



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA



***PROJETO E OPERAÇÃO DE HIDRATADORES  
INDUSTRIAIS DE CAL VIRGEM***

***Priciane Martins Parreira***

Uberlândia – MG

2010





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**



***PROJETO E OPERAÇÃO DE HIDRATADORES***  
***INDUSTRIAIS DE CAL VIRGEM***

**Priciane Martins Parreira**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2010



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 20 DE DEZEMBRO DE 2010

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique  
Orientador (PPGEQ/UFU)

---

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
PPGEQ/UFU

---

Prof. Dr. Marlei Barboza Pasotto  
Coordenador EQ/UFTM



# ***AGRADECIMENTOS***

Descobrir quais são minhas qualidades e meus defeitos e onde meu desempenho será melhor sempre foi minha maior preocupação. E acredito que seja o desafio de muitas pessoas. Para mim, era uma angústia diária. Fazer escolhas sempre foi difícil, pois sabia que deveria estar preparada para o erro e para o acerto.

E em todos os momentos da minha vida eu encontrei pessoas que não somente me apoiaram, mas viram em mim algo que estava obscuro para mim. E além de grandes amigos tornaram grandes exemplos.

A começar, agradeço aos meus pais que abdicaram dos seus sonhos para viver o meu sonho. Que quando pequena já perceberam a minha vontade de aprender e para poder me dedicar exclusivamente a esse objetivo me pouparam de muitos assuntos da realidade humana. Que mesmo com a maior dor que um ser humano pode sentir, a perda de um filho, souberam acreditar em mim e principalmente confiar nas minhas escolhas. Nunca vou esquecer aquela frase que foi meu apoio emocional durante anos: “Enquanto eu puder, eu vou fazer de tudo para que vocês possam estudar”. E assim se fez.

Minha irmã também tem lugar de honra nestes agradecimentos. Sempre foi a parte que faltava em mim: o coração, a emoção e a compreensão. E hoje que não a tenho por perto tenho que ser também a parte que falta em mim, ela. Tenho muito orgulho de ser sua irmã.

E terminando no âmbito familiar quero agradecer ao David que entrou gradativamente em minha vida e foi se tornando meu espelho, meu esteio e meu companheiro de todos os dias de angústias e de todos os dias de alegria. O que dizer desse exemplo de caráter que muitas vezes abriu mão de alguns sonhos para que eu concluísse meu objetivo.

E no âmbito profissional vou agradecer as pessoas na ordem em que entraram em minha vida. A minha amiga que desde o primeiro dia de faculdade até o último esteve ao meu lado, respeitou meus momentos e me mostrou que se você quer algo da vida tem que correr atrás. Stela Mara tornou-se um exemplo de vida para todos que tiveram a honra de conviver com ela.

Agradeço a alguns colegas de trabalho que se tornaram meus grandes amigos: Elaine, Larissa e Lygia. Agradeço as minhas amigas Camila e Nádia pelas horas de companheirismo. Quanta alegria compartilhada e quantos sonhos realizados.

Aos meus professores pelo apoio e pela lição de profissionalismo. Em especial a professora Carla pelo carinