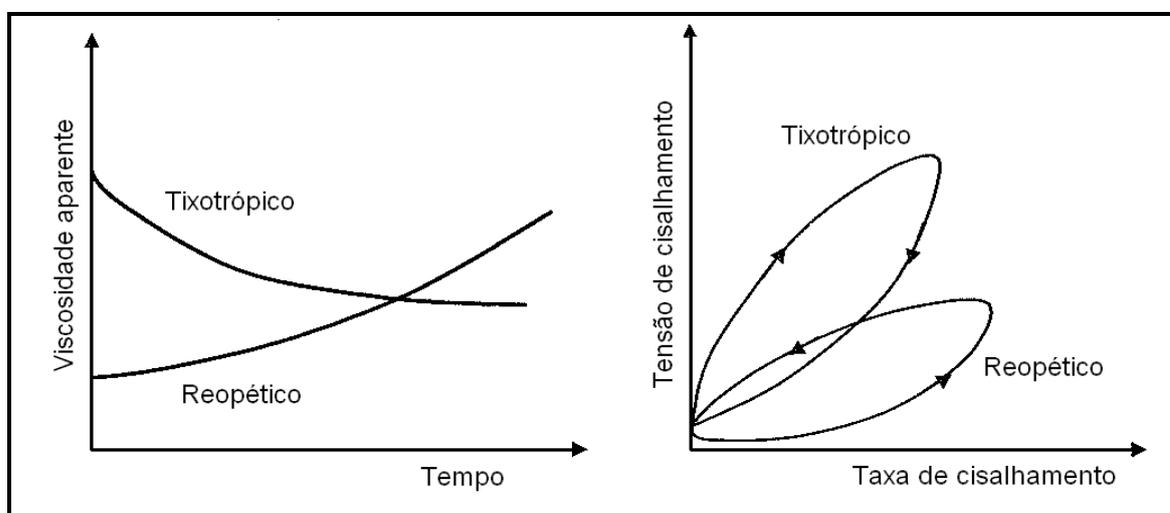


Figura 3.2 - Viscosidade em função do tempo (para uma dada taxa de cisalhamento) e curvas de histerese para fluidos tixotrópicos e reoéticos (adaptado de HE, 2007).

KLEIN (2002) afirmou que as suspensões tixotrópicas ou reopéticas são dependentes do tempo requerido a fim de se alcançar um estado de equilíbrio para orientação das partículas e para o nível de agregação e dispersão. Para uma resposta tixotrópica tem-se que o nível de dispersão e o alinhamento das partículas aumentam com a taxa de cisalhamento. Já para um comportamento reopético, o aumento da taxa de cisalhamento induz a um maior grau de agregação das partículas.

3.1.3 Modelos empíricos

As propriedades reológicas podem ser descritas utilizando-se uma equação empírica simples. As equações mais comuns são apresentadas na tabela III.1. KLEIN (2002) apresentou algumas considerações sobre a seleção do melhor modelo:

- a equação deve ser ajustada para uma faixa ampla de tensões de cisalhamento;
- deve ser simples, com o menor número de coeficientes possível;
- os coeficientes devem ser facilmente determinados;
- os coeficientes devem ter significado físico.

Tabela III.1 - Modelos reológicos mais comuns (KLEIN, 2002)

Modelo	Equação
Newtoniano	$\tau = \mu_N \gamma$
Lei da Potência / Ostwald de Waele	$\tau = k \gamma^n$
Equação de plástico de Bingham	$\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL} \gamma$
Modelo de Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_{HB} + k \gamma^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_{YC}^{1/2} + (\mu_c \gamma)^{1/2}$

O modelo mais simples é o newtoniano, que caracteriza a reologia com um único coeficiente, a viscosidade newtoniana (μ_N). Fluidos pseudoplásticos e dilatantes são comumente modelados utilizando a equação da Lei de Potência, sendo esse o modelo empírico mais utilizado, segundo DARLEY e GREY (1988) e POSSA e de LIMA (2000).

O coeficiente k , que está relacionado à consistência da suspensão, é denominado índice de consistência do fluido. Já o coeficiente n , índice de comportamento do fluido, relaciona-se ao comportamento newtoniano ou não-newtoniano de uma suspensão (FERREIRA, 2002).

Quando $n < 1$, o fluido é pseudoplástico. Quando $n = 1$, a equação se torna o modelo newtoniano, onde $k = \mu_N$. Quando $n > 1$, o fluido é dilatante (FERREIRA, 2002; KLEIN, 2002).

Para valores de $n < 1$, um aumento nos valores de k significa um aumento na viscosidade aparente e um aumento nos valores de tensão de cisalhamento. Conseqüentemente, mais agregada estará a suspensão. Ao contrário, uma diminuição de k implica numa diminuição da agregação; a suspensão torna-se mais dispersa e os valores de viscosidade aparente e tensão de cisalhamento se reduzem (FERREIRA, 2002).

Quando $n = 1$, um aumento ou diminuição nos valores de k não significa uma agregação ou dispersão da suspensão, mas sim o efeito de algum parâmetro hidrodinâmico do sistema (FERREIRA, 2002).

A equação do modelo de plástico de Bingham é comumente usada. A tensão limite de escoamento é o termo τ_{yB} (interseção do eixo de tensão de cisalhamento) e a viscosidade plástica μ_{PL} é a inclinação da reta. Essa equação deve ser usada com cuidado, principalmente quando há poucos dados para valores de taxa de cisalhamento baixos, o que pode ocasionar em erros para suspensões que exibem comportamento pseudoplástico ou pseudoplástico com tensão limite de escoamento. Nesses casos, essa equação indica a presença de uma tensão limite de escoamento, quando na verdade não há, ou superestima o valor da tensão limite de escoamento (KLEIN, 2002). Segundo CHAVES *et al.* (2006), a maior parte das polpas usuais em tratamento de minérios pode ser assimilada ao modelo de plástico de Bingham.

As equações de Casson e de Herschel-Bulkley se ajustam para fluidos pseudoplásticos com tensão limite de escoamento, sendo que a equação de Casson é mais simples por possuir menos coeficientes (2 versus 3) que são facilmente determinados graficamente e com significado físico. A tensão limite de escoamento de Casson (τ_{yC}) é obtida por extrapolação dos dados de baixa taxa de cisalhamento no eixo de tensão de cisalhamento. A viscosidade de Casson (μ_c) é a inclinação da

tangente dos dados das maiores taxas de cisalhamento. Quando a tensão limite de escoamento tende a zero, a equação de Casson se torna a equação de Newton.

Já a equação de Herschel-Bulkley é semelhante à equação de Lei da Potência, mas com um termo de tensão limite de escoamento. A equação se ajusta a fluidos pseudoplásticos e dilatantes com tensão limite de escoamento.

Os coeficientes dessas equações podem ser parâmetros adequados para monitoramento das propriedades reológicas. Como exemplo, para suspensões minerais concentradas, a tensão limite de escoamento de Casson é um bom indicador da estabilidade de sedimentação; uma tensão limite de escoamento alta corresponde a uma taxa de sedimentação baixa, e uma tensão limite de escoamento baixa corresponde a uma taxa de sedimentação elevada (KLEIN, 2002).

3.1.4 Variáveis que afetam a reologia de suspensões

Segundo KLEIN (2002), as propriedades físicas e químicas das suspensões minerais determinam como as partículas interagem entre si e com a fase aquosa. A tabela III.2 sumaria a faixa dessas propriedades físicas e químicas para sistemas minerais. Os dois principais tipos de interação que contribuem para as propriedades reológicas são classificados como efeitos hidrodinâmicos e efeitos de agregação, sendo a magnitude desses efeitos determinada pelas propriedades físicas e químicas da suspensão.

Tabela III.2 - Propriedades químicas e físicas que afetam o comportamento reológico de suspensões (KLEIN, 2002)

Propriedade	Descrição
Porcentagem de sólidos em peso	Diluído <5% para concentrado >70%
Densidade da partícula	Carvão <1,5g/cm ³ para concentrados de minerais metálicos >7,0g/cm ³
Tamanho da partícula	Areia grossa >200µm para argilas <2µm
Distribuição de tamanho de partículas	Taxa de tamanho máximo para mínimo tipicamente >4
Forma da partícula	Corpuscular, lamelar, fibrilar
pH	Ácido pH <3 para alcalino pH >11
Espécies dissolvidas	Anions e cátions de metais e sais
Aditivos químicos inorgânicos	Dispersantes, coagulantes
Aditivos químicos orgânicos	Dispersantes, floculantes

Segundo KLEIN (1992), *apud* FERREIRA (2002), as propriedades reológicas de uma suspensão podem ser analisadas do ponto de vista de microrreologia, onde atuam os seguintes efeitos:

- efeitos hidrodinâmicos, os quais descrevem a dissipação de energia devido ao movimento das partículas no fluido;
- efeitos eletroviscosos, que estão relacionados com a dissipação de energia devido a interação entre as cargas de superfície das partículas;
- efeitos de agregação, que estão relacionados à formação e quebra de agregados em suspensão;
- efeitos granuloviscosos, os quais estão relacionados ao empacotamento das partículas em suspensão; esses efeitos são mais pronunciados para alta concentração de partículas, acima de 35% de massa.

Para suspensões com baixa porcentagem de sólidos contendo partículas grossas, os efeitos hidrodinâmicos determinam as propriedades reológicas. Acima de 30% de

sólidos em volume, as interações físicas das partículas podem contribuir para as propriedades viscosas, e se tornam dominantes para porcentagens de sólido superiores a 50%. Para altas porcentagens de sólido, as suspensões desenvolvem comportamento pseudoplástico. Um aumento adicional na porcentagem de sólidos ocasiona um aumento exponencial na viscosidade aparente, tornando-se infinita próxima à máxima fração de empacotamento de sólidos. O valor da fração de sólidos máxima depende da distribuição de tamanho de partículas e tipicamente varia de 61 a 70% de sólidos em volume (KLEIN, 2002).

Para partículas finas ($<20\mu\text{m}$), as interações químicas da superfície tornam-se significativas, facilitando a agregação. Para maiores porcentagens de sólido, essas partículas se interconectam, formando uma estrutura de rede, com uma tensão limite de escoamento associada. Se o cisalhamento quebra essa estrutura, o comportamento será pseudoplástico com tensão limite de escoamento e tixotrópico. De forma contrária, se o cisalhamento induz à agregação, o comportamento será dilatante e reopético (KLEIN, 2002).

3.2 Efeito da reologia no desempenho da moagem

KLIMPEL (1982, 1983, 1997) estudou o efeito do comportamento reológico da polpa na moagem de minérios e carvão. Ele verificou que existe um padrão consistente de mudança nas taxas específicas de quebra associado a mudanças de fluidez da polpa. Utilizando a taxa de produção líquida de um material menor que um determinado tamanho (por exemplo, kg/h de material $<75\mu\text{m}$) como um índice da produção do moinho para um teste *batch* padronizado, foi verificado um padrão de comportamento, ilustrado na figura 3.3.

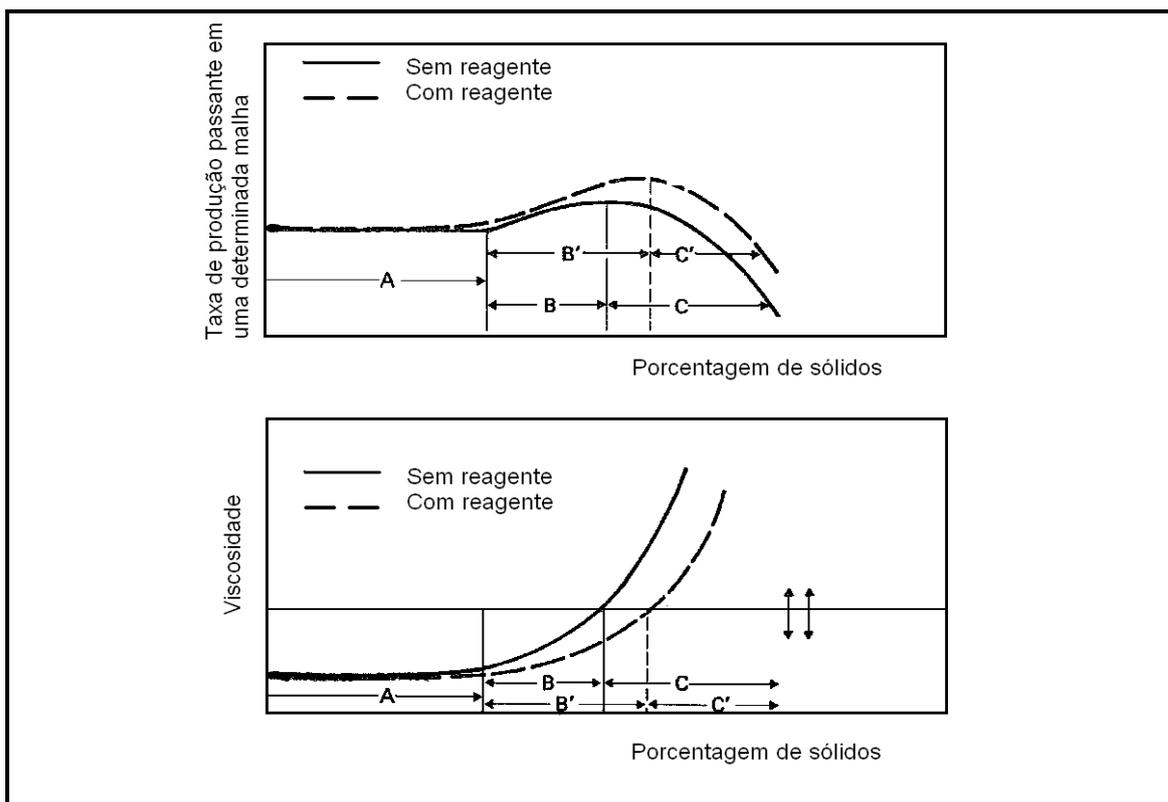


Figura 3.3 - Taxa de produção passante em uma determinada malha e viscosidade em função do percentual de sólidos em testes de moagem *batch* padronizados (KLIMPEL, 1982, 1997).

KLIMPEL (1982, 1983) verificou que a maioria das polpas minerais e de carvão que contêm uma porcentagem de sólidos por volume menor que 40-45%, uma distribuição normal de tamanhos e uma menor viscosidade, apresenta um comportamento dilatante (região A). Nessas condições, a taxa de quebra é de 1ª ordem. Aumentando-se a viscosidade da polpa através do aumento da porcentagem de sólidos ou da quantidade de finos, a polpa passa a apresentar um comportamento pseudoplástico (região B) e, se não apresentar uma tensão limite de escoamento (região C), as taxas de quebra serão de 1ª ordem, porém com valores maiores que os obtidos na região A. Essa é uma das regiões que proporciona uma maior eficiência de moagem.

Aumentando ainda mais a viscosidade da polpa pelo aumento da porcentagem de sólidos, quantidade de finos ou controle da distribuição de tamanhos (distribuições mais fechadas apresentam características mais dilatantes do que distribuições mais abertas), KLIMPEL (1982, 1983, 1997) verificou valores mais significativos de tensão limite de escoamento. Com isso, as taxas de quebra deixaram de ser de 1ª ordem, e

seus valores decresceram consideravelmente. Para contornar esse problema, foram utilizados aditivos químicos de moagem, que mantiveram o comportamento pseudoplástico para maiores porcentagens de sólido (região B'), ou reduziram a tensão limite de escoamento para polpas muito densas, aumentando a sua fluidez.

Em um trabalho mais recente, KLIMPEL (1997) descreveu que as principais variáveis que determinam o tamanho e a localização das regiões A, B e C são: percentual de sólidos, percentual de finos presentes, taxa de quebra do material, volume de polpa no moinho e ambiente químico. O impacto de cada um desses fatores é sumariado a seguir:

- quanto mais finas as partículas da polpa (provenientes da alimentação ou geradas pela moagem) ou maior a taxa de quebra, menor será a porcentagem de sólidos na qual ocorre a transição da região A para a região B e da região B para a região C;
- quanto mais finas as partículas da polpa ou maior a taxa de quebra, menor será o delta de porcentagem de sólidos para a região B;
- o maior ganho na eficiência da moagem é quando a porcentagem de sólidos é escolhida de tal forma que a presença de finos seja suficiente apenas para que a polpa tenha um comportamento pseudoplástico;
- modificadores químicos de viscosidade minimizam ou eliminam a tensão limite de escoamento, podendo-se trabalhar com polpas contendo uma maior porcentagem de sólidos e/ou uma maior quantidade de finos.

KLIMPEL (1982, 1983, 1997) citou que foram feitos vários testes industriais com um poliacrilato de sódio de médio peso molecular denominado GA-4272 (DOW CHEMICAL CO). Ganhos de 0 a 15% de produtividade foram obtidos. O maior desafio foi o custo, que só se mostrou competitivo em plantas que operavam em plena capacidade (KLIMPEL, 1997).

KATZER *et al.* (1981) estudaram o efeito de um polímero aniônico de baixo peso molecular denominado XFS-4272.00 (DOW CHEMICAL CO) na moagem de um taconito utilizando testes em moinho de laboratório, e buscaram correlações com dados industriais. As correlações foram muito consistentes, indicando que a utilização do dispersante XFS-4272.00 em alguns testes industriais provocou um aumento de 8 a

15% na produção com distribuição granulométrica do produto similar ou um produto de 3 a 6% mais fino em 74 μ m, para uma taxa de alimentação constante.

LARTIGES e SOMASUNDARAN (1992) estudaram o efeito da dosagem e do peso molecular de dois ácidos poliacrílicos na moagem de zircônia estabilizada com ítria. As dosagens variaram de zero a 2.000ppm e os pesos moleculares dos dois aditivos estudados foram de 5.000Da e 150.000Da, respectivamente. Nem a concentração de aditivo, nem o peso molecular do polímero tiveram efeito sobre a geração de superfície após moagem. A geração de superfície foi dependente apenas do tempo de moagem, apresentando um comportamento linear.

SHI e NAPIER-MUNNN (2002), tendo por base um grande número de dados industriais, estudaram os efeitos da reologia de polpa no processo de moagem. Os parâmetros avaliados foram a variação da viscosidade, da densidade de polpa, da quantidade de partículas finas e da vazão de alimentação do moinho. Os autores confirmaram as observações de KLIMPEL (1982, 1983) e constataram que o aumento da viscosidade, geralmente, aumenta a taxa de moagem, exceto para polpas dilatantes com tensões limite de escoamento; o aumento da quantidade de finos aumenta a taxa de moagem para polpas com comportamento pseudoplástico e diminui a taxa para polpas dilatantes e newtonianas.

TANGSATHITKULCHAI (2003) investigou a cinética de queda das taxas de quebra na moagem fina do quartzo em função da porcentagem de sólidos em volume, utilizando testes de moagem *batch* em laboratório. O autor constatou que o efeito de queda ocorre em todos os tamanhos de partícula e em qualquer porcentagem de sólidos, até mesmo para as mais diluídas. O fator de queda foi definido e apresentou boa correlação com a viscosidade aparente da polpa. Três regimes diferentes de moagem na região de moagem fina foram identificados em função do seu comportamento reológico: regime I, para concentrações de polpa baixas (no máximo 20% sólidos em volume), com comportamento newtoniano; regime II, para concentrações de polpa intermediárias (30 a 40% de sólidos em volume), com comportamento pseudoplástico ou plástico de Bingham; regime III, para altas concentrações de polpa (54 a 65% de sólidos), apresentando um comportamento de plástico de Bingham com alta tensão limite de escoamento. O autor traçou algumas hipóteses com relação aos mecanismos de queda das taxas de quebra na moagem fina para cada um dos regimes: no regime

I, a queda ocorre em função da redução de eficiência de captura de partículas devido ao arraste do fluido; no regime II, a queda é consequência da eficiência reduzida da transmissão de tensão ocasionado pelo recobrimento das bolas por uma camada de partículas; no regime III a queda resulta da redução de frequência de colisão das bolas devido a um efeito de aderência dessas bolas.

HE (2007) investigou o efeito da reologia de polpa na moagem ultrafina de calcário e quartzito utilizando um vertimill (PMH 5 TEX Drais, volume líquido da câmara de moagem de 5,6L), verificando a influência da porcentagem de sólidos, peso molecular do dispersante, tamanho e distribuição de partículas. O autor constatou que o aumento da porcentagem de sólidos da polpa de calcário (<100 μ m) de 60% para 78,5% provoca mudança no comportamento reológico, que passa de fracamente dilatante ou newtoniano para pseudoplástico com tensão limite de escoamento; um dispersante polimérico com peso molecular de 5.500Da (denominado S40) apresentou o melhor resultado para redução da viscosidade da polpa de calcário e da polpa de quartzito; quanto menor o tamanho de partícula e mais estreita a distribuição granulométrica, mais evidente é o comportamento pseudoplástico, com maiores tensões limites de escoamento e viscosidades aparentes para uma determinada taxa de cisalhamento.

3.3 Aditivos de moagem

3.3.1 Principais dispersantes e seus mecanismos de atuação

Dispersantes são substâncias que promovem a formação de uma dispersão e a estabilizam através da inibição da agregação da fase dispersa (KISSA, 1999).

KLIMPEL e HANSEN (1989) e KLIMPEL (1999) afirmaram que a escolha de um dispersante apropriado para uma determinada polpa engloba um conhecimento prévio do tipo e magnitude da carga elétrica existente nas partículas dessa polpa.

O modelo da dupla camada elétrica é amplamente usado para explicar e quantificar essa natureza elétrica. A dupla camada elétrica é gerada quando uma partícula, contendo uma carga elétrica superficial (gerada pelo rompimento das ligações

químicas, via fratura do sólido), é imersa em um fluido (por exemplo, a água). Após a imersão, espécies carregadas começarão a migrar através da interface sólido/líquido, até que o equilíbrio seja alcançado. Um exemplo da dupla camada elétrica para uma partícula carregada negativamente é apresentado na figura 3.4. Íons que se adsorvem especificamente nessas partículas, revertendo ou até mesmo aumentando a carga elétrica, são denominados íons determinadores de potencial (IDP) e, na maioria dos casos, são únicos para cada tipo de sistema de partículas. Para vários tipos de partículas sólidas, especialmente aquelas que são óxidos, os íons determinadores de potencial são H^+ e OH^- . Para essa situação, a simples mudança do pH da fase líquida pode causar uma mudança na carga da superfície da partícula. Dessa forma, com o aumento do pH, a concentração de OH^- aumenta e a carga da superfície da partícula mudará de positiva para negativa, com o ponto de carga zero sendo o valor de pH no qual a carga elétrica da superfície é nula.

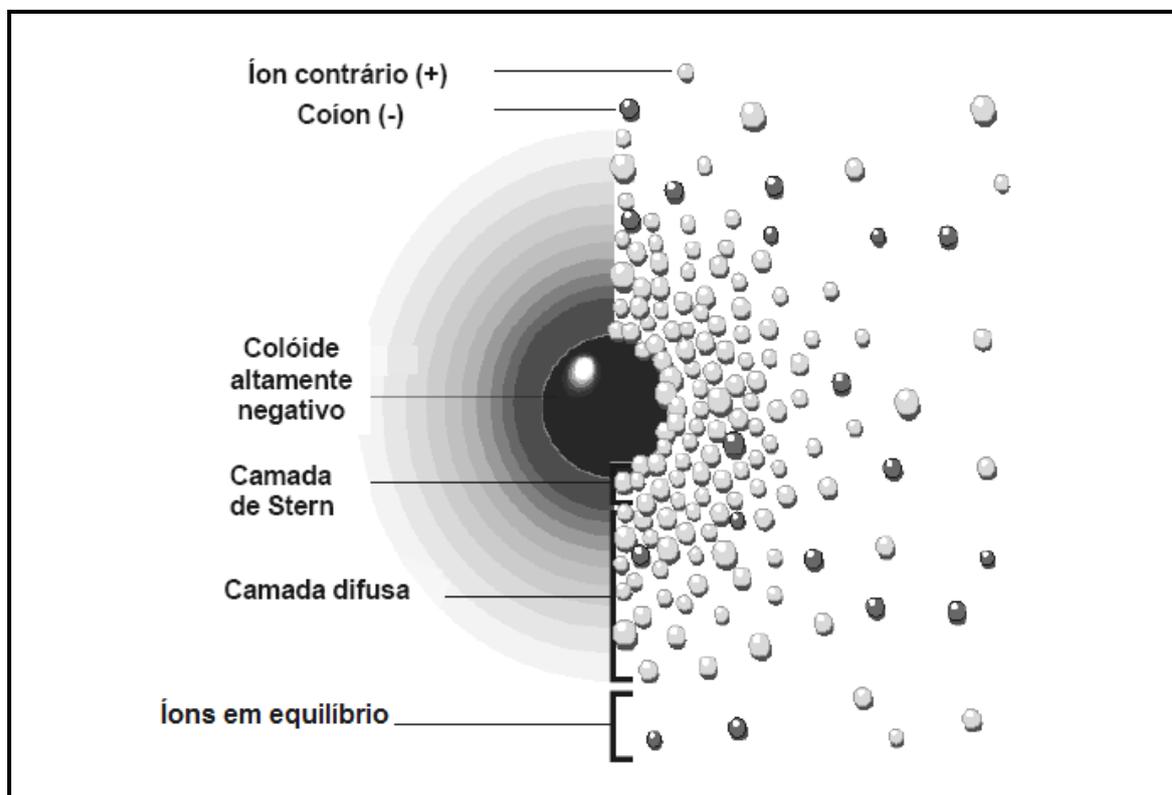


Figura 3.4 - Modelo de dupla camada elétrica (BRANDÃO, 2009).

Vários autores (KISSA, 1999; KLIMPEL e HANSEN, 1989; KLIMPEL, 1999) relataram a existência de alguns mecanismos nos quais as partículas podem ser dispersas,

incluindo repulsão eletrostática (onde as partículas têm a mesma carga, sendo repelidas), forças de solvatação (moléculas de água envolvendo uma partícula, criando uma barreira contra a aproximação de outras partículas) e estabilização estérica (provocada pela adsorção de reagentes químicos).

A tabela III.3 lista os principais tipos de reagentes químicos utilizados na dispersão e os seus respectivos mecanismos de ação.

Tabela III.3 - Principais reagentes dispersantes (RABELO, 1994; BRANDÃO, 2009)

Classes	Tipos	Mecanismos de atuação	Exemplos
Inorgânicos	Fosfatos de sódio	Aumento da carga na DCE através da ligação de hidrogênio e adsorção química	Hexametáfosfato
			Tripolifosfato
			Pirofosfato
			Ortofosfato
	Silicatos de sódio	Aumento da carga na DCE através da ligação de hidrogênio e adsorção química	Relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ varia de 1,5 a 3,5
	Sais alcalinos	Aumento da carga da DCE através da ligação de hidrogênio e adsorção química	Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)
Aluminato (NaAlO_2)			
Carbonato (Na_2CO_3)			
Fluoreto (NaF)			
Hidróxido (NaOH)			
Orgânicos monoméricos	Diaminas	Solvatação	$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_n-\text{NH}_2$ (n=3 a 6)
	Amino-álcoois	Solvatação	$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$ (n=3 a 6)
	Fenóis múltiplos	Solvatação	Catecol
			Pirogalol
	Ácidos policarboxílicos	Solvatação e aumento da carga da DCE	Ácido oxálico
			Ácido hemimelítico
			Ácido piromelítico
	Ácidos aminocarboxílicos	Solvatação e aumento da carga da DCE	EDTA (ou sal sódico)
	Ácidos hidroxicarboxílicos	Solvatação e aumento da carga da DCE	Ácido cítrico
			Ácido tartárico
Ácido gálico			
Orgânicos poliméricos	Poliacrilatos de sódio	Aumento e manutenção da carga negativa na DCE	$(\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COONa})_n$
	Lignossulfonatos e taninos	Solvatação e estabilização estérica	Estrutura complexa, com radicais aromáticos e similares
	Polissacarídeos (cadeias médias)	Solvatação e estabilização estérica	Dextrina
			Carboximetilcelulose
	Surfatantes etoxilados e propoxilados	Estabilização estérica	Nonil-fenol etoxilado
	Outros polímeros (estabilização estérica)	Estabilização estérica	Gelatinas
			Goma arábica
Caseína			
Taninos			

A estabilização estérica envolvendo polímeros com cadeia hidrofóbica e surfatantes é o mecanismo primário dos aditivos de moagem. A repulsão é causada pela criação de uma barreira estérica à agregação, prevenindo a aproximação das partículas e impedindo que as forças de atração sejam relevantes.

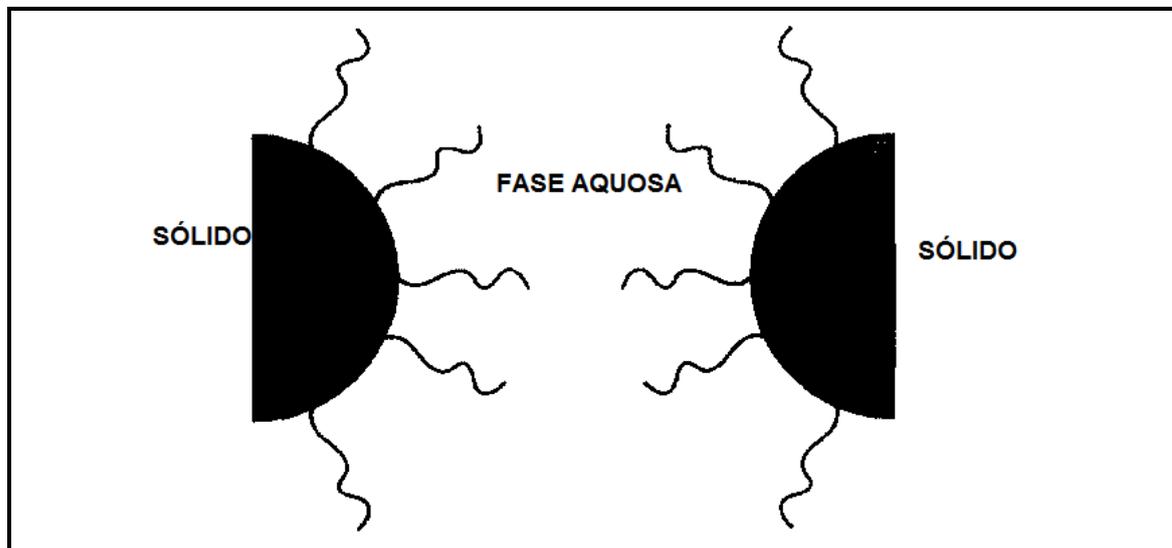


Figura 3.5 - Estabilização estérica de partículas devido à adsorção de dispersantes poliméricos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

A figura 3.6 ilustra cinco condições comuns nas quais um dispersante polimérico (incluindo monômeros orgânicos simples) pode se adsorver em uma partícula, conduzindo à estabilização estérica. São elas: (a e b) ligação eletrostática, que é a atração de materiais com carga oposta, conduzindo à neutralização de carga; (c) ligação hidrofóbica, que ocorre quando a cadeia hidrocarbônica de um dispersante se associa com a superfície de uma partícula hidrofóbica; (d) ligação de hidrogênio, que é comum para sólidos que contêm uma superfície com carga aproximadamente neutra com reagentes sem carga (não-iônicos); (e) ligação quelante de um reagente com um átomo metálico na superfície da partícula. Normalmente a ligação eletrostática é preferida e é a mais fácil de controlar industrialmente, porém reagentes baseados na ligação hidrofóbica são também muito utilizados (KLIMPEL e HANSEN, 1989; KLIMPEL, 1999).

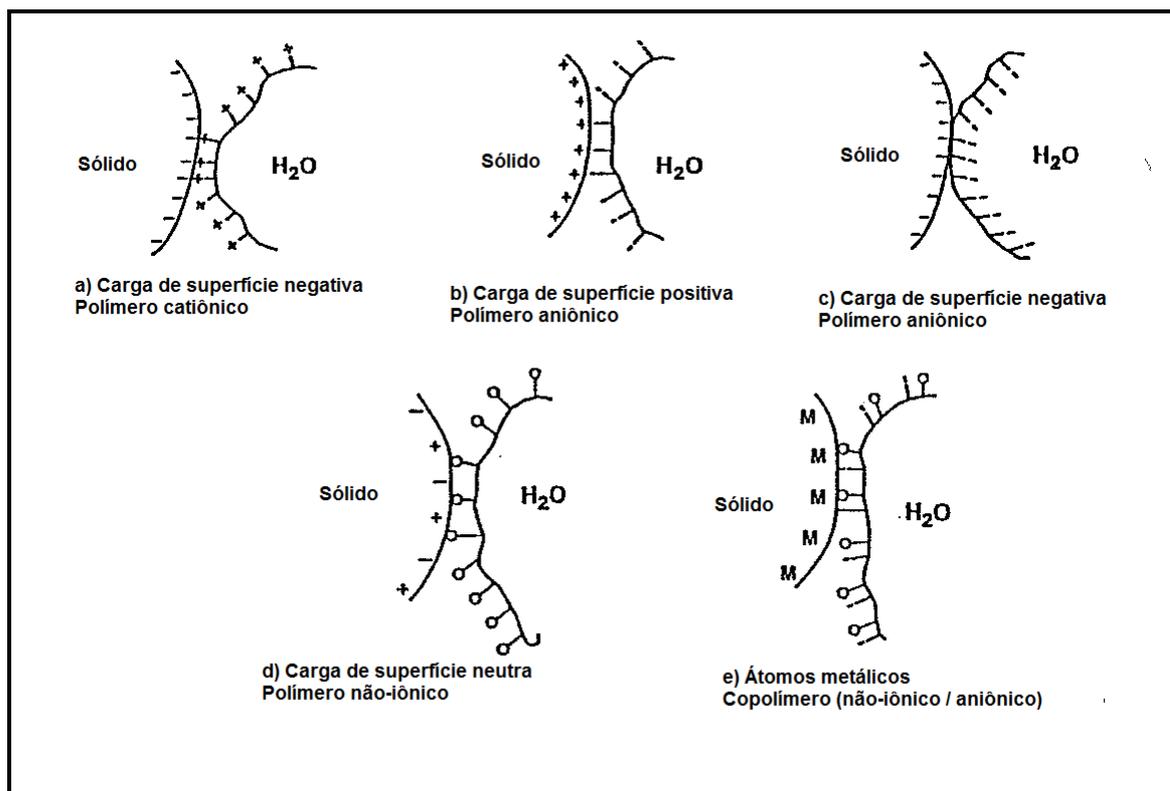
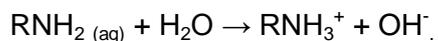


Figura 3.6 - Tipos comuns de configurações de adsorção de polímeros nas superfícies das partículas (KLIMPEL, 1999).

KLIMPEL e HANSEN (1989) e KLIMPEL (1999) afirmaram que outro importante fator a ser considerado é como reagentes aniônicos e catiônicos desenvolvem carga com a mudança do pH. Reagentes não-iônicos (usualmente contendo $-O-$ e $-OH-$) são praticamente insensíveis a mudanças no pH, mas são mais efetivos como dispersantes em superfícies de partículas aproximadamente neutras. Os dispersantes aniônicos mais comuns contêm ácidos carboxílicos (e seus sais). Tais ácidos orgânicos se dissociam em solução aquosa, em pH 5 ou 6, não sendo eficazes como dispersantes em pH menor que 5 ou 6. Com os ácidos carboxílicos, a presença de íons multivalentes (como Ca^{2+}) provenientes de água dura ou cal adicionada é bastante prejudicial, uma vez que sais carboxílicos insolúveis são formados. Portanto, a utilização de dispersantes como aditivos de moagem em tais condições não é econômica. Reagentes baseados no ácido sulfônico, $RS(=O)_2OH$, são usualmente utilizados como dispersantes para menores faixas de pH, uma vez que se dissociam em pH próximo a 2.

Os dispersantes catiônicos usados são geralmente aminas. As aminas ionizam em solução aquosa por protonação:



Podem ser utilizadas aminas primárias, secundárias, terciárias ou quaternárias. Aminas quaternárias são bases fortes, assim são ionizadas em toda faixa do pH, enquanto a ionização das outras formas é dependente do pH.

Os reagentes catiônicos são geralmente muito mais caros que os dispersantes aniônicos, razão pela qual a ligação hidrofóbica utilizando dispersantes aniônicos ou não iônicos é usada mesmo para polpas contendo partículas carregadas negativamente (KLIMPEL, 1999).

3.3.2 Dispersantes utilizados como aditivos de moagem

A tabela III.4 apresenta alguns dispersantes orgânicos e inorgânicos mais comumente utilizados como aditivos de moagem a úmido. As fórmulas químicas dos ácidos lignossulfônicos e dos polímeros solúveis em água são apresentadas nas figuras 3.7 e 3.8.

Tabela III.4 - Alguns reagentes orgânicos e inorgânicos utilizados como aditivos de moagem (KLIMPEL, 1999)

Reagente	Fórmula química	Breve descrição
Soda cáustica	NaOH	Dispersante utilizado para polpas que contêm oxi-minerais. O maior desafio é se o pH da polpa associado a dosagem necessária pode ser tolerado.
Silicato de sódio	Na _x Si _y O _z	Algumas vezes utilizado como uma combinação de dispersante e depressor em sistemas minerais complexos. É sensível ao pH e necessita de altas dosagens, o que pode trazer problemas em processos subsequentes. Geralmente não é um aditivo econômico.
Metafosfato de sódio	Na _x P _y O _z	Dispersante efetivo para algumas aplicações específicas de moagem. Principal problema em aplicações de larga escala é o aspecto ambiental associado com o uso / reutilização da água. Em algumas aplicações, causa problemas aos processos subsequentes.
Amino-álcoois	H _n N(C ₂ H ₄ OH) _{3-n} , n=0,1,2	Dispersante efetivo para polpas contendo sílica ou silicatos em pH menor que 10. As superfícies das partículas podem ser impedidas de ser adsorvidos por outros reagentes químicos em processos subsequentes. Geralmente não é econômico, com exceção em algumas aplicações.
Ácido cítrico	C ₆ H ₈ O ₇	Dispersante efetivo para uma ampla variedade de polpas minerais em processos de moagem que operam com pH maior que 6. O maior problema é a tendência desse reagente se associar a íons metálicos como Ca ²⁺ , formando sais insolúveis, exigindo assim maiores dosagens. Pode ser usado em associação com outros dispersantes, além de ser econômico. Geralmente não traz problemas a processos subsequentes.
Titanatos	Ti(OR) ₄	Utilizado na moagem de alguns materiais hidrofílicos como pigmentos. Possui aplicação restrita e o seu uso não é econômico para a maioria das aplicações.
Ácido lignossulfônico e seus sais	Vide figura 3.7	Dispersantes mais comumente utilizados como aditivos de moagem devido ao seu baixo custo. Geralmente lignossulfonatos de maior sulfonação são mais efetivos por resistirem à degradação causada pelo cisalhamento, enquanto sulfonatos de menor sulfonação tendem a ser mais efetivos na moagem de partículas que são mais hidrofóbicas, como o carvão.
Polímeros solúveis em água	Vide figura 3.8	Selecionar um dispersante ótimo significa aperfeiçoar peso molecular, tamanho da cadeia hidrocarbônica, densidade de carga, pH, íons presentes na água e dosagem. As dosagens utilizadas geralmente são em torno de 1/10 ou menos das dosagens utilizadas pelos outros reagentes contidos nessa tabela. Ainda que esses polímeros geralmente custem de 2 a 5 vezes mais que os outros reagentes, a sua utilização ainda é bem favorável. Também é comum a utilização desses polímeros em combinação com os outros aditivos de moagem. O mais utilizado é o ácido poliacrílico (e seus sais), que como outros ácidos carboxílicos, reagem com cátions como Ca ²⁺ e formam sais insolúveis, necessitando de maior dosagem. São mais efetivos em pH>6.

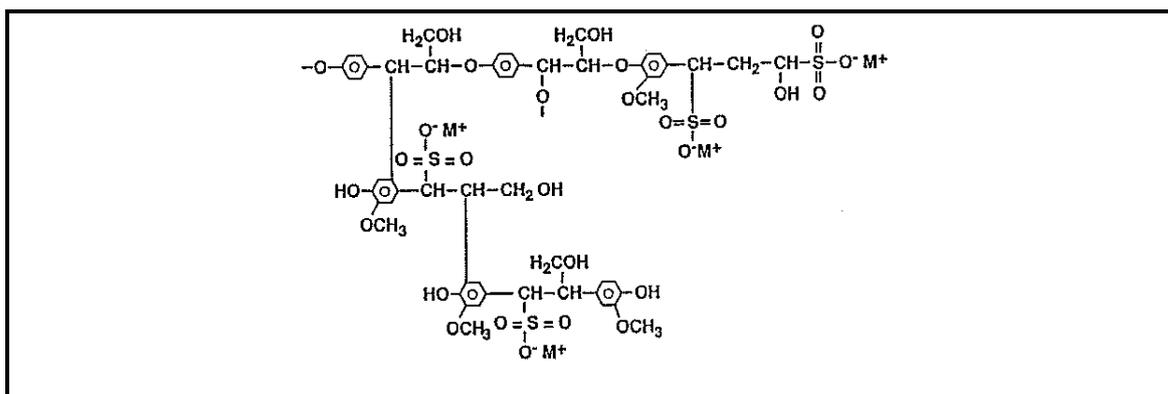


Figura 3.7 - Fórmula química do ácido lignossulfônico utilizado como aditivo de moagem (KLIMPEL, 1999).

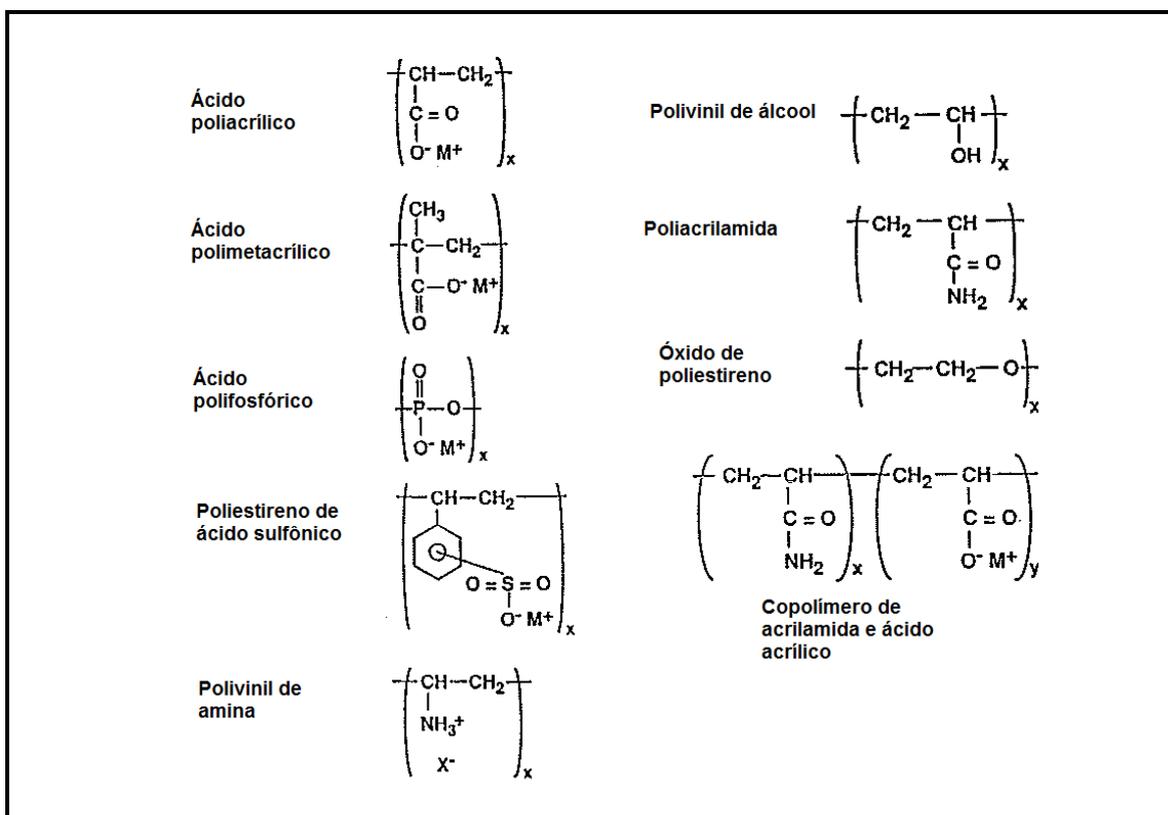


Figura 3.8 - Fórmulas químicas de polímeros solúveis em água utilizados como aditivos de moagem (KLIMPEL, 1999).

Dispersantes não-iônicos como o álcool de polivinil, poli(acrilamida), e óxido de polietileno trabalham melhor em polpas onde as partículas não estão fortemente carregadas. Ácido polifosfórico e polivinil de amina são utilizados somente em algumas

aplicações de moagem, uma vez que os seus custos são relativamente altos (KLIMPEL 1999).

Uma maneira para reduzir a magnitude da carga elétrica da superfície das partículas é adicionar cuidadosamente coagulantes catiônicos à polpa antes da adição dos polímeros. Exemplos desses coagulantes são sais inorgânicos contendo Ca^{2+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , etc. Dessa forma facilitam-se os mecanismos de ligação hidrofóbica ou ligação de hidrogênio que ocorrerão nas superfícies das partículas. O desafio é adicionar somente a quantidade suficiente de cátions para atuar como coagulantes, uma vez que o excesso pode reagir com dispersantes como o ácido carboxílico. Ca^{2+} , proveniente da cal, é basicamente um anti-aditivo de moagem devido a sua tendência de coagulação, conduzindo à formação de agregados acompanhados por um valor de tensão limite de escoamento (KLIMPEL, 1999).

A figura 3.9 mostra um resultado típico da relação entre a viscosidade de uma polpa ao se adicionar duas bases diferentes, soda cáustica (hidróxido de sódio) e cal (hidróxido de cálcio). Em circuitos de moagem otimizados para maior produtividade (polpas com comportamento pseudoplástico), a adição de cal pode ocasionar uma redução de produtividade na moagem de até 10% (KLIMPEL, 1987).

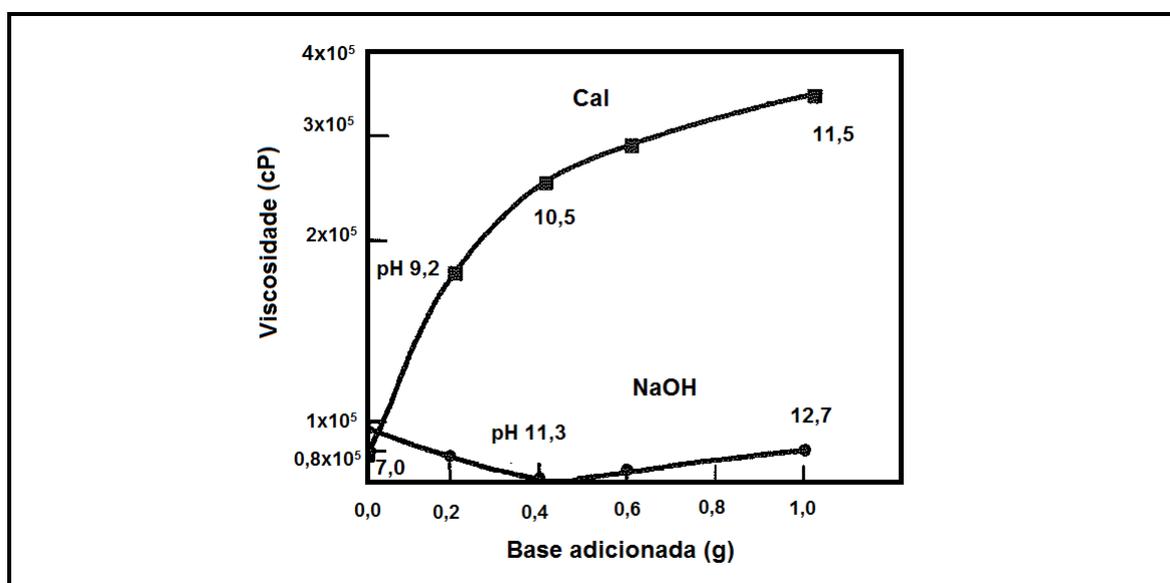


Figura 3.9 - Viscosidade de uma polpa de minério de cobre com ganga silicatada em função da adição de duas bases: soda cáustica x cal (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

KLIMPEL (1982, 1983) enfatizou que para uma determinada distribuição de tamanhos de partículas existe uma região relativamente pequena onde aumentos grandes de viscosidade resultam em pequenas mudanças de percentual de sólidos. Esta é a região crítica onde a produtividade da moagem pode ser aumentada se a viscosidade da polpa for menor, para uma determinada porcentagem de sólidos. A figura 3.10 mostra um resultado típico para um minério de cobre nesta região crítica em função da variação de dosagem de sulfoetilmetacrilato de sódio (peso molecular médio de 9.000Da).

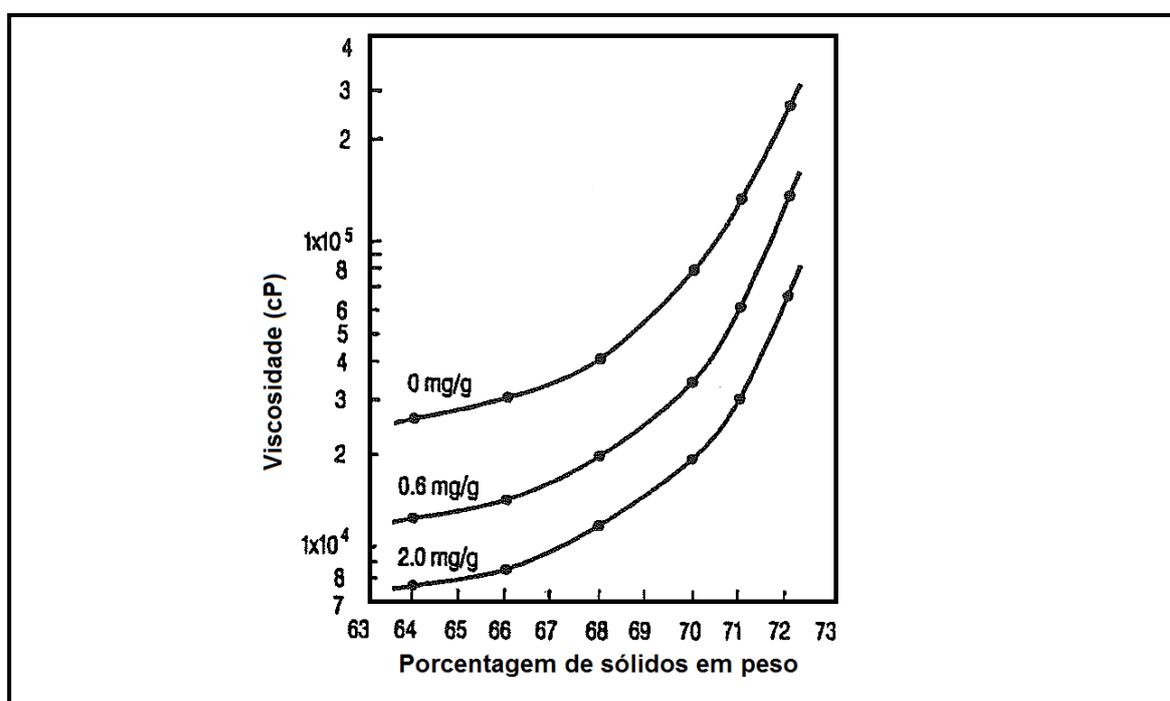


Figura 3.10 - Viscosidade de uma polpa de minério de cobre em função do percentual de sólidos e dosagem de sulfoetilmetacrilato (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

KLIMPEL e HANSEN (1989) apresentaram diversos resultados de redução de viscosidade de polpas minerais de minérios de ferro, cobre e ouro através da adição de diferentes polímeros aniônicos. São apresentados resultados dessa variação em função de dosagem, peso molecular e estrutura química desses reagentes.

A figura 3.11 mostra o comportamento da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e do peso molecular. Nesta figura, a única diferença

entre o reagente da curva (1) e o reagente da curva (2) é o peso molecular, sendo que o reagente de menor peso molecular promoveu maior redução de viscosidade. Esta tendência foi mantida em vários estudos, sendo a faixa ótima de peso molecular variável de 4.000 a 12.000Da.

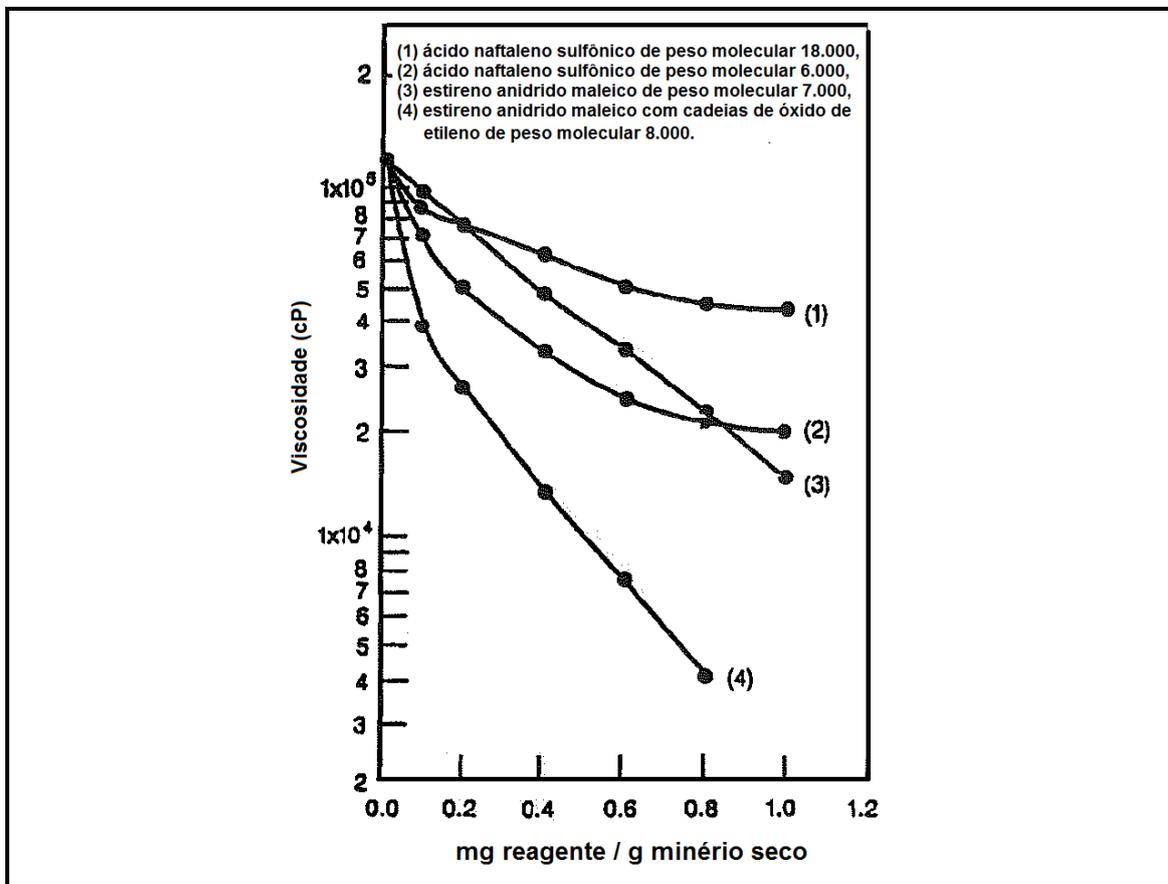


Figura 3.11 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e peso molecular de polímeros aniônicos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

A figura 3.11 também mostra o efeito da adição de um grupo na cadeia química do reagente mantendo-se o peso molecular aproximadamente constante – curvas (3) e (4). Neste caso, a adição de óxido de etileno (grupo hidrofílico) aumentou significativamente o desempenho do estireno anidrido maleico como redutor de viscosidade da polpa.

A figura 3.12 mostra a influência da adição de uma estrutura de copolímero (acrilamida) a partir de uma cadeia simples de polímero (sulfoetilmetacrilato). A curva (3), com melhor desempenho que a curva (2), reforça o efeito do peso molecular. Outra tendência observada é que o reagente com cadeia simples, curva (1), apresentou uma redução progressiva de viscosidade com o aumento da dosagem. Isto não é observado para as outras curvas para dosagens pequenas, uma vez que o copolímero demonstrou uma tendência à floculação em baixas dosagens, explicado pela mudança na densidade aniônica e pela densidade do agente. Menores participações de acrilamida reduziram esse efeito, curva (4) x curvas (2) e (3), mas não o eliminaram (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

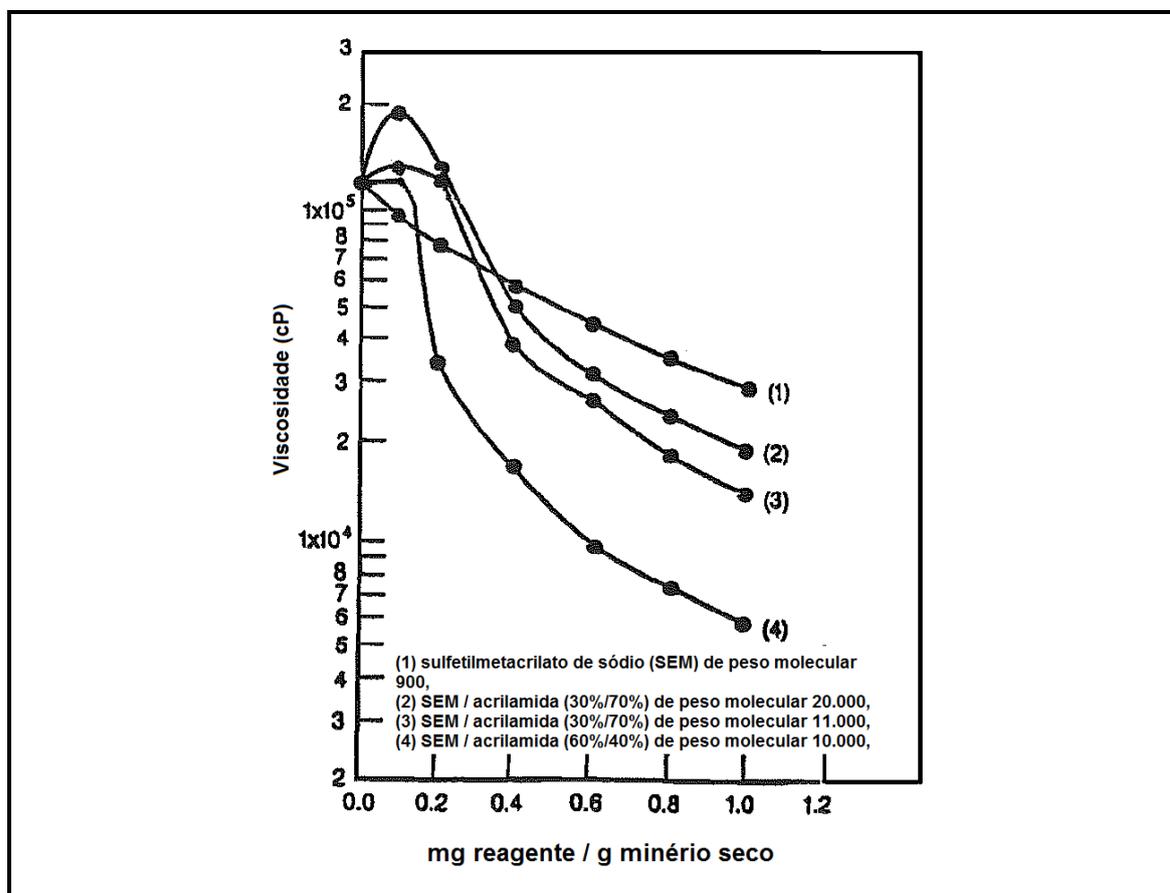


Figura 3.12 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e da proporção de polímeros aniônicos (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

A figura 3.13 apresenta a influência do grau de hidrólise (formação de grupos carboxílicos) na cadeia de uma acrilamida. Cem por cento de hidrólise significa a formação de ácido poliacrílico. Para minérios mais puros, como para um minério de ouro contendo 98% de quartzo, o aumento do grau de hidrólise promoveu reduções significativas na viscosidade da polpa (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

A curva (4) proveniente da figura 3.13 foi obtida utilizando o reagente GA-4272, citado anteriormente (KLIMPEL, 1982,1983).

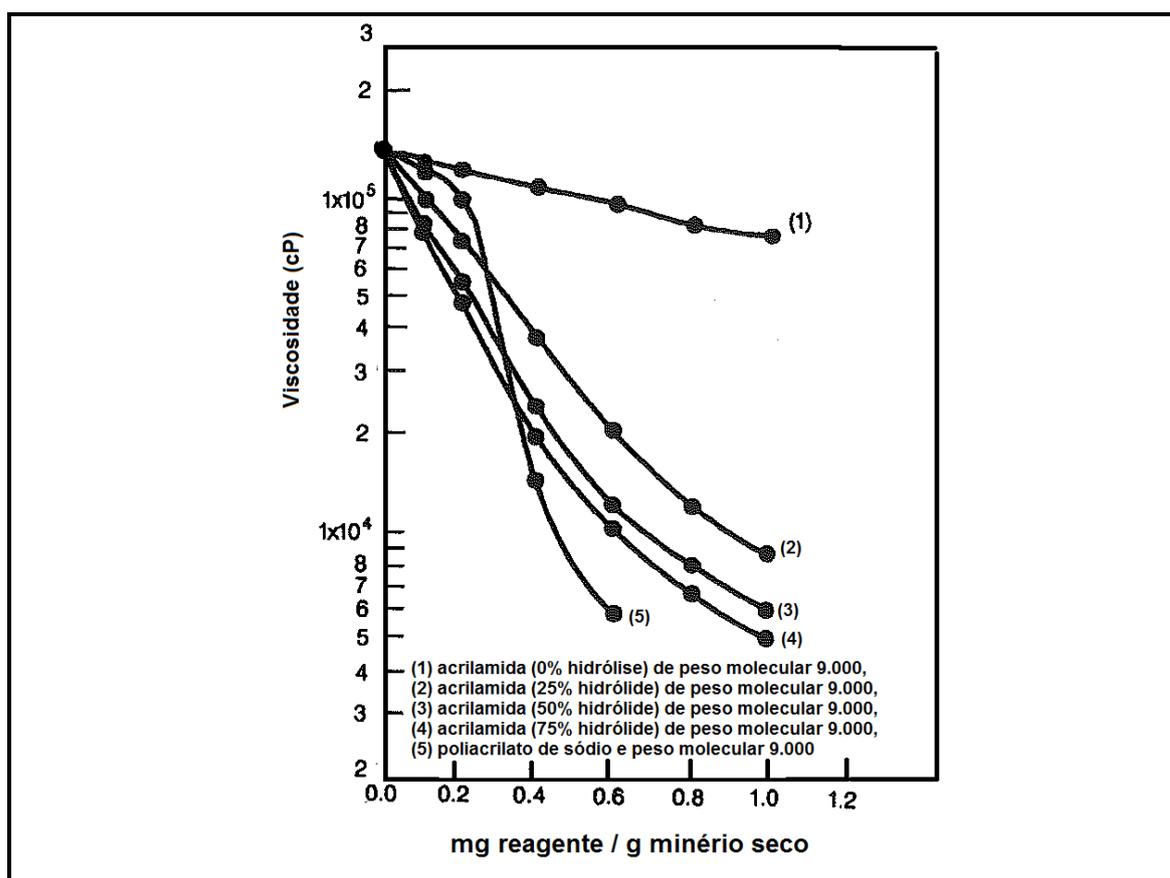


Figura 3.13 - Variação da viscosidade de uma polpa de minério de ferro em função da dosagem e do grau de hidrólise de uma poliácridamida (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

KLIMPEL e HANSEN (1989) relataram a utilização de dispersantes inorgânicos bastante utilizados (silicato de sódio, silicato de alumínio, tripolifosfato de sódio, etc), e de polímeros naturais sulfonados (lignossulfonatos) como aditivos de moagem.

Entretanto, a utilização de tais reagentes como aditivos de moagem levou a vários problemas, como:

- necessidade de altas dosagens para o reagente ser efetivo (mais do que 10 vezes a dosagem utilizada com certos polímeros solúveis);
- geralmente apresentam uma interação negativa muito forte com certos íons, especialmente o Ca^{2+} ;
- forte degradação na sua habilidade de controlar a viscosidade da polpa com o aumento dos níveis de cisalhamento.

A figura 3.14 mostra o efeito do íon Ca^{2+} utilizando o silicato de sódio e o GA-4272. Conforme visualizado, o silicato não consegue controlar a viscosidade da polpa na presença desse íon. KLIMPEL e HANSEN (1989) ainda afirmaram que esses reagentes podem perder sua eficiência em taxas de cisalhamento de 60 a 80s⁻¹.

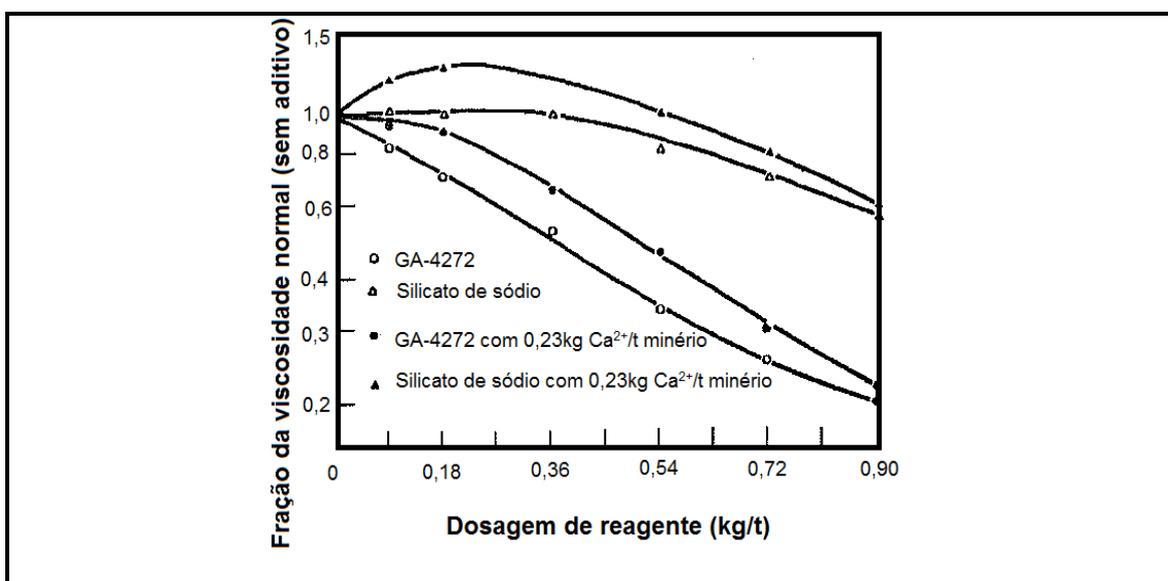


Figura 3.14 - Redução da viscosidade de uma polpa de minério de cobre em função do tipo de dispersante, dosagem e concentração de íon cálcio (KLIMPEL e HANSEN, 1989).

3.4 Descrição das etapas de moagem da SAMARCO

Neste tópico serão descritas algumas características das etapas de moagem dos dois concentradores da SAMARCO, localizados na unidade industrial de Germano, município de Mariana, Minas Gerais.

3.4.1 Concentrador I

A figura 3.15 apresenta um fluxograma simplificado do concentrador I. A capacidade anual é de 16,5 milhões de toneladas de concentrado (para um teor de ferro na alimentação de 47%), sendo 2,0 milhões de toneladas de concentrado adquirido da VALE. O concentrado adquirido é remoído juntamente com o concentrado final (concentrado proveniente do circuito de colunas de flotação).

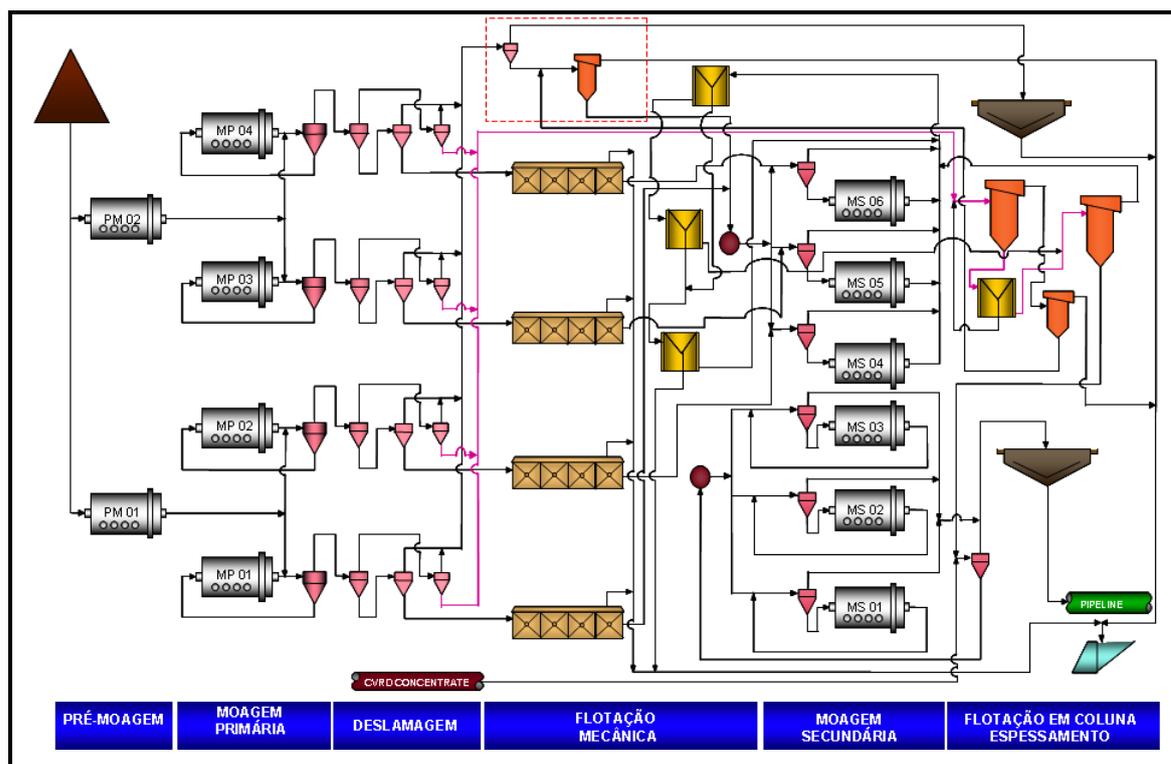


Figura 3.15 - Fluxograma simplificado do concentrador I.

O concentrador I apresenta doze moinhos, divididos em três etapas: pré-moagem, moagem primária e moagem secundária. Algumas características desses moinhos estão apresentadas na tabela III.5.

Tabela III.5 - Características dos moinhos do concentrador I

Características	Pré-moagem	Moagem primária	Moagem secundária
Fabricante	Fuller	Koppers	Fuller
Dimensões (m)	5,18 x 8,53 (17' x 28')	4,27 x 5,18 (14' x 17')	5,18 x 11,28 (17' x 34')
Potência nominal (kW)	3800	1430	4430
Número de motores	2	Acionamento único (motor síncrono e embreagem)	2
Rotação (rpm)	13,9	14,9	13,4 (4 moinhos) 13,9 (2 moinhos)
Porcentagem da velocidade crítica	73,7	71,5	71,0 (4 moinhos) 73,7 (2 moinhos)
Corpos moedores	70% bolas 63,5mm 30% bolas 76,2mm	Bolas 63,5mm	Bolas 20mm (3 moinhos) Bullets 22 mm (1 moinho) Bolas 25mm (2 moinhos)
Grau de enchimento (%)	30 - 34	36 - 40	40 - 42
Revestimento	Misto / dupla onda	Borracha / placa e barra	Borracha / tripla onda
F ₈₀ (µm)	3360	210	149
P ₈₀ (µm)	210	105	37
Taxa de alimentação média por moinho (t/h)	1456	767	343
Porcentagem de sólidos (%)	76 - 78	76 - 78	78 - 80

A pré-moagem é alimentada com material abaixo de 12,5mm, proveniente das etapas de peneiramento primário e britagem primária e secundária. Nessa etapa ocorre a primeira adição de água no processo, de forma que esses moinhos trabalhem com uma polpa de 78% de sólidos em peso. O produto da pré-moagem alimenta a moagem primária, que opera em circuito fechado reverso com baterias de ciclones de 0,66m (26") de diâmetro. O *overflow* desses ciclones constitui a alimentação do circuito de

deslamagem, possuindo aproximadamente de 8 a 12% de material com granulometria superior a 149 μ m.

Após as etapas de deslamagem e flotação mecânica, o concentrado do circuito de células mecânicas alimenta três baterias de ciclones de 0,25m (10") de diâmetro. O *underflow* desses ciclones alimenta 3 moinhos secundários que operam em circuito aberto. A descarga desses moinhos, juntamente com o *overflow* dos ciclones, alimenta um circuito de células mecânicas de 160m³, cujo concentrado alimenta o circuito de colunas de flotação.

O concentrado do circuito de colunas de flotação, juntamente com o concentrado adquirido da VALE, alimenta três baterias de ciclones de 0,25m (10") de diâmetro. O *overflow* desses ciclones é concentrado final, sendo destinado aos espessadores de concentrado. O *underflow* é dividido para três caixas que alimentam outras três baterias de ciclones de 0,25m de diâmetro. Essas baterias fecham o circuito com os outros três moinhos secundários, sendo o *overflow* também destinado para os espessadores de concentrado.

A especificação física do concentrado final apresenta uma porcentagem passante em 44 μ m de 88,2 \pm 1,0 e uma superfície específica (Blaine) de 1800cm²/g \pm 75cm²/g. Descrições mais detalhadas de cada etapa do concentrador I podem ser encontradas nos trabalhos de MAPA (2006), BATISTELI (2007), TURRER (2007) e VIEIRA (2008).

As etapas de moagem representam cerca de 80% do consumo de energia do concentrador I. Do total de energia das etapas de moagem, a moagem secundária representa 60%.

3.4.2 Concentrador II

A figura 3.10 apresenta o fluxograma do concentrador II, dimensionado para operar com minério de teor de ferro na alimentação de 45 \pm 2%. A capacidade é de 7,5 milhões de toneladas de concentrado por ano. Os equipamentos de grande porte e a sua correta disposição tornam o concentrador II mais simples e compacto, com uma única linha de deslamagem e flotação mecânica.

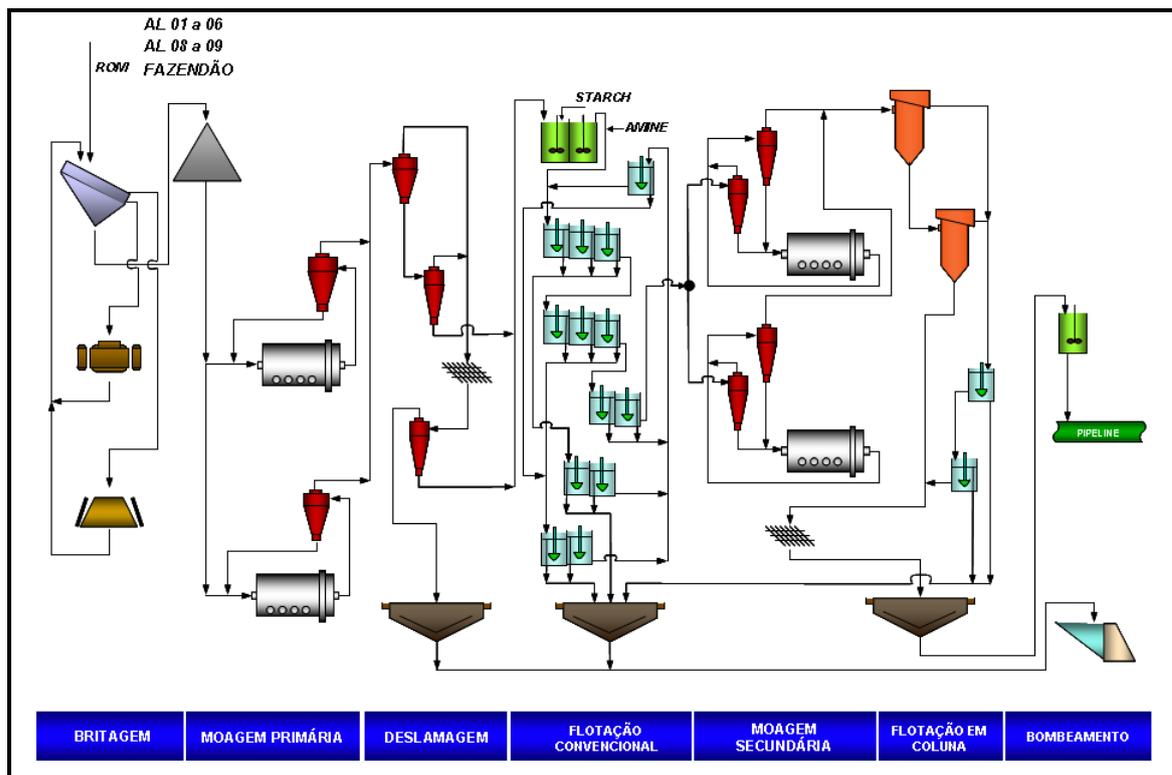


Figura 3.16 - Fluxograma do concentrador II.

A moagem primária consiste de dois moinhos de bolas, operando em paralelo, em circuito fechado direto com ciclones de 0,66m (26") de diâmetro. O *overflow* dos ciclones alimenta uma única linha de processamento para as etapas de deslamagem e flotação mecânica.

A moagem secundária é alimentada pelo concentrado do circuito de células mecânicas. Os dois moinhos trabalham em paralelo, em circuito inverso. É feita uma primeira classificação em circuito aberto e uma segunda classificação em circuito fechado no mesmo moinho, sendo o material remoído antes da alimentação das colunas. Os ciclones utilizados apresentam 0,25m (10") de diâmetro. Esse circuito garante a passagem do quartzo pelo interior dos moinhos, além de uma granulometria na alimentação das colunas mais fina, gerando uma maior redução de sílica no circuito de colunas. Outro fator observado nessa configuração de circuito é a menor superfície gerada quando se alimentam minérios contendo maiores teores de PPC se comparada com a moagem secundária do concentrador I. Tal fator permite alimentar o concentrador II com minérios de maior teor de PPC, não gerando um excesso de

superfície (Blaine), que impacta diretamente a operação de filtração nas usinas de pelotização, localizadas na unidade de Ponta Ubu, no município de Anchieta, ES.

A especificação física do concentrado final apresenta uma porcentagem passante em 44 μ m de 87,8 \pm 1,8 e uma superfície específica (Blaine) de 1600cm²/g \pm 100cm²/g. A tabela III.6 apresenta algumas características dos moinhos do concentrador II.

Tabela III.6 - Características dos moinhos do concentrador II

Características	Moagem primária	Moagem secundária
Número de moinhos	2	2
Fabricante	Polysius	Polysius
Dimensões (m)	5,49 x 10,06 (18' x 33')	5,49 x 12,19 (18' x 40')
Potência nominal (kW)	5500	6400
Número de motores	1	1
Rotação (rpm)	13,9	13,9
Porcentagem da velocidade crítica	74	74
Corpos moedores	Bolas 63,5mm	Bolas 25mm
Grau de enchimento (%)	25 - 30	37 - 40
Revestimento	Misto / placa e barra	Borracha / tripla onda
F ₈₀ (μ m)	3360	105
P ₈₀ (μ m)	105	37
Taxa de alimentação média (t/h)	808	435
Porcentagem de sólidos (%)	76 - 78	78 - 80

3.5 Método para previsão do consumo específico de energia na remoagem

DONDA (2003) desenvolveu um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas. Esse método é utilizado mensalmente desde janeiro de 1998 no concentrador I e desde junho de 2009 no concentrador II para controle de eficiência energética da moagem secundária. O método foi também utilizado para dimensionamento dos moinhos secundários do concentrador II (DONDA, 2005).

O método desenvolvido consiste na realização de moagens em três diferentes tempos (22 minutos, 44 minutos, 66 minutos) em um moinho de laboratório de 0,2540m x 0,2540m, nas condições listadas na tabela III.7. São efetuadas análises granulométricas e análises de Blaine do produto de cada moagem e do minério de alimentação do ensaio. O consumo específico de energia é obtido através da multiplicação do tempo de moagem, em minutos, pelo fator de conversão, cujo valor é 0,2727. Esse fator de conversão é calculado através da fórmula de ROWLAND JR (1986).

Tabela III.7 - Estabelecimento das condições para realização dos ensaios de previsão de consumo específico de energia (DONDA, 2003)

Parâmetro	Condição estabelecida		
Diâmetro x comprimento interno do moinho (m)	0,2540 x 0,2540		
Porcentagem de enchimento	30,08		
Relação V_{polpa} / V_{vazios}	1,21		
Porcentagem de sólidos em volume	37,73		
Porcentagem de sólidos em peso *	75		
Porcentagem da velocidade crítica	65		
Peso do minério (kg) (* peso específico de 4,95t/m ³)	3,500		
Peso da carga de bolas (kg)	18,000		
Distribuição da carga de bolas	Diâmetro	Porcentagem	Peso (kg)
	30	29	5,220
	25	38	6,840
	20	21	3,780
	15	12	2,160
Área específica da carga (m ² /t)	34		
Volume interno do moinho e aparente da carga (L)	12,870 e 3,871		
Volume de vazios da carga e volume de polpa (L)	1,549 e 1,874		
Potência (kW) no eixo pinhão	0,0573		
Energia no eixo pinhão (kWh/t) e tempos de moagem	6kW/t (22min); 12kWh/t (44min); 18kWh/t (66min)		
Revestimento / <i>lifters</i>	Sem revestimento e sem <i>lifters</i>		
Ponto de tomada da amostra para realização dos ensaios	Alimentação do circuito		

A fórmula de ROWLAND JR (1986) calcula a potência absorvida por tonelada de corpos moedores. Multiplicando-se esse valor pelo peso da carga, determina-se a potência absorvida no eixo pinhão do moinho. Para moinhos com diâmetro menor que 2,44m, a equação é:

$$kWb = 6,3 \times D^{0,3} \times sen \left[51 - 22 \times \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right] \times (3,2 - 3V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right) \quad (2)$$

Onde:

kWb = kilowatts por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D = diâmetro do moinho, em metros, interno ao revestimento;

V_p = fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

C_s = fração da velocidade crítica.

A aplicação da equação (2) é o que permite a simplificação dos procedimentos, fator diferenciador de outros métodos existentes, pois não são efetuadas medidas de consumo de energia.

Após a realização das moagens nos tempos pré-estabelecidos e das análises granulométricas e de Blaine, elabora-se o gráfico porcentagem retida em 44 μ m e Blaine na ordenada e o consumo específico de energia na abscissa, conforme apresentado na figura 3.9. O consumo específico de energia é determinado para ambas às curvas, sendo adotado o maior valor.

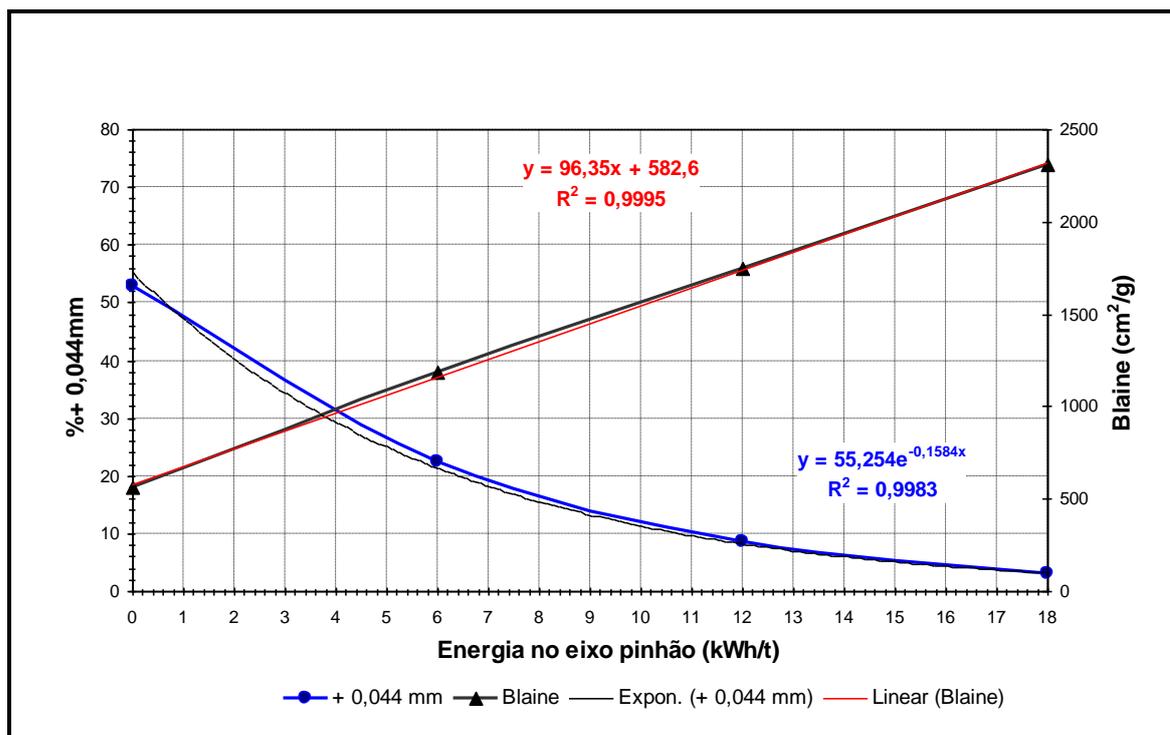


Figura 3.17 - Exemplo de curvas para determinação do consumo específico de energia.

Rittinger, em 1867, considerou que a energia específica necessária para a quebra é diretamente proporcional à nova superfície produzida. A reta obtida pela relação Blaine versus energia indica que a lei de Rittinger é aplicável, e sua inclinação é denominada BSA/kWh/t. O índice BSA/kWh/t é uma medida da geração de superfície por energia (DONDA *et al.* 2007).

3.6 Técnicas para análise de dispersão / agregação de uma polpa

GALÉRY e de ARAUJO (1987) apresentaram uma revisão das principais técnicas utilizadas para análise do estado de dispersão / agregação de uma polpa: técnicas de sedimentação, técnicas eletrocinéticas de medidas de potencial e técnicas óticas.

As técnicas de sedimentação são baseadas na medida direta da faixa de sedimentação gravítica das partículas uniformemente dispersas num fluido, em função do tempo. Essas medidas podem ser realizadas numa pipeta de Andreasen ou num simples tubo de sedimentação. O material é uniformemente disperso em água, na

presença ou não de agentes dispersantes. Um tubo sifão (pipeta de Andreasen) ou um orifício (tubo de sedimentação) é imerso ou localizado a uma altura h , pré-estabelecida, através do qual é feita a retirada do material. O grau de dispersão é calculado pela equação (5).

$$GD(\%) = \frac{M_t}{M_o} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$GD(\%)$ = porcentagem do material em dispersão;

M_o = material em dispersão no tempo $t = 0$;

M_t = material em dispersão após t minutos de sedimentação.

As técnicas eletrocinéticas de potencial levam em conta a medição do potencial zeta das partículas minerais em solução aquosa. Uma dispersão coloidal estável geralmente requer elevados valores de potencial zeta (GALÉRY e de ARAUJO, 1987).

Quando um feixe de luz é direcionado através de uma célula contendo sólidos em suspensão, há uma perda de energia devida primeiramente à adsorção da energia pela suspensão. A análise quantitativa da adsorção (absorbância) pode ser traduzida em termos de grau de dispersão. Esse é o princípio básico das técnicas óticas (GALÉRY e de ARAUJO, 1987).

Em função da rapidez, facilidade, simplicidade de manuseio e boa repetibilidade, o tubo de sedimentação foi utilizado nos trabalhos de GALÉRY (1985), RABELO (1994), SILVA (1994), MARTINS *et al.* (2004), PEREIRA (2004) e SILVESTRE (2007).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados durante a realização da parte experimental deste trabalho.

4.1 Materiais

4.1.1 Amostras minerais

Duas amostras de concentrado de minério de ferro foram coletadas para a realização deste estudo:

- amostra 1, coletada na alimentação dos espessadores de concentrado do concentrador I da SAMARCO, e denominada “produto da remoagem”;
- amostra 2, coletada nas quatro linhas de flotação mecânica do concentrador I da SAMARCO, e denominada “alimentação da remoagem”.

As duas amostras foram compostas por incrementos coletados ao longo de 10 dias, durante campanha para produção de pelotas de alto-forno. Os incrementos foram coletados somente em condições usuais de operação do concentrador I:

- operação das 3 minas (Alegria 1/2/6, Alegria 3/4/5 e Alegria 9) e alimentação do minério de Fazendão, proveniente da VALE;
- taxa de alimentação por moinho pré-primário de 1600 a 1750t/h e 4 moinhos primários em operação.

No final dos 10 dias de coleta dos incrementos foram geradas amostras com cerca de 1.000kg, que foram desaguadas, homogeneizadas e estocadas em tambores de 200 litros. A homogeneização das duas amostras foi feita em pilhas cônicas. Para o quarteamento dos testes tecnológicos foi utilizado um divisor de rifles.

A amostra “produto da remoagem” foi coletada para a realização dos testes de reologia e grau de dispersão com os diversos reagentes que foram testados, e assim,

escolher os potenciais aditivos de moagem, que foram utilizados nos testes de remoagem com a amostra “alimentação da remoagem”.

A escolha da amostra “produto da remoagem” foi fundamental para a realização dos testes reológicos, uma vez que não foi possível realizar esses testes utilizando o reômetro de cilindro coaxial da marca BROOKFIELD, modelo R/S⁺ e sensor CC3-45 com a amostra “alimentação da remoagem” tal qual (sem remoer), em função da alta taxa de sedimentação, e conseqüente travamento do *spindle*.

4.1.2 Reagentes

Os reagentes testados como potenciais aditivos de moagem nos testes com a amostra “produto da remoagem” podem ser visualizados na tabela IV.1.

Tabela IV.1 - Reagentes testados como aditivos de moagem

Reagente	Nome comercial / Fabricante	Breve descrição, segundo fabricante
Ácido poliacrílico	Lupromin DPW 410 / BASF	Quanto maior a numeração contida no nome comercial, maior é o peso molecular.
	Lupromin DPW 510 / BASF	
	Lupromin DPW 610 / BASF	
Poliacrilato de sódio e fosfato	AG Disper 503 / AG ADITIVOS	Apresenta peso molecular inferior a 10.000Da.
Polielenimina	Lupromin DPW 1210 / BASF	Quanto maior a numeração contida no nome comercial, maior é o peso molecular.
	Lupromin DPW 1310 / BASF	
	Lupromin DPW 1410 / BASF	
Polivinil de amina	Lupromin DPW 710 / BASF	Quanto maior a numeração contida no nome comercial, maior é o peso molecular.
	Lupromin DPW 810 / BASF	
Óxido de polietileno	Lupromin DPW 910 / BASF	Quanto maior a numeração contida no nome comercial, maior é o peso molecular.
	Lupromin DPW 1010 / BASF	
	Lupromin DPW 1110 / BASF	
Copolímero sílico acrilato	Bulab 49CT / BUCKMAN	-
Copolímero de acrilamida e acrilato de sódio	Magnafloc 1011 / BASF	Polímero aniônico de alto peso molecular. O Magnafloc 919 possui maior carga iônica.
	Magnafloc 919 / BASF	
Poliacrilamida	Magnafloc 351 / BASF	Polímero não iônico de alto peso molecular. O peso molecular do Magnafloc 333 é superior ao peso molecular do Magnafloc 351.
	Magnafloc 333 / BASF	
Ácido cítrico	SULFAL QUÍMICA LIMITADA	-
Hexametáfosfato de sódio	SULFAL QUÍMICA LIMITADA	-
Hidróxido de sódio	BRASKEM	-

Além desses reagentes foi utilizado o coagulante hidróxido de cálcio (cal), da ITAÚ, para verificação dos efeitos negativos da cal relatados por KLIMPEL (1987, 1999).

4.2 Métodos

O fluxograma macro para este estudo é apresentado na figura 4.1. O estudo pode ser dividido em duas etapas:

- etapa I, realizada com a amostra “produto da remoagem”, tem como objetivo escolher, dentre todos os reagentes apresentados na tabela IV.1, aqueles que são potenciais aditivos de moagem;
- etapa II, realizada com a amostra “alimentação da remoagem”, tem como objetivo verificar os efeitos do percentual de sólidos, da adição de reagente (escolhido na parte I) e do pH na etapa de remoagem da SAMARCO, utilizando o método de previsão do consumo de energia na remoagem desenvolvido por DONDA (2003).

4.2.1 Análise química quantitativa (AQQT)

As análises químicas quantitativas foram realizadas no Laboratório Químico da SAMARCO, conforme procedimentos internos. Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , P e MnO foram determinados por um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), da marca VARIAN, modelo 725-ES.

O teor de ferro foi determinado por dicromatometria (método TiCl_3).

A perda por calcinação foi determinada por gravimetria (calcinação em forno mufla a 1000°C).

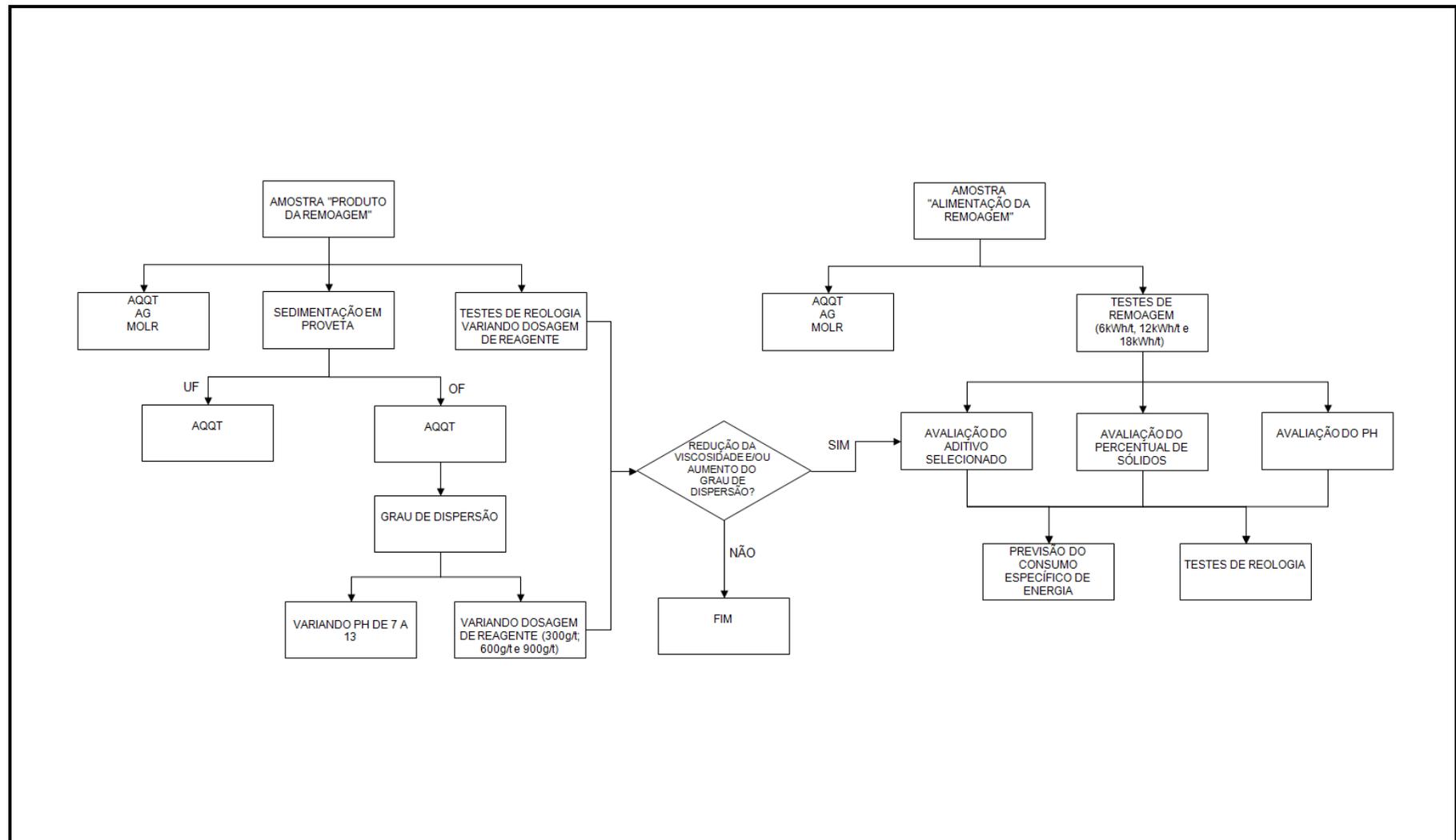


Figura 4.1 - Fluxograma macro para o estudo.

4.2.2 Análise granulométrica (AG)

As análises granulométricas das amostras foram realizadas no Laboratório de Controle de Processo da SAMARCO, conforme procedimento interno. Foram utilizadas peneiras da série Tyler, com as seguintes aberturas: 1.000 μ m, 840 μ m, 595 μ m, 420 μ m, 297 μ m, 210 μ m, 149 μ m, 105 μ m, 74 μ m, 53 μ m, 44 μ m e 37 μ m. As peneiras usadas foram da marca Bronzinox, com 20cm de diâmetro e 7cm de altura.

As amostras foram classificadas a úmido em peneira de 37 μ m. Os *oversizes* foram secados em estufa e submetidos a um peneiramento a seco utilizando um agitador eletro-magnético da marca BERTEL, durante 20 minutos.

As distribuições granulométricas das frações das amostras passantes em 37 μ m foram determinadas em um granulômetro a laser Mastersizer Micro, da Malvern Instruments. As frações passantes em 37 μ m foram filtradas, secadas e analisadas no equipamento. Foi utilizada como dispersante uma solução de hexametáfosfato de sódio (0,05%p/v). Os diâmetros reportados foram: 35 μ m, 30 μ m, 25 μ m, 15 μ m, 10 μ m, 5 μ m e 1 μ m.

4.2.3 Microscopia ótica de luz refletida (MOLR)

As análises foram realizadas no Laboratório de Mineralogia da SAMARCO, conforme procedimentos internos. Foi utilizado um microscópio óptico marca Leica, modelo DMLP, com dispositivo de fotomicrografia acoplado e aumento de até 500 vezes. As seções polidas foram confeccionadas com embutimento dos minerais em resina de cura rápida, a frio. Após a cura as seções foram lixadas e polidas com pasta de alumina. Foi utilizado o método de contagem de grãos (mínimo de 500 partículas) para determinação da porcentagem em peso das fases mineralógicas presentes.

4.2.4 Área específica (Blaine)

As análises de área específica (Blaine) foram realizadas no Laboratório Químico da SAMARCO, conforme procedimento interno.

O procedimento de calibração e execução de análises no permeâmetro de Blaine foi descrito por DONDA (2003). No procedimento de execução das análises, as massas das amostras foram calculadas através da equação (3), sendo cada amostra pesada em duplicata.

$$P_{amostra} = \rho \times V \times 0,5 \quad (3)$$

Onde:

ρ = peso específico do minério, determinado via picnômetro;

V = volume da célula do permeâmetro, determinado através de calibração com padrão de cimento.

As amostras foram transferidas para a célula já preparada com papel de filtro, sendo colocado outro papel de filtro sobre ela. Em seguida, as amostras foram compactadas com o êmbolo até este apoiar-se na borda da célula (volume padrão).

Finalmente foi feita a leitura do tempo de escoamento do ar da seguinte forma:

- a célula foi acoplada hermeticamente ao tubo manométrico e a pera de borracha foi acionada;
- a abertura da válvula foi controlada para eliminar lentamente o ar contido no ramo do tubo manométrico;
- a válvula foi fechada quando o líquido alcança a primeira marca do tubo;
- o cronômetro foi acionado no momento em que o menisco do líquido passa pela segunda marca e é parado no momento em que o menisco passa pela terceira marca;
- o tempo gasto foi anotado.

A área específica foi calculada através da fórmula (5).

$$Blaine = \frac{k_2 \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (5)$$

Onde:

k_2 = constante de calibração do permeâmetro;

t = média dos tempos encontrados (s).

ρ = peso específico da amostra (determinado em um picnômetro a hélio da marca Quantachrome Instruments, modelo PENTAPYC 5200E).

4.2.5 Determinação do grau de dispersão

4.2.5.1 Determinação do grau de dispersão em função do pH

A amostra denominada “produto da remoagem” foi homogeneizada, quarteada para 1700 gramas e transferida para uma proveta de 2000mL, sendo adicionada, em seguida, água destilada, até completar o volume. A polpa foi transferida para uma proveta de 2000mL, homogeneizada manualmente com um *plunger*, e deixada em repouso por 5 minutos. O sobrenadante foi sifonado até a marca de 1200mL.

O volume da proveta foi completado novamente para 2000mL mais duas vezes, repetindo-se a sequência descrita no parágrafo anterior, sendo o sobrenadante sifonado até a marca de 1100mL na segunda vez e 1000mL na terceira vez.

O *underflow* da proveta foi filtrado, secado e pesado. O sobrenadante das três etapas foi transferido para uma cuba de PVC de 4000mL. O volume da cuba foi completado com água destilada. Com um agitador mecânico, a polpa foi homogeneizada, sendo o pH ajustado para 7 com solução de NaOH a 3% p/V. Uma alíquota de 500mL foi transferida para uma proveta de 500mL. Esta alíquota foi homogeneizada durante 3 minutos utilizando-se um agitador magnético e foi deixada em repouso durante 5 minutos, sendo o *overflow* sifonado. O *underflow* e o *overflow* dessa proveta foram filtrados, secados e pesados. O grau de dispersão foi calculado dividindo-se a massa do *overflow* pela massa total (massa do *overflow* mais massa do *underflow*).

O procedimento descrito no parágrafo anterior foi repetido ajustando-se o pH da polpa contida na cuba para 8, 9, 10, 11, 12 e 13, sendo assim calculado o grau de dispersão para cada condição de pH.

4.2.5.2 Determinação do grau de dispersão em função da dosagem de reagente

O procedimento adotado nesta seção é idêntico ao adotado na seção anterior, com exceção dos seguintes passos:

- o pH da cuba de PVC foi ajustado para 10 (pH da moagem secundária);
- o reagente foi dosado na proveta de 500mL, nas seguintes dosagens: 300g/t, 600g/t e 900g/t (o volume de reagente foi calculado em função do percentual de sólidos da polpa contida na cuba de PVC);
- o grau de dispersão foi determinado para cada uma das três dosagens de reagente.

4.2.6 Testes de remoagem e determinação do consumo específico de energia

Os testes de remoagem foram executados conforme procedimento descrito por DONDA (2003), porém com pequenas modificações:

- foi utilizada água destilada e o pH da polpa foi ajustado para 10 (exceção para os testes onde o efeito do pH foi avaliado);
- não foi adicionada água para a lavagem do moinho após o seu descarregamento; esperavam-se alguns minutos para utilizar o sobrenadante da polpa para a lavagem;
- determinação das curvas de fluxo imediatamente após o quarteamento da polpa.

Os testes de remoagem foram divididos em três grupos: avaliação do aditivo selecionado, avaliação do percentual de sólidos e avaliação do pH da polpa. Todos os testes foram comparados ao teste padrão (amostra “alimentação da remoagem”, a 75% de sólidos e pH 10, sem adição de reagente).

Nos testes para avaliação do aditivo (selecionado previamente na parte I), foi preparada uma solução 1%p/V do reagente, sendo o mesmo adicionado a uma dosagem de 300g/t. Os testes foram feitos com polpa a 75% de sólidos e pH 10.

Foram feitos três testes para avaliação do percentual de sólidos (70%, 75% e 80%). Para os três testes, o volume de polpa foi mantido constante em 1,874L e a massa necessária para o teste foi recalculada para os ensaios com 70% e 80% de sólidos. O fator de conversão do tempo de moagem (em minutos) em energia (em kWh/t) foi recalculado para essas duas condições, sendo respectivamente, 0,3212 e 0,2313. Utilizando esses fatores, o tempo de moagem foi recalculado para se obter 6kWh/t, 12kWh/t e 18kWh/t. A tabela IV.2 sumaria as condições utilizadas.

Tabela IV.2 – Condições para realização dos ensaios de remoagem para 70%, 75% e 80% de sólidos

Parâmetro	75% sólidos (condição padrão)	70% sólidos	80% sólidos
Diâmetro - D	0,254	0,254	0,254
% velocidade crítica - Cs	0,65	0,65	0,65
Massa do minério (kg)	3,5	2,972	4,146
Peso da carga de bolas (kg)	18	18	18
Fração do volume ocupado pelas bolas - Vp	0,3008	0,3008	0,3008
kWb (kW/t bolas, no eixo pinhão)	3,1821	3,1821	3,1821
Potência no eixo pinhão (kW)	0,0573	0,0573	0,0573
Fator de conversão de tempo de moagem (min) em energia (kWh/t)	0,2727	0,3212	0,2303
E1 (6kWh/t) em t (min)	22,0	18,7	26,1
E2 (12kWh/t) em t (min)	44,0	37,4	52,1
E3 (18kWh/t) em t (min)	66,0	56,0	78,2

Para avaliação da influência do pH da polpa, o teste padrão foi comparado a dois outros testes: pH natural e pH 8,5 (ajustado com hidróxido de sódio).

O fluxograma dos ensaios de remoagem utilizados para determinação do consumo específico de energia e para obtenção de amostras para os ensaios reológicos é mostrado na figura 4.2.

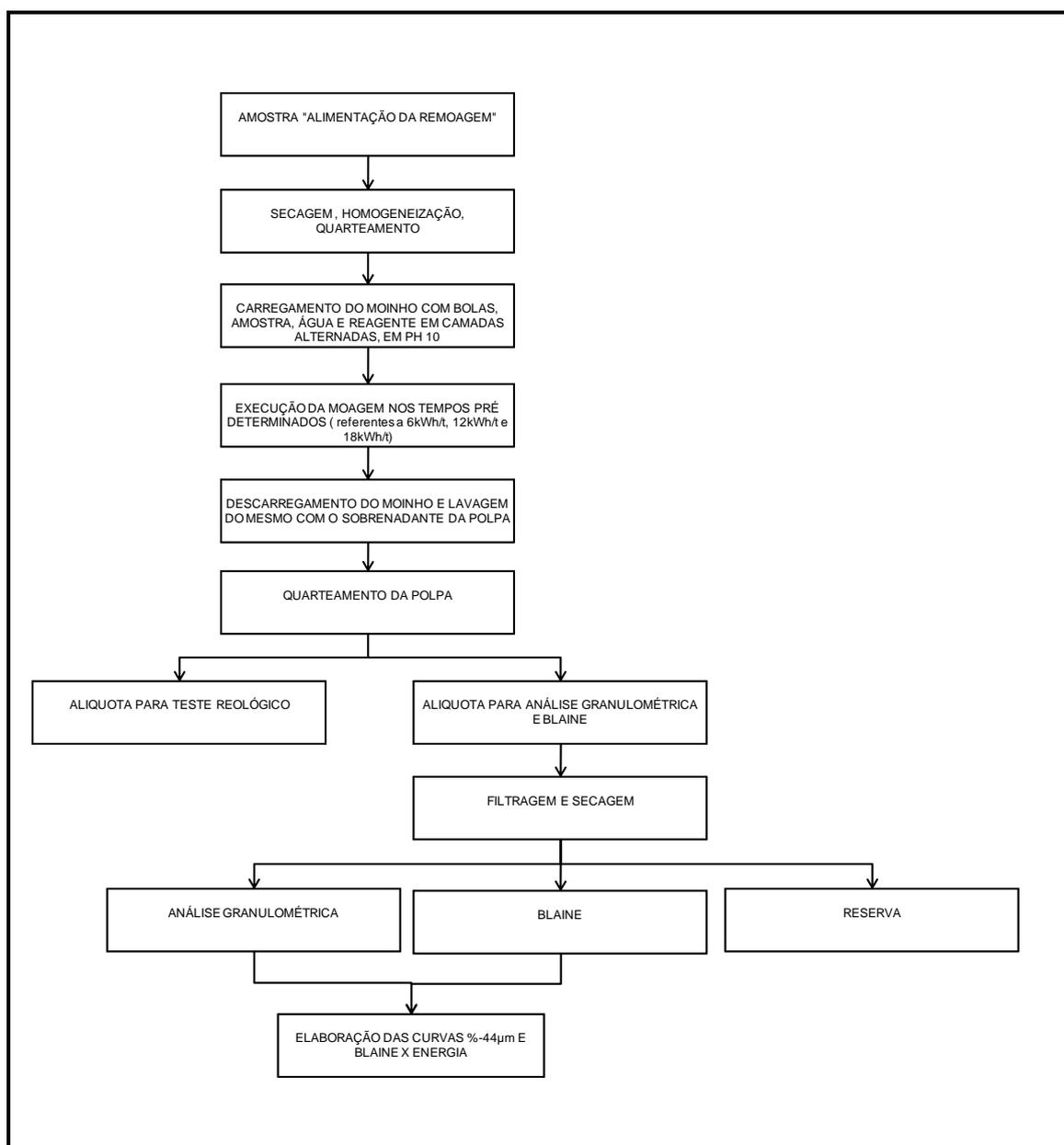


Figura 4.2 - Fluxograma dos ensaios de remoagem para determinação do consumo específico de energia e do comportamento reológico.

4.2.7 Determinação das curvas reológicas

As curvas reológicas foram determinadas no Laboratório da Engenharia de Processo do Mineroduto da SAMARCO, sendo utilizado um reômetro de cilindro coaxial da marca BROOKFIELD, modelo R/S+ e sensor CC3-45 (visualizado na figura 4.3). Com o sensor CC3-45 é possível obter as seguintes faixas de leitura:

- faixa de viscosidade: 0,005 – 1512Pa.s;
- faixa de taxa de cisalhamento: 1 – 1290s⁻¹;
- máxima tensão de cisalhamento: 195Pa.



Figura 4.3 - Reômetro de cilindro coaxial utilizado no estudo.

Foram executados testes com duas amostras:

- amostra “produto da remoagem”, preparada a 75% de sólidos e pH 10, sem adição ou com adição de reagentes nas dosagens de 300g/t, 600g/t e 900g/t;

- amostra “alimentação da remoagem”, remoída conforme condições apresentadas no item 4.2.6 (cada teste contou com três remoagens realizadas em tempos equivalentes a 6kWh/t, 12kWh/t e 18kWh/t).

Não foi possível criar um programa para obtenção da curva reológica da amostra “alimentação da remoagem” tal qual, em função da alta velocidade de sedimentação, e consequente travamento do *spindle*.

As curvas reológicas foram obtidas utilizando uma rampa de decréscimo de taxa de cisalhamento, de 500s^{-1} a 1s^{-1} , durante 30s, com leituras realizadas a cada segundo (30 pontos). Essa condição permitiu melhores ajustes aos modelos reológicos, sendo observados os seguintes fatores:

- taxas maiores que 500s^{-1} ocasionavam turbulência à polpa;
- tempo maior que 30s ocasionava sedimentação;
- minimização do efeito de sedimentação com a utilização de uma rampa de decréscimo de taxa de cisalhamento ao invés de uma rampa de acréscimo de taxa de cisalhamento.

Todos os testes foram realizados em duplicata. As curvas de fluxo obtidas foram construídas pela média aritmética dos pares de pontos. Os coeficientes dos modelos, utilizados para a construção de curvas em função da dosagem do reagente ou da condição de moagem, foram obtidos pela média aritmética de cada duplicata.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise química, granulométrica e mineralógica das amostras

As tabelas V.1 e V.2 mostram os teores das frações retidas simples e os teores das amostras cabeça utilizadas neste estudo. Verifica-se, para ambas as amostras, uma maior concentração de sílica, fósforo, alumina e perda por calcinação nas frações grosseiras, e uma maior concentração de ferro nas frações finas.

O produto dos moinhos MS04, MS05 e MS06 alimenta etapas posteriores de limpeza, feitas em circuitos de células de grande volume (*tank cells*) e colunas. Por essa razão, o teor de sílica da amostra produto da remoagem é menor do que o da amostra alimentação da remoagem.

Tabela V.1 – Distribuição granulométrica e teores das frações retidas simples para a amostra alimentação da remoagem

Abertura (µm)	% Passante acumulada	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	PPC (%)	MnO (%)
149	77,08	58,56	11,88	0,38	0,044	3,79	0,13
105	63,28	64,97	4,07	0,28	0,039	2,87	0,07
74	50,85	66,94	2,40	0,26	0,032	2,47	0,05
53	31,92	67,97	1,39	0,22	0,028	1,90	0,04
44	24,89	68,10	0,94	0,22	0,024	1,52	0,03
37	20,62	68,05	0,93	0,21	0,022	1,45	0,03
-37	-	68,05	0,89	0,29	0,026	1,48	0,07
Cabeça calculada		65,30	4,13	0,28	0,033	2,41	0,07
Cabeça analisada		65,44	4,20	0,28	0,032	2,40	0,07

Tabela V.2 - Distribuição granulométrica e teores das frações retidas simples da amostra produto da remoagem

Abertura (µm)	% Passante acumulada	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	PPC (%)	MnO (%)
74	97,91	57,15	12,04	0,88	0,075	5,03	0,17
53	90,15	65,80	1,87	0,42	0,056	3,39	0,12
44	85,17	67,06	1,02	0,31	0,044	2,59	0,09
37	80,44	67,30	0,93	0,29	0,04	2,38	0,08
-37	-	67,15	1,00	0,40	0,04	2,38	0,10
Cabeça calculada		66,72	1,42	0,40	0,046	2,57	0,10
Cabeça analisada		66,84	1,36	0,38	0,045	2,64	0,10
Overflow para teste de dispersão		65,75	1,64	0,51	0,053	3,16	0,12
Underflow		66,90	1,41	0,32	0,042	2,34	0,09

A tabela V.2 apresenta também os teores das frações *overflow* (utilizada nos testes de dispersão) e *underflow*. Observa-se uma maior concentração de sílica, alumina, fósforo e perda por calcinação na fração *overflow*.

As fases mineralógicas presentes nas amostras estudadas são apresentadas na tabela V.3. A hematita compacta e hematita porosa são as fases mais abundantes.

Tabela V.3 - Fases mineralógicas presentes nas amostras estudadas (MOLR, % em peso)

Amostra	HC (%)	HP (%)	G (%)	MA (%)	QI (%)	QM (%)	Total (%)
Alimentação da remoagem	35,9	44,1	16,2	2,9	0,8	0,1	100,0
Produto da remoagem	42,2	32,1	21,9	3,0	0,6	0,1	100,0

HC - hematita compacta (hematita especular + hematita lamelar + hematita granular); HP - hematita porosa (hematita martítica); G – goethita; MA - magnetita; QI - quartzo inteiro; QM - quartzo misto.

A figura 5.1 apresenta as distribuições granulométricas das amostras obtidas por peneiramento e granulômetro a laser. Os valores de d_{50} , F_{80} e o percentual de lamas (fração menor que $10\mu\text{m}$) para a amostra alimentação da remoagem foram, respectivamente: $74\mu\text{m}$, $162\mu\text{m}$ e $0,83\%$. Para a amostra produto da remoagem, estes valores foram, respectivamente: $20\mu\text{m}$, $37\mu\text{m}$ e $30,63\%$.

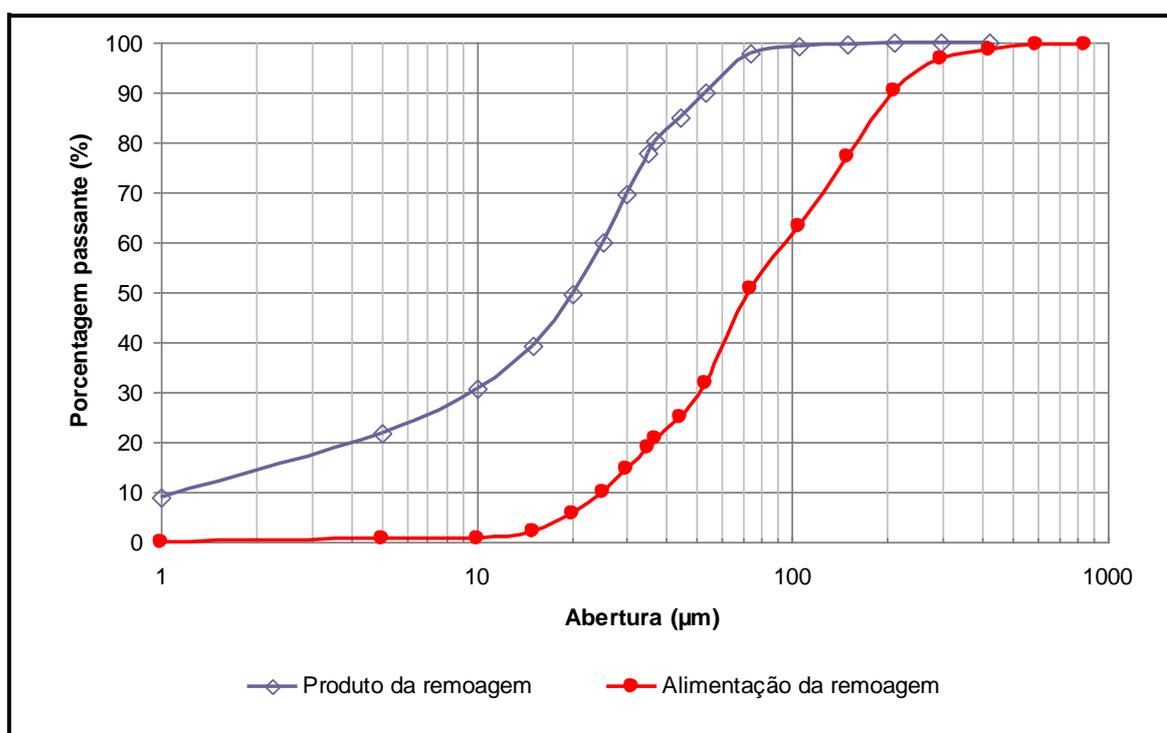


Figura 5.1 - Distribuições granulométricas das amostras.

5.2 Avaliação dos potenciais aditivos de moagem

Para avaliação dos potenciais aditivos de moagem foram executados ensaios de grau de dispersão e curvas de fluxo, em função da dosagem de reagente. Todos esses testes foram realizados utilizando pH 10, que é o pH de trabalho da remoagem de concentrado da SAMARCO (produto da flotação mecânica). Como os íons H^+ e OH^- são íons determinadores de potencial para os oxi-minerais e, conseqüentemente, modificam a carga de superfície das partículas e alteram a estabilidade termodinâmica da polpa, um reagente que seja capaz de promover maior dispersão e redução de

viscosidade da polpa em pH 10 é um provável aditivo para a etapa de remoagem da SAMARCO.

A influência do pH no estado de agregação e dispersão da polpa pode ser visualizada na figura 5.2. Essa curva foi obtida para testar se a metodologia utilizada na amostra “produto da remoagem” estava adequada. Entende-se por adequada se a curva mostrada na figura 5.2 apresentar uma forma semelhante às várias curvas obtidas para determinação do pH de dispersão ótimo da etapa de deslamagem da SAMARCO. O aspecto dessa curva foi muito semelhante: aumentando-se o pH de 7 para próximo de 9 ocorre uma forte dispersão da polpa; a partir do pH 9 essa dispersão aumenta até atingir um limite máximo (próximo de 10); a partir desse limite máximo ocorre uma ligeira agregação do sistema. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato da hidroxila, mesmo sendo aniônica, se adsorver especificamente ao substrato das partículas negativas de quartzo e hematita, aumentando a carga elétrica negativa e promovendo maior dispersão do sistema. Quando se aumenta ainda mais a concentração de hidroxila, os sítios reativos à espécie dispersante se esgotam, cessando a adsorção específica. Adições a mais do “dispersante” agora ficam no seio da solução, atuando apenas como espécies indiferentes, o que provocará uma compactação da camada difusa, e inevitavelmente, uma diminuição do grau de dispersão (BRANDÃO, 2009).

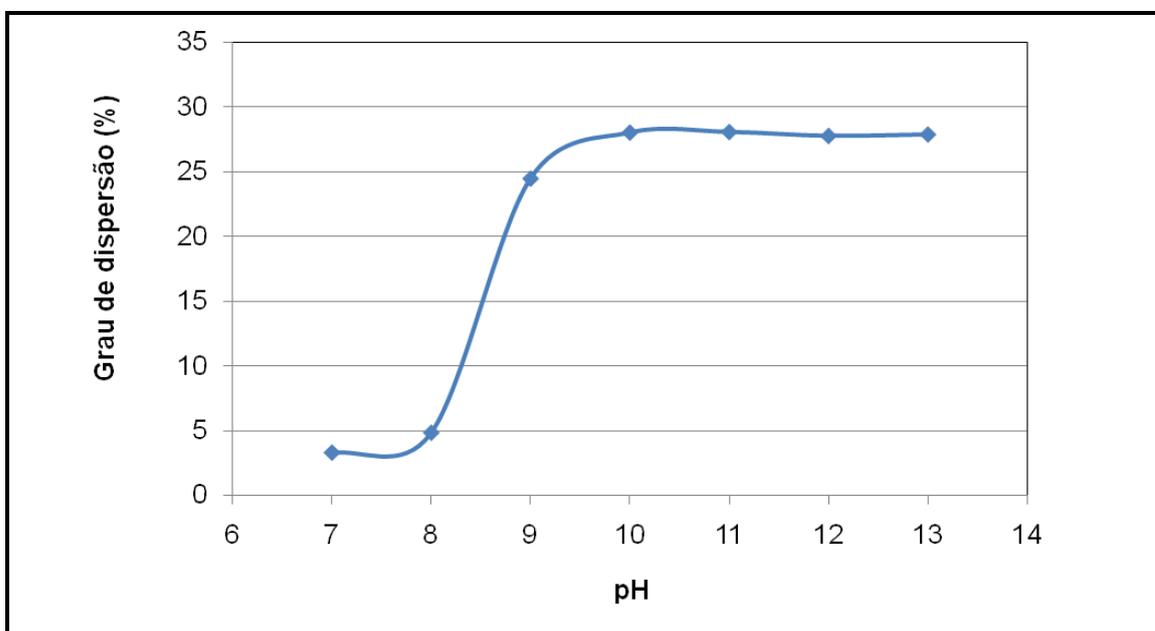


Figura 5.2 - Grau de dispersão em função do pH.

Os modelos empíricos que apresentaram melhor ajuste às curvas de fluxo foram: Herschel-Bulkley (R^2 médio de 0,988) e Bingham (R^2 médio de 0,965). As curvas de fluxo, bem como as equações obtidas utilizando esses modelos encontram-se listadas no Anexo I e Anexo II.

A existência de uma tensão limite de escoamento em várias curvas de fluxo (Anexo I e Anexo II) foi decisiva para a não escolha do modelo de Ostwald de Waele, utilizado nos trabalhos de POSSA e de LIMA (2000) e FERREIRA (2002). Apesar disso, as equações dos modelos de Herschel-Bulkley e de Ostwald de Waele apresentam coeficientes comuns: k (relacionado à consistência da suspensão e denominado índice de consistência do fluido) e n (relacionado ao comportamento newtoniano ou não-newtoniano de uma suspensão e denominado índice de comportamento de fluxo).

FERREIRA (2002) demonstrou que esses coeficientes foram capazes de descrever o comportamento reológico para diferentes condições de agregação e dispersão. Dessa forma, os coeficientes k , n e o *yield stress* (YS) obtidos pelo modelo de Herschel-Bulkley foram utilizados para melhor descrição do comportamento reológico da polpa frente à adição dos potenciais aditivos de moagem, juntamente com o grau de dispersão e a viscosidade plástica - obtida pelo modelo de Bingham, utilizado nos trabalhos de SAMPAIO (2002) e BRAGANÇA (2008).

A figura 5.3 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de três ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610) e de um poliacrilato de sódio e fosfato (AG DISPER). Para todos esses reagentes, foram observadas as seguintes características, comparadas ao teste padrão (sem adição de reagentes):

- redução significativa no coeficiente k (relacionado à viscosidade e a tensão limite de escoamento), sendo essa redução mais pronunciada para os ácidos poliacrílicos;
- tendência de redução da tensão limite de escoamento (coeficiente YS) e da viscosidade plástica;
- tendência da polpa se tornar mais dilatante, evidenciada pelo aumento do índice n ;
- maior redução dos índices k , YS e viscosidade plástica para os ácidos poliacrílicos de menor peso molecular; essa tendência de maior redução da

viscosidade para reagentes com mesma estrutura química e menor peso molecular foi relatada por KLIMPEL e HANSEN (1989).

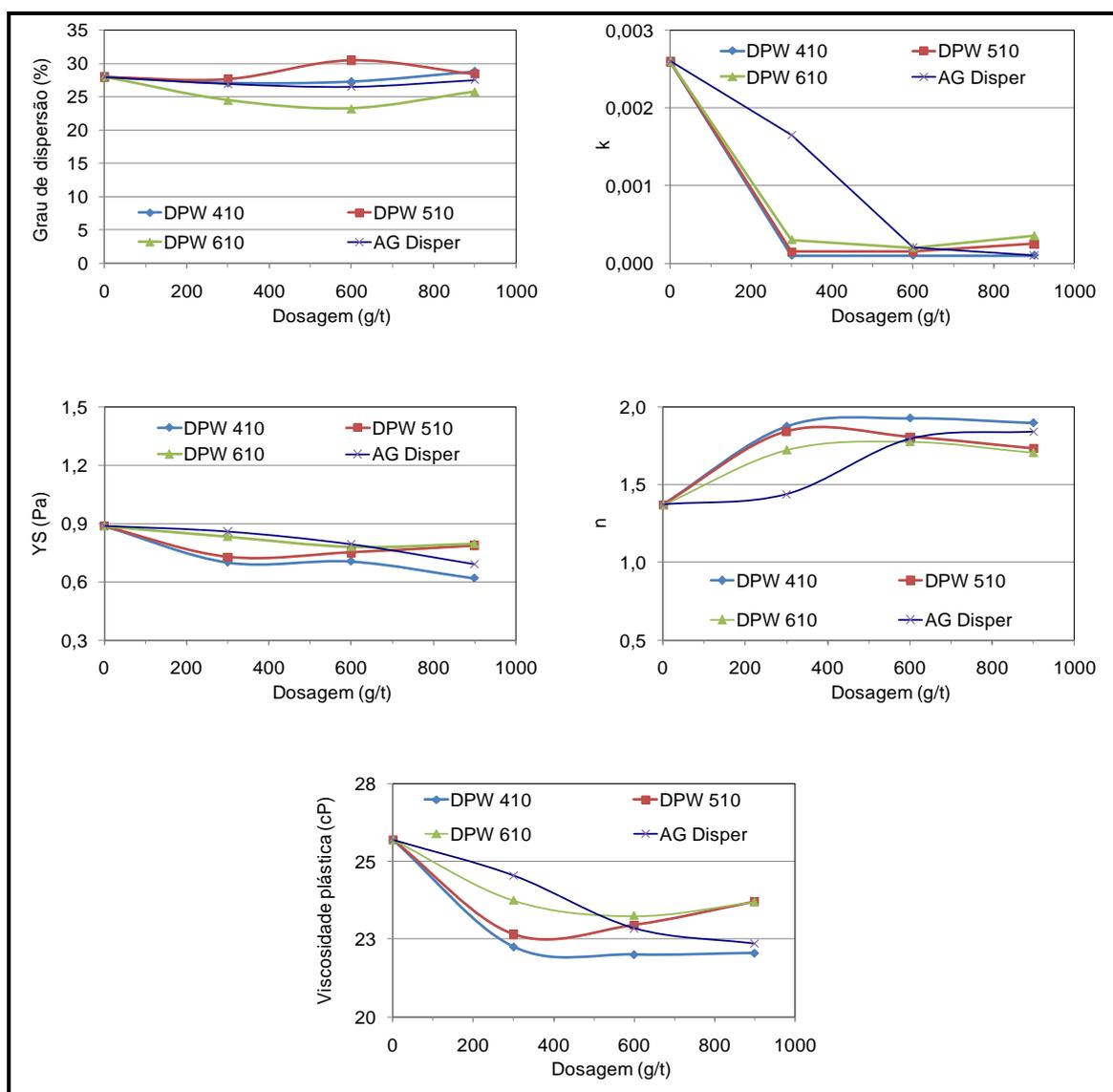


Figura 5.3 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610) e da dosagem de poliácrlato de sódio e fosfatos (AG Disper).

As curvas de fluxo para os níveis de dosagem estudados (300g/t, 600g/t e 900g/t) foram praticamente idênticas, conforme visualizado no Anexo I (figura 10.1) e figura 5.3 (estabilização dos coeficientes a partir de 300g/t).

A redução dos índices k , YS e viscosidade plástica é um indicativo de um maior nível de estabilidade termodinâmica ou grau de dispersão das partículas, apesar das curvas de grau de dispersão em função da dosagem não terem sofrido alterações significativas. Desse grupo de quatro reagentes, o que apresentou uma maior redução desses índices foi o DPW 410. Este reagente foi testado como aditivo de moagem, e seus resultados serão apresentados na seção 5.3.

Segundo BRANDÃO (2009), os ácidos poliacrílicos e seus sais estão entre os mais eficientes dispersantes de uso industrial e laboratorial, e apresentam como principal mecanismo de dispersão o aumento e manutenção de carga negativa elevada na DCE.

A figura 5.4 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de três polietileniminas (DPW 1210, DPW 1310 e DPW 1410). Para esses reagentes, foram observadas as seguintes características, comparadas ao teste padrão (sem adição de reagentes):

- maior agregação da polpa, principalmente na dosagem de 300g/t, indicada pelo menor grau de dispersão e pelos maiores coeficientes obtidos pelos modelos de Herschel-Bulkley e Bingham (k , YS e viscosidade plástica);
- comportamento dilatante para a condição de maior agregação (300g/t);
- os maiores valores do coeficiente k (relacionado a uma maior viscosidade e/ou tensão limite de cisalhamento) foram obtidos com a polietilenimina de maior peso molecular (DPW 1410); entretanto, a comparação dos outros índices e do grau de dispersão conduziu a resultados muito próximos entre as três polietileniminas estudadas.

As curvas de fluxo para os níveis de dosagem estudados podem ser visualizadas no Anexo I (figura 10.2).

CORTI *et al.* (2004) destacam que as polietileniminas são polímeros da classe das poliaminas. Como as poliaminas são moléculas catiônicas, a adsorção desses polímeros às partículas negativas dos minerais de ferro e quartzo pode ter minimizado a magnitude da carga elétrica negativa e, conseqüentemente, diminuído a repulsão

eletrostática entre essas partículas, gerando uma maior desestabilização termodinâmica do sistema.

Em função da maior agregação da polpa para os níveis de dosagem estudados, nenhuma das três polietilenimas foi selecionada para os testes de moagem.

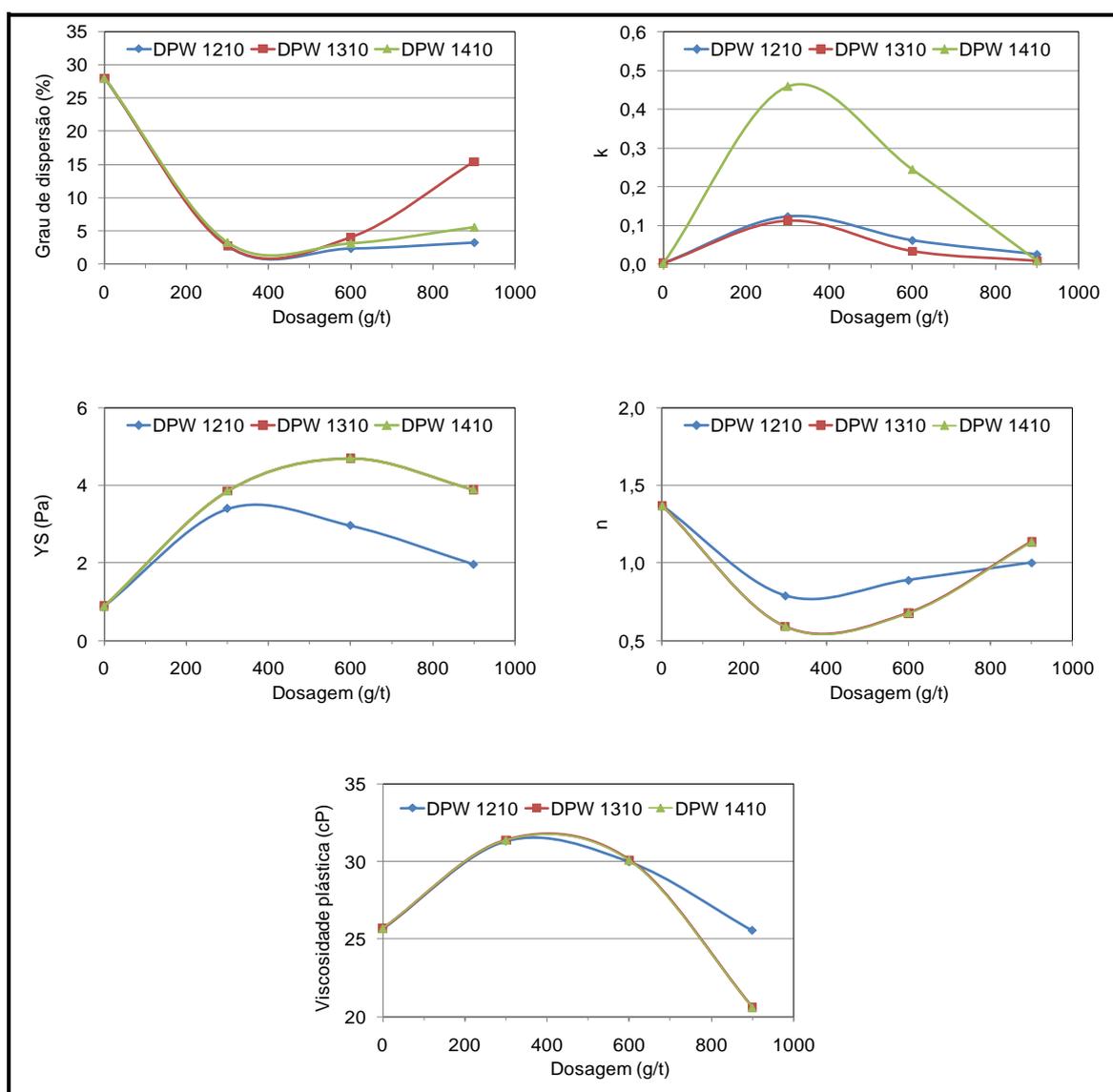


Figura 5.4 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de polietileniminas.

A figura 5.5 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de dois polivinil de amina (DPW 710 e DPW 810). Para esses reagentes, foram observadas as seguintes características, comparadas ao teste padrão (sem adição de reagentes):

- redução do índice k , principalmente na dosagem de 600g/t;
- leve tendência de aumento da tensão limite de escoamento (coeficiente YS);
- redução na viscosidade plástica na dosagem de 600g/t;
- curvas de fluxo muito semelhantes (Anexo I – figura 10.3), não havendo diferenças significativas entre os dois reagentes;
- leve tendência de agregação mostrada nas curvas de grau de dispersão, o que contraria a tendência de redução do coeficiente k e viscosidade plástica.

Como os resultados não mostraram de uma forma contundente que as polivinil de amina promoveram maior dispersão das partículas, nenhum dos dois reagentes foi selecionado para os testes de moagem. Talvez a presença de grupos catiônicos (NH_3^+) tenha reduzido a magnitude da carga elétrica negativa da superfície das partículas, gerando uma situação de maior agregação dessas partículas.

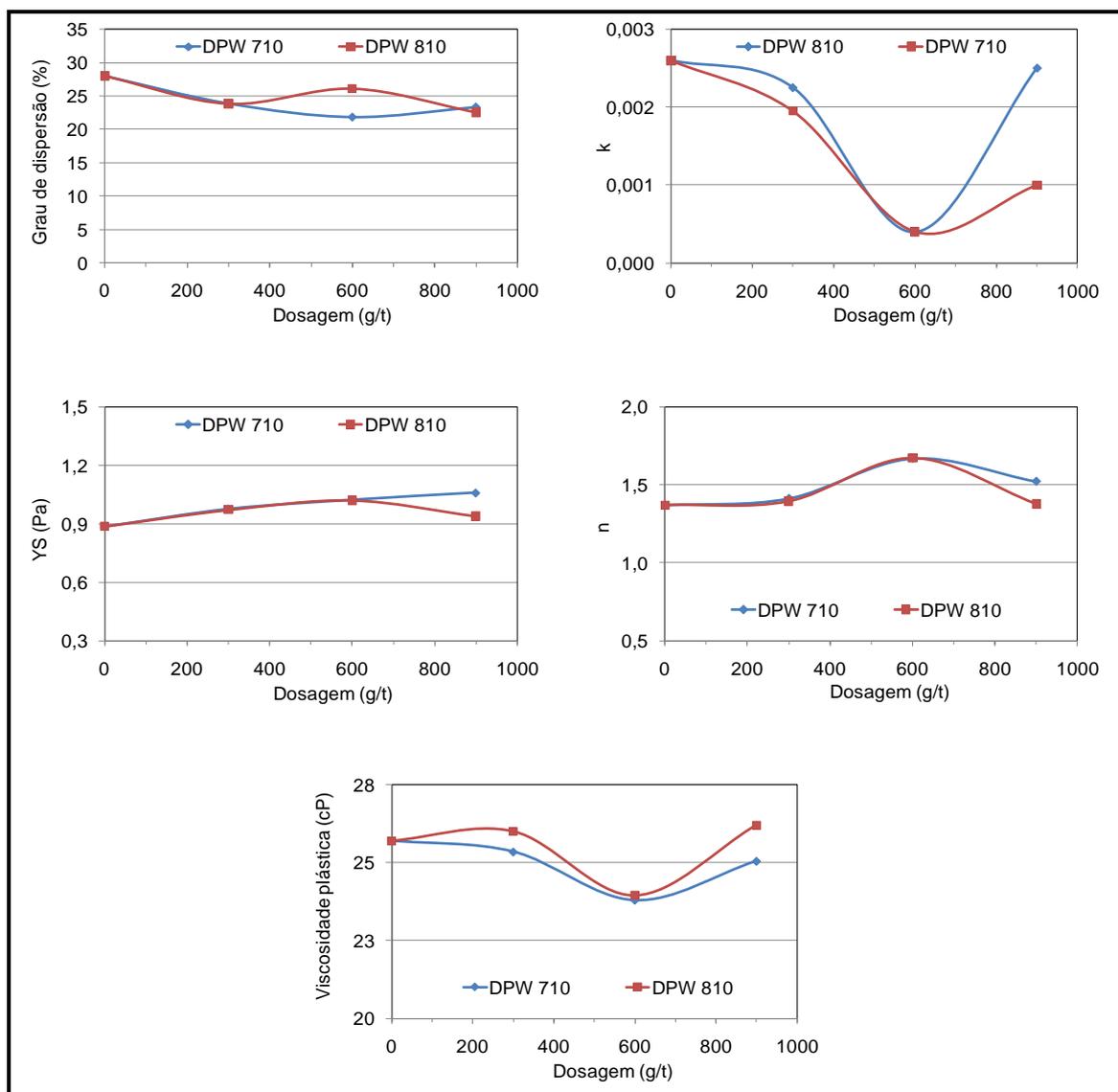


Figura 5.5 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de polivinil de amina.

A figura 5.6 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de três óxidos de polietileno (DPW 910, DPW 1010 e DPW 1110). Para esses reagentes, foram observadas as seguintes características, comparadas ao teste padrão (sem adição de reagentes):

- os reagentes DPW 1010 e 1110 tiveram praticamente o mesmo comportamento e não alteraram as características reológicas da polpa, se

- comparado ao teste padrão (o que pode ser visualizado pelas curvas de fluxo quase coincidentes representadas na figura 10.4 – Anexo I);
- o reagente DPW 910 apresentou uma maior tendência de promover maior agregação das partículas da polpa (maior índice k e viscosidade plástica).

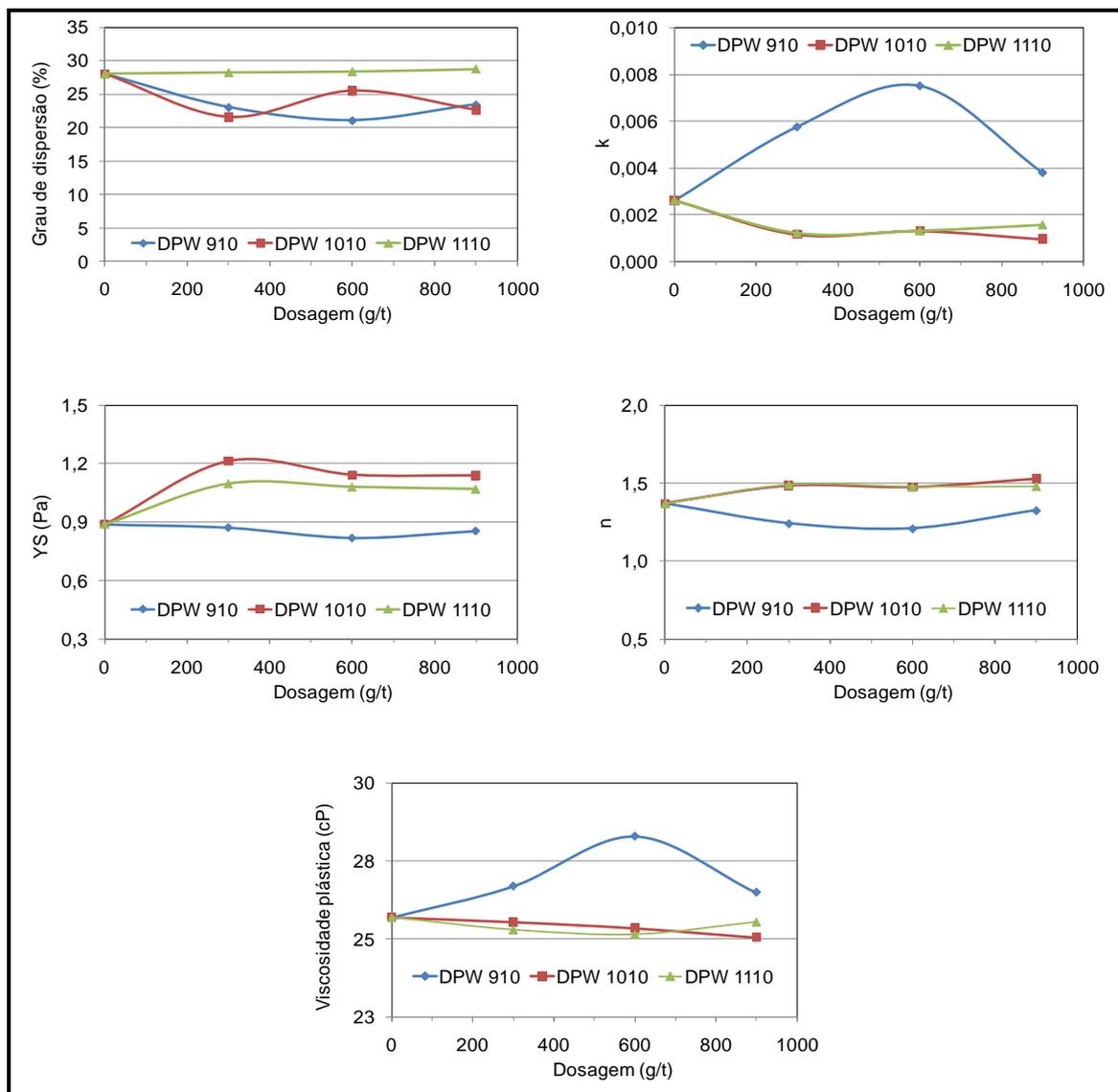


Figura 5.6 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de óxidos de polietileno.

BRANDÃO (2009) relata que os surfatantes poliméricos etoxilados e propoxilados são eficientes como dispersantes para partículas hidrofílicas, porém apenas quando o mecanismo de dispersão estérica predomina.

Os três óxidos de polietileno não foram testados como aditivos de moagem uma vez que não foram capazes de promover uma maior dispersão da polpa.

A figura 5.7 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem de um copolímero sílico acrilato (Bulab 49CT). Para esse reagente, foi observado:

- redução no coeficiente k e na viscosidade plástica, indicando uma maior estabilidade termodinâmica do sistema;
- dosagens maiores do reagente não conduziram a uma maior dispersão das partículas;
- curvas do grau de dispersão e dos coeficientes k e n praticamente inalteradas.

Esse reagente foi testado como aditivo de moagem, e o seu resultado será apresentado na seção 5.3.

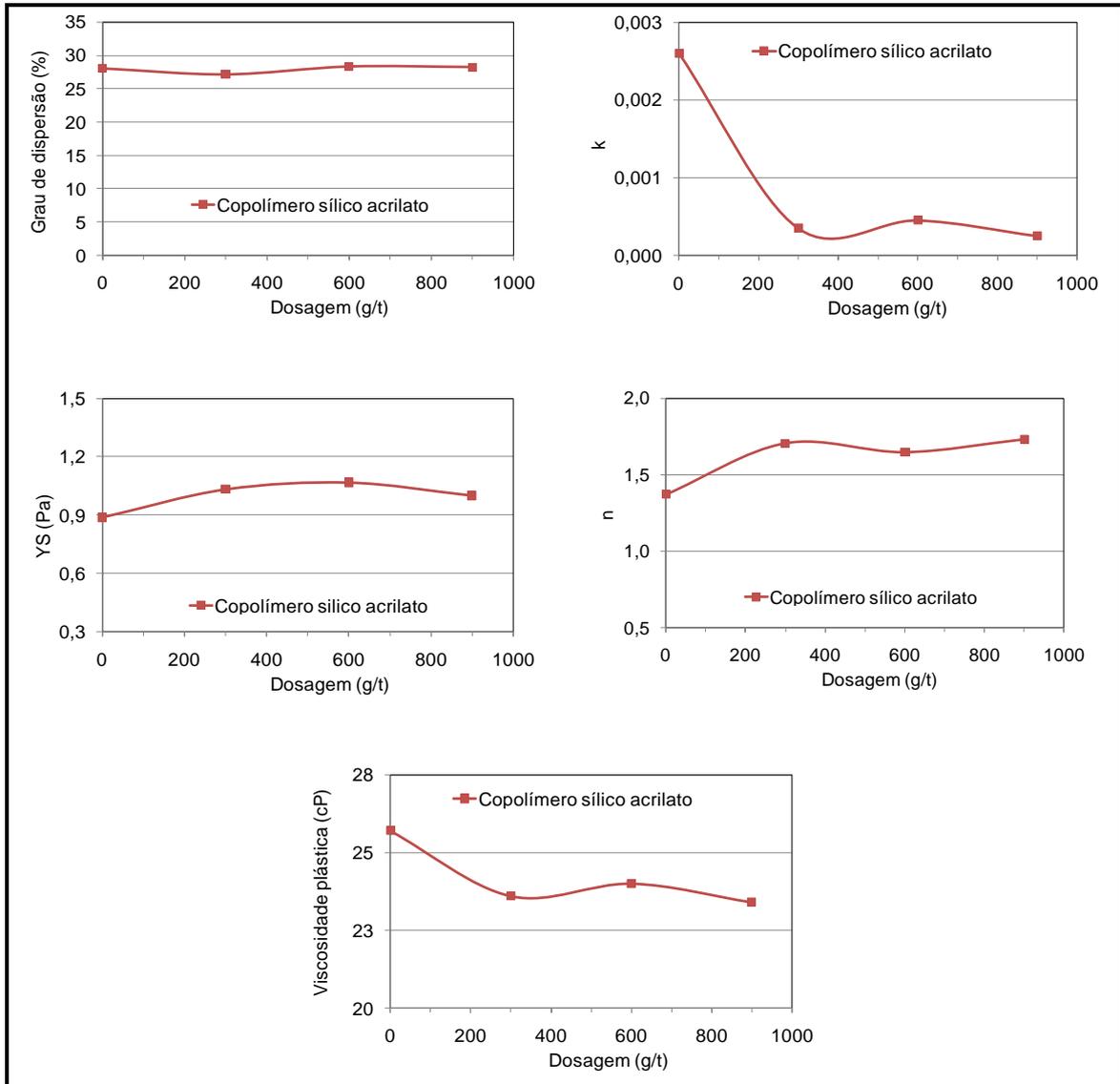


Figura 5.7 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de copolímero sílico acrilato.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem de dois copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio (Magnafloc 919 e Magnafloc 1011) e de duas poliacrilamidas (Magnafloc 351 e Magnafloc 333). Os copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio são polímeros aniônicos de alto peso molecular, sendo que o Magnafloc 919 possui maior carga iônica. Já as poliacrilamidas são polímeros não iônicos de alto peso molecular, sendo o peso molecular do Magnafloc 333 superior ao peso molecular do Magnafloc 351. Para todos esses reagentes, foi observado:

- aumento significativo nos valores dos coeficientes k , YS e viscosidade plástica, indicando uma forte agregação dos sistemas, provavelmente por mecanismo de floculação (por pontes);
- redução do grau de dispersão da polpa.

Todas as curvas de fluxo são apresentadas no Anexo I (figuras 11.6 e 11.7).

A poliacrilamida Magnafloc 351 é utilizada como floculante na etapa de espessamento de concentrado da SAMARCO, em dosagens variando de 5 a 10g/t.

BRANDÃO (2009) relata que o mecanismo de floculação por pontes pode evoluir para a dispersão estérica. Apesar das altas dosagens de reagentes praticadas (300g/t, 600g/t e 900g/t), não houve maior dispersão das partículas. Os dois copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio, juntamente com as duas poliacrilamidas, não foram testados como aditivos de moagem.

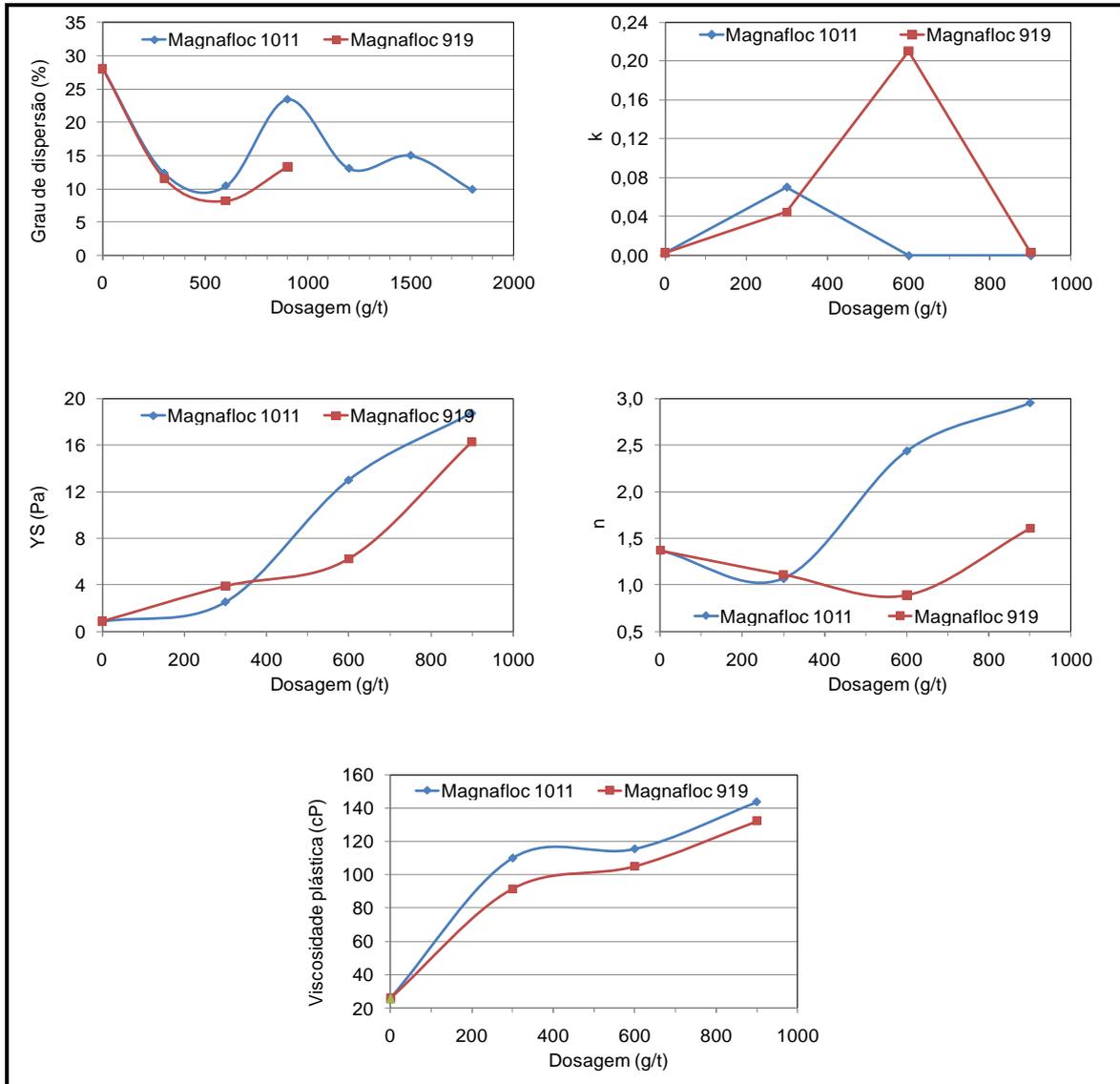


Figura 5.8 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio.

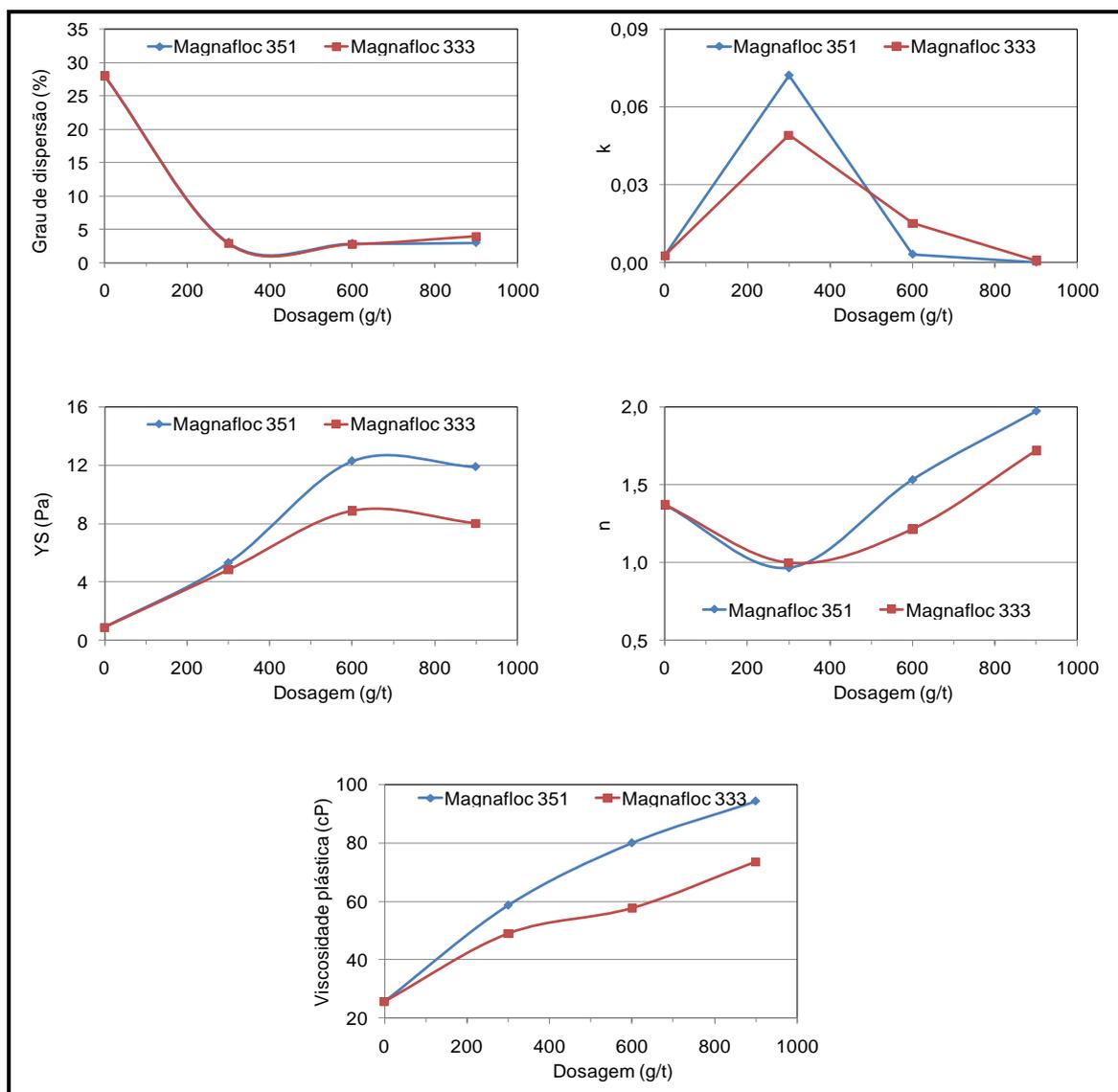


Figura 5.9 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem e do peso molecular de poliacrilamidas.

A figura 5.10 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem de ácido cítrico, hidróxido de sódio e hexametáfostato de sódio. Para esses reagentes, foram observadas as seguintes características, comparadas ao teste padrão (sem adição de reagentes):

- a adição de ácido cítrico e de hexametáfostato de sódio reduziu o coeficiente k e a viscosidade plástica, indicando uma maior estabilidade termodinâmica do sistema;

- a adição de 300g/t de hidróxido de sódio à polpa (ajustada previamente para pH 10) promoveu redução no coeficiente k e na viscosidade plástica; dosagens maiores tiveram um efeito contrário, provavelmente devido ao esgotamento dos sítios reativos das partículas de quartzo e de minerais de ferro, cessando a adsorção específica e provocando uma diminuição no grau de dispersão, conforme relatado por BRANDÃO (2009);
- não houve alterações significativas na tensão limite de escoamento (coeficiente YS).

KLIMPEL e HANSEN (1989) relatam o aumento da viscosidade de uma polpa de minério de cobre com ganga silicatada a partir da adição de 400g/t de hidróxido de sódio, conforme mostrado na figura 3.9.

BRANDÃO (2009) afirma que os fosfatos de sódio adsorvem nas partículas por ligações de hidrogênio, van der Waals ou mesmo quimissorção. O principal mecanismo de dispersão é o aumento e manutenção de uma alta carga na dupla camada elétrica, de sinal negativo. Já o ácido cítrico apresenta a estrutura química ideal para um dispersante em meio aquoso: por ionização, uma ou mais carboxilas adsorveriam na partícula, criando carga elétrica interfacial média a alta e ainda orientando uma ou mais hidroxilas para a solução, portanto, com a participação também da solvatação.

SILVA (1994), realizando estudos sobre o estado de agregação de suspensões de um minério de ferro, demonstrou que:

- hexametáfosfato de sódio, comparado a outros dispersantes inorgânicos testados (metassilicato de sódio, silicato de sódio com $SiO_2 : Na_2O = 2,15$, silicato de sódio com $SiO_2 : Na_2O = 3,25$ e bórax) apresentou os maiores valores de grau de dispersão, mostrando-se o mais eficiente dos reagentes dispersantes inorgânicos utilizados, principalmente em faixas de pH superiores a 7;
- ácido cítrico, comparado a outros dispersantes orgânicos testados (ácido policarboxílico e Cataflot P40), apresentou maior eficiência para aumentar o nível de estabilidade termodinâmica das suspensões, principalmente em valores de pH maiores ou iguais a 7;

- aumento na magnitude da carga negativa de amostras de quartzo e minerais de ferro com a utilização de ácido cítrico (400g/t) e hexametáfosfato de sódio (300g/t), demonstrado através de medidas de potencial zeta realizadas em diferentes condições de pH; esse efeito foi ainda mais acentuado com o hexametáfosfato de sódio em ambas as amostras, o que está coerente com a curva de redução de viscosidade plástica mostrada na figura 5.10.

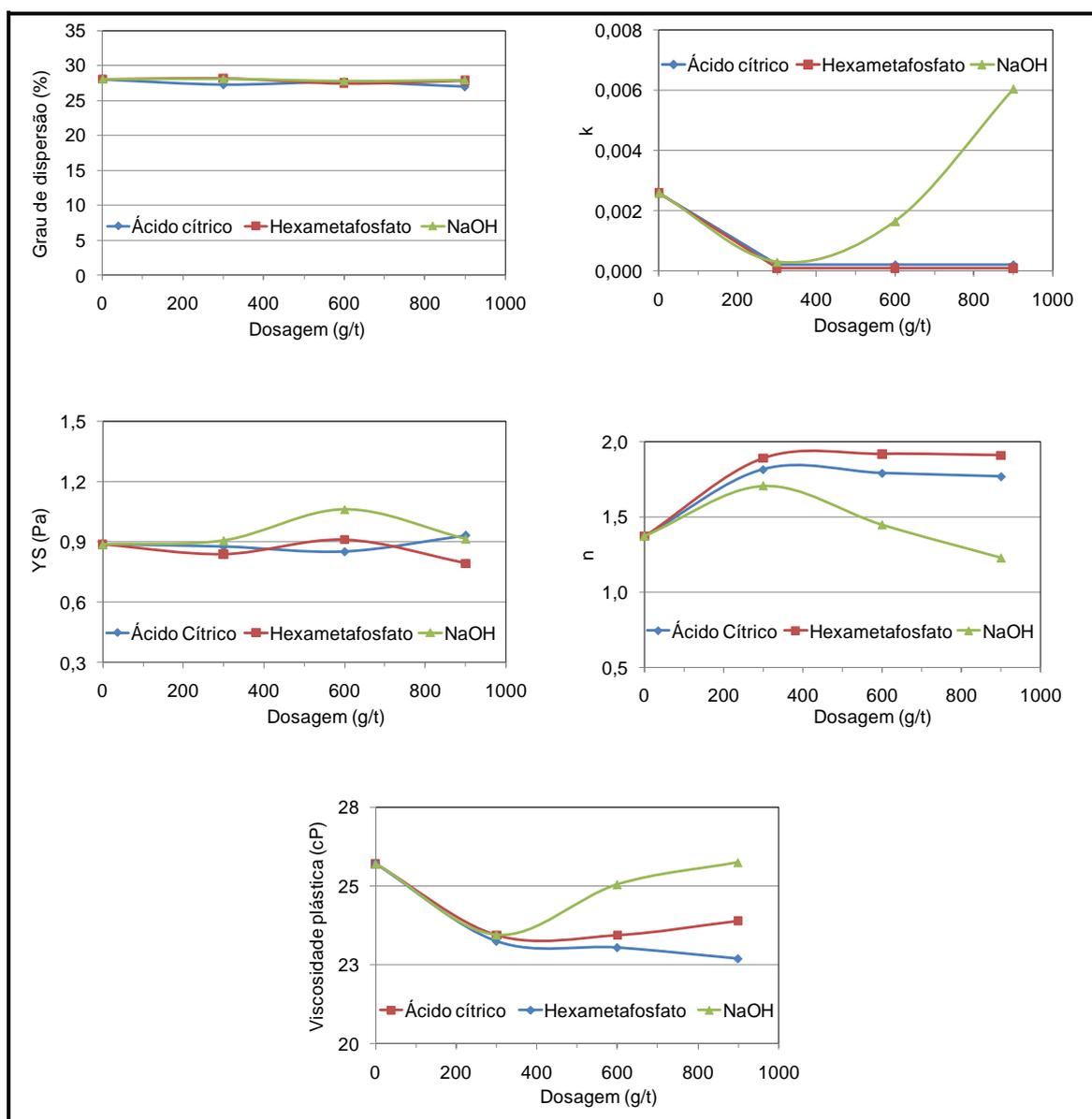


Figura 5.10 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de ácido cítrico, hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio.

FERREIRA (2002) avaliou o efeito do hexametáfosfato na reologia de duas amostras de lamas de minério de ferro. Para as duas amostras foi observada uma diminuição nos valores do coeficiente k com o aumento da concentração, tornando as amostras mais dispersas. Esses resultados também estão coerentes com os apresentados na figura 5.9.

O hexametáfosfato de sódio e o ácido cítrico foram testados como aditivos de moagem, e seus resultados serão apresentados na seção 5.3.

A figura 5.11 apresenta o grau de dispersão, os coeficientes k , n e YS e a viscosidade plástica em função da dosagem de duas bases: hidróxido de sódio (já mostrado na figura 5.10) e hidróxido de cálcio. O objetivo desse estudo foi verificar a influência de um coagulante na reologia da polpa. Foi verificada uma intensa coagulação da polpa utilizando o hidróxido de cálcio, o que pode ser visualizado pela redução do grau de dispersão e aumento dos coeficientes k , YS e viscosidade plástica.

As curvas de viscosidade plástica apresentadas na figura 5.10 apresentam o mesmo aspecto se comparadas às curvas de viscosidade apresentadas por KLIMPEL e HANSEN (1989) – vide figura 3.9.

SAMPAIO (2002) afirma que as amostras de concentrado coaguladas com cal mostraram um comportamento do tipo plástico de Bingham, com valores razoáveis de tensão de escoamento e, mesmo após a agitação, não tiveram suas propriedades significativamente alteradas. Os resultados desse trabalho estão compatíveis ao se avaliar os índices n e YS apresentados na figura 5.10 (valores significativos de tensão limite de escoamento e coeficiente n tendendo a um).

FERREIRA (2002) verificou que a adição de Ca^{2+} ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em uma polpa contendo hematita causou uma reversão nos valores de potencial zeta de negativo para positivo, o que indica reversão de carga. O autor atribui tal fato à adsorção específica de espécies desse cátion, podendo ser alguma espécie de hidroxicomplexo e/ou o próprio cátion metálico Ca^{2+} . Em pH 10, embora a carga da superfície seja relativamente alta, um aumento na concentração de Ca^{2+} promoveu um efeito bastante significativo na redução e reversão da carga de superfície da hematita.

TURRER *et al.* (2009) investigaram a influência da cal na filtragem e no pelotamento. Os autores concluíram que o pH da polpa é afetado pela dosagem de cal, através da interação dos íons cálcio com as partículas minerais e com o aglomerante orgânico.

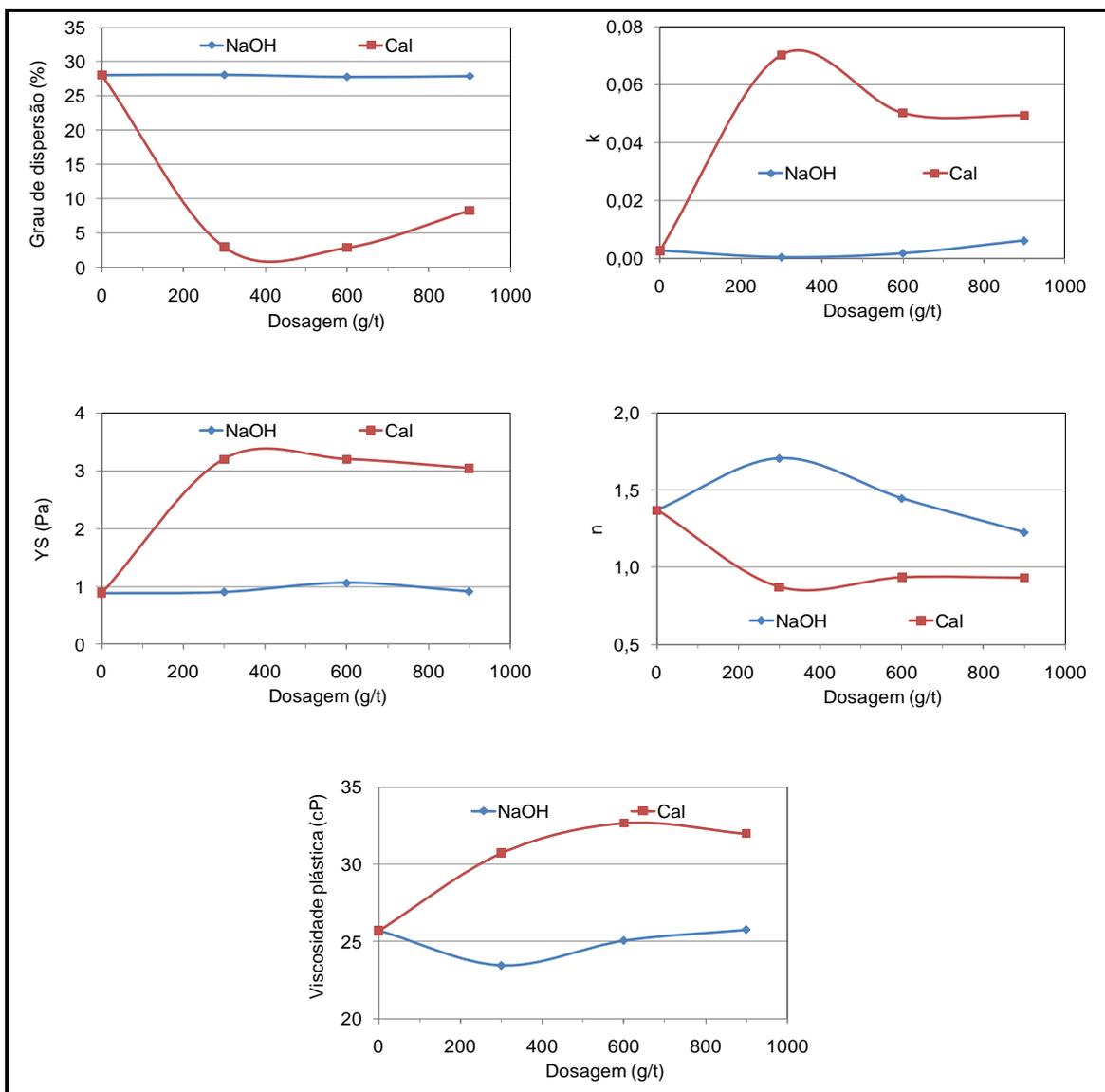


Figura 5.11 - Grau de dispersão, coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica em função da dosagem de hidróxido de sódio e de hidróxido de cálcio.

KLIMPEL (1987, 1999) afirma que a cal pode ocasionar a redução de produtividade na moagem. Como esse reagente é adicionado como coagulante na etapa de espessamento de lamaz da SAMARCO, e a água de processo recuperada nessa

etapa é recirculada, foram feitos alguns testes para quantificar o efeito desse reagente na etapa de remoagem. Esses testes serão apresentados na seção 5.3.

5.3 Avaliação dos testes de remoagem

5.3.1 Efeito da porcentagem de sólidos da polpa

A figura 5.12 apresenta as curvas de fluxo obtidas para os três níveis de porcentagem de sólidos estudados: 70%, 75% (teste padrão) e 80%. Para uma mesma taxa de cisalhamento, o aumento do percentual de sólidos proporcionou maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente. Pela análise das curvas de fluxo, observa-se também uma maior tensão limite de escoamento (*yield stress*) para maiores valores de porcentagem de sólidos.

As curvas obtidas na figura 5.12 foram ajustadas segundo os modelos de Herschel-Bulkley e Bingham. Os coeficientes obtidos para cada percentual de sólidos e para cada tempo de moagem (convertido em energia aplicada no eixo pinhão) são apresentados na figura 5.13. O aumento do percentual de sólidos e da energia aplicada ocasionou aumento nos índices k , YS e viscosidade plástica, além de tornar a polpa menos dilatante (redução do índice n).

O aumento dos coeficientes k , YS e viscosidade plástica está coerente com as afirmações de KLEIN (2002), HE (2007) e KLIMPEL e HANSEN (1989). KLEIN (2002) afirma que uma maior energia aplicada proporciona um aumento no número de partículas finas ($<20\mu\text{m}$), que se interconectam com o aumento do percentual de sólidos, formando uma estrutura de rede, com uma tensão limite de escoamento associada; o aumento da porcentagem de sólidos ocasiona um aumento exponencial na viscosidade aparente, tornando-se infinita próxima à máxima fração de empacotamento de sólidos (o valor da fração de sólidos máxima depende da distribuição de tamanho de partículas e tipicamente varia de 61 a 70% de sólidos em volume).

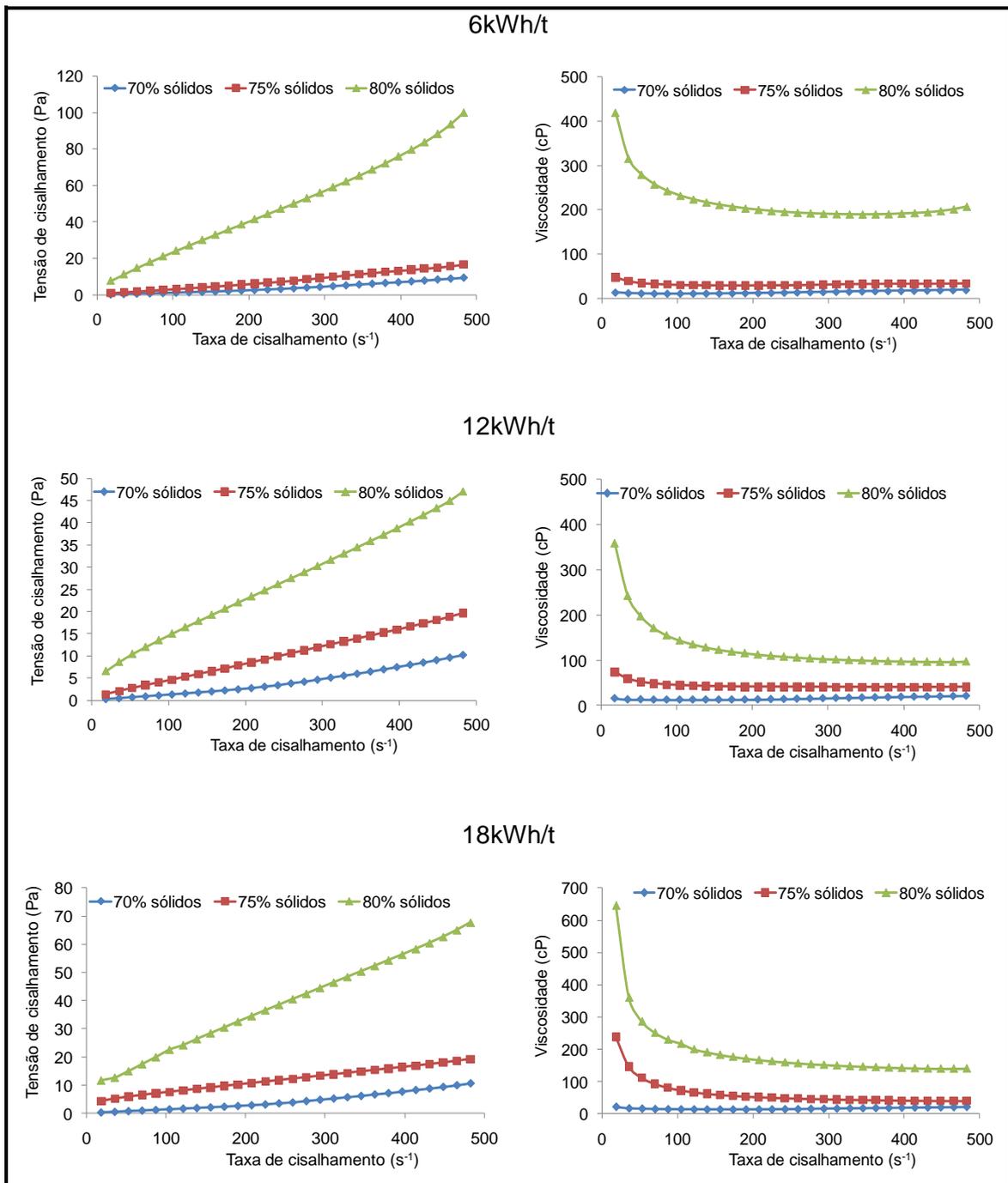


Figura 5.12 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, para três níveis de percentual de sólidos na polpa: 70%, 75% e 80%.

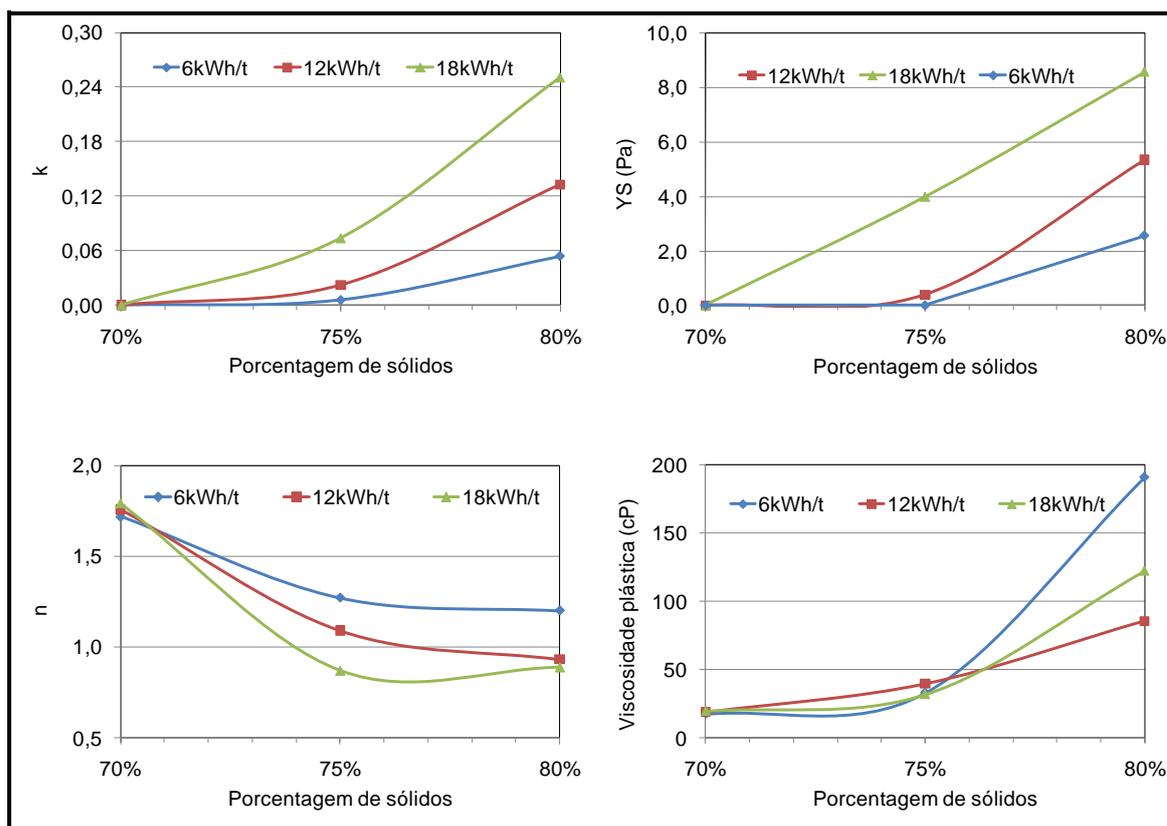


Figura 5.13 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem estudados em três níveis de porcentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.

HE (2007) relata que o aumento do percentual de sólidos de uma polpa de calcário ocasionou aumento do *yield stress* (determinado pelo modelo de Casson) e um aumento exponencial da viscosidade para percentuais de sólido superiores a 70% em peso (46,36% em volume). Apesar de terem sido testados apenas três níveis de percentual de sólidos, observa-se que as curvas de viscosidade plástica e do coeficiente k apresentam uma forma exponencial.

A figura 5.14 apresenta as curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, para os três níveis de percentual de sólido estudados. Observa-se que as curvas dos testes realizados com 70% e 75% de sólidos foram praticamente idênticas, indicando um consumo de 12,6kWh/t para 88% passante em 0,044mm. Para 80% de sólidos, o consumo estimado para a mesma granulometria foi de 15,4kWh/t (cerca de 22% superior ao teste padrão).

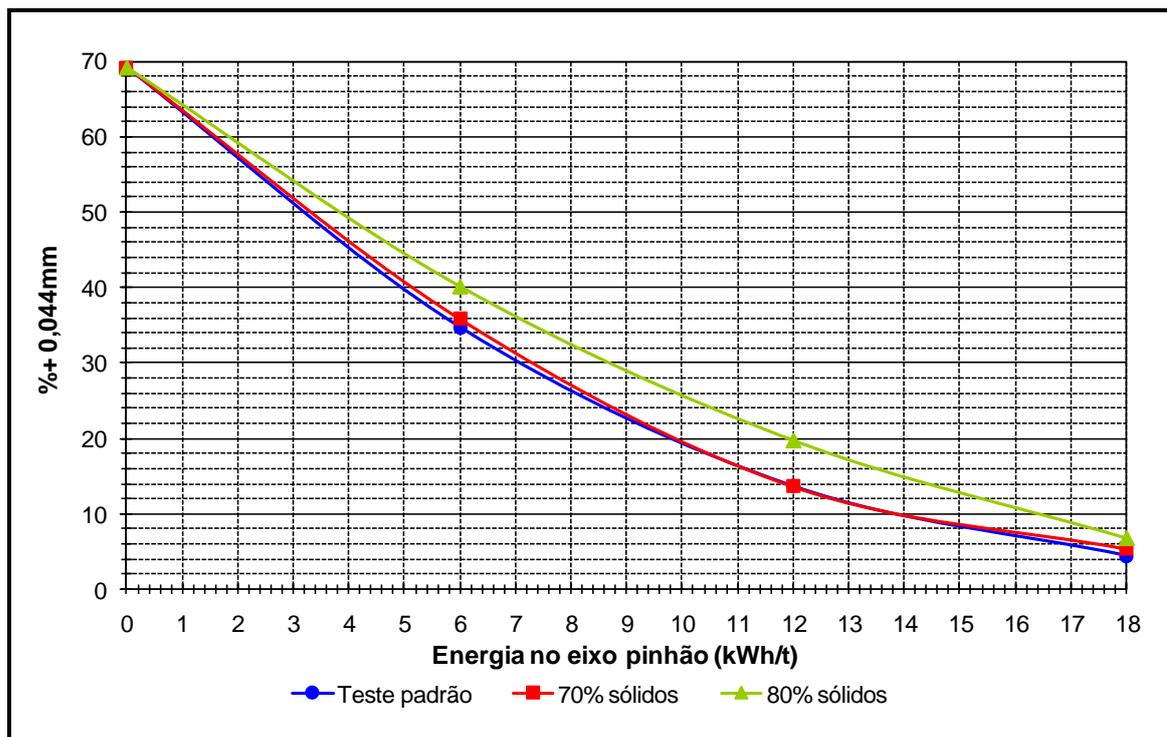


Figura 5.14 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, para três níveis de percentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.

As curvas de fluxo mostradas na figura 5.12 e os coeficientes da equação de Hershel-Bulkely (coeficientes k e n), tensão limite de escoamento e viscosidade plástica mostrados na figura 5.13 foram mais próximas para os testes realizados com 70% e 75% de sólidos se comparados ao teste realizado com 80% de sólidos. Apesar de existir uma diferença entre as curvas de fluxo para os testes realizados com 70% e 75% de sólidos, essa diferença não foi significativa para afetar o desempenho da remoagem.

A figura 5.15 apresenta as curvas de Blaine em função da energia aplicada, para os três níveis de percentual de sólidos estudados. As retas obtidas apresentaram uma ótima correlação (R^2 superior a 0,99), indicando que a lei de Rittinger pode ser aplicada, conforme demonstrado por DONDA *et al.* (2007). Os resultados indicaram uma geração de Blaine, avaliado pelo índice BSA/kWh/t, ligeiramente superior para a condição de 75% de sólidos (teste padrão).

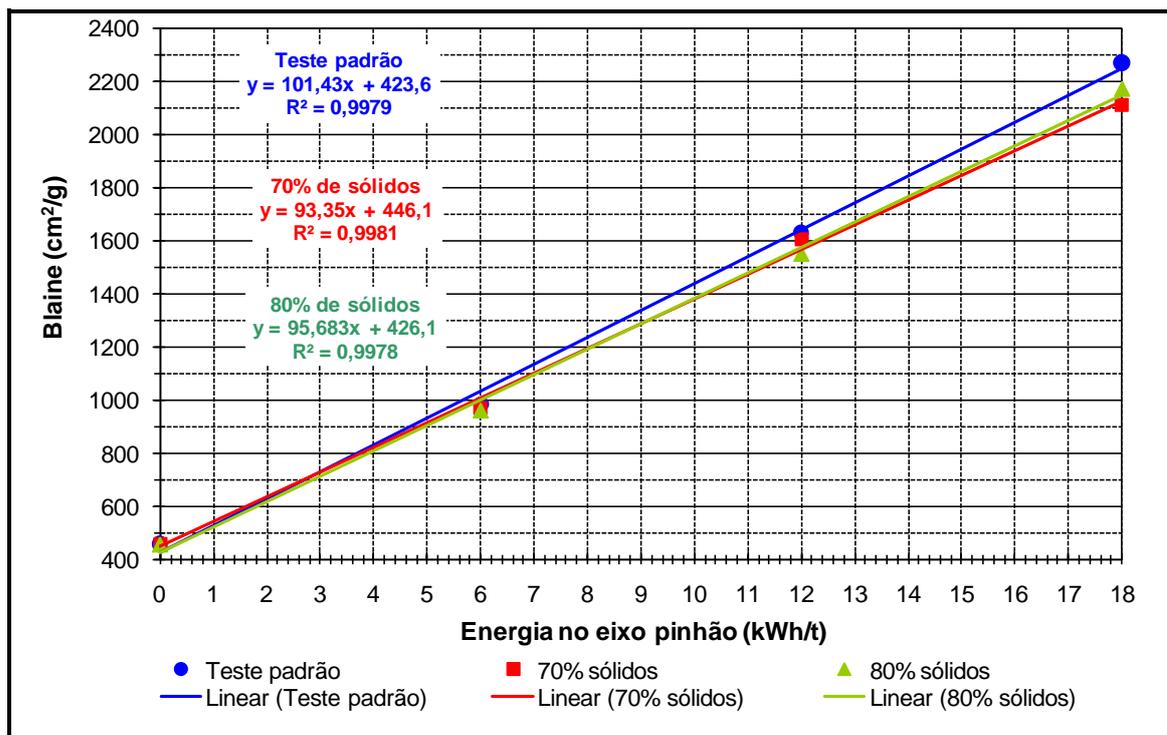


Figura 5.15 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, para três níveis de percentagem de sólidos: 70%, 75% e 80%.

Para avaliar o efeito do percentual de sólidos na geração de partículas ultrafinas e coloidais, foram plotadas as curvas do percentual retido em $10\mu\text{m}$ em função da energia aplicada e do percentual passante em $10\mu\text{m}$ em função do Blaine, conforme visualizado na figura 5.16.

O primeiro gráfico mostra que o efeito do percentual de sólidos na geração de partículas ultrafinas e coloidais não foi significativo, uma vez que as três curvas são praticamente coincidentes. O segundo gráfico mostra uma alta correlação entre o percentual passante em $10\mu\text{m}$ e o Blaine (R^2 superior a 0,99).

Aparentemente, o comportamento reológico da polpa com 80% de sólidos, caracterizado por uma maior tensão limite de escoamento e índice de consistência do fluido, afetou de forma mais significativa a cinética de quebra das partículas mais grosseiras (maiores que $44\mu\text{m}$), conforme visualizado na figura 5.14.

Todas as planilhas dos testes de remoagem encontram-se listadas no Anexo III.

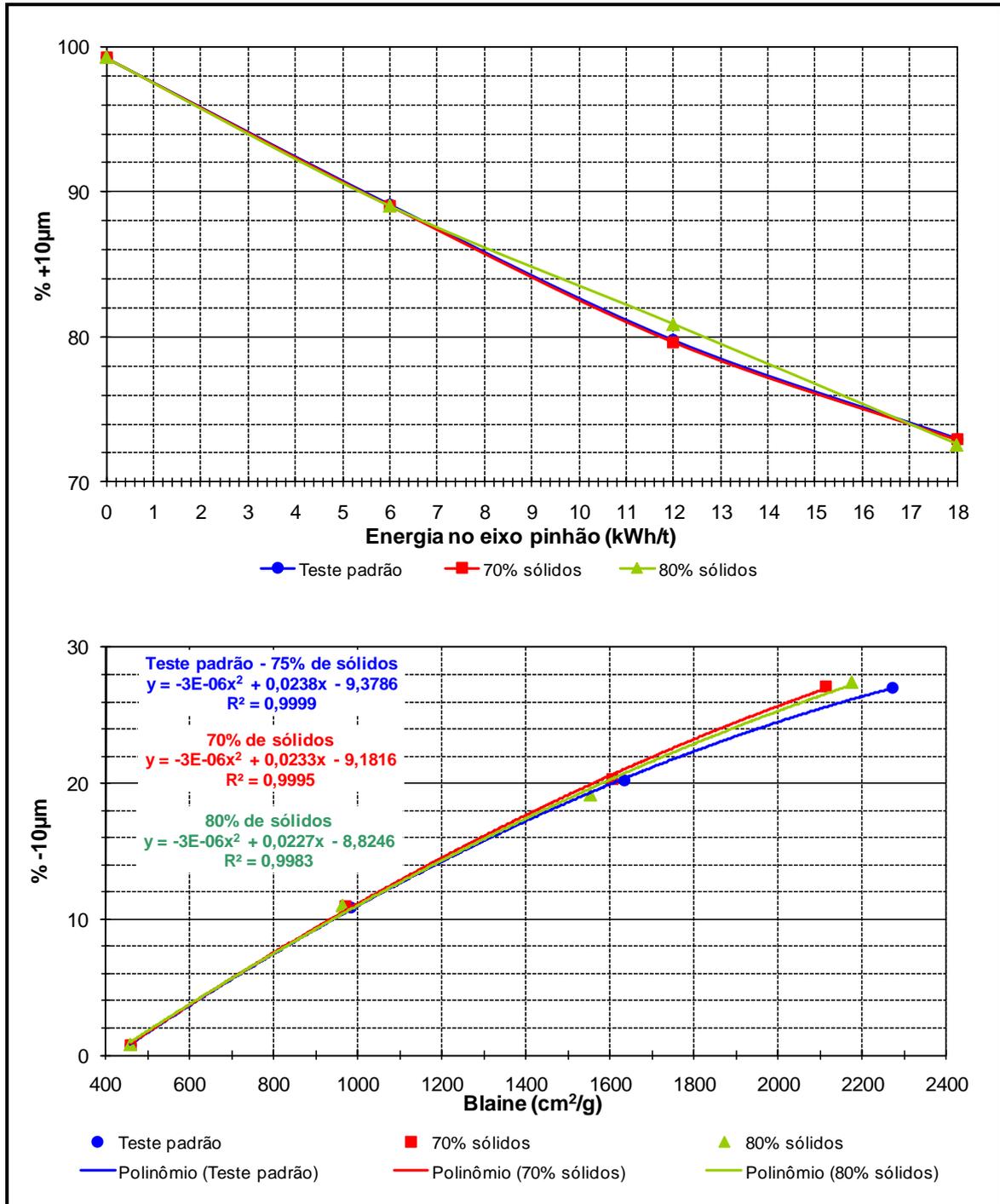


Figura 5.16 - Efeito do percentual de sólidos nas curvas percentual retido em 10µm em função da energia e percentual passante em 10µm em função do Blaine.

5.3.2 Influência da adição dos reagentes selecionados na etapa I

A figura 5.17 mostra as curvas de fluxo obtidas para os testes de remoagem realizados com a adição de 300g/t dos reagentes selecionados na etapa I. Os reagentes selecionados foram: ácido poliacrílico (DPW 410), copolímero sílico acrilato (Bulab 49CT), hexametáfosfato de sódio e ácido cítrico. As curvas do hexametáfosfato de sódio e do copolímero sílico acrilato mostraram valores superiores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente para uma mesma taxa de cisalhamento, se comparados ao teste padrão, para energia aplicada no eixo pinhão de 6kWh/t. Para todos os demais testes, a adição dos reagentes proporcionou redução da tensão de cisalhamento e viscosidade aparente se comparados ao teste padrão, inclusive para o hexametáfosfato de sódio e o copolímero sílico acrilato para energias aplicadas no eixo pinhão de 12kWh/t e 18kWh/t.

As curvas obtidas na figura 5.17 foram ajustadas segundo os modelos de Herschel-Bulkley e Bingham. Os coeficientes obtidos para cada teste são apresentados na figura 5.18. Em comum, todos os reagentes mantiveram o valor da tensão limite de escoamento (coeficiente YS) praticamente constante, mesmo com o aumento do percentual de partículas finas ocasionado pela maior energia aplicada. O efeito de dispersão das partículas ocasionado por esses reagentes provavelmente evitou o efeito de rede com tensão limite de escoamento associado relatado por KLEIN (2002).

No geral, a adição dos reagentes proporcionou redução do coeficiente k . O ácido cítrico e o hexametáfosfato de sódio tornaram a polpa com comportamento mais dilatante.

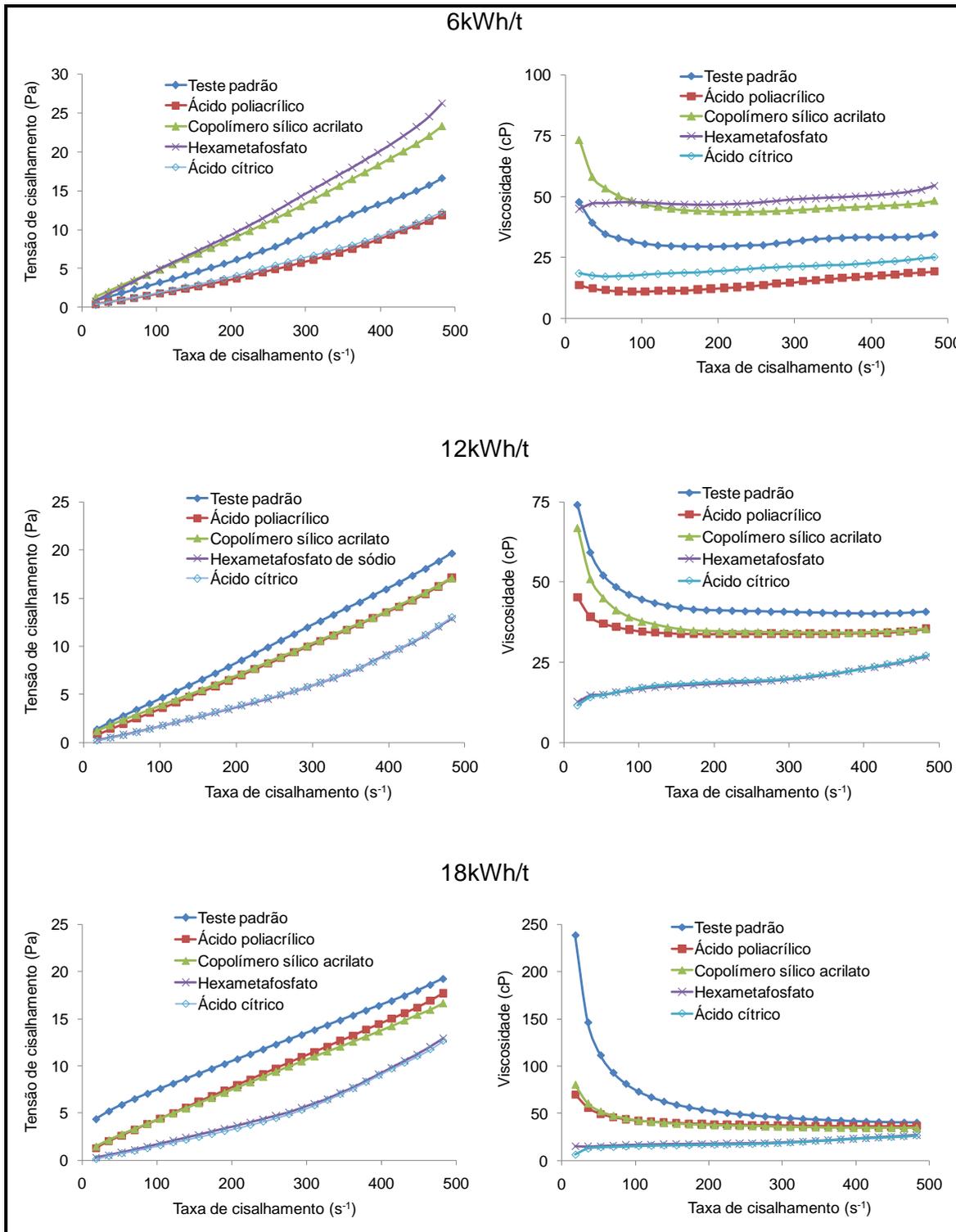


Figura 5.17 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, com adição de 300g/t do potencial aditivo selecionado previamente.

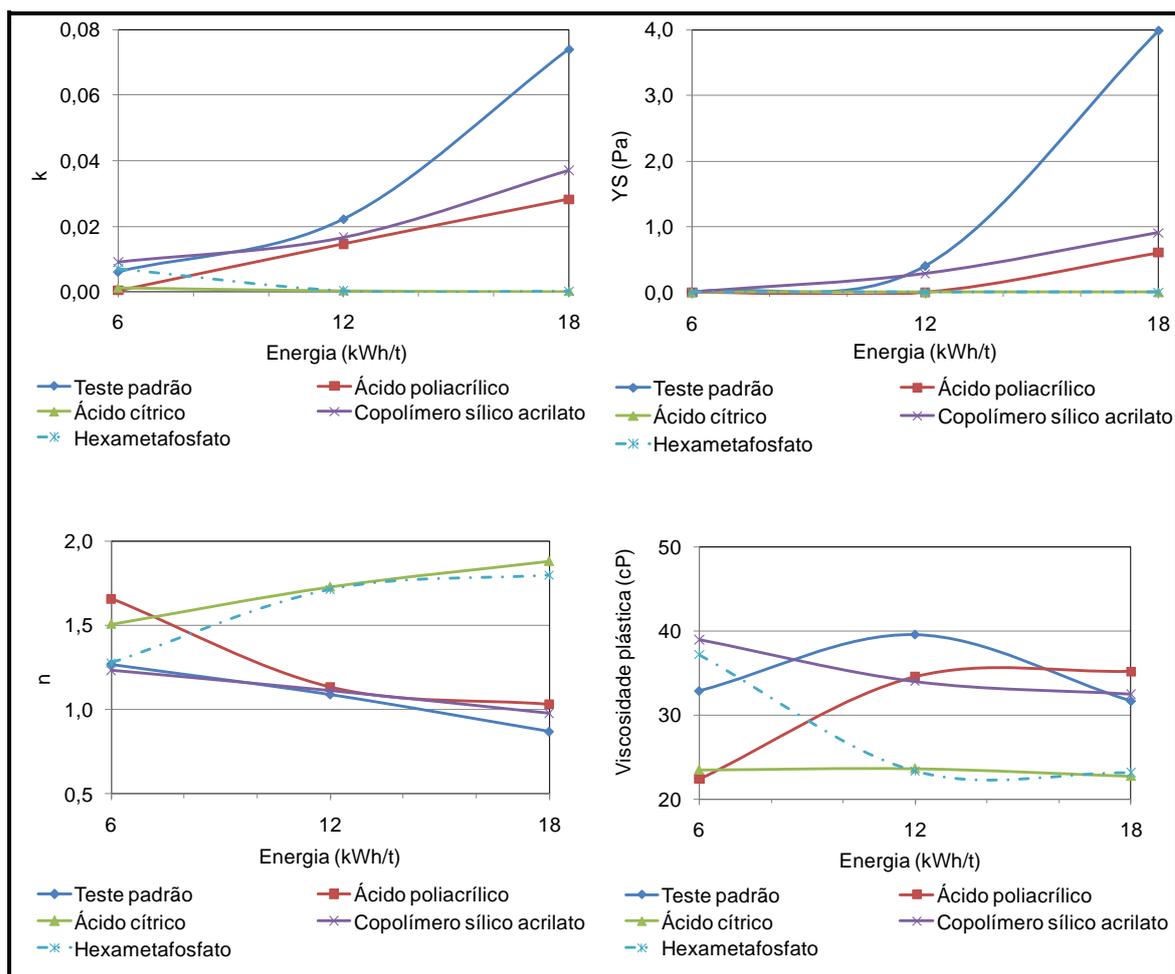


Figura 5.18 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem efetuados com 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente.

A figura 5.19 apresenta as curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, para os reagentes pré-selecionados. Observa-se que as curvas dos testes realizados praticamente se sobrepõem, indicando que o efeito da dosagem de 300g/t dos reagentes testados não foi significativo para a redução do consumo específico de energia.

O segundo gráfico da figura 5.19 apresenta um *zoom* na escala das ordenadas, de 0 a 15% retido em 0,044mm. Observa-se que para essa faixa, as curvas obtidas com a adição de ácido poliacrílico e ácido cítrico são idênticas à curva do teste padrão. O hexametáfosfato de sódio e o copolímero sílico acrilato aumentaram o consumo específico de energia de 12,6kWh/t para 13,1kWh/t (aproximadamente 4%).

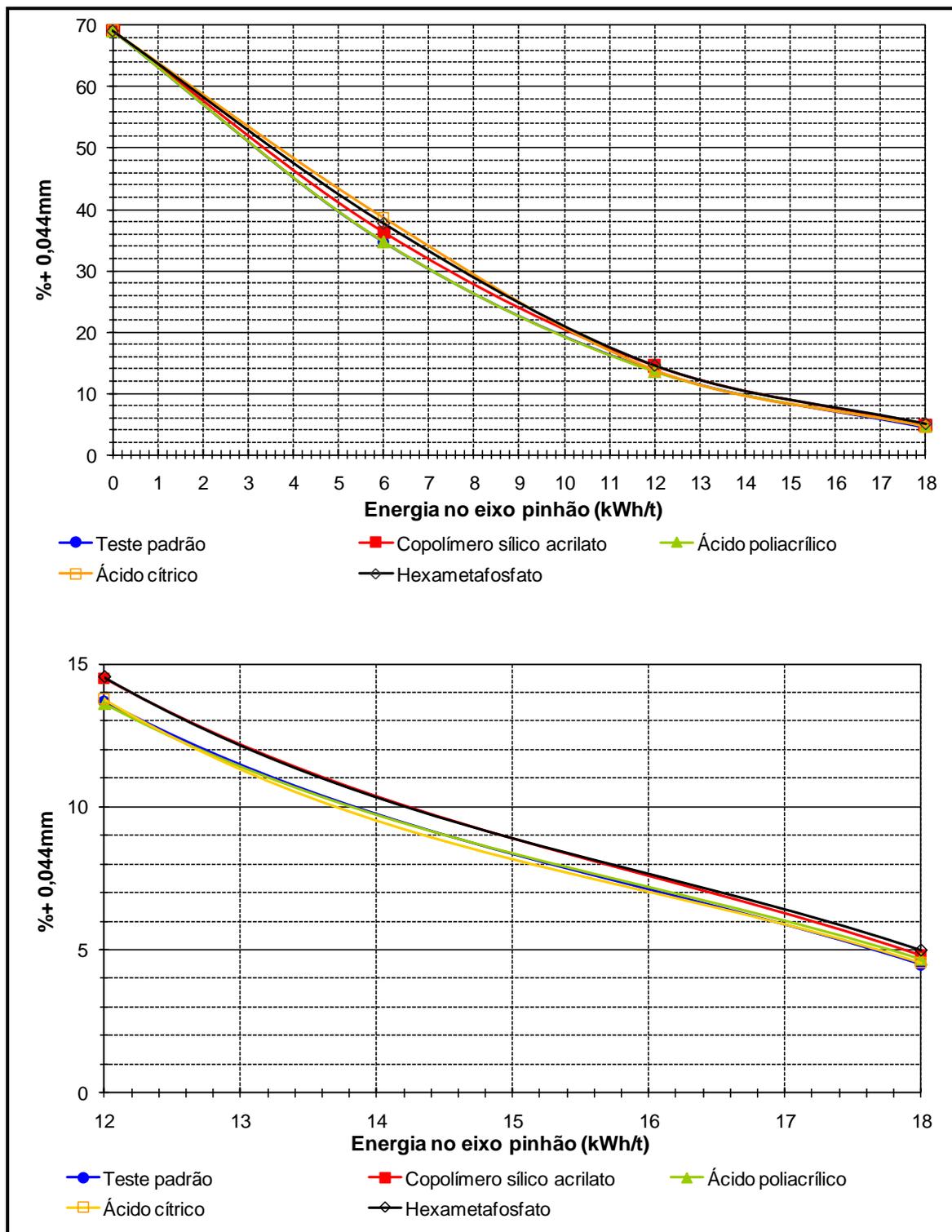


Figura 5.19 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, com adição de 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente.

A figura 5.20 apresenta as curvas de Blaine em função da energia aplicada, para os reagentes pré-selecionados. Novamente, todas as retas obtidas apresentaram uma ótima correlação (R^2 superior a 0,99). Os reagentes estudados reduziram a geração de Blaine por energia aplicada, se comparados ao teste padrão, conforme pode ser visualizado pelas inclinações das retas (índice BSA/kWh/t).

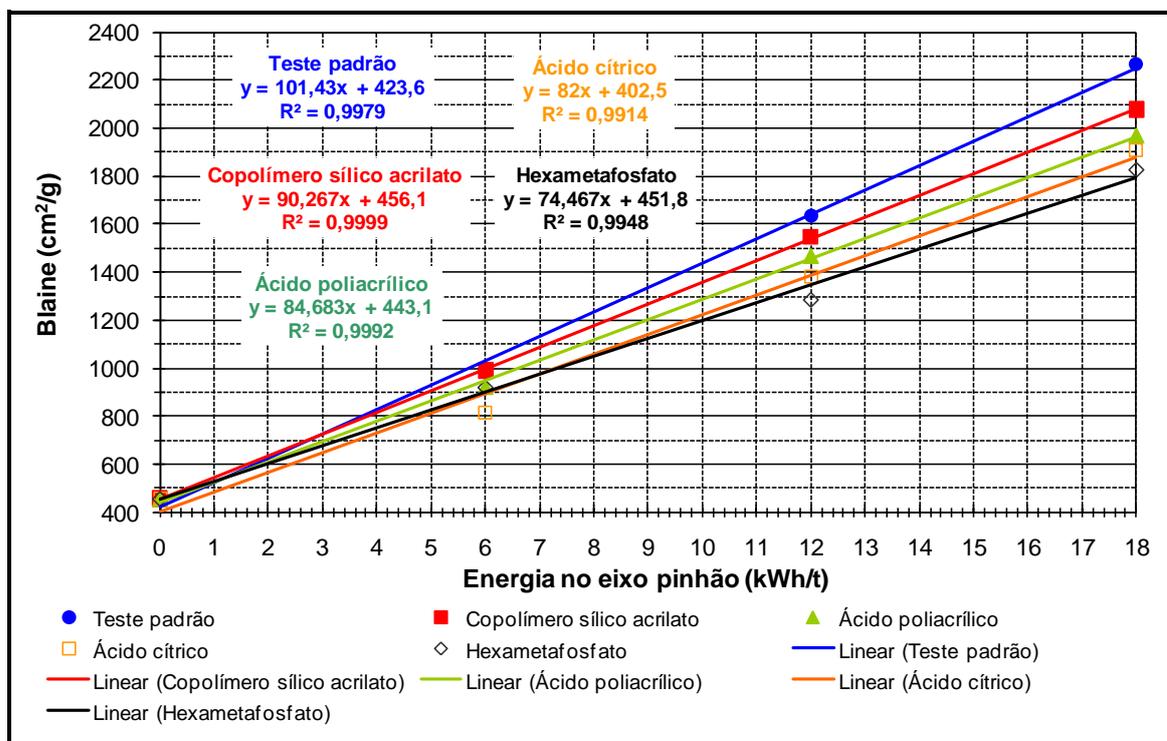


Figura 5.20 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, com adição de 300g/t do potencial aditivo de moagem selecionado previamente.

De todos os reagentes, o hexametáfosfato foi o mais efetivo, apresentando uma redução de BSA/kWh/t de 26% se comparado ao teste padrão.

Conforme demonstrado por DONDA *et al.* (2007), a mineralogia exerce um papel fundamental no índice BSA/kWh/t. A composição básica dos concentrados produzidos pela SAMARCO é hematita compacta, hematita porosa (martítica) e goethita, com pequena fração de quartzo e magnetita. Minérios com maiores percentuais de hematita compacta apresentam menor geração de ultrafinos / superfície. Nos últimos anos, o percentual de goethita dos concentrados produzidos pela SAMARCO vem aumentando, conforme relatado por RESENDE (2009). Isso implica em maior geração

de superfície para uma mesma granulometria e energia aplicada, o que traz, inevitavelmente, perda de produtividade no processo de filtragem. O estudo do impacto desses reagentes na geração de superfície durante a remoagem para concentrados com maiores percentuais de goethita pode representar uma nova linha de pesquisa, sobretudo para o concentrador I, que devido ao tipo de circuito de remoagem, gera concentrados com maior Blaine.

Para avaliar o efeito da adição dos reagentes testados na geração de partículas ultrafinas e coloidais, foram plotadas as curvas do percentual retido em $10\mu\text{m}$ em função da energia aplicada e do percentual passante em $10\mu\text{m}$ em função do Blaine, conforme visualizado na figura 5.21.

O primeiro gráfico mostra que a cinética de quebra das partículas ultrafinas e coloidais utilizando o hexametáfosfato é menor, estando coerente com a curva Blaine em função da energia aplicada apresentada na figura 5.20. Entretanto, apesar de algumas inconsistências no percentual retido em $10\mu\text{m}$ observadas nas curvas do ácido poliacrílico e do ácido cítrico, as outras curvas são praticamente coincidentes, indicando que o efeito desses reagentes não foi significativo para a cinética de quebra das partículas ultrafinas e coloidais. Estudos mais aprofundados deverão ser feitos para viabilizar a utilização desses reagentes como prováveis redutores de geração de Blaine para minérios mais goethíticos.

A inconsistência descrita anteriormente na curva do ácido poliacrílico ocasionou um menor coeficiente de regressão para a curva do percentual passante em $10\mu\text{m}$ em função do Blaine ($R^2 = 0,96$). Para o ácido cítrico e os demais reagentes, os coeficientes de regressão foram superiores a 0,99.

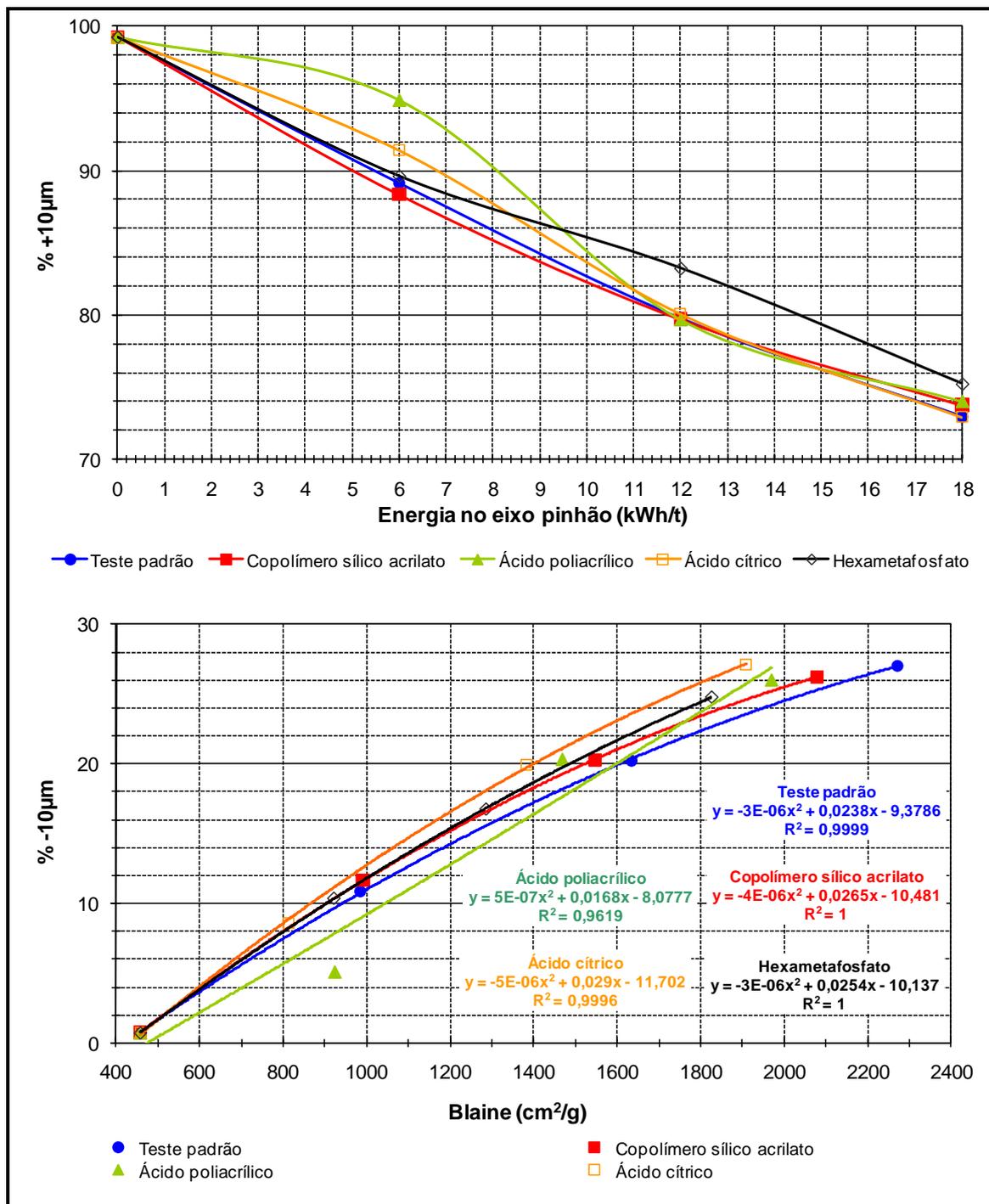


Figura 5.21 - Efeito da adição de 300g/t dos reagentes selecionados na etapa I nas curvas do percentual retido em 10µm em função da energia e do percentual passante em 10µm em função do Blaine.

5.3.3 Influência do pH

Durante a fase de seleção dos potenciais aditivos, os quatro reagentes escolhidos reduziram o índice k e a viscosidade aparente, indicando uma condição de maior estabilidade termodinâmica. Entretanto, as curvas de dispersão ficaram praticamente inalteradas (figuras 5.3, 5.7 e 5.10), sugerindo que estas reduções ocasionadas pela adição destes reagentes não foram significativas ao ponto de aumentar a dispersão das partículas e reduzir o consumo específico de energia na moagem. Talvez o hidróxido de sódio, adicionado para ajustar a polpa para pH 10, já promova o efeito desejado de um aditivo de moagem. O efeito do pH na estabilidade termodinâmica da polpa foi ilustrado na figura 5.2, onde variações de pH de 7 para 10 promovem alterações significativas no grau de dispersão da polpa.

Foram realizados testes de remoagem em três condições de pH: pH natural (7,3), pH 8,5 (ponto de inflexão da curva mostrada na figura 5.2) e pH 10. O objetivo desses testes foi avaliar se variações significativas do grau de dispersão afetam o desempenho da remoagem. As figuras 5.22 e 5.23 mostram as curvas de fluxo e os coeficientes obtidos pelo ajuste dos modelos de Herschel-Bulkley e Bingham para cada condição de pH. Estas curvas estão bem coerentes: aumentando-se o pH de 7,3 para 10, aumenta-se o grau de dispersão, que proporciona menores valores de tensão limite de escoamento e viscosidade aparente. O aumento da energia aplicada, pela maior geração de partículas ultrafinas, aumenta exponencialmente o coeficiente k e a tensão limite de escoamento.

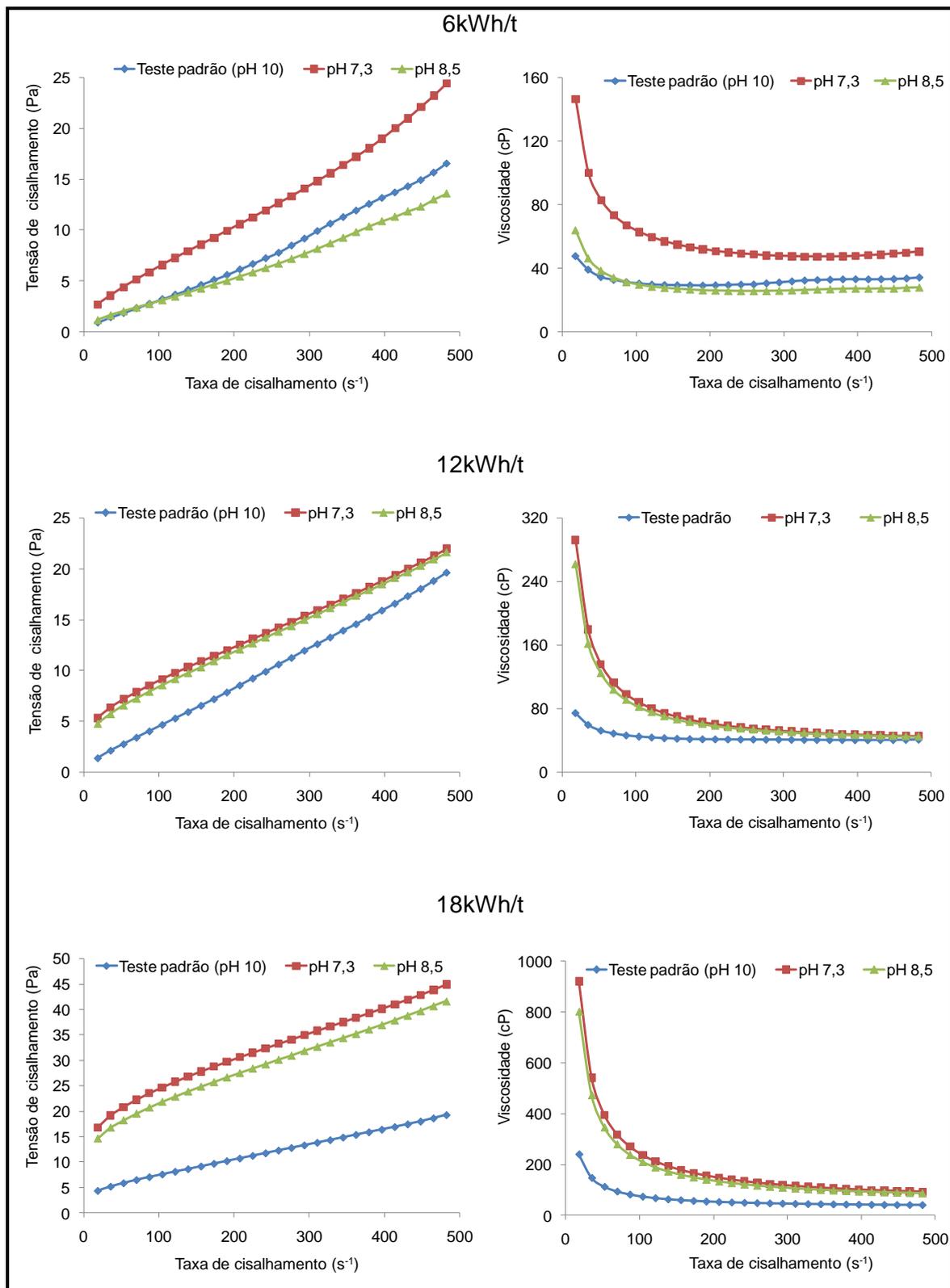


Figura 5.22 - Efeito do pH nas curvas de fluxo obtidas após remoagem.

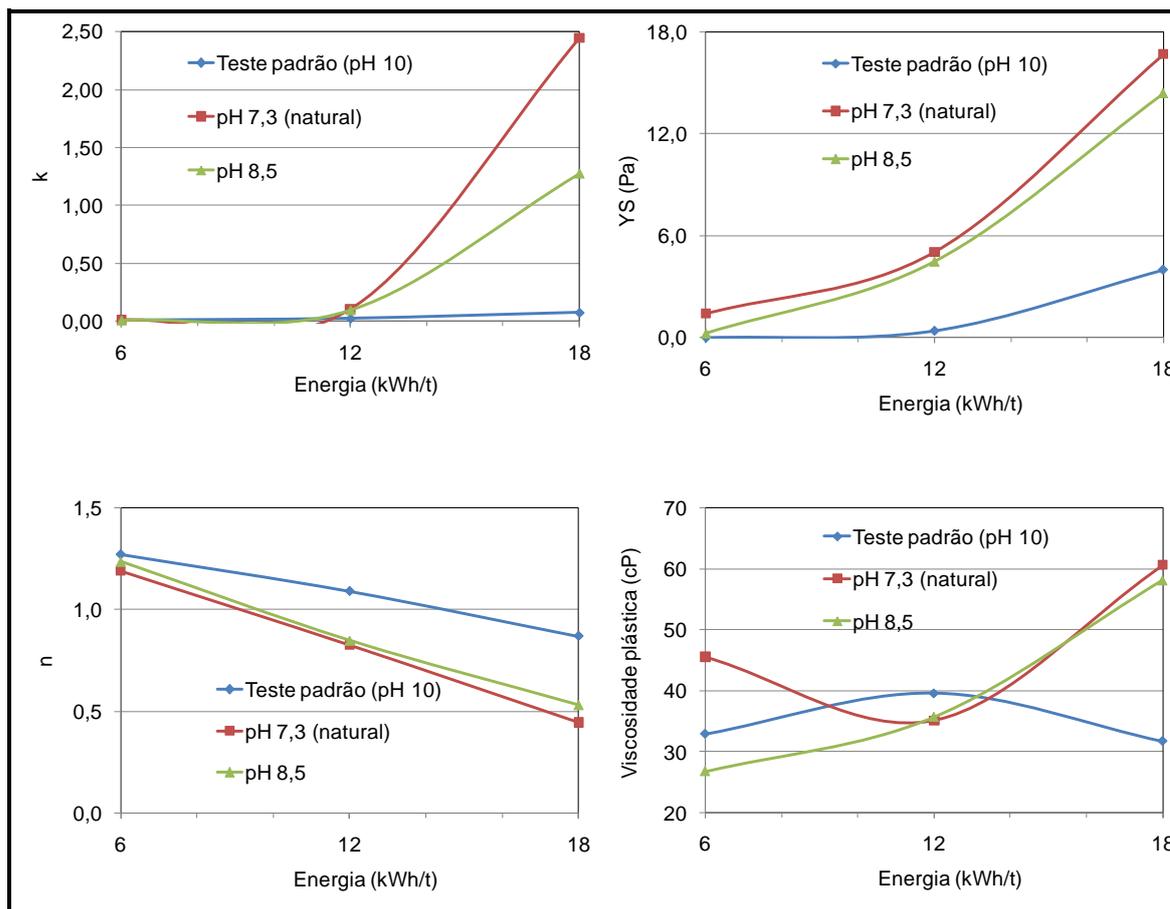


Figura 5.23 - Efeito do pH nos coeficientes da equação de Herschel-Bulkley, tensão limite de escoamento e viscosidade plástica para testes de remoagem.

A figura 5.24 mostra o efeito do pH nas curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada. Observa-se que as curvas obtidas com pH 7,3 e 8,5 são próximas, porém coerentes: aumentando-se o pH da polpa, o consumo específico de energia cai, provavelmente em função da redução da tensão limite de escoamento provocada pela maior estabilidade termodinâmica da polpa. Os consumos previstos em laboratório para 88% passante em 0,044mm foram:

- pH 7,3, consumo específico de 15,3kWh/t (21,4% acima do teste padrão);
- pH 8,5, consumo específico de 14,5kWh/t (15,0% acima do teste padrão);
- pH 10, consumo específico de 12,6kWh/t.

Portanto, o hidróxido de sódio, adicionado nas etapas anteriores à remoagem de concentrado (etapas de deslamagem e flotação mecânica) já funciona como um aditivo de moagem.

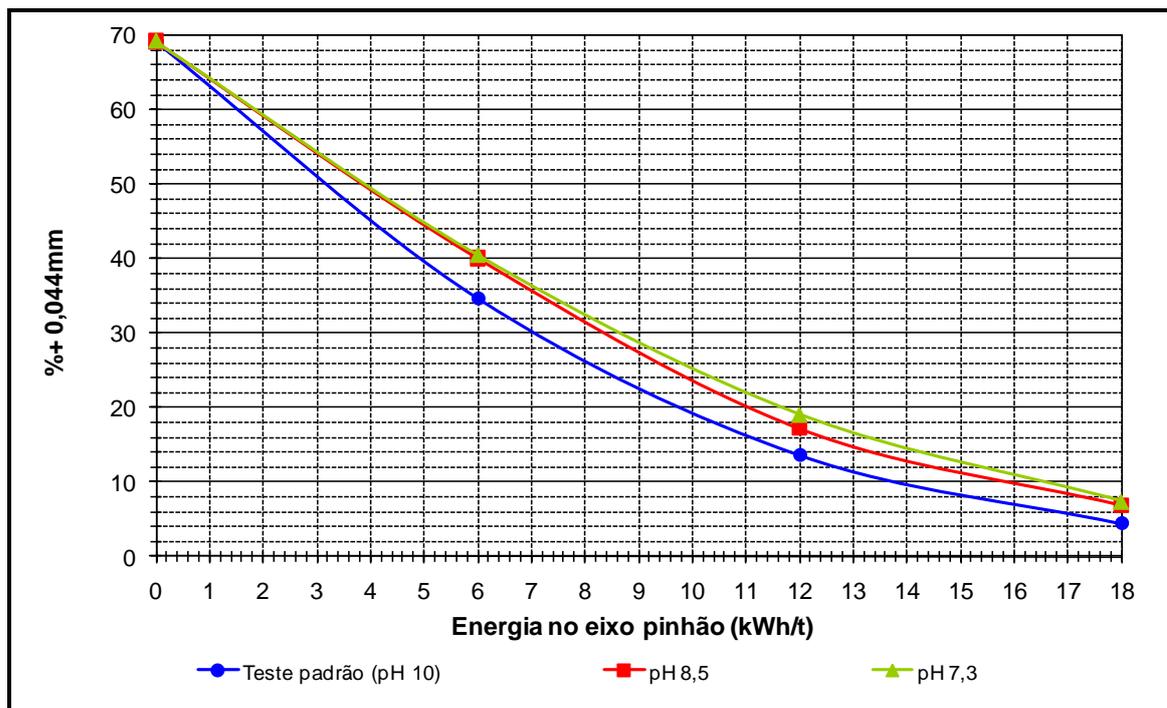


Figura 5.24 - Efeito do pH nas curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada.

A figura 5.25 mostra o efeito do pH nas curvas de Blaine em função da energia aplicada. Observa-se que o coeficiente BSA/kWh/t cresce ligeiramente com o aumento do grau de dispersão da polpa. Considerando o teste padrão como referência, o índice BSA/kWh/t na condição de pH 8,5 reduziu em 5,1%. Para a condição de pH 7,3, esse índice teve uma redução de 8,9%.

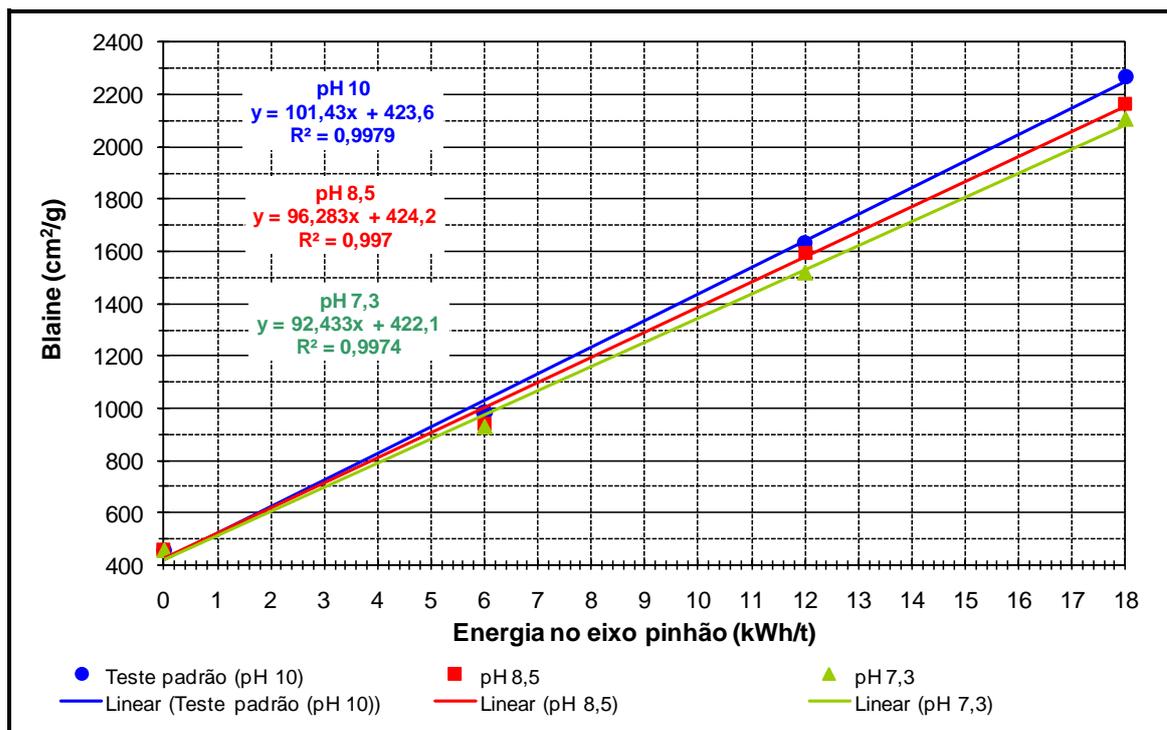


Figura 5.25 – Efeito do pH nas curvas de Blaine em função da energia aplicada.

Para avaliar o efeito do pH na geração de partículas ultrafinas e coloidais, foram plotadas as curvas do percentual retido em 10µm em função da energia aplicada e do percentual passante em 10µm em função do Blaine, conforme visualizado na figura 5.26.

O primeiro gráfico mostra que elevação do pH (e portanto, do grau de dispersão) teve efeito na geração de partículas ultrafinas e coloidais. Este gráfico está coerente com a figura 5.24, onde o mesmo efeito foi observado na cinética de quebra das partículas mais grosseiras ($\geq 44\mu\text{m}$). O segundo gráfico mostra a alta correlação entre o percentual retido em 10µm e o Blaine (R^2 superior a 0,99). Em função desta alta correlação observada, o primeiro gráfico da figura 5.26 está coerente com as curvas apresentadas na figura 5.25. Portanto, o aumento do grau de dispersão aumentou o índice BSA/kWh/t, que está coerente com a maior geração de partículas ultrafinas e coloidais observada.

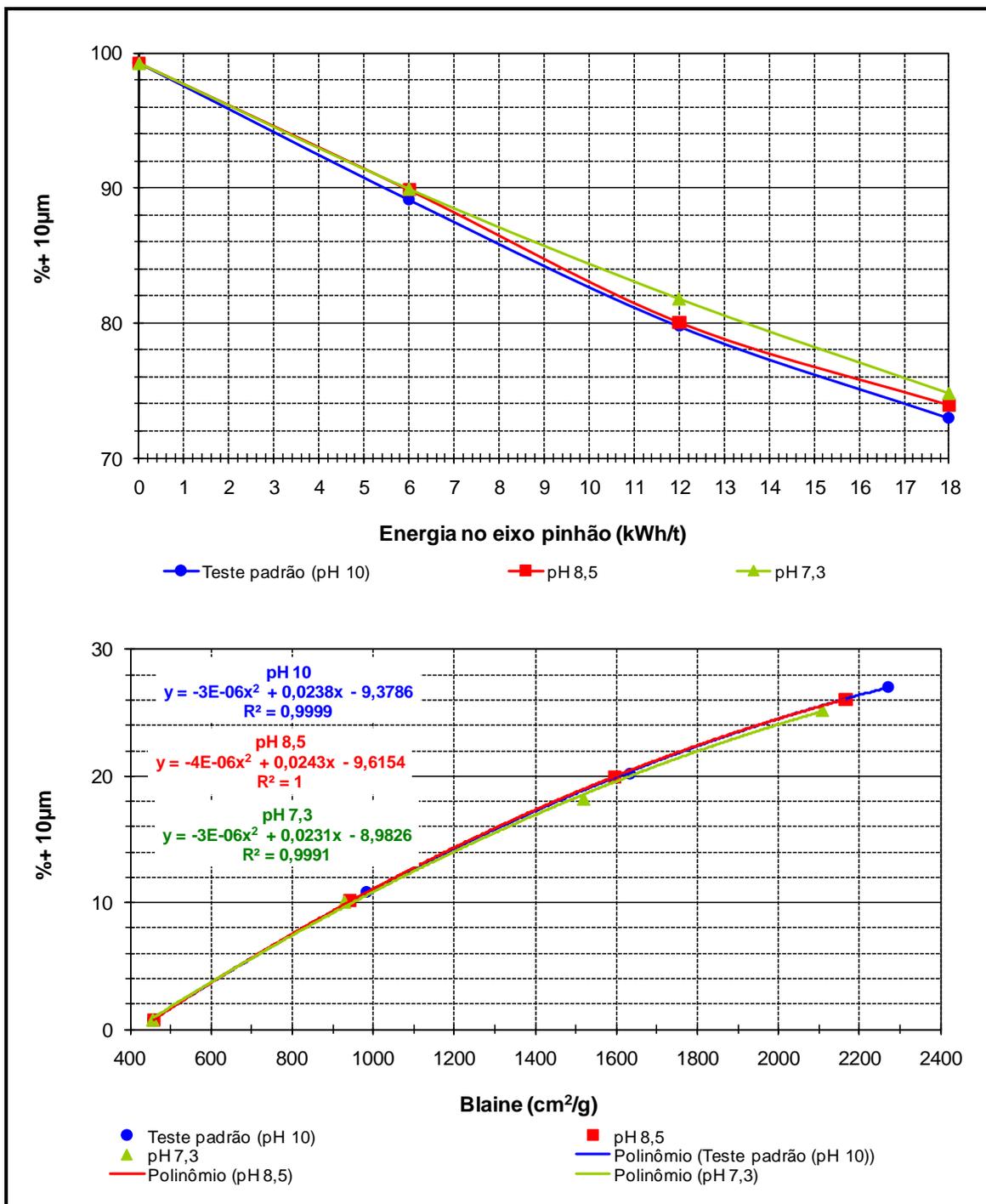


Figura 5.26 - Efeito do pH nas curvas do percentual retido em 10µm em função da energia e do percentual passante em 10µm em função do Blaine.

5.3.4 Influência da adição de cal

A figura 5.27 mostra as curvas de fluxo obtidas para os testes de remoagem realizados com água de processo (*overflow* dos espessadores de lama e de concentrado) e com a adição de 300g/t de cal. Observa-se que as curvas do teste padrão (feito com água destilada) e do teste utilizando água de processo são semelhantes. No entanto, a curva do teste utilizando 300g/t de cal apresenta valores superiores de viscosidade aparente e tensão limite de escoamento, para uma mesma taxa de cisalhamento. Esses valores são ainda mais significativos após 66 minutos de moagem (equivalente a 18kWh/t no eixo pinhão).

As curvas obtidas na figura 5.27 foram ajustadas segundo os modelos de Herschel-Bulkley e Bingham. Os coeficientes obtidos para cada teste são apresentados na figura 5.28. No geral, os índices obtidos para o teste padrão e para o teste realizado com água de processo foram muito semelhantes.

O teste utilizando 300g/t de cal apresentou maiores valores para os coeficientes k e YS , principalmente na condição de 18kWh/t. Devido ao maior número de partículas finas geradas pela maior energia aplicada, aliado a adição de um coagulante, os efeitos de agregação provavelmente tornaram-se mais significativos que os efeitos hidrodinâmicos, proporcionando maiores valores de tensão limite de escoamento. Esses efeitos são os dois tipos principais de interações que contribuem para as propriedades reológicas (KLEIN, 2002).

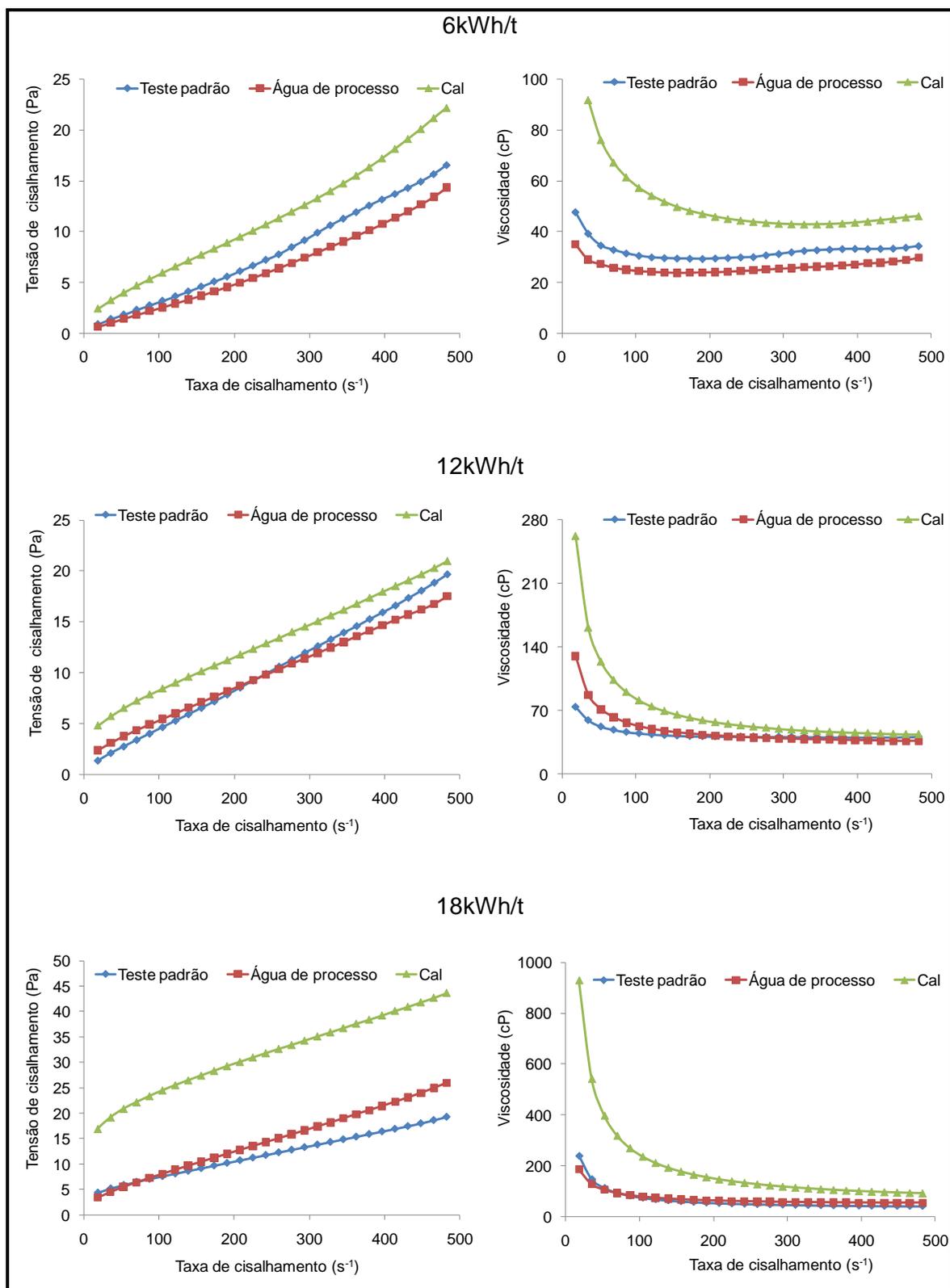


Figura 5.27 - Curvas de fluxo obtidas após remoagem, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.

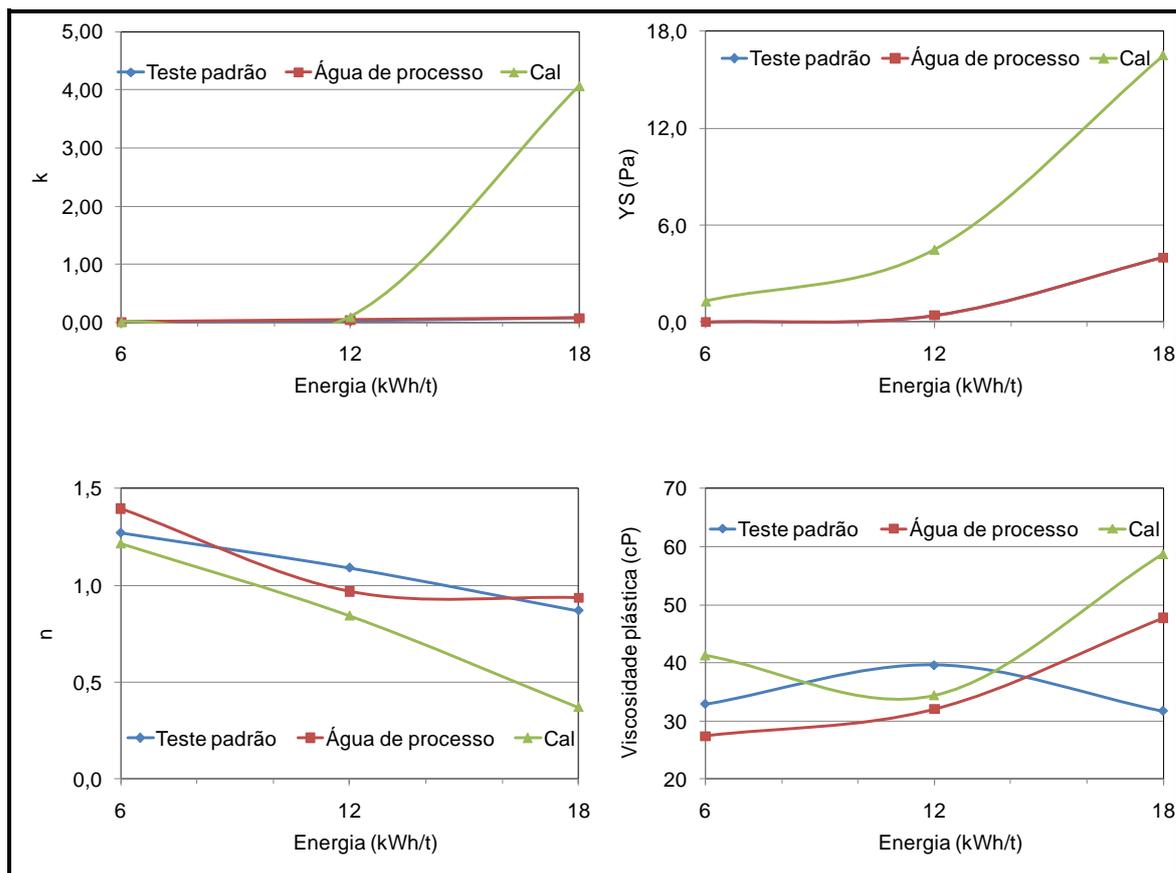


Figura 5.28 - Coeficientes da equação de Herschel-Bulkley e viscosidade plástica para testes de remoagem efetuados com 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.

Além dos maiores valores de tensão limite de escoamento, o aumento da energia aplicada para o teste utilizando 300g/t de cal tornou a polpa mais pseudoplástica.

A figura 5.29 apresenta as curvas de percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada. Observa-se que as curvas do teste padrão e do teste efetuado com água de processo se sobrepõem, indicando que a concentração de íons cálcio presentes na água de processo do concentrador I da SAMARCO não é significativa ao ponto de modificar o consumo específico de energia para uma mesma granulometria. Entretanto, altas concentrações de cálcio e seus complexos podem aumentar o consumo específico de energia, conforme evidenciado pelo teste executado com 300g/t de cal. Para essa condição, o consumo previsto para uma granulometria de 88% passante em 0,044mm foi de 16kWh/t (cerca de 27% superior ao teste padrão).

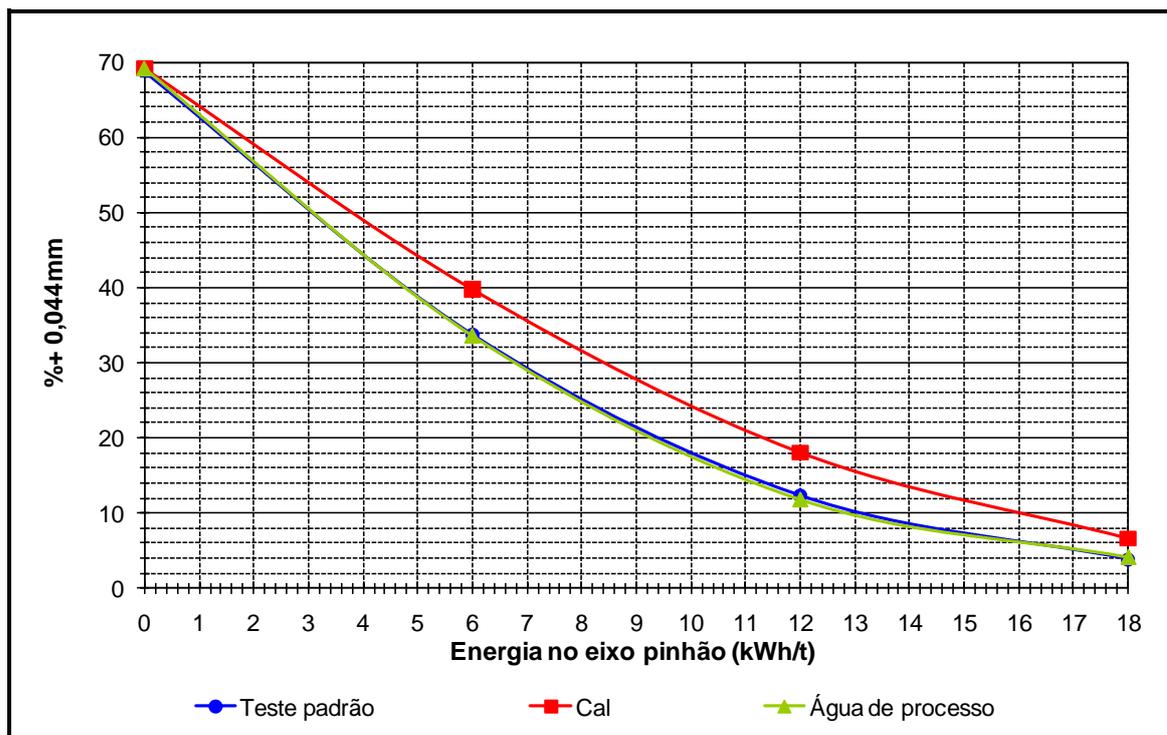


Figura 5.29 - Curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.

A figura 5.30 apresenta as curvas de Blaine em função da energia aplicada. Novamente, os ajustes das retas foram ótimos (R^2 maior que 99%). Observa-se que a geração de superfície (índice BSA/kWh/t) do teste realizado com 300g/t de cal é ligeiramente menor do que a dos testes realizados com água destilada e água de processo. Provavelmente a adição de 300g/t de cal afetou principalmente a cinética de quebra das partículas mais grosseiras ($\geq 44\mu\text{m}$), uma vez que da análise da curva do percentual retido em 0,044mm em função da energia do teste com adição de 300g/t de cal (figura 5.29) seria esperado também um menor percentual de partículas ultrafinas e coloidais, o que ocasionaria uma redução mais significativa no índice BSA/kWh/t do que a observada na figura 5.30.

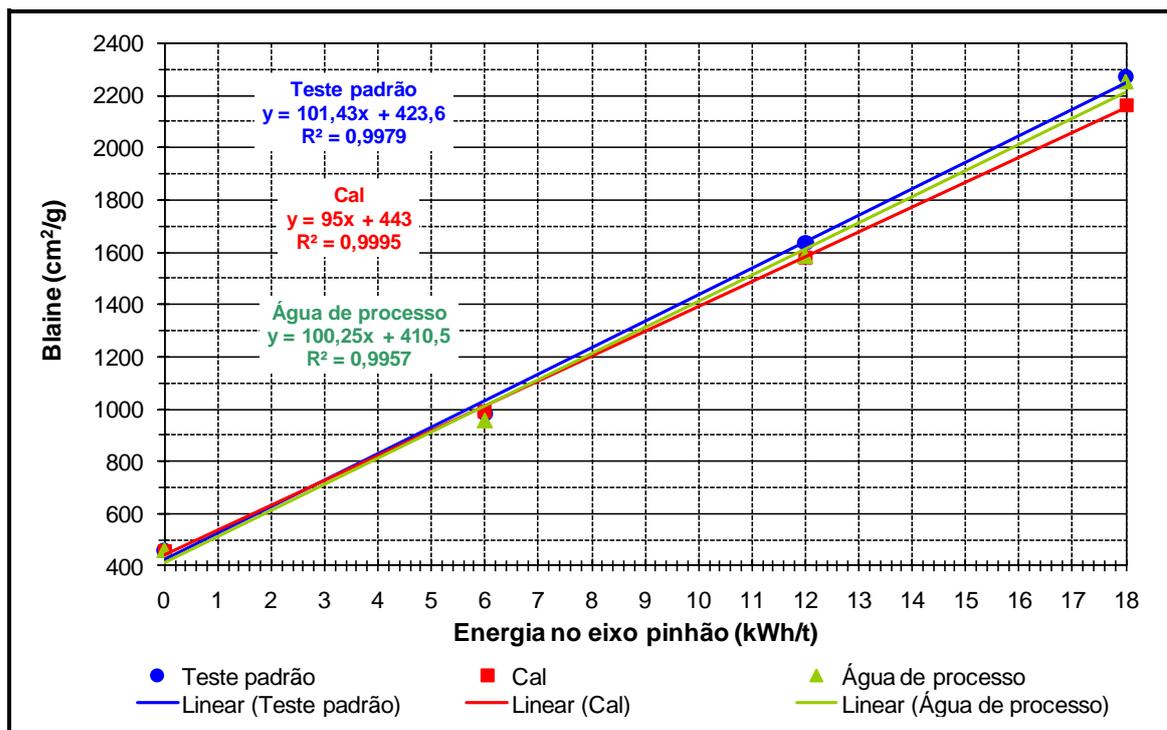


Figura 5.30 - Curvas de Blaine em função da energia aplicada, com adição de 300g/t de cal ou com utilização de água de processo.

Para avaliar o efeito da adição de 300g/t de cal ou da utilização de água de processo na geração de partículas ultrafinas e coloidais, foram plotadas as curvas do percentual retido em 10 μ m em função da energia aplicada e do percentual passante em 10 μ m em função do Blaine, conforme visualizado na figura 5.31.

O primeiro gráfico confirma a hipótese feita anteriormente de que a adição de 300g/t de cal afeta principalmente a cinética de quebra das partículas grosseiras. Os índices BSA/kWh/t mostrados na figura 5.30 estão coerentes com as curvas mostradas no primeiro gráfico da figura 5.31.

Novamente houve uma alta correlação entre o percentual passante em 10 μ m e o Blaine (R^2 superior a 0,99), conforme mostrado no segundo gráfico da figura 5.31.

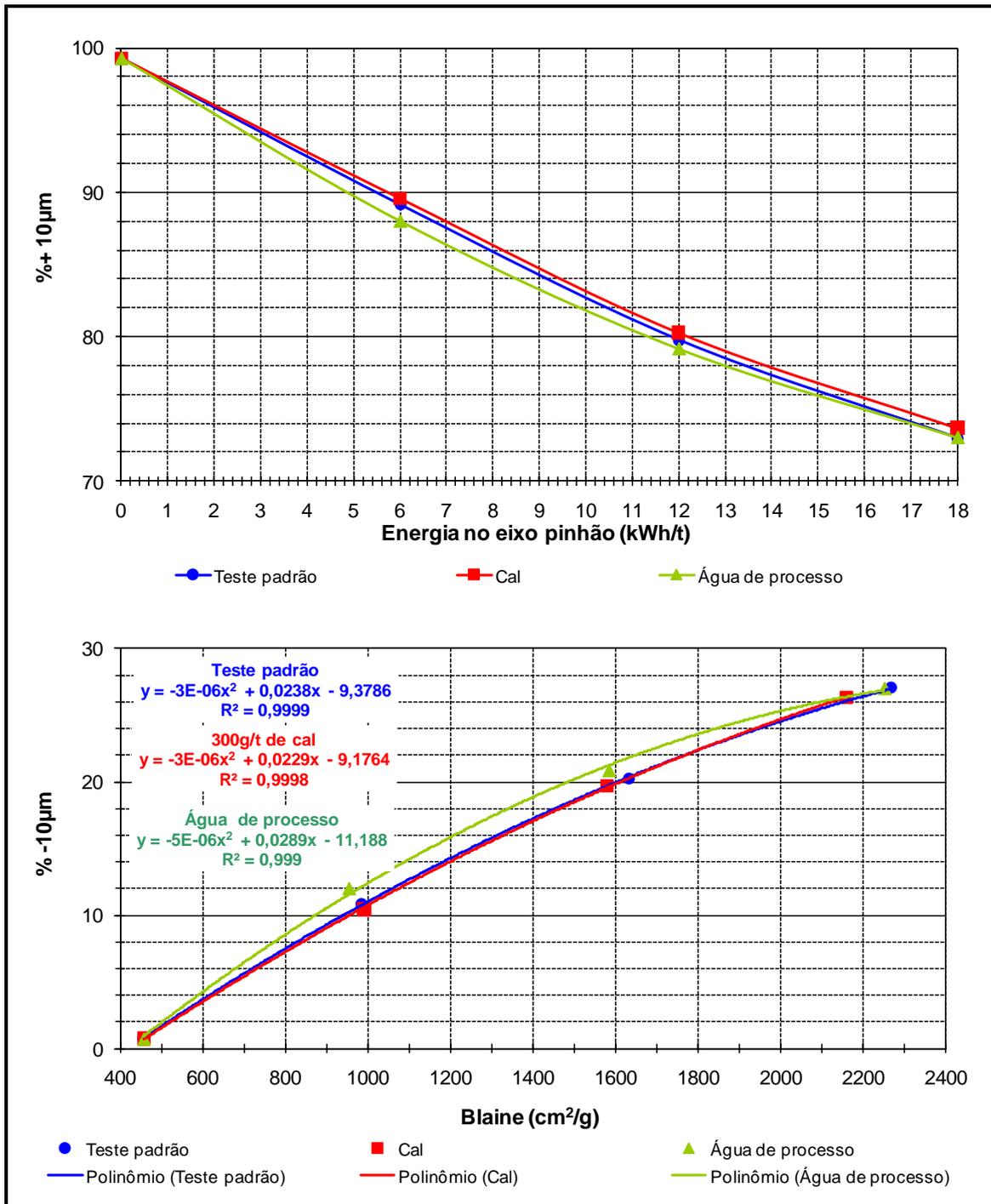


Figura 5.31 - Efeito da utilização de água de processo ou da adição de 300g/t de cal nas curvas do percentual retido em 10µm em função da energia e do percentual passante em 10µm em função do Blaine.

6 CONCLUSÕES

A determinação do grau de dispersão utilizando tubo de sedimentação, em conjunto com a análise das curvas de fluxo e dos coeficientes dos modelos de Herschel-Bulkley e Bingham, mostrou-se adequada para descrever o comportamento reológico da polpa em diferentes condições de agregação e dispersão.

Nenhum dos vinte reagentes avaliados na etapa I deste trabalho promoveu aumentos significativos no grau de dispersão da polpa. Destes vinte reagentes, seis promoveram redução do índice de consistência do fluido e da viscosidade plástica, com dosagem de 300g/t: três ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610), copolímero sílico acrilato (BULAB 49CT), ácido cítrico e hexametáfosfato de sódio. O aumento da dosagem para 600g/t e 900g/t não alterou de forma significativa as curvas de fluxo geradas. O ácido poliacrílico de menor peso molecular (DPW 410) promoveu maiores reduções de viscosidade plástica, tensão limite de escoamento e índice de consistência do fluido se comparado aos outros dois ácidos poliacrílicos testados.

A adição de 300g/t dos quatro reagentes selecionados na parte I (DPW 410, BULAB 49CT, ácido cítrico e hexametáfosfato de sódio) não promoveu redução no consumo específico de energia ao se avaliar as curvas do percentual retido em 0,044mm em função da energia aplicada, apesar da redução do índice de consistência do fluido e da estabilização da tensão limite de escoamento observada. Entretanto, a adição desses reagentes promoveu redução na geração de Blaine por energia aplicada. O hexametáfosfato de sódio foi o mais eficiente, reduzindo o índice BSA/kWh/t em 26%.

Os reagentes testados não foram efetivos porque não alteraram de forma significativa o grau de dispersão da polpa em pH 10,0. O aumento do pH de 7,3 (pH natural) para 10,0 aumentou o grau de dispersão da polpa de 3% para 28%. Esse aumento proporcionou menores valores de tensão limite de escoamento e viscosidade aparente, e uma redução no consumo específico de energia de 17,4%. Portanto, o hidróxido de sódio, adicionado às etapas anteriores de remoagem, já atua como um aditivo de moagem.

O aumento do tempo de moagem, convertido em energia aplicada, provocou aumentos exponenciais no índice de consistência do fluido e na tensão limite de escoamento para os testes onde foram avaliados os efeitos do percentual de sólidos, da adição de cal e do pH. A redução do pH, o aumento do percentual de sólidos e adição de 300g/t de cal promoveram aumentos ainda mais significativos nessas curvas. Para todos esses testes, o aumento da energia aplicada provocou uma mudança no comportamento do fluido, de dilatante para pseudoplástico, com tensão limite de escoamento associada.

Não houve diferenças significativas no consumo específico de energia para os testes executados com 70% e 75% de sólidos. Entretanto, o consumo específico previsto para o teste realizado com 80% de sólidos foi 22% superior ao teste padrão (realizado com 75% de sólidos). A geração de Blaine por energia aplicada foi ligeiramente superior para a condição de 75% de sólidos.

Não houve diferenças no consumo específico de energia e na geração de Blaine para os testes executados com água destilada e com água de processo, indicando que a concentração de íons cálcio presentes na água de processo do concentrador I da SAMARCO não é significativa ao ponto de modificar o desempenho da moagem. Entretanto, a adição de 300g/t de cal provocou um aumento de 27% no consumo específico de energia, com aumentos significativos na tensão limite de escoamento e no índice de consistência do fluido, principalmente para a condição de 18kWh/t.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a complementação desse estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

- 1) estudar o impacto da adição de hexametáfosfato de sódio, copolímero sílico acrilato, ácido cítrico e ácido poliacrílico na geração de superfície durante a remoagem de concentrados com maiores percentuais de goethita (ou perda por calcinação - %PPC);
- 2) estudar a influência do grau de dispersão e do comportamento reológico da polpa no consumo específico de energia nas etapas de pré-moagem e moagem primária;
- 3) estudar a influência do comportamento reológico da polpa em outras etapas unitárias, como flotação, espessamento e filtração;
- 4) avaliar o desempenho dos dispersantes estudados nesse trabalho em outras faixas de pH.

8 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados desta tese demonstraram que o consumo específico de energia da remoagem de concentrados de minério de ferro é afetado pelo grau de dispersão da polpa. O aumento da estabilidade termodinâmica da polpa pode gerar reduções significativas no consumo específico de energia e/ou aumento na produtividade em instalações para remoagem de *pellet feed*. O hidróxido de sódio mostrou ser um aditivo de moagem adequado, desde que haja aumento significativo do grau de dispersão.

Neste trabalho, os parâmetros reológicos da polpa, obtidos por meio de ajustes dos modelos de Herschel-Bulkley e Bingham, foram correlacionados com o grau de dispersão e com os consumos específicos de energia obtidos para curvas de Blaine e percentual retido em 0,044mm. Através de testes simples de laboratório, porém realizados de forma criteriosa, todos os parâmetros foram correlacionados e discutidos, gerando um maior conhecimento da influência da reologia nos processos de remoagem de minério de ferro.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. (1989) *An introduction to rheology*. 1ª ed. New York: Elsevier, 199p. (Rheology Series, 3).

BATISTELI, G. M. B. (2007) *Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 118p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BRAGANÇA, A. C. C. R. (2008) *Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 102p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BRANDÃO, P. R. G. (2009) *Agregação e dispersão*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG (notas de aula).

CHAVES, A. P.; NAKAE, T.; SALGADO, O. R. (2006) Bombeamento de polpas. In: CHAVES, A. P. *Teoria e prática do tratamento de minérios – volume 1*. São Paulo: Signus Editora. Capítulo 2, p.83-166.

CORTI, G. S.; BOTARO, V. R.; GIL, L. F. (2004) *Estudo da capacidade de complexação de íons Cu^{2+} em solução aquosa usando celulose modificada com anidrido succínico e com poliaminas*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, nº 5, p. 313-317.

DARLEY, H. C. H.; GREY, G. R. (1988) Rheology of drilling fluids. In: *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, fifth edition, Gulf Publishing Company, chapter 5, p. 184-281.

DONDA, J. D. (2003) *Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinho de bolas*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 124p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

DONDA, J. D. (2005) *Considerações gerais sobre o concentrador do projeto da terceira usina de pelotização (segundo concentrador de Germano)*. Revisão 01, maio (relatório interno da Samarco Mineração SA).

DONDA, J. D.; RABELO, P. J. B.; PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P. (2007) *Rittinger, 140 anos depois: uma aplicação a uma instalação industrial*. Metalurgia e Materiais, vol 63, setembro, p.463-466.

FERREIRA, E. E. (2002) *Lamas de minérios de ferro: agregação / dispersão e reologia*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 190p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. (2005) *Reologia de suspensões minerais: uma revisão*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 58(1): 83-87.

GALÉRY, R. (1985) *Influência do estado de dispersão na flutuabilidade do sistema willemita / dolomita*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 92p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GALÉRY, R.; de ARAUJO, A. C. (1987) *Técnicas para analisar dispersão/agregação*. In: *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, 12. Rio de Janeiro, v.1, p.234-248.

HE, M. (2007) *Slurry rheology of industrial minerals and its effects on wet ultra-fine grinding*. Sweden: Luleå University of Technology, 68p. (Doctoral Thesis).

KATZER, M.; KLIMPEL, R.; SEWELL, J. (1981) *Example of the laboratory characterization of grinding aids in the wet grinding of ores*. Mining Engineering, October, p. 1471-1476.

KISSA, E. (1999) *Dispersions – Characterization, Testing, and Measurement*. Marcel Dekker, Inc., 1st ed. New York, v.84.

KLEIN, B. (1992) *Rheology and stability of magnetite dense media*. Vancouver: The University of British Columbia, 442p. (Thesis of Doctor of Philosophy, Department of Mining and Mineral Process Engineering).

KLEIN, B. (2001) *Observations on the rheopectic properties of nickel laterites*. CIM Conference of Metallurgists, UBC-McGill Symposium, Toronto.

KLEIN, B. (2002) *Rheology of mineral suspensions*. Curso Interno da Samarco Mineração SA (apostila de curso).

KLIMPEL, R. R. (1982) *Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits*. Mining Engineering, December, p. 1665-1668.

KLIMPEL, R. R. (1983) *Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits – part 2*. Mining Engineering, January, p. 21-26.

KLIMPEL, R. R. (1987) *Grinding aids based on slurry rheology control*. Reagents in the Mineral Industries, P. SOMASUNDURAN and B. MOUDGIL, eds., Marcel Dekker, New York, pp. 179-194.

KLIMPEL, R. R. (1997) *The impact on industrial grinding circuits of changing and/or controlling the slurry rheology*. Comminution Practices, Ed. S. K. KAWATRA, SME, Littleton Colorado, pp.1-9.

KLIMPEL, R. R. (1999) *The selection of wet grinding chemical additives based on slurry rheology control*. Powder Technology 105, p. 430-435.

KLIMPEL, R. R.; HANSEN, R. D. (1989) *The chemistry of mineral slurry rheology control grinding aids*. Minerals and Metallurgical processing, Vol. 6, No. 1, p. 35-43.

LABA, D. (1993) *Rheological properties of cosmetics and toiletries*. New York: Marcel Dekker, p. 09-33.

LATIRGES, B; SOMASUNDARAN, P. (1992) Ultra fine grinding of yttria stabilized zirconia in polyacrylic acid solutions. In: KAWATRA, S. *Comminution: theory and practice*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, CO, p. 585-598.

MARTINS, M.; FILHO, L. S. L.; LEITE, P. R.; de LIMA, J. R. B. (2004) *Influência do estado de agregação da polpa na flotação de quartzo, apatita e calcita*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59 (1): 55-60.

MAPA, P. S. (2006) *Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.* Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 190p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MOYS, M. H. (1989) *Slurry rheology – the key to a further advance in grinding mill control*. SAG' 89, The University of British Columbia, Vancouver Press et al., 1986, Press Syndicate of the University of Cambridge, New York, pp. 713-727.

NASCIMENTO, C. R. (2007) Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Capítulo 25, p.425-450.

PEREIRA, C. A. (2004) *Estudo da dispersão e concentração de minério calamínico*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 119p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

POSSA, M. V.; de LIMA, J. R. B. (2000) *Comportamento reológico de polpas de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 37p. (Série Tecnologia Mineral, 77).

RABELO, P. J. B. (1994) *Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da Mina de Alegria, Mariana, MG*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 304p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

RESENDE, A. J. C. (2009) *Influência da perda por calcinação na sedimentação de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.* Belo Horizonte: Escola

de Engenharia da UFMG, 67p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

ROWLAND JR, C. A. (1986) Ball Mill scale-up – diameter factors. In: SOMASUNDARAM, P. *Advances in Mineral Processing*. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 606-617.

SAMPAIO, D. A. (2002) *Estudo das propriedades de concentrados de minérios de ferro da Samarco Mineração S.A. e sua influência no potencial de entupimento no mineroduto*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 158p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SHAW, D. J. (1992) Rheology. In: *Introduction to Colloid and Surface Chemistry*, Butterworths-Heinemann Ltd, fourth edition, chapter 9, p. 244-261.

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

SILVA, G. M. A. (1994) *Estudos sobre o estado de agregação de suspensões de um minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 145p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SILVESTRE, M. O. (2007) *Estudo do estado de dispersão das partículas em polpa de minério sulfetado de chumbo-zinco*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 90p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SKELLAND, A. H. (1967) *Asymptotic rates of heat or mass transfer in non-newtonian laminar flow*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals.6(1): 148.

STEFFE, J. F. (1996) *Rheological methods in food process engineering*. 2^a ed. East Lansing: Freeman Press, 418p.

TANGSATHITKULCHAI, C. (2003) *The effect of slurry rheology on fine grinding in a laboratory ball mill*. International Journal of Mineral Processing, 69, p. 29-47.

TURRER, H. D. G. (2007) *Polímeros depressores na flotação de minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 174p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

TURRER, H. D. G.; BEHRING, R. S.; JUNIOR, A. M. A.; DOELLINGER, T. M.; PASSIGATI, V. P.; FONSECA, M. C.; PERES, A. E. C. (2009) *Influência da cal na filtração e pelotamento*. XXIII ENTMMME, Gramado – RS.

VANDRESEN, S. (2007) *Caracterização físico-química e comportamento reológico de sucos de cenoura e laranja e suas misturas*. Florianópolis: UFSC, 133p. (Dissertação, Mestrado em Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos).

VIEIRA, M. G. (2008) *Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 90p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

10 ANEXOS

Anexo I – Curvas de fluxo obtidas para a etapa I

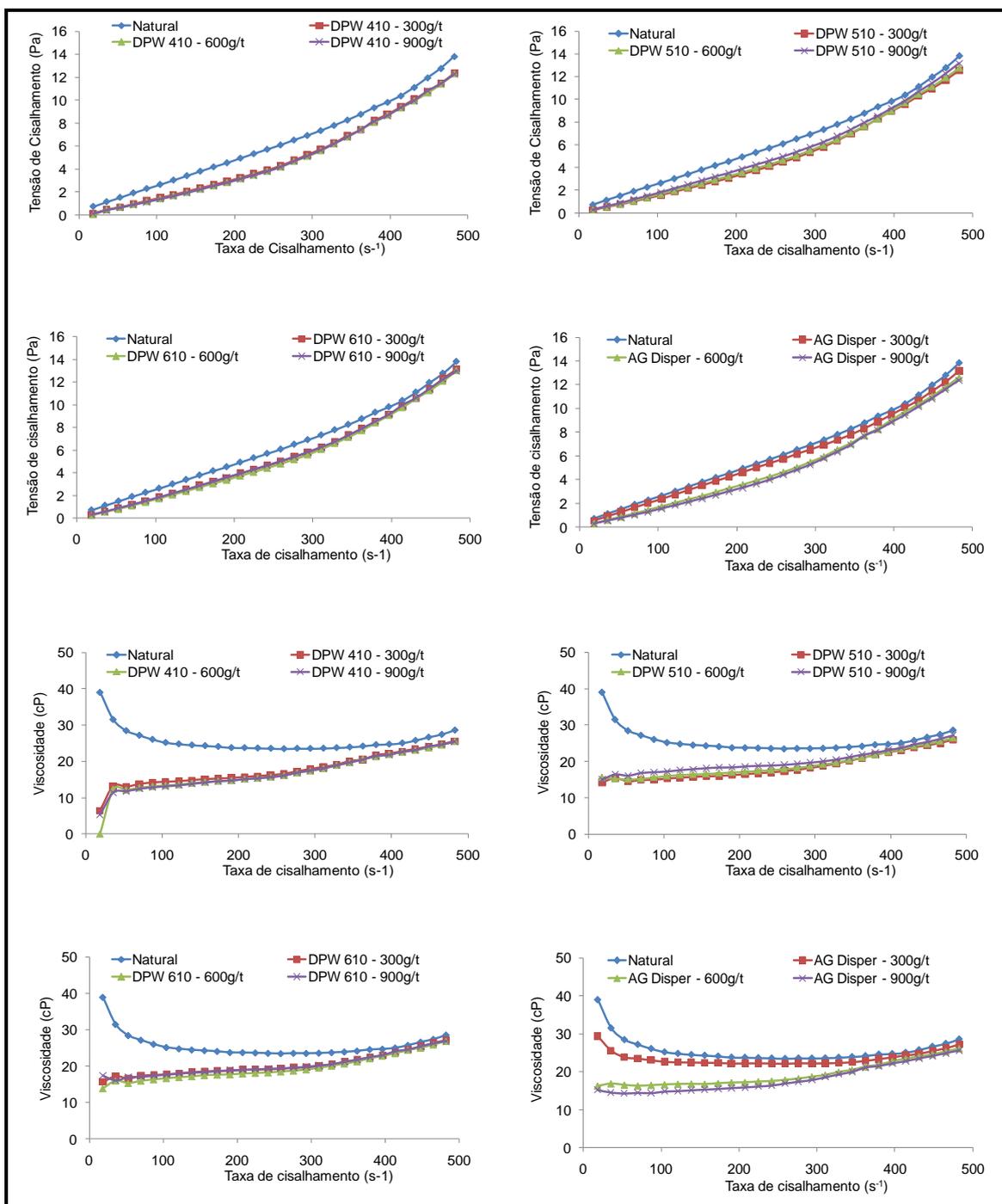


Figura 10.1 - Curvas de fluxo para testes com ácidos poliacrílicos (DPW 410, DPW 510 e DPW 610) e para poliacrilato de sódio e fosfato (AG Disper).

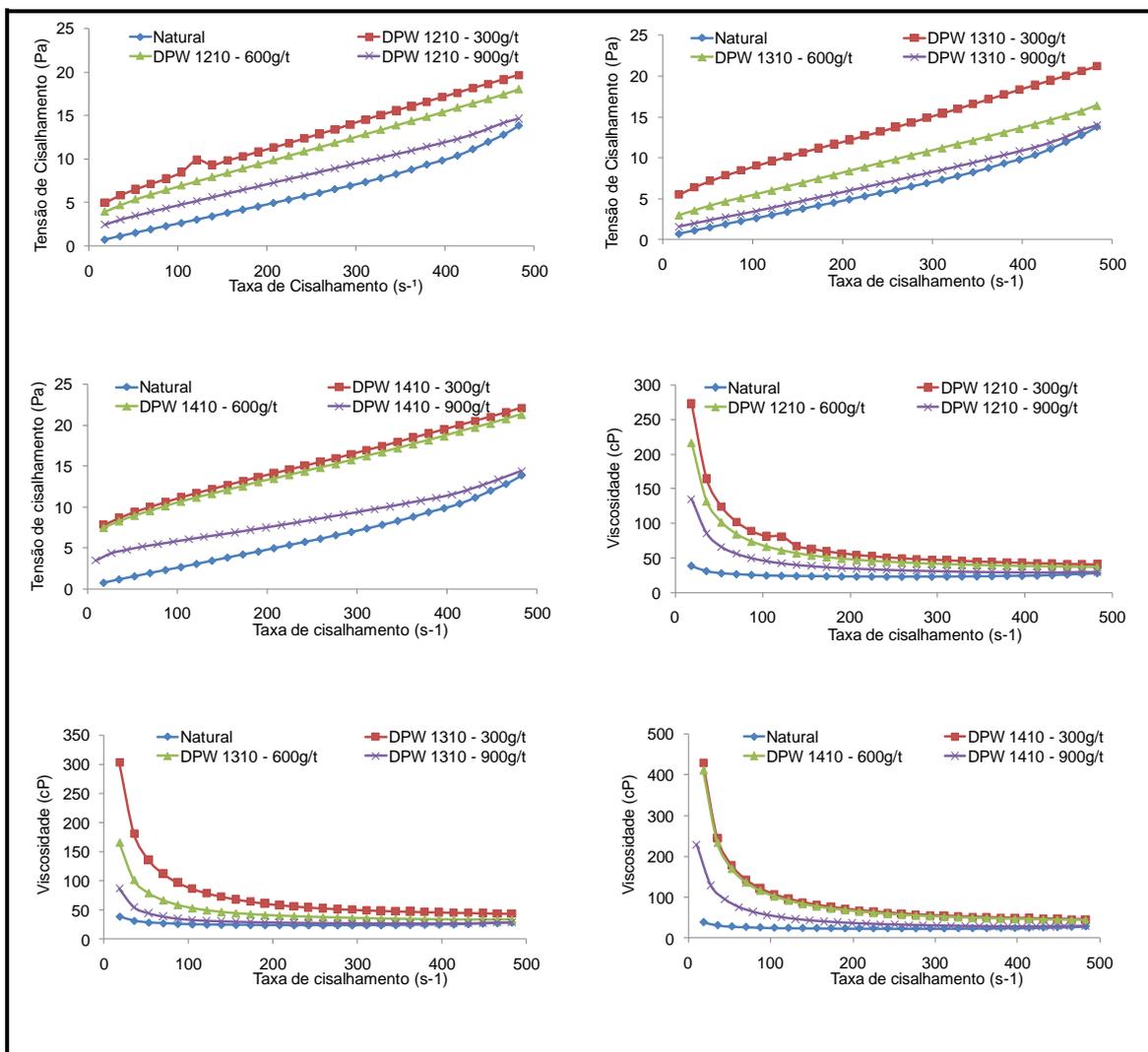


Figura 10.2 - Curvas de fluxo para testes com polietileniminas.

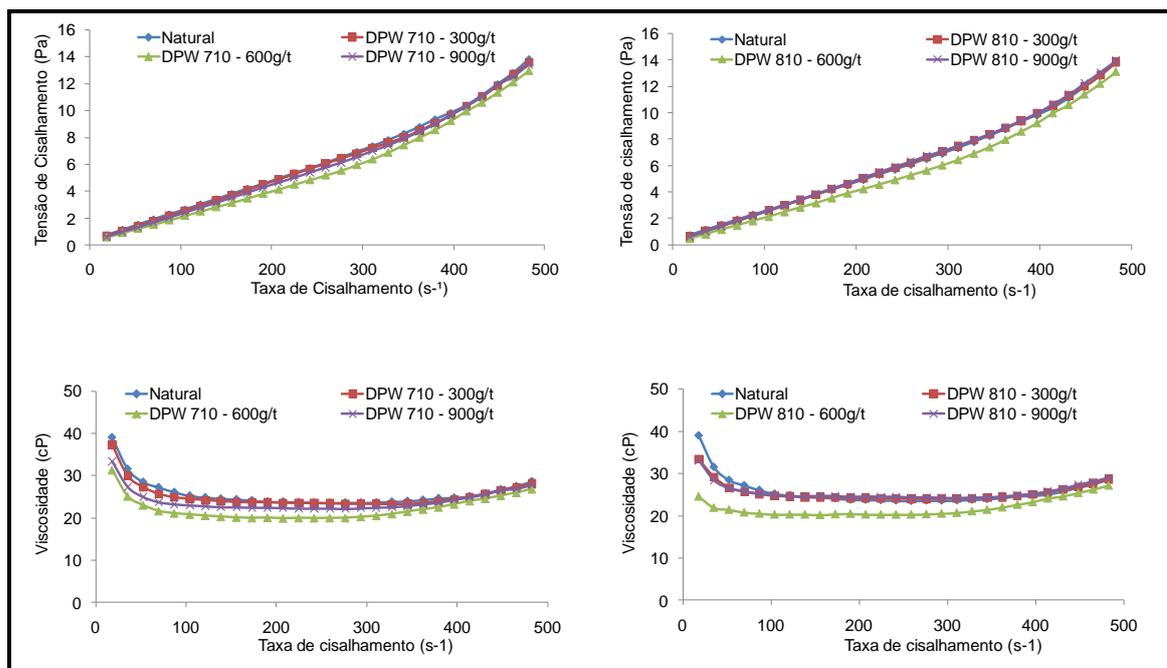


Figura 10.3 - Curvas de fluxo para testes com polivinils de amina.

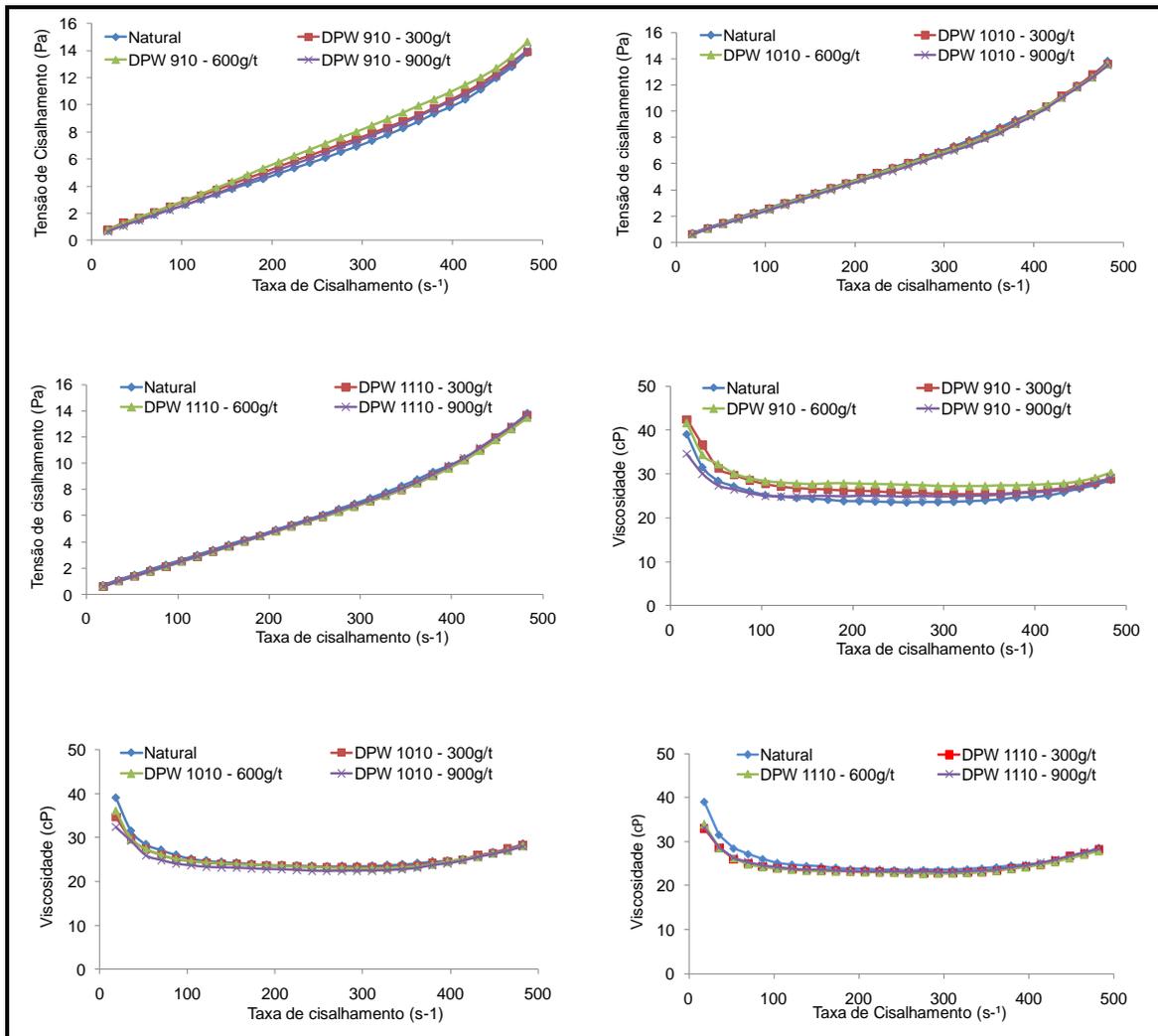


Figura 10.4 - Curvas de fluxo para testes com óxidos de polietileno.

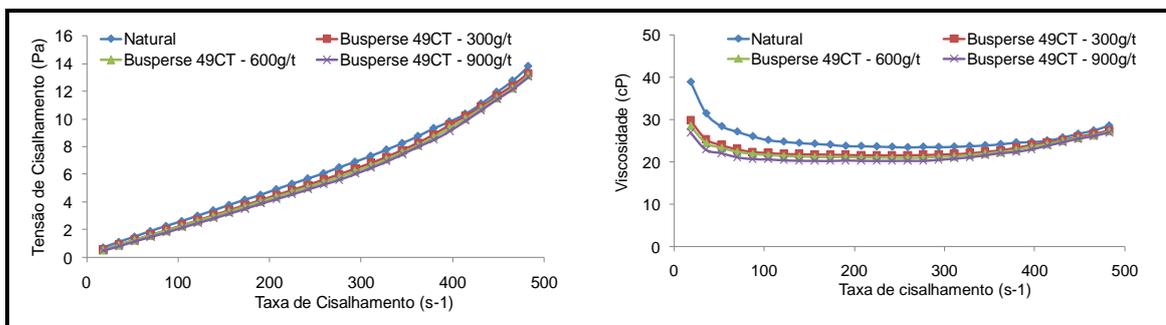


Figura 10.5 - Curvas de fluxo para testes com copolímero sílico acrilato.

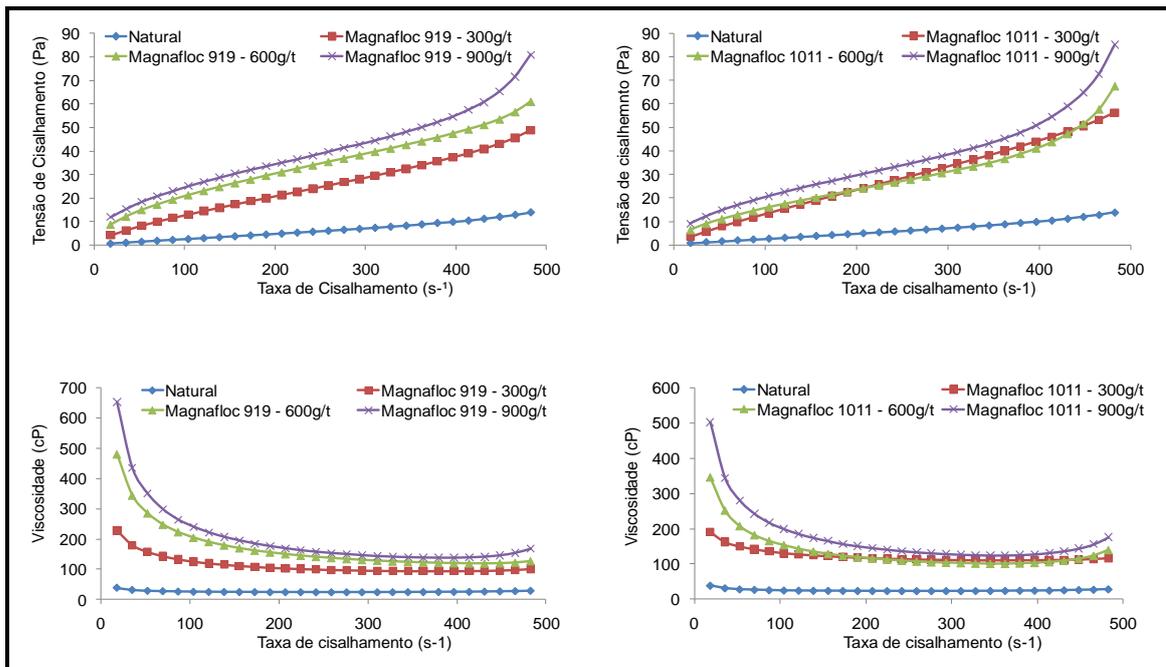


Figura 10.6 - Curvas de fluxo para testes com copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio.

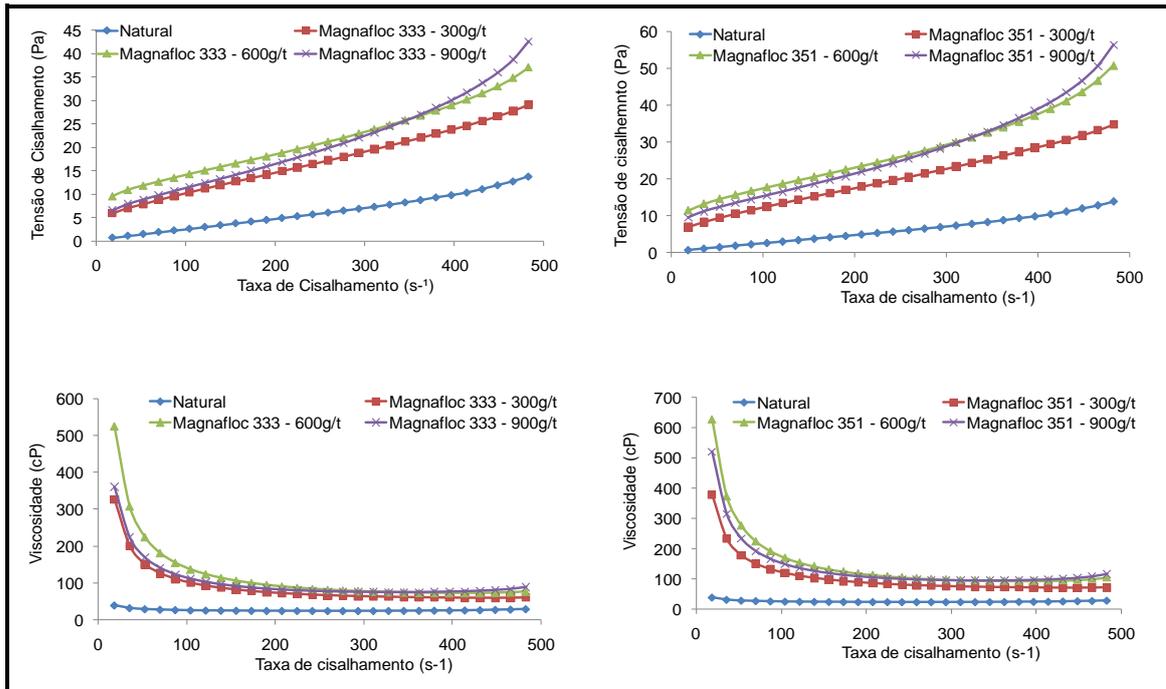


Figura 10.7 - Curvas de fluxo para testes com poliacrilamidas.

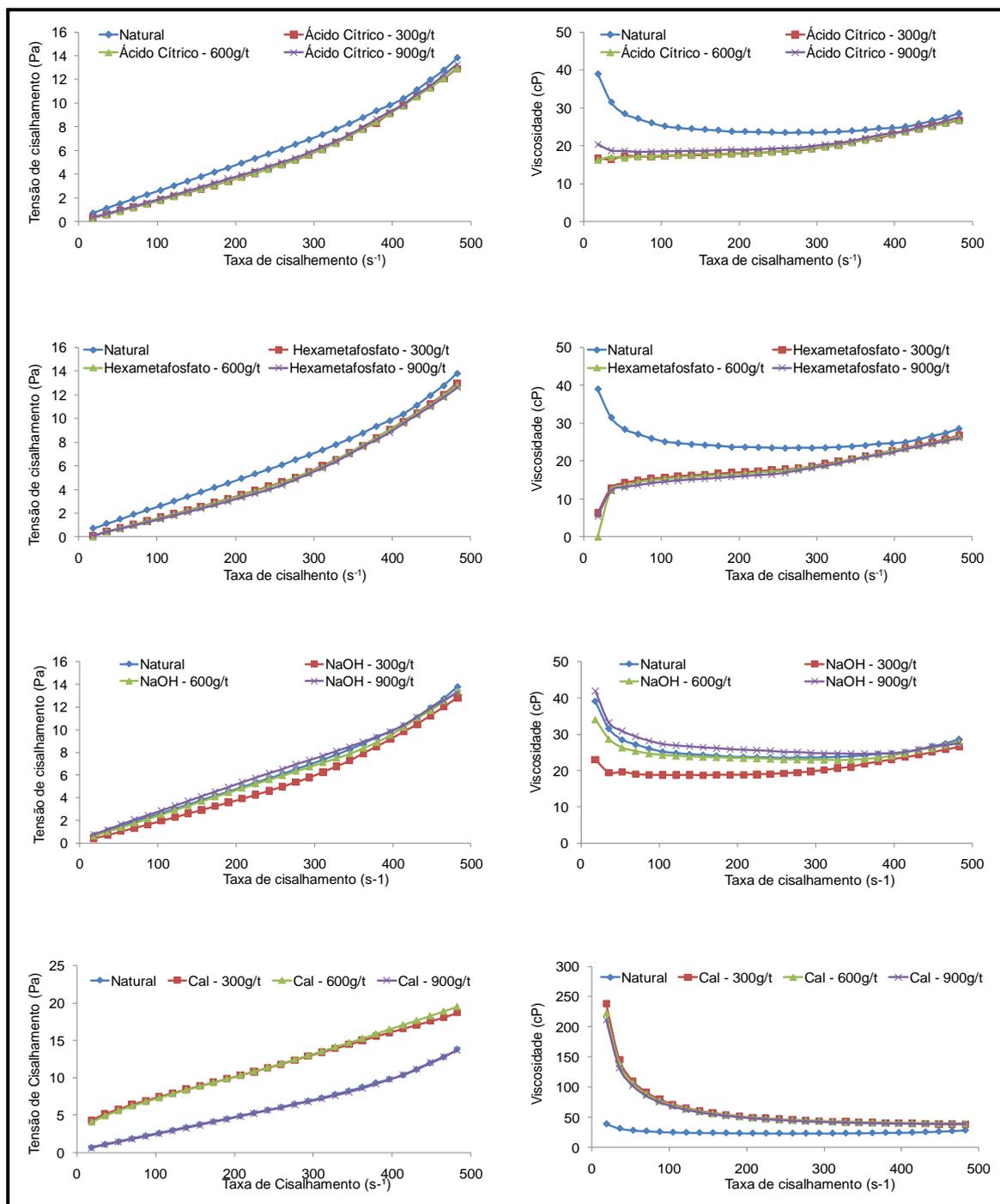


Figura 10.8 - Curvas de fluxo para testes com ácido cítrico, hexametáfosfato de sódio e hidróxido de sódio.

Anexo II – Ajustes das curvas de fluxo usando os modelos reológicos de Herschel-Bulkley e Bingham

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Teste padrão	-	21,7	1	$\tau = 0,9190 + 0,0019\gamma^{1,4167}$	0,994	$\tau = 0,0257\gamma$	0,978
			2	$\tau = 0,8578 + 0,0033\gamma^{1,3264}$	0,994	$\tau = 0,0257\gamma$	0,984
Ácido poliacrílico (DPW 410)	300	21,5	1	$\tau = 0,6757 + 0,0001\gamma^{1,855}$	0,923	$\tau = 0,0224\gamma$	0,997
			2	$\tau = 0,7248 + 0,0001\gamma^{1,8967}$	0,921	$\tau = 0,0221\gamma$	0,998
	600	21,5	1	$\tau = 0,7245 + 0,0001\gamma^{1,9414}$	0,915	$\tau = 0,0221\gamma$	0,997
			2	$\tau = 0,6865 + 0,0001\gamma^{1,9161}$	0,917	$\tau = 0,0219\gamma$	0,998
	900	21,4	1	$\tau = 0,5758 + 0,0001\gamma^{1,8680}$	0,917	$\tau = 0,0222\gamma$	0,998
			2	$\tau = 0,6599 + 0,0001\gamma^{1,9287}$	0,913	$\tau = 0,0219\gamma$	0,998
Ácido poliacrílico (DPW 510)	300	21,9	1	$\tau = 0,7568 + 0,0001\gamma^{1,8661}$	0,996	$\tau = 0,0226\gamma$	0,926
			2	$\tau = 0,6992 + 0,0002\gamma^{1,8206}$	0,997	$\tau = 0,0227\gamma$	0,929
	600	21,8	1	$\tau = 0,7682 + 0,0002\gamma^{1,7769}$	0,997	$\tau = 0,0232\gamma$	0,938
			2	$\tau = 0,7362 + 0,0001\gamma^{1,8405}$	0,997	$\tau = 0,0227\gamma$	0,928
	900	21,7	1	$\tau = 0,7685 + 0,0003\gamma^{1,7159}$	0,996	$\tau = 0,0238\gamma$	0,945
			2	$\tau = 0,8061 + 0,0002\gamma^{1,7512}$	0,995	$\tau = 0,0236\gamma$	0,942
Ácido poliacrílico (DPW 610)	300	22,7	1	$\tau = 0,8718 + 0,0003\gamma^{1,7151}$	0,994	$\tau = 0,0239\gamma$	0,948
			2	$\tau = 0,7944 + 0,0003\gamma^{1,733}$	0,996	$\tau = 0,0236\gamma$	0,944
	600	22,2	1	$\tau = 0,7682 + 0,0002\gamma^{1,7853}$	0,996	$\tau = 0,0232\gamma$	0,936
			2	$\tau = 0,7913 + 0,0002\gamma^{1,7684}$	0,995	$\tau = 0,0233\gamma$	0,939
	900	21,3	1	$\tau = 0,7923 + 0,0005\gamma^{1,6277}$	0,995	$\tau = 0,0242\gamma$	0,955
			2	$\tau = 0,8006 + 0,0002\gamma^{1,7852}$	0,996	$\tau = 0,0232\gamma$	0,938

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Poliacrilato de Sódio (AG Disper 503)	300	21,6	1	$\tau = 0,9432 + 0,0017\gamma^{1,4277}$	0,994	$\tau = 0,0247\gamma$	0,973
			2	$\tau = 0,7743 + 0,0016\gamma^{1,4487}$	0,994	$\tau = 0,0244\gamma$	0,980
	600	21,2	1	$\tau = 0,7785 + 0,0002\gamma^{1,7999}$	0,997	$\tau = 0,0229\gamma$	0,935
			2	$\tau = 0,8076 + 0,0002\gamma^{1,7919}$	0,997	$\tau = 0,0228\gamma$	0,938
	900	21,4	1	$\tau = 0,6967 + 0,0001\gamma^{1,8412}$	0,997	$\tau = 0,0222\gamma$	0,926
			2	$\tau = 0,6824 + 0,0001\gamma^{1,8435}$	0,998	$\tau = 0,0225\gamma$	0,926
Polietilenimiana (DPW 1210)	300	22,0	1	$\tau = 3,4713 + 0,1108\gamma^{0,8047}$	0,992	$\tau = 0,0316\gamma + 4,6788$	0,997
			2	$\tau = 3,3297 + 0,1343\gamma^{0,7729}$	0,982	$\tau = 0,0311\gamma + 4,7662$	0,988
	600	22,9	1	$\tau = 3,0096 + 0,0666\gamma^{0,8733}$	0,996	$\tau = 0,0296\gamma + 3,6890$	0,998
			2	$\tau = 2,9218 + 0,0559\gamma^{0,9047}$	0,996	$\tau = 0,0304\gamma + 3,4286$	0,997
	900	21,1	1	$\tau = 1,9758 + 0,0225\gamma^{1,0178}$	0,996	$\tau = 0,0253\gamma + 1,9043$	0,996
			2	$\tau = 1,9542 + 0,0281\gamma^{0,9863}$	0,997	$\tau = 0,0258\gamma + 2,0101$	0,997
Polietilenimiana (DPW 1310)	300	21,5	1	$\tau = 3,8454 + 0,1281\gamma^{0,7936}$	0,989	$\tau = 0,0340\gamma + 5,2341$	0,994
			2	$\tau = 3,8598 + 0,0976\gamma^{0,8323}$	0,991	$\tau = 0,0333\gamma + 4,9170$	0,994
	600	21,7	1	$\tau = 2,4340 + 0,0315\gamma^{0,9834}$	0,998	$\tau = 0,0284\gamma + 2,5091$	0,998
			2	$\tau = 2,2693 + 0,0359\gamma^{0,9630}$	0,998	$\tau = 0,0284\gamma + 2,4412$	0,998
	900	22,1	1	$\tau = 1,3570 + 0,0088\gamma^{1,1716}$	0,995	$\tau = 0,0261\gamma + 0,7423$	0,998
			2	$\tau = 1,3601 + 0,0080\gamma^{1,1849}$	0,994	$\tau = 0,0258\gamma + 0,7121$	0,997
Polietilenimiana (DPW 1410)	300	21,9	1	$\tau = 3,8199 + 0,4724\gamma^{0,5847}$	0,960	$\tau = 0,0313\gamma + 7,2407$	0,983
			2	$\tau = 3,9002 + 0,4468\gamma^{0,5938}$	0,961	$\tau = 0,0315\gamma + 7,2179$	0,983
	600	21,9	1	$\tau = 4,7712 + 0,2477\gamma^{0,6757}$	0,973	$\tau = 0,0302\gamma + 7,0281$	0,986
			2	$\tau = 4,6378 + 0,2420\gamma^{0,6781}$	0,974	$\tau = 0,0300\gamma + 6,8558$	0,987
	900	21,5	1	$\tau = 3,8808 + 0,0115\gamma^{1,0907}$	0,988	$\tau = 0,0204\gamma + 3,6080$	0,988
			2	$\tau = 3,9114 + 0,0065\gamma^{1,1837}$	0,984	$\tau = 0,0208\gamma + 3,3926$	0,987

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Aliquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Polivinil de amina (DPW 710)	300	22,4	1	$\tau = 0,9207 + 0,0017\gamma^{1,4329}$	0,993	$\tau = 0,0252\gamma$	0,976
			2	$\tau = 1,0336 + 0,0022\gamma^{1,3944}$	0,994	$\tau = 0,0255\gamma$	0,983
	600	22,4	1	$\tau = 1,093 + 0,0005\gamma^{1,6415}$	0,995	$\tau = 0,0239\gamma$	0,964
			2	$\tau = 0,9533 + 0,0003\gamma^{1,6979}$	0,994	$\tau = 0,0237\gamma$	0,952
	900	22,1	1	$\tau = 1,0694 + 0,0009\gamma^{1,5361}$	0,995	$\tau = 0,0250\gamma$	0,973
			2	$\tau = 1,0491 + 0,0011\gamma^{1,5099}$	0,995	$\tau = 0,0251\gamma$	0,975
Polivinil de amina (DPW 810)	300	18,3	1	$\tau = 0,9957 + 0,0024\gamma^{1,3862}$	0,995	$\tau = 0,0263\gamma$	0,984
			2	$\tau = 0,9492 + 0,0021\gamma^{1,4047}$	0,994	$\tau = 0,0257\gamma$	0,981
	600	21,3	1	$\tau = 1,0343 + 0,0002\gamma^{1,7463}$	0,994	$\tau = 0,0236\gamma$	0,950
			2	$\tau = 1,0082 + 0,0006\gamma^{1,5999}$	0,994	$\tau = 0,0243\gamma$	0,965
	900	18,2	1	$\tau = 0,9203 + 0,0027\gamma^{1,3677}$	0,995	$\tau = 0,0263\gamma$	0,984
			2	$\tau = 0,9604 + 0,0023\gamma^{1,3912}$	0,994	$\tau = 0,0261\gamma$	0,983
Óxido de polietileno (DPW 910)	300	18,4	1	$\tau = 0,777 + 0,0055\gamma^{1,251}$	0,995	$\tau = 0,0266\gamma$	0,989
			2	$\tau = 0,9647 + 0,006\gamma^{1,2349}$	0,997	$\tau = 0,0268\gamma + 0,0315$	0,993
	600	21,3	1	$\tau = 0,802 + 0,0082\gamma^{1,196}$	0,997	$\tau = 0,0285\gamma$	0,994
			2	$\tau = 0,8305 + 0,0068\gamma^{1,2251}$	0,997	$\tau = 0,0281\gamma$	0,993
	900	21,4	1	$\tau = 0,8009 + 0,0054\gamma^{1,2585}$	0,997	$\tau = 0,0272\gamma$	0,992
			2	$\tau = 0,9053 + 0,0022\gamma^{1,3955}$	0,995	$\tau = 0,0258\gamma$	0,982
Óxido de polietileno (DPW 1010)	300	21,9	1	$\tau = 1,1063 + 0,0017\gamma^{1,4399}$	0,994	$\tau = 0,026\gamma$	0,981
			2	$\tau = 1,3166 + 0,0006\gamma^{1,5313}$	0,992	$\tau = 0,0251\gamma$	0,974
	600	21,4	1	$\tau = 1,155 + 0,0012\gamma^{1,4885}$	0,993	$\tau = 0,0252\gamma$	0,977
			2	$\tau = 1,1292 + 0,0014\gamma^{1,4644}$	0,994	$\tau = 0,0255\gamma$	0,979
	900	21,1	1	$\tau = 1,169 + 0,0008\gamma^{1,5543}$	0,993	$\tau = 0,025\gamma$	0,972
			2	$\tau = 1,1082 + 0,0011\gamma^{1,5049}$	0,994	$\tau = 0,0251\gamma$	0,976

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\dot{\gamma}$	R ²
Óxido de polietileno (DPW 1110)	300	21,1	1	$\tau = 1,0675 + 0,0014\gamma^{1,4626}$	0,993	$\tau = 0,0253\dot{\gamma}$	0,978
			2	$\tau = 1,1256 + 0,001\gamma^{1,5198}$	0,994	$\tau = 0,0253\dot{\gamma}$	0,974
	600	21,2	1	$\tau = 1,0612 + 0,0015\gamma^{1,4497}$	0,994	$\tau = 0,0253\dot{\gamma}$	0,979
			2	$\tau = 1,0993 + 0,0011\gamma^{1,5083}$	0,994	$\tau = 0,025\dot{\gamma}$	0,975
	900	21,1	1	$\tau = 0,9982 + 0,0024\gamma^{1,3848}$	0,995	$\tau = 0,0261\dot{\gamma}$	0,984
			2	$\tau = 1,1408 + 0,0007\gamma^{1,5752}$	0,993	$\tau = 0,025\dot{\gamma}$	0,970
Copolímero sílico acrilato (Bulab 49 CT)	300	21,8	1	$\tau = 1,0332 + 0,0003\gamma^{1,7257}$	0,995	$\tau = 0,0235\dot{\gamma}$	0,954
			2	$\tau = 1,0313 + 0,0004\gamma^{1,6836}$	0,995	$\tau = 0,0237\dot{\gamma}$	0,958
	600	22,2	1	$\tau = 1,0408 + 0,0005\gamma^{1,6189}$	0,995	$\tau = 0,0241\dot{\gamma}$	0,965
			2	$\tau = 1,0933 + 0,0004\gamma^{1,675}$	0,995	$\tau = 0,0239\dot{\gamma}$	0,960
	900	22,2	1	$\tau = 0,9784 + 0,0002\gamma^{1,7552}$	0,996	$\tau = 0,0231\dot{\gamma}$	0,949
			2	$\tau = 1,0219 + 0,0003\gamma^{1,7056}$	0,995	$\tau = 0,0237\dot{\gamma}$	0,955
Copolímero de acrilamida e acrilato de sódio (Magnafloc 1011)	300	22,5	1	$\tau = 2,4898 + 0,0742\gamma^{1,0614}$	0,995	$\tau = 0,1099\dot{\gamma} + 1,4684$	0,995
			2	$\tau = 2,6397 + 0,0662\gamma^{1,0798}$	0,995	$\tau = 0,1101\dot{\gamma} + 1,3344$	0,994
	600	22,2	1	$\tau = 12,8105 + 0,00\gamma^{2,4219}$	0,923	$\tau = 0,1148\dot{\gamma} + 1,1906$	0,871
			2	$\tau = 13,2079 + 0,00\gamma^{2,4531}$	0,923	$\tau = 0,1162\dot{\gamma} + 1,3241$	0,870
	900	22,6	1	$\tau = 18,8834 + 0,00\gamma^{2,9688}$	0,915	$\tau = 0,1455\dot{\gamma} + 2,0101$	0,840
			2	$\tau = 18,5954 + 0,00\gamma^{2,9375}$	0,916	$\tau = 0,1419\dot{\gamma} + 2,3309$	0,844
Copolímero de acrilamida e acrilato de sódio (Magnafloc 919)	300	22,5	1	$\tau = 3,9015 + 0,0436\gamma^{1,1158}$	0,987	$\tau = 0,0912\dot{\gamma} + 2,3804$	0,986
			2	$\tau = 3,8989 + 0,0456\gamma^{1,1102}$	0,987	$\tau = 0,0919\dot{\gamma} + 2,4321$	0,986
	600	22,3	1	$\tau = 6,2420 + 0,2101\gamma^{0,8910}$	0,973	$\tau = 0,1048\dot{\gamma} + 8,2647$	0,972
			2	$\tau = 6,2464 + 0,2104\gamma^{0,8914}$	0,975	$\tau = 0,1053\dot{\gamma} + 8,2677$	0,974
	900	21,9	1	$\tau = 16,0160 + 0,0036\gamma^{1,5751}$	0,937	$\tau = 0,1320\dot{\gamma} + 8,0823$	0,922
			2	$\tau = 16,5216 + 0,0024\gamma^{1,6389}$	0,925	$\tau = 0,1323\dot{\gamma} + 7,9977$	0,909

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Poliacrilamida (Magnafloc 351)	300	22,5	1	$\tau = 5,4109 + 0,0703\gamma^{0,9725}$	0,991	$\tau = 0,0591\gamma + 5,673$	0,991
			2	$\tau = 5,2047 + 0,074\gamma^{0,9623}$	0,992	$\tau = 0,0583\gamma + 5,5647$	0,992
	600	22,9	1	$\tau = 12,7113 + 0,0018\gamma^{1,6119}$	0,955	$\tau = 0,0813\gamma + 7,6353$	0,937
			2	$\tau = 11,8502 + 0,0045\gamma^{1,4536}$	0,961	$\tau = 0,0788\gamma + 7,8335$	0,950
	900	22,4	1	$\tau = 11,9662 + 0,0002\gamma^{2,0079}$	0,961	$\tau = 0,0951\gamma + 4,0416$	0,919
			2	$\tau = 11,7992 + 0,0002\gamma^{1,9375}$	0,963	$\tau = 0,0936\gamma + 3,9983$	0,925
Poliacrilamida (Magnafloc 333)	300	21,3	1	$\tau = 4,8804 + 0,0511\gamma^{0,9934}$	0,993	$\tau = 0,0492\gamma + 4,9285$	0,993
			2	$\tau = 4,7654 + 0,0471\gamma^{1,0049}$	0,992	$\tau = 0,0487\gamma + 4,7242$	0,992
	600	21,3	1	$\tau = 8,8898 + 0,0119\gamma^{1,2487}$	0,970	$\tau = 0,0575\gamma + 7,0360$	0,966
			2	$\tau = 8,8438 + 0,0184\gamma^{1,1805}$	0,972	$\tau = 0,0578\gamma + 7,4182$	0,970
	900	21,5	1	$\tau = 8,4243 + 0,0006\gamma^{1,7188}$	0,972	$\tau = 0,0747\gamma + 3,0062$	0,945
			2	$\tau = 7,5892 + 0,0008\gamma^{1,7195}$	0,970	$\tau = 0,0724\gamma + 2,6115$	0,943
Ácido Cítrico	300	22,5	1	$\tau = 0,8849 + 0,0002\gamma^{1,811}$	0,994	$\tau = 0,0235\gamma$	0,936
			2	$\tau = 0,8703 + 0,0002\gamma^{1,8221}$	0,995	$\tau = 0,0234\gamma$	0,935
	600	21,6	1	$\tau = 0,8751 + 0,0002\gamma^{1,7747}$	0,995	$\tau = 0,0237\gamma$	0,941
			2	$\tau = 0,8298 + 0,0002\gamma^{1,8082}$	0,996	$\tau = 0,0232\gamma$	0,936
	900	22	1	$\tau = 0,9291 + 0,0002\gamma^{1,7605}$	0,995	$\tau = 0,0239\gamma$	0,944
			2	$\tau = 0,9374 + 0,0002\gamma^{1,7781}$	0,995	$\tau = 0,0239\gamma$	0,943
Hexametáfosfato	300	22	1	$\tau = 0,911 + 0,0001\gamma^{1,9227}$	0,996	$\tau = 0,0233\gamma$	0,925
			2	$\tau = 0,767 + 0,0001\gamma^{1,856}$	0,995	$\tau = 0,0232\gamma$	0,926
	600	21,8	1	$\tau = 0,9876 + 0,0001\gamma^{1,9375}$	0,995	$\tau = 0,0231\gamma$	0,922
			2	$\tau = 0,8364 + 0,0001\gamma^{1,8987}$	0,997	$\tau = 0,023\gamma$	0,925
	900	21,5	1	$\tau = 0,8128 + 0,0001\gamma^{1,9448}$	0,997	$\tau = 0,0227\gamma$	0,918
			2	$\tau = 0,7747 + 0,0001\gamma^{1,875}$	0,996	$\tau = 0,0227\gamma$	0,921

Reagente	Dosagem (g/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Hidróxido de sódio	300	21,8	1	$\tau = 0,8917 + 0,0003\gamma^{1,7031}$	0,996	$\tau = 0,0234\gamma$	0,952
			2	$\tau = 0,9246 + 0,0003\gamma^{1,7095}$	0,996	$\tau = 0,0235\gamma$	0,952
	600	21,7	1	$\tau = 1,0384 + 0,0021\gamma^{1,4006}$	0,992	$\tau = 0,0253\gamma$	0,982
			2	$\tau = 1,0872 + 0,0012\gamma^{1,493}$	0,994	$\tau = 0,0248\gamma$	0,976
	900	21,7	1	$\tau = 0,9403 + 0,0062\gamma^{1,226}$	0,994	$\tau = 0,0262\gamma + 0,0532$	0,991
			2	$\tau = 0,8920 + 0,0059\gamma^{1,2268}$	0,996	$\tau = 0,0253\gamma + 0,0367$	0,993
Cal	300	21	1	$\tau = 3,2462 + 0,0818\gamma^{0,8483}$	0,997	$\tau = 0,031\gamma + 4,1197$	0,994
			2	$\tau = 3,1684 + 0,0591\gamma^{0,8964}$	0,995	$\tau = 0,0305\gamma + 3,7257$	0,994
	600	21,1	1	$\tau = 3,2047 + 0,0408\gamma^{0,9692}$	0,996	$\tau = 0,0336\gamma + 3,3718$	0,996
			2	$\tau = 3,1953 + 0,0598\gamma^{0,9006}$	0,996	$\tau = 0,0318\gamma + 3,7481$	0,995
	900	21,2	1	$\tau = 3,0367 + 0,0454\gamma^{0,9452}$	0,995	$\tau = 0,0321\gamma + 3,3304$	0,994
			2	$\tau = 3,0539 + 0,0536\gamma^{0,9185}$	0,996	$\tau = 0,0319\gamma + 3,5014$	0,995

Condição	Energia aplicada (kWh/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
Teste padrão 75% de sólidos	6	22,9	1	$\tau = 0,8733 + 0,006\gamma^{1,2717}$	0,999	$\tau = 0,0327\gamma$	0,992
			2	$\tau = 0,7975 + 0,006\gamma^{1,2744}$	0,999	$\tau = 0,0331\gamma$	0,991
	12	22,5	1	$\tau = 1,0777 + 0,018\gamma^{1,1158}$	0,998	$\tau = 0,0381\gamma + 0,3113$	0,997
			2	$\tau = 1,0508 + 0,0261\gamma^{1,0697}$	0,999	$\tau = 0,0411\gamma + 0,4879$	0,999
	18	22,4	1	$\tau = 3,2313 + 0,072\gamma^{0,8707}$	0,997	$\tau = 0,0315\gamma + 3,9697$	0,995
			2	$\tau = 3,2118 + 0,076\gamma^{0,864}$	0,997	$\tau = 0,0318\gamma + 4,0029$	0,994

Condição	Energia aplicada (kWh/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\dot{\gamma}$	R ²
70% de sólidos	6	26,5	1	$\tau = 0,4576 + 0,0002\gamma^{1,7327}$	0,997	$\tau = 0,0175\gamma + 0$	0,935
			2	$\tau = 0,3925 + 0,0002\gamma^{1,7007}$	0,998	$\tau = 0,0173\gamma + 0$	0,937
	12	23,5	1	$\tau = 0,5103 + 0,0002\gamma^{1,7448}$	0,998	$\tau = 0,0188\gamma + 0$	0,936
			2	$\tau = 0,5404 + 0,0002\gamma^{1,7681}$	0,998	$\tau = 0,0188\gamma + 0$	0,934
	18	22,5	1	$\tau = 0,7238 + 0,0001\gamma^{1,8036}$	0,998	$\tau = 0,0195\gamma + 0$	0,938
			2	$\tau = 0,7129 + 0,0002\gamma^{1,7782}$	0,997	$\tau = 0,0195\gamma + 0$	0,940
80% de sólidos	6	23,2	1	$\tau = 7,3766 + 0,0588\gamma^{1,1842}$	0,992	$\tau = 0,189\gamma + 2,648$	0,988
			2	$\tau = 7,9843 + 0,0498\gamma^{1,2145}$	0,990	$\tau = 0,1936\gamma + 2,4792$	0,986
	12	25,6	1	$\tau = 4,3013 + 0,1363\gamma^{0,9301}$	0,997	$\tau = 0,0874\gamma + 5,3398$	0,996
			2	$\tau = 4,3881 + 0,1292\gamma^{0,9323}$	0,996	$\tau = 0,084\gamma + 5,3527$	0,996
	18	26,3	1	$\tau = 6,9901 + 0,2231\gamma^{0,903}$	0,995	$\tau = 0,1202\gamma + 9,0314$	0,994
			2	$\tau = 5,2737 + 0,2789\gamma^{0,8737}$	0,998	$\tau = 0,1244\gamma + 8,1149$	0,996
75% de sólidos 300g/t de ácido poliacrílico (DPW 410)	6	24,5	1	$\tau = 0,781 + 0,0004\gamma^{1,6729}$	0,994	$\tau = 0,0227\gamma + 0$	0,950
			2	$\tau = 0,7169 + 0,0004\gamma^{1,6439}$	0,994	$\tau = 0,0221\gamma + 0$	0,952
	12	23,7	1	$\tau = 0,6946 + 0,0143\gamma^{1,1355}$	0,997	$\tau = 0,034\gamma + 0$	0,996
			2	$\tau = 0,6242 + 0,015\gamma^{1,1348}$	0,999	$\tau = 0,0351\gamma + 0$	0,997
	18	24,1	1	$\tau = 0,898 + 0,0286\gamma^{1,0333}$	0,999	$\tau = 0,0357\gamma + 0,5961$	0,998
			2	$\tau = 0,8962 + 0,0279\gamma^{1,0322}$	0,999	$\tau = 0,0347\gamma + 0,6065$	0,998
75% de sólidos 300g/t de ácido cítrico	6	27,2	1	$\tau = 0,6964 + 0,0008\gamma^{1,559}$	0,991	$\tau = 0,0235\gamma + 0$	0,958
			2	$\tau = 0,5127 + 0,0014\gamma^{1,4567}$	0,992	$\tau = 0,0235\gamma + 0$	0,964
	12	25,1	1	$\tau = 0,7466 + 0,0003\gamma^{1,7246}$	0,993	$\tau = 0,0237\gamma + 0$	0,941
			2	$\tau = 0,768 + 0,0003\gamma^{1,7325}$	0,993	$\tau = 0,0236\gamma + 0$	0,940
	18	24,4	1	$\tau = 0,6888 + 0,0001\gamma^{1,8639}$	0,997	$\tau = 0,0228\gamma + 0$	0,922
			2	$\tau = 0,8154 + 0,0001\gamma^{1,8964}$	0,997	$\tau = 0,0227\gamma + 0$	0,925

Condição	Energia aplicada (kWh/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
75% de sólidos 300g/t de copolímero sílico acrilato (<i>Bulab 49CT</i>)	6	22,3	1	$\tau = 0,9358 + 0,0091\gamma^{1,23}$	0,997	$\tau = 0,0382\gamma + 0$	0,992
			2	$\tau = 1,0015 + 0,0091\gamma^{1,236}$	0,998	$\tau = 0,0397\gamma + 0$	0,992
	12	24,2	1	$\tau = 0,7927 + 0,0163\gamma^{1,1136}$	0,998	$\tau = 0,0335\gamma + 0,2436$	0,997
			2	$\tau = 0,881 + 0,0169\gamma^{1,1124}$	0,998	$\tau = 0,0345\gamma + 0,3209$	0,996
	18	25	1	$\tau = 0,7672 + 0,039\gamma^{0,9711}$	0,999	$\tau = 0,0326\gamma + 0,9199$	0,999
			2	$\tau = 0,8277 + 0,0351\gamma^{0,9871}$	0,999	$\tau = 0,0324\gamma + 0,8941$	0,999
75% de sólidos 300g/t de hexametáfosfato de sódio	6	22	1	$\tau = 0,875 + 0,005\gamma^{1,3259}$	0,993	$\tau = 0,0371\gamma + 0$	0,981
			2	$\tau = 0,5991 + 0,0091\gamma^{1,2277}$	0,996	$\tau = 0,0372\gamma + 0$	0,989
	12	23,6	1	$\tau = 0,6996 + 0,0004\gamma^{1,6793}$	0,995	$\tau = 0,0236\gamma + 0$	0,946
			2	$\tau = 0,7404 + 0,0002\gamma^{1,7461}$	0,995	$\tau = 0,0231\gamma + 0$	0,940
	18	23,1	1	$\tau = 0,7784 + 0,0002\gamma^{1,792}$	0,996	$\tau = 0,0232\gamma + 0$	0,936
			2	$\tau = 0,7741 + 0,0002\gamma^{1,8041}$	0,996	$\tau = 0,0231\gamma + 0$	0,934
75% de sólidos Teste com água de processo	6	22,9	1	$\tau = 0,9148 + 0,002\gamma^{1,4219}$	0,998	$\tau = 0,0275\gamma + 0$	0,981
			2	$\tau = 0,7944 + 0,0027\gamma^{1,3723}$	0,999	$\tau = 0,0274\gamma + 0$	0,984
	12	22,1	1	$\tau = 1,6928 + 0,0391\gamma^{0,9685}$	0,998	$\tau = 0,0320\gamma + 1,8574$	0,998
			2	$\tau = 1,6928 + 0,0391\gamma^{0,9685}$	0,998	$\tau = 0,0320\gamma + 1,8574$	0,998
	18	21,8	1	$\tau = 2,204 + 0,0711\gamma^{0,9381}$	0,998	$\tau = 0,048\gamma + 2,704$	0,997
			2	$\tau = 2,2134 + 0,0725\gamma^{0,9335}$	0,998	$\tau = 0,0475\gamma + 2,7483$	0,997
75% de sólidos 300g/t de cal	6	23,2	1	$\tau = 2,3742 + 0,01\gamma^{1,2117}$	0,994	$\tau = 0,0383\gamma + 1,2978$	0,990
			2	$\tau = 2,4624 + 0,0102\gamma^{1,2274}$	0,993	$\tau = 0,043\gamma + 1,178$	0,989
			3	$\tau = 2,4812 + 0,0113\gamma^{1,2094}$	0,994	$\tau = 0,0424\gamma + 1,3008$	0,990
	12	24,3	1	$\tau = 3,461 + 0,0912\gamma^{0,8481}$	0,997	$\tau = 0,0345\gamma + 4,4357$	0,994
			2	$\tau = 3,4556 + 0,0957\gamma^{0,8392}$	0,997	$\tau = 0,0342\gamma + 4,4874$	0,993
	18	22,9	1	$\tau = 1,4829 + 4,196\gamma^{0,3689}$	0,981	$\tau = 0,0595\gamma + 16,76$	0,910
2			$\tau = 1,6729 + 3,9397\gamma^{0,3739}$	0,981	$\tau = 0,0580\gamma + 16,2608$	0,912	

Condição	Energia aplicada (kWh/t)	Temperatura (°C)	Alíquota	Herschel-Bulkley $\tau = \tau_{HB} + k\gamma^n$	R ²	Bingham $\tau = \tau_{YB} + \mu_{PL}\gamma$	R ²
75% de sólidos pH 7,3 (natural)	6	24,4	1	$\tau = 2,5932 + 0,0145 \gamma^{1,1818}$	0,993	$\tau = 0,0458\gamma + 1,4592$	0,990
			2	$\tau = 2,5631 + 0,0127 \gamma^{1,2013}$	0,994	$\tau = 0,0453\gamma + 1,341$	0,990
	12	24,1	1	$\tau = 3,9296 + 0,1052 \gamma^{0,8291}$	0,996	$\tau = 0,0351\gamma + 5,0718$	0,993
			2	$\tau = 3,8417 + 0,1087 \gamma^{0,824}$	0,995	$\tau = 0,0352\gamma + 5,0241$	0,992
	18	23,7	1	$\tau = 4,531 + 2,7067 \gamma^{0,4324}$	0,985	$\tau = 0,0614\gamma + 16,7528$	0,930
			2	$\tau = 5,8913 + 2,1859 \gamma^{0,4586}$	0,987	$\tau = 0,0599\gamma + 16,6637$	0,938
75% de sólidos pH 8,5	6	23,7	1	$\tau = 1,0466 + 0,0059 \gamma^{1,2372}$	0,998	$\tau = 0,0264\gamma + 0,2217$	0,992
			2	$\tau = 1,0495 + 0,0062 \gamma^{1,2345}$	0,998	$\tau = 0,0271\gamma + 0,2217$	0,992
	12	23,0	1	$\tau = 3,3227 + 0,0946 \gamma^{0,8463}$	0,997	$\tau = 0,0354\gamma + 4,3357$	0,994
			2	$\tau = 3,6032 + 0,0939 \gamma^{0,85}$	0,998	$\tau = 0,0360\gamma + 4,6046$	0,995
	18	22,5	1	$\tau = 6,6179 + 1,2103 \gamma^{0,5369}$	0,989	$\tau = 0,0576\gamma + 14,2547$	0,9555
			2	$\tau = 6,3826 + 1,3396 \gamma^{0,5249}$	0,988	$\tau = 0,0587\gamma + 14,5322$	0,9530

Anexo III – Testes de remoagem



Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	
Tyler	µm	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante
16	1.000	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	840	0,16	0,21	0,21	99,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
28	595	0,14	0,18	0,39	99,61	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
35	420	0,63	0,82	1,21	98,79	0,01	0,01	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
48	297	1,22	1,60	2,81	97,19	0,01	0,01	0,02	99,98	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
65	210	4,47	5,85	8,65	91,35	0,02	0,02	0,05	99,95	0,01	0,02	0,02	99,98	0,01	0,01	0,01	99,99
100	149	9,13	11,94	20,59	79,41	0,10	0,14	0,18	99,82	0,01	0,02	0,03	99,97	0,01	0,01	0,02	99,98
150	105	10,44	13,65	34,24	65,76	0,91	1,23	1,41	98,59	0,05	0,07	0,10	99,90	0,02	0,03	0,05	99,95
200	74	9,60	12,55	46,78	53,22	4,54	6,13	7,54	92,46	0,40	0,55	0,65	99,35	0,08	0,11	0,16	99,84
270	53	14,55	19,02	65,80	34,20	15,95	21,52	29,07	70,93	6,28	8,53	9,17	90,83	1,52	2,14	2,30	97,70
325	44	2,59	3,39	69,19	30,81	4,21	5,68	34,75	65,25	3,32	4,50	13,67	86,33	1,54	2,17	4,47	95,53
400	37	3,82	4,99	74,18	25,82	5,85	7,89	42,64	57,36	5,78	7,84	21,51	78,49	3,49	4,91	9,38	90,62
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,47	3,17	45,81	54,19	95,41	3,60	25,11	74,89	96,13	3,51	12,89	87,11	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	78,93	8,91	54,72	45,28	82,28	10,31	35,42	64,58	84,83	10,24	23,13	76,87	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	61,81	9,82	64,54	35,46	67,34	11,73	47,15	52,85	71,49	12,09	35,22	64,78	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	44,64	9,85	74,39	25,61	51,70	12,28	59,42	40,58	56,83	13,28	48,50	51,50	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	29,66	8,59	82,99	17,01	37,23	11,36	70,78	29,22	42,34	13,13	61,63	38,37	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	18,95	6,14	89,13	10,87	25,79	8,98	79,76	20,24	29,84	11,33	72,96	27,04	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	10,81	4,67	93,80	6,20	15,73	7,90	87,65	12,35	18,46	10,31	83,27	16,73	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,47	4,78	98,58	1,42	3,97	9,23	96,88	3,12	4,75	12,42	95,70	4,30	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,42	100,00	0,00		3,12	100,00	0,00		4,30	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	74,10	---	---	---	73,70	---	---	---	71,10	---	---	---
Blaine			458				984				1634				2270		
Tempo (min)			0				22,0				44,0				66,0		
Energia (kWh/t)			0				6,0				12,0				18,0		

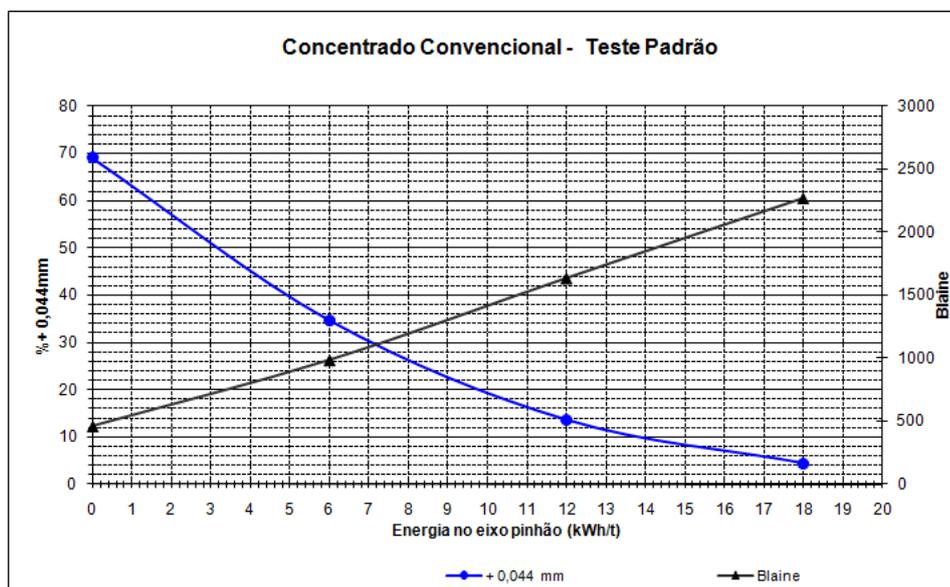
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - 70 % Sólidos

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-
Tyler	µm	(g)	Simple	Acumul.	sante	(g)	Simple	Acumul.	sante	(g)	Simple	Acumul.	sante	(g)	Simple	Acumul.	sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,007	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,013	0,02	0,03	99,97	0,006	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,027	0,04	0,07	99,93	0,008	0,01	0,02	99,98	0,007	0,01	0,01	99,99
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,149	0,21	0,28	99,72	0,017	0,02	0,04	99,96	0,008	0,01	0,02	99,98
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	1,179	1,68	1,96	98,04	0,074	0,10	0,14	99,86	0,023	0,03	0,05	99,95
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	4,676	6,67	8,63	91,37	0,505	0,69	0,83	99,17	0,110	0,15	0,20	99,80
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	14,508	20,70	29,33	70,67	6,540	8,95	9,78	90,22	2,221	3,01	3,21	96,79
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	4,563	6,51	35,84	64,16	2,826	3,87	13,65	86,35	1,617	2,19	5,40	94,60
400	37	3,82	4,99	74,18	25,82	5,48	7,82	43,65	56,35	4,930	6,74	20,39	79,61	3,34	4,52	9,93	90,07
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,30	3,21	46,87	53,13	95,460	3,61	24,01	75,99	96,34	3,30	13,22	86,78	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	78,45	8,93	55,80	44,20	82,480	10,33	34,34	65,66	85,56	9,71	22,93	77,07	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	61,19	9,73	65,52	34,48	67,650	11,81	46,14	53,86	72,59	11,68	34,61	65,39	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	44,15	9,60	75,12	24,88	52,030	12,43	58,58	41,42	57,97	13,17	47,78	52,22	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	29,57	8,22	83,34	16,66	37,370	11,67	70,25	29,75	43,13	13,37	61,15	38,85	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	19,41	5,72	89,06	10,94	25,560	9,40	79,65	20,35	30,06	11,77	72,92	27,08	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	11,42	4,50	93,57	6,43	15,370	8,11	87,76	12,24	18,46	10,45	83,37	16,63	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,62	4,96	98,52	1,48	3,720	9,27	97,04	2,96	4,68	12,41	95,78	4,22	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,48	100,00	0,00		2,96	100,00	0,00		4,22	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	70,10	---	---	---	73,10	---	---	---	73,80	---	---	---
Blaine				458				971				1604				2113	
Tempo (min)				0				18,7				37,4				56,0	
Energia (kWh/t)				0				7,1				14,1				21,2	

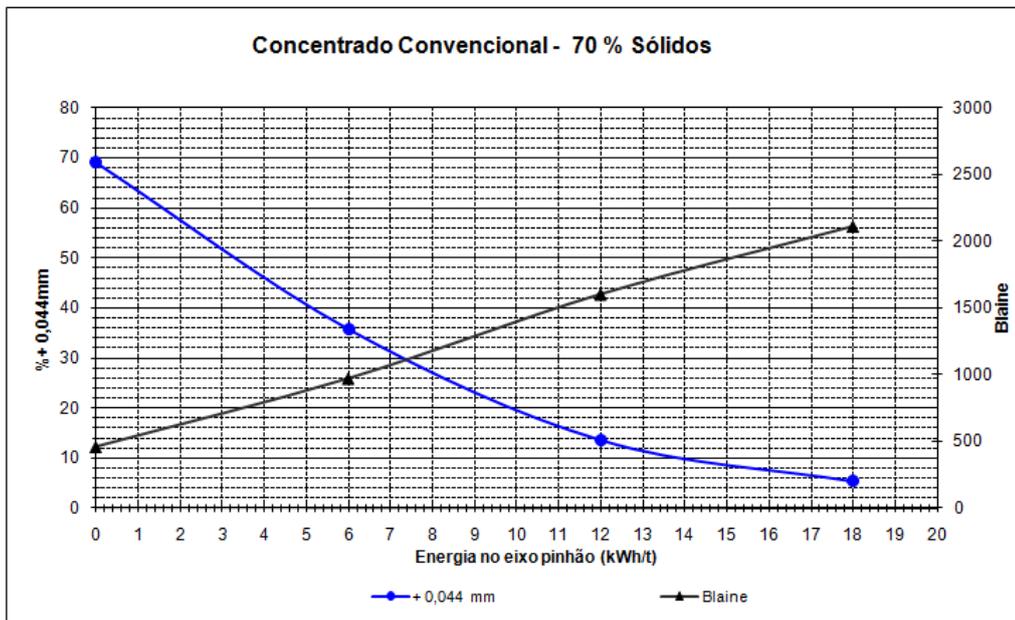
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - 80 % Sólidos

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

I. Resultados

Peneiramento	Alimentação					Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				
	Malha Tyler	Abertura μm	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,014	0,02	0,02	99,98	0,009	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,147	0,19	0,21	99,79	0,018	0,02	0,03	99,97	0,012	0,02	0,02	99,98	0,012
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	2,029	2,62	2,83	97,17	0,136	0,17	0,21	99,79	0,011	0,01	0,03	99,97	0,011
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	7,535	9,74	12,56	87,44	0,764	0,97	1,18	98,82	0,089	0,12	0,15	99,85	0,089
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	17,404	22,49	35,05	64,95	11,304	14,42	15,60	84,40	2,510	3,36	3,51	96,49	2,510
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	3,957	5,11	40,16	59,84	3,270	4,17	19,77	80,23	2,470	3,31	6,82	93,18	2,470
400	37	3,82	4,99	74,18	25,82	4,98	6,43	46,60	53,40	6,07	7,74	27,51	72,49	4,70	6,29	13,11	86,89	4,70
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,82	2,77	49,36	50,64	95,50	3,26	30,77	69,23	96,15	3,35	16,45	83,55	3,35	96,15
30	64,94	6,57	83,23	16,77	80,16	7,83	57,19	42,81	82,64	9,32	40,09	59,91	84,95	9,73	26,19	73,81	9,73	84,95
25	40,70	6,26	89,49	10,51	63,68	8,80	65,99	34,01	67,88	10,70	50,79	49,21	71,83	11,40	37,59	62,41	11,40	71,83
20	20,93	5,10	94,60	5,40	46,73	9,05	75,04	24,96	52,30	11,29	62,09	37,91	57,59	12,37	49,96	50,04	12,37	57,59
15	7,89	3,37	97,96	2,04	31,57	8,10	83,14	16,86	37,81	10,50	72,59	27,41	43,64	12,12	62,08	37,92	12,12	72,59
10	2,91	1,29	99,25	0,75	20,54	5,89	89,03	10,97	26,37	8,29	80,88	19,12	31,54	10,51	72,59	27,41	10,51	80,88
5	2,26	0,17	99,42	0,58	12,02	4,55	93,58	6,42	16,07	7,47	88,35	11,65	19,81	10,19	82,79	17,21	10,19	88,35
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,76	4,95	98,53	1,47	3,89	8,83	97,18	2,82	5,00	12,87	95,66	4,34	12,87	97,18
<1		0,14	100,00	0,00		1,47	100,00	0,00		2,82	100,00	0,00		4,34	100,00	0,00		2,82
Total		76,50	---	---	---	77,40	---	---	---	78,40	---	---	---	74,70	---	---	---	---
Blaine				458				963				1553				2175		
Tempo (min)				0				26,1				52,1				78,2		
Energia (kWh/t)				0				5,1				10,1				15,2		

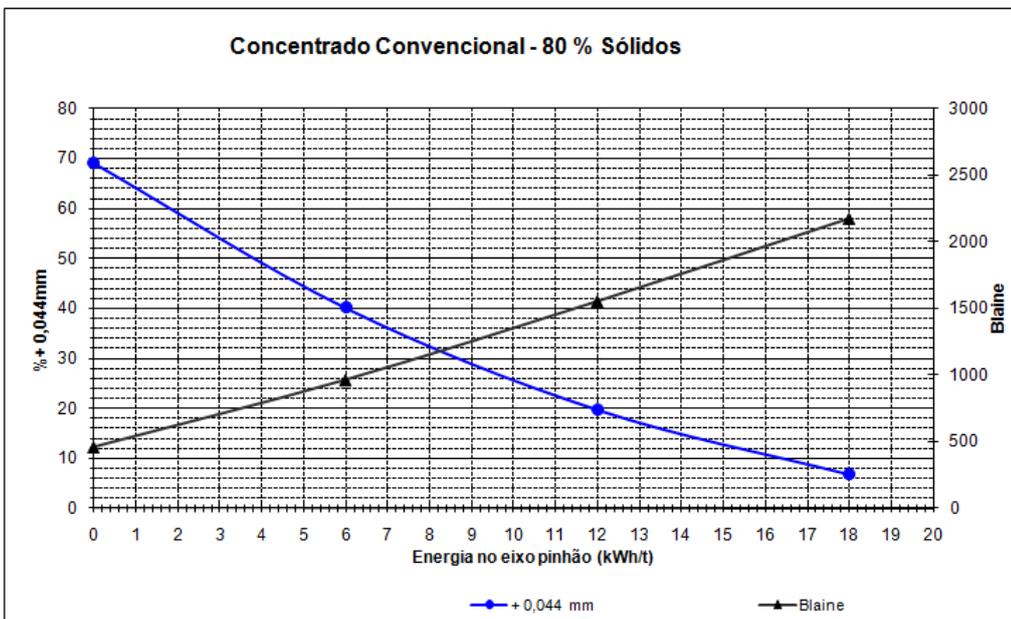
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - BULAB 49 CT

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

I. Resultados

Peneiramento	Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem					
	Malha Tyler	Abertura μm	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,175	0,22	0,22	99,78	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,22	99,78	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,22	99,78	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,22	99,78	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,016	0,02	0,02	99,98	0,000	0,00	0,22	99,78	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,080	0,11	0,13	99,87	0,020	0,03	0,25	99,75	0,012	0,02	0,02	99,98	0,000
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	1,062	1,40	1,52	98,48	0,059	0,07	0,32	99,68	0,019	0,02	0,04	99,96	0,000
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	5,277	6,94	8,47	91,53	0,444	0,56	0,88	99,12	0,075	0,10	0,14	99,86	0,000
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	16,491	21,70	30,17	69,83	6,281	7,93	8,81	91,19	1,538	2,00	2,14	97,86	0,000
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	4,665	6,14	36,30	63,70	4,501	5,68	14,49	85,51	2,049	2,66	4,80	95,20	0,000
400	37	3,82	4,99	74,18	25,82	5,78	7,61	43,91	56,09	5,81	7,34	21,83	78,17	3,66	4,76	9,56	90,44	0,000
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,64	3,01	46,92	53,08	95,49	3,53	25,36	74,64	96,16	3,47	13,04	86,96	0,000	0,000
30	64,94	6,57	83,23	16,77	79,62	8,42	55,34	44,66	82,57	10,10	35,46	64,54	84,92	10,16	23,20	76,80	0,000	0,000
25	40,70	6,26	89,49	10,51	63,02	9,31	64,65	35,35	67,81	11,54	47,00	53,00	71,50	12,14	35,34	64,66	0,000	0,000
20	20,93	5,10	94,60	5,40	46,28	9,39	74,04	25,96	52,24	12,17	59,17	40,83	56,59	13,48	48,82	51,18	0,000	0,000
15	7,89	3,37	97,96	2,04	31,55	8,26	82,31	17,69	37,68	11,38	70,55	29,45	41,73	13,44	62,26	37,74	0,000	0,000
10	2,91	1,29	99,25	0,75	20,79	6,03	88,34	11,66	25,96	9,16	79,71	20,29	29,01	11,50	73,76	26,24	0,000	0,000
5	2,26	0,17	99,42	0,58	12,07	4,89	93,23	6,77	15,62	8,08	87,79	12,21	17,65	10,27	84,04	15,96	0,000	0,000
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,77	5,22	98,45	1,55	3,75	9,28	97,07	2,93	4,19	12,17	96,21	3,79	0,000	0,000
<1		0,14	100,00	0,00		1,55	100,00	0,00		2,93	100,00	0,00		3,79	100,00	0,00	0,000	0,000
Total		76,50	---	---	---	76,00	---	---	---	79,20	---	---	---	76,90	---	---	---	---
Blaine				458				991				1547					2078	
Tempo (min)				0				22,0				44,0					66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0					18,0	

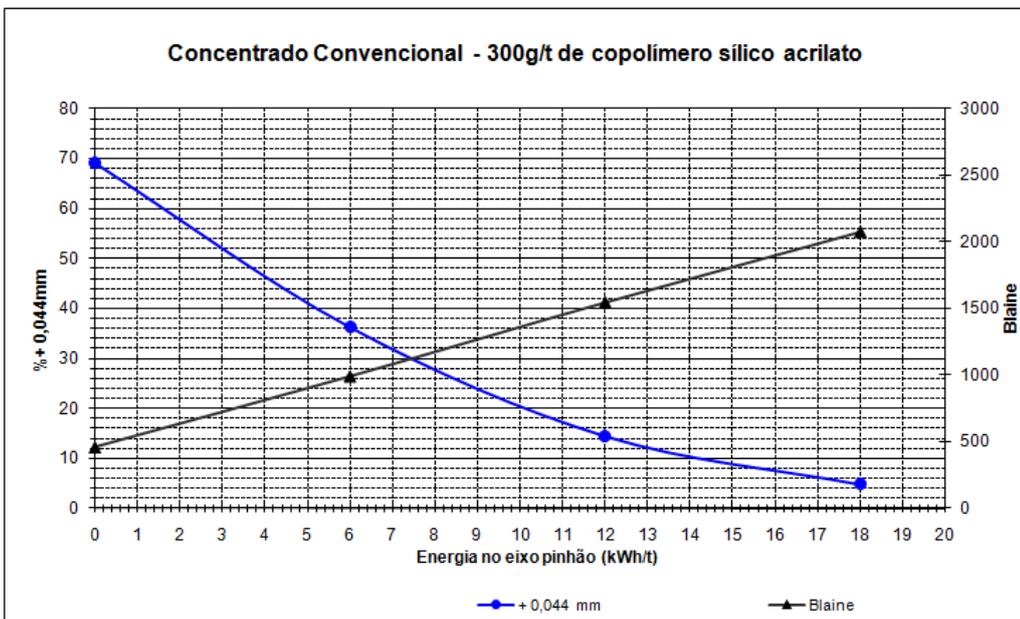
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia



Amostra: Concentrado Flotação Convencional - DPW 410

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha Tyler	Abertura μm	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Passante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Passante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Passante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Passante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,03	0,03	99,97
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,03	99,97
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,03	99,97
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,03	99,97
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,015	0,02	0,02	99,98	0,008	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,03	99,97
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,084	0,13	0,15	99,85	0,016	0,02	0,03	99,97	0,013	0,02	0,04	99,96
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	0,901	1,40	1,56	98,44	0,086	0,12	0,15	99,85	0,015	0,02	0,07	99,93
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	4,276	6,65	8,21	91,79	0,504	0,68	0,82	99,18	0,085	0,12	0,19	99,81
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	14,707	22,87	31,08	68,92	6,614	8,87	9,69	90,31	1,445	2,09	2,28	97,72
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	2,377	3,70	34,77	65,23	2,915	3,91	13,60	86,40	1,646	2,38	4,66	95,34
400	37	3,82	4,99	74,18	25,82	4,88	7,59	42,37	57,63	5,35	7,18	20,77	79,23	2,95	4,26	8,93	91,07
35	90,37	2,49	76,67	23,33	92,45	4,35	46,72	53,28	95,49	3,57	24,35	75,65	96,15	3,51	12,43	87,57	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	71,80	11,90	58,62	41,38	82,58	10,23	34,57	65,43	84,75	10,38	22,81	77,19	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	50,34	12,37	70,99	29,01	67,77	11,73	46,31	53,69	71,12	12,41	35,23	64,77	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	30,82	11,25	82,24	17,76	52,09	12,42	58,73	41,27	56,31	13,49	48,72	51,28	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	16,29	8,37	90,61	9,39	37,40	11,64	70,37	29,63	41,17	13,78	62,50	37,50	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	8,87	4,28	94,89	5,11	25,62	9,33	79,70	20,30	28,52	11,52	74,03	25,97	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	4,51	2,51	97,40	2,60	15,24	8,22	87,93	12,07	17,37	10,15	84,18	15,82	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	1,03	2,01	99,41	0,59	3,54	9,27	97,20	2,80	4,31	11,89	96,07	3,93	
< 1		0,14	100,00	0,00		0,59	100,00	0,00		2,80	100,00	0,00		3,93	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	64,30	---	---	---	74,60	---	---	---	69,10	---	---	---
Blaine				458				924				1469				1970	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

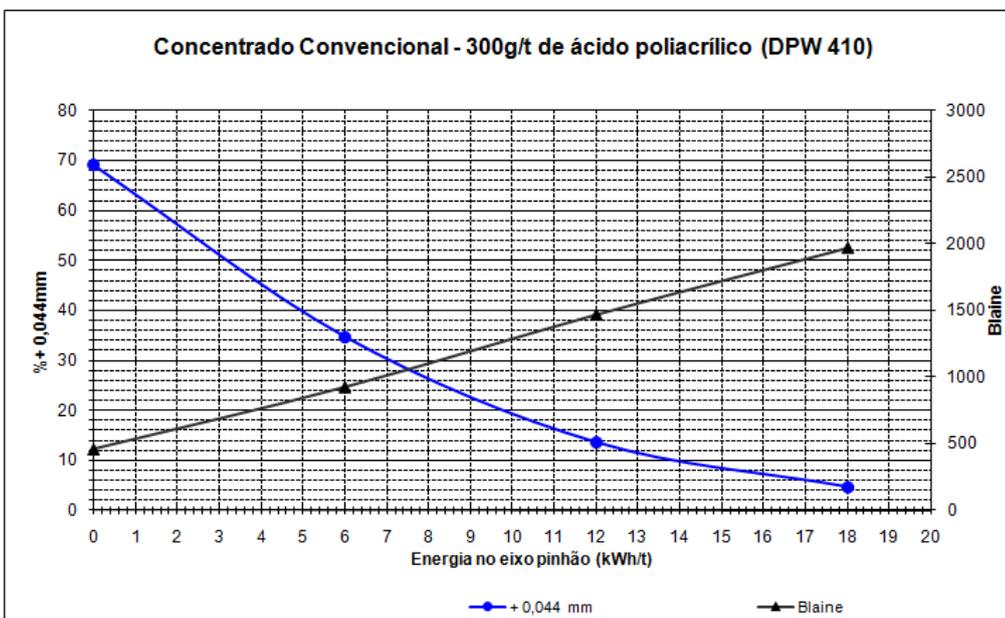
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia



Amostra: Concentrado Flotação Convencional - Ácido Cítrico

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha	Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-
Tyler	µm	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,008	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,050	0,07	0,08	99,92	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,007	0,01	0,09	99,91	0,014	0,02	0,02	99,98	0,014	0,02	0,02	99,98
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,110	0,15	0,25	99,75	0,015	0,02	0,04	99,96	0,021	0,03	0,05	99,95
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	1,168	1,65	1,89	98,11	0,072	0,10	0,14	99,86	0,027	0,04	0,08	99,92
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	4,813	6,78	8,67	91,33	0,552	0,74	0,88	99,12	0,081	0,11	0,19	99,81
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	16,491	23,23	31,90	68,10	6,349	8,53	9,41	90,59	1,705	2,25	2,44	97,56
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	4,795	6,75	38,65	61,35	3,237	4,35	13,76	86,24	1,602	2,11	4,55	95,45
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	5,61	7,90	46,55	53,45	5,42	7,29	21,05	78,95	3,64	4,80	9,35	90,65
35	90,37	2,49	76,67	23,33	93,31	3,58	50,13	49,87	95,31	3,70	24,75	75,25	96,28	3,37	12,72	87,28	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	75,09	9,74	59,87	40,13	81,81	10,66	35,41	64,59	85,34	9,92	22,64	77,36	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	56,34	10,02	69,89	30,11	66,78	11,87	47,28	52,72	72,23	11,88	34,53	65,47	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	39,06	9,24	79,12	20,88	51,10	12,38	59,66	40,34	57,55	13,31	47,83	52,17	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	25,17	7,42	86,55	13,45	36,66	11,40	71,06	28,94	42,76	13,41	61,24	38,76	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	16,09	4,85	91,40	8,60	25,24	9,02	80,07	19,93	29,88	11,68	72,91	27,09	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	9,29	3,63	95,03	4,97	15,23	7,90	87,98	12,02	18,20	10,59	83,50	16,50	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,08	3,85	98,89	1,11	3,71	9,10	97,07	2,93	4,33	12,57	96,07	3,93	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,11	100,00	0,00		2,93	100,00	0,00		3,93	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	71,00	---	---	---	74,40	---	---	---	75,80	---	---	---
Blaine				458				814				1381				1909	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

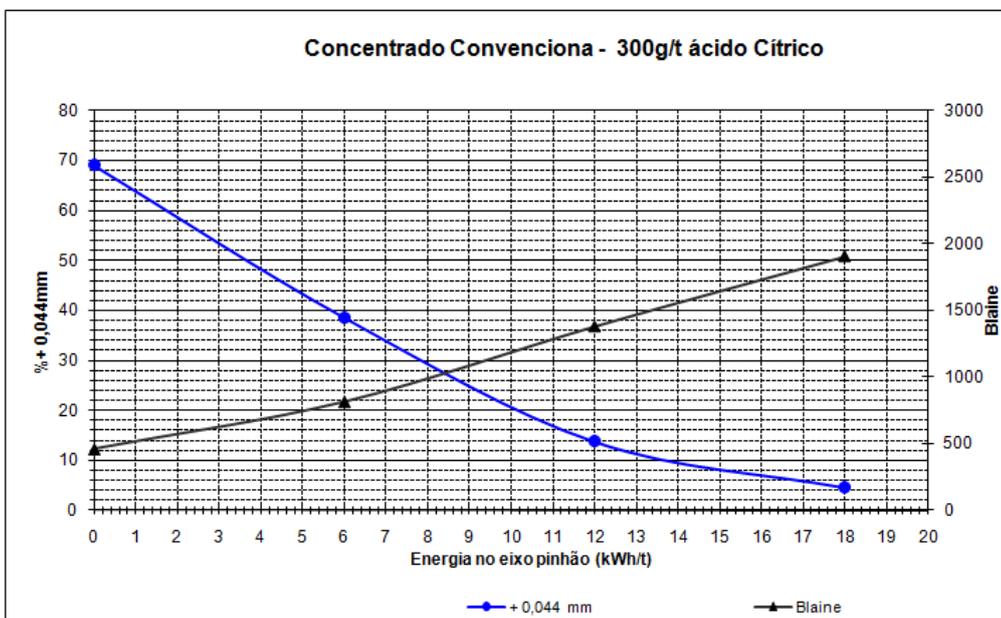
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - Hexametáfosfato de Sódio
 Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira
 Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha Tyler	Abertura μm	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
20	840	0,158	0,21	0,21	99,79	0,005	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
28	595	0,140	0,18	0,39	99,61	0,008	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
35	420	0,625	0,82	1,21	98,79	0,022	0,02	0,04	99,96	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
48	297	1,224	1,60	2,81	97,19	0,018	0,02	0,06	99,94	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00
65	210	4,472	5,85	8,65	91,35	0,031	0,04	0,09	99,91	0,013	0,02	0,02	99,98	0,019	0,03	0,03	99,97
100	149	9,131	11,94	20,59	79,41	0,129	0,15	0,24	99,76	0,017	0,02	0,04	99,96	0,015	0,02	0,05	99,95
150	105	10,441	13,65	34,24	65,76	1,102	1,25	1,49	98,51	0,062	0,09	0,13	99,87	0,021	0,03	0,08	99,92
200	74	9,597	12,55	46,78	53,22	5,058	5,72	7,20	92,80	0,462	0,65	0,78	99,22	0,092	0,13	0,20	99,80
270	53	14,548	19,02	65,80	34,20	21,171	23,92	31,12	68,88	6,524	9,21	10,00	90,00	1,797	2,49	2,69	97,31
325	44	2,591	3,39	69,19	30,81	6,039	6,82	37,95	62,05	3,213	4,54	14,54	85,46	1,663	2,30	5,00	95,00
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	6,890	7,79	45,73	54,27	5,73	8,09	22,63	77,37	3,454	4,78	9,78	90,22
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,29	3,10	48,83	51,17	94,85	3,98	26,61	73,39	96,05	3,56	13,34	86,66	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	78,38	8,63	57,46	42,54	80,23	11,31	37,92	62,08	84,46	10,46	23,80	76,20	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	61,09	9,38	66,85	33,15	63,90	12,64	50,56	49,44	70,64	12,47	36,27	63,73	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	44,09	9,23	76,07	23,93	47,35	12,81	63,36	36,64	55,37	13,78	50,05	49,95	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	29,50	7,92	83,99	16,01	32,65	11,37	74,74	25,26	40,28	13,61	63,66	36,34	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	19,13	5,63	89,62	10,38	21,66	8,50	83,24	16,76	27,46	11,57	75,23	24,77	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	11,02	4,40	94,02	5,98	12,70	6,93	90,17	9,83	16,24	10,12	85,35	14,65	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,48	4,63	98,65	1,35	2,99	7,51	97,69	2,31	3,65	11,36	96,71	3,29	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,35	100,00	0,00		2,31	100,00	0,00		3,29	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	88,50	---	---	---	70,80	---	---	---	72,20	---	---	---
Blaine				458				921				1285				1825	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

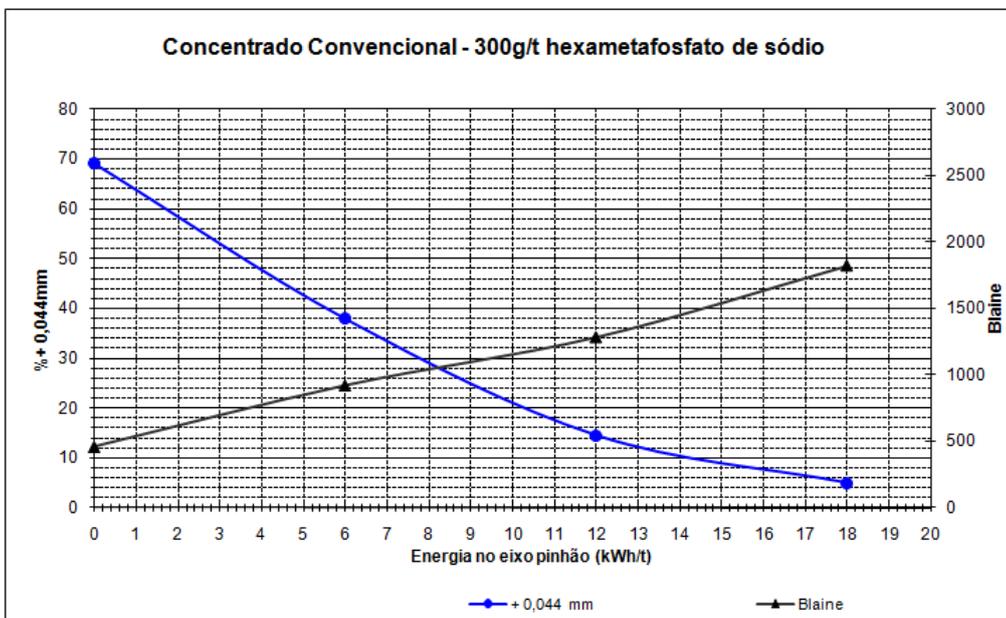
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - Cal
 Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira
 Determinação Energética da Remoagem

I. Resultados

Peneiramento	Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem					
	Malha Tyler	Abertura μm	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
20	840	0,16	0,21	0,21	99,79	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
28	595	0,14	0,18	0,39	99,61	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
35	420	0,63	0,82	1,21	98,79	0,007	0,01	0,01	99,99	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
48	297	1,22	1,60	2,81	97,19	0,014	0,02	0,02	99,98	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000	0,00	0,00	100,00	0,000
65	210	4,47	5,85	8,65	91,35	0,016	0,02	0,04	99,96	0,013	0,01	0,01	99,99	0,009	0,01	0,01	99,99	0,009
100	149	9,13	11,94	20,59	79,41	0,129	0,15	0,19	99,81	0,011	0,01	0,03	99,97	0,013	0,01	0,02	99,98	0,013
150	105	10,44	13,65	34,24	65,76	1,455	1,64	1,83	98,17	0,087	0,10	0,13	99,87	0,029	0,03	0,06	99,94	0,029
200	74	9,60	12,55	46,78	53,22	7,282	8,20	10,03	89,97	0,568	0,64	0,77	99,23	0,100	0,11	0,17	99,83	0,100
270	53	14,55	19,02	65,80	34,20	21,056	23,71	33,74	66,26	9,610	10,88	11,65	88,35	2,756	3,12	3,30	96,70	2,756
325	44	2,59	3,39	69,19	30,81	5,340	6,01	39,75	60,25	5,600	6,34	17,99	82,01	2,877	3,26	6,56	93,44	2,877
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	6,66	7,50	47,25	52,75	6,67	7,55	25,54	74,46	4,42	5,01	11,57	88,43	4,42
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,49	2,91	50,16	49,84	95,51	3,34	28,89	71,11	96,14	3,41	14,99	85,01	95,51	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	79,09	8,12	58,28	41,72	82,67	9,56	38,45	61,55	84,86	9,97	24,96	75,04	82,67	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	62,19	8,91	67,20	32,80	68,04	10,89	49,34	50,66	71,51	11,81	36,77	63,23	68,04	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	45,30	8,91	76,11	23,89	52,65	11,46	60,80	39,20	56,81	13,00	49,76	50,24	52,65	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	30,52	7,80	83,90	16,10	38,22	10,74	71,54	28,46	42,27	12,86	62,62	37,38	38,22	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	19,77	5,67	89,57	10,43	26,49	8,73	80,28	19,72	29,77	11,05	73,68	26,32	26,49	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	11,13	4,56	94,13	5,87	15,88	7,90	88,18	11,82	18,40	10,05	83,73	16,27	15,88	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,36	4,63	98,76	1,24	3,82	8,98	97,16	2,84	4,64	12,17	95,90	4,10	3,82	
<1	0,14	100,00	0,00	0,00	1,24	100,00	0,00	0,00	2,84	100,00	0,00	0,00	4,10	100,00	0,00	0,00	2,84	
Total	76,50	---	---	---	88,80	---	---	---	88,30	---	---	---	88,20	---	---	---	---	---
Blaine	458				992				1580				2162					
Tempo (min)	0				22,0				44,0				66,0					
Energia (kWh/t)	0				6,0				12,0				18,0					

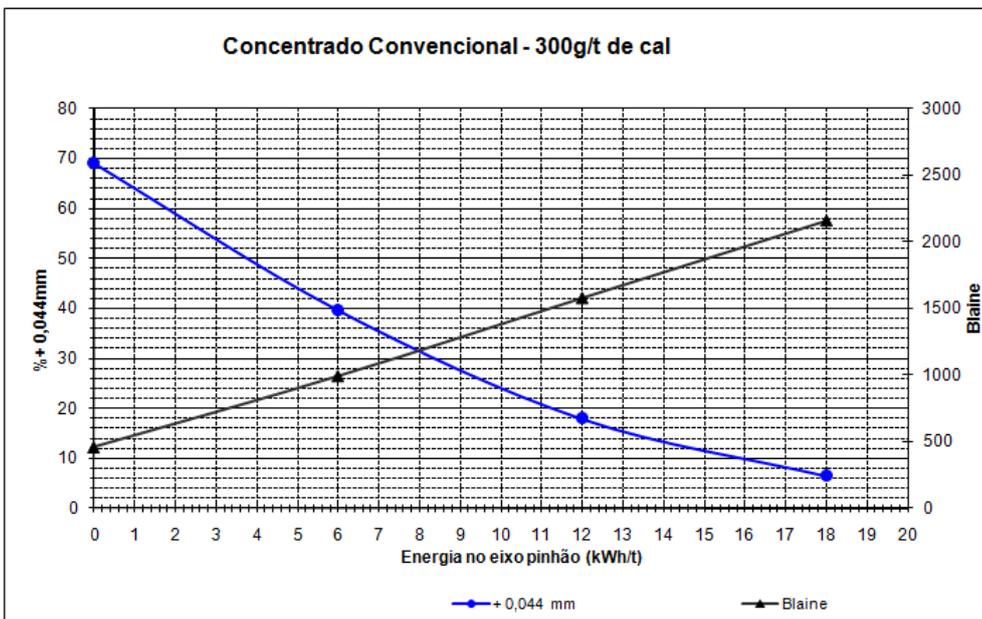
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Laboratório Controle de Processo - LCP

Amostra: Concentrado Flotação Convencional - Água de Processo
 Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira
 Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha Tyler	Abertura um	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	840	0,16	0,21	0,21	99,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
28	595	0,14	0,18	0,39	99,61	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
35	420	0,63	0,82	1,21	98,79	0,01	0,01	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
48	297	1,22	1,60	2,81	97,19	0,03	0,05	0,06	99,94	0,03	0,05	0,05	99,95	0,03	0,04	0,04	99,96
65	210	4,47	5,85	8,65	91,35	0,01	0,02	0,08	99,92	0,02	0,03	0,08	99,92	0,02	0,03	0,07	99,93
100	149	9,13	11,94	20,59	79,41	0,08	0,13	0,21	99,79	0,07	0,11	0,19	99,81	0,03	0,04	0,11	99,89
150	105	10,44	13,65	34,24	65,76	0,96	1,56	1,77	98,23	0,17	0,25	0,44	99,56	0,04	0,05	0,17	99,83
200	74	9,60	12,55	46,78	53,22	3,80	6,16	7,93	92,07	0,50	0,75	1,19	98,81	0,10	0,15	0,32	99,68
270	53	14,55	19,02	65,80	34,20	13,85	22,45	30,37	69,63	6,01	9,06	10,25	89,75	1,82	2,69	3,01	96,99
325	44	2,59	3,39	69,19	30,81	2,02	3,27	33,64	66,36	1,06	1,60	11,85	88,15	0,80	1,18	4,19	95,81
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	4,83	7,82	41,46	58,54	5,04	7,59	19,44	80,56	3,31	4,90	9,09	90,91
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,74	3,08	44,54	55,46	95,37	3,73	23,17	76,83	96,15	3,50	12,59	87,41	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	79,89	8,69	53,24	46,76	82,13	10,67	33,84	66,16	84,91	10,22	22,81	77,19	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	63,27	9,73	62,96	37,04	67,18	12,04	45,88	54,12	71,54	12,15	34,96	65,04	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	46,32	9,92	72,89	27,11	51,68	12,49	58,37	41,63	56,74	13,45	48,42	51,58	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	31,32	8,78	81,67	18,33	37,36	11,54	69,90	30,10	42,11	13,30	61,72	38,28	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	20,51	6,33	87,99	12,01	25,88	9,25	79,15	20,85	29,70	11,28	73,00	27,00	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	12,10	4,92	92,92	7,08	15,60	8,28	87,43	12,57	18,52	10,16	83,16	16,84	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,83	5,43	98,34	1,66	3,81	9,50	96,93	3,07	4,61	12,65	95,81	4,19	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,66	100,00	0,00		3,07	100,00	0,00		4,19	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	61,70	---	---	---	66,30	---	---	---	67,60	---	---	---
Blaine				458				955				1585				2253	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

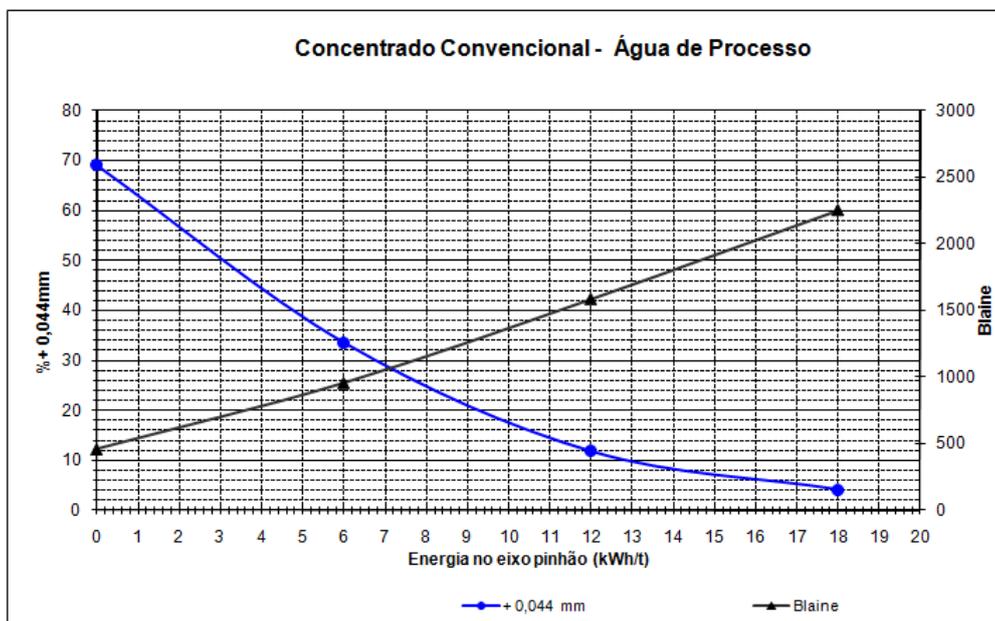
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia



Amostra: Concentrado Flotação Convencional - pH 7,29

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha Tyler	Abertura um	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	840	0,16	0,21	0,21	99,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
28	595	0,14	0,18	0,39	99,61	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
35	420	0,63	0,82	1,21	98,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
48	297	1,22	1,60	2,81	97,19	0,01	0,01	0,01	99,99	0,00	0,01	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00	100,00
65	210	4,47	5,85	8,65	91,35	0,01	0,02	0,03	99,97	0,01	0,01	0,01	99,99	0,01	0,02	0,02	99,98
100	149	9,13	11,94	20,59	79,41	0,05	0,13	0,16	99,84	0,01	0,02	0,04	99,96	0,02	0,03	0,04	99,96
150	105	10,44	13,65	34,24	65,76	0,60	1,45	1,61	98,39	0,07	0,12	0,15	99,85	0,03	0,05	0,09	99,91
200	74	9,60	12,55	46,78	53,22	2,53	6,18	7,79	92,21	0,43	0,68	0,83	99,17	0,11	0,18	0,28	99,72
270	53	14,55	19,02	65,80	34,20	9,42	22,97	30,76	69,24	6,13	9,63	10,46	89,54	1,87	3,00	3,28	96,72
325	44	2,59	3,39	69,19	30,81	3,99	9,72	40,48	59,52	5,48	8,60	19,05	80,95	2,56	4,12	7,39	92,61
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	3,21	7,82	48,30	51,70	4,87	7,64	26,70	73,30	3,11	4,99	12,38	87,62
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,45	2,87	51,17	48,83	95,32	3,43	30,13	69,87	96,11	3,41	15,79	84,21	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	78,90	8,04	59,21	40,79	81,92	9,82	39,95	60,05	84,70	10,00	25,79	74,21	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	61,88	8,80	68,01	31,99	66,70	11,16	51,11	48,89	71,10	11,92	37,71	62,29	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	44,95	8,75	76,76	23,24	50,85	11,62	62,73	37,27	56,08	13,16	50,87	49,13	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	30,20	7,63	84,39	15,61	36,27	10,69	73,41	26,59	41,27	12,98	63,84	36,16	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	19,48	5,54	89,93	10,07	24,84	8,38	81,79	18,21	28,80	10,93	74,77	25,23	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	11,02	4,37	94,30	5,70	14,91	7,28	89,07	10,93	17,74	9,69	84,46	15,54	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,46	4,43	98,73	1,27	3,54	8,33	97,41	2,59	4,35	11,73	96,19	3,81	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,27	100,00	0,00		2,59	100,00	0,00		3,81	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	41,00	---	---	---	63,70	---	---	---	62,20	---	---	---
Blaine				458				955				1585				2253	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

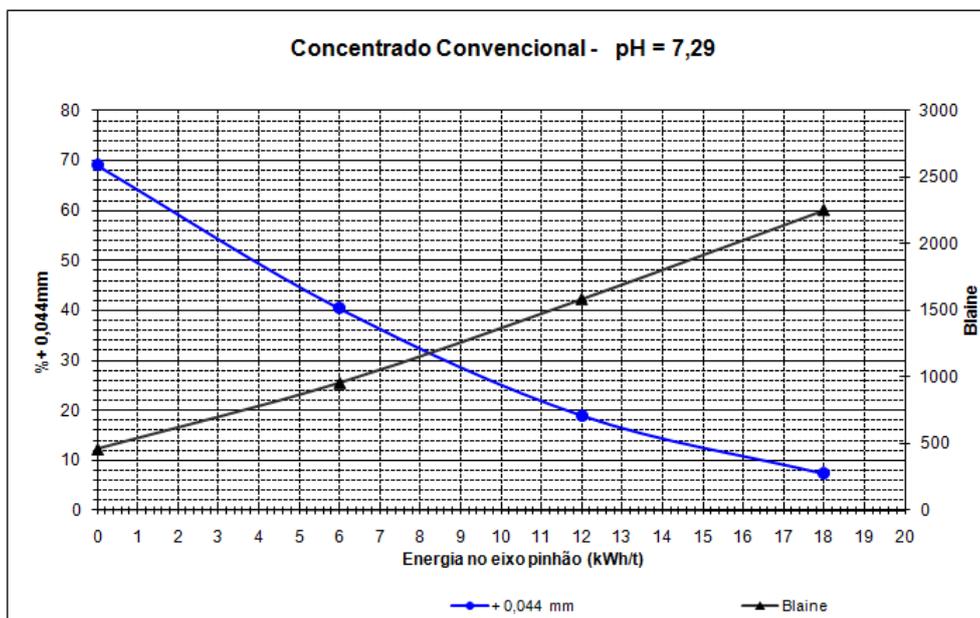
Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia





Amostra: Concentrado Flotação Convencional - pH 8,5

Projeto: Doutorado de Marcos Gomes Vieira

Determinação Energética da Remoagem

1. Resultados

Peneiramento		Alimentação				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem			
Malha Tyler	Abertura um	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante
16	1.000	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20	840	0,16	0,21	0,21	99,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
28	595	0,14	0,18	0,39	99,61	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
35	420	0,63	0,82	1,21	98,79	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,01	99,99	0,00	0,00	0,00	100,00
48	297	1,22	1,60	2,81	97,19	0,01	0,01	0,01	99,99	0,00	0,01	0,02	99,98	0,00	0,00	0,00	100,00
65	210	4,47	5,85	8,65	91,35	0,01	0,01	0,02	99,98	0,01	0,01	0,03	99,97	0,01	0,02	0,02	99,98
100	149	9,13	11,94	20,59	79,41	0,08	0,12	0,14	99,86	0,02	0,03	0,06	99,94	0,03	0,04	0,06	99,94
150	105	10,44	13,65	34,24	65,76	0,96	1,45	1,59	98,41	0,07	0,11	0,18	99,82	0,05	0,07	0,13	99,87
200	74	9,60	12,55	46,78	53,22	4,39	6,63	8,21	91,79	0,38	0,64	0,82	99,18	0,12	0,19	0,32	99,68
270	53	14,55	19,02	65,80	34,20	15,45	23,34	31,55	68,45	5,83	9,69	10,50	89,50	1,73	2,72	3,05	96,95
325	44	2,59	3,39	69,19	30,81	5,66	8,55	40,10	59,90	4,04	6,71	17,22	82,78	2,46	3,88	6,93	93,07
400	37	3,820	4,99	74,18	25,82	5,03	7,60	47,70	52,30	4,38	7,27	24,49	75,51	3,78	5,95	12,88	87,12
35	90,37	2,49	76,67	23,33	94,28	2,99	50,69	49,31	95,76	3,20	27,69	72,31	96,34	3,19	16,07	83,93	
30	64,94	6,57	83,23	16,77	78,37	8,32	59,01	40,99	83,45	9,30	36,98	63,02	85,49	9,45	25,52	74,48	
25	40,70	6,26	89,49	10,51	61,13	9,02	68,03	31,97	68,98	10,93	47,91	52,09	72,36	11,44	36,96	63,04	
20	20,93	5,10	94,60	5,40	44,21	8,85	76,88	23,12	53,29	11,85	59,76	40,24	57,56	12,89	49,85	50,15	
15	7,89	3,37	97,96	2,04	29,68	7,60	84,48	15,52	38,32	11,30	71,06	28,94	42,68	12,96	62,82	37,18	
10	2,91	1,29	99,25	0,75	19,38	5,39	89,86	10,14	26,40	9,00	80,06	19,94	29,94	11,10	73,92	26,08	
5	2,26	0,17	99,42	0,58	11,23	4,26	94,13	5,87	16,25	7,66	87,73	12,27	18,63	9,85	83,77	16,23	
1	0,53	0,45	99,86	0,14	2,56	4,53	98,66	1,34	4,02	9,24	96,96	3,04	4,69	12,14	95,91	4,09	
< 1		0,14	100,00	0,00		1,34	100,00	0,00		3,04	100,00	0,00		4,09	100,00	0,00	
Total		76,50	---	---	---	66,20	---	---	---	60,20	---	---	---	63,50	---	---	---
Blaine				458				955				1585				2253	
Tempo (min)				0				22,0				44,0				66,0	
Energia (kWh/t)				0				6,0				12,0				18,0	

Análise Química:

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	FeO
64,71	4,69	0,28	0,031	2,39	0,05	

Peso específico:

4,782

2. Curvas % + 0,044m e Blaine x energia

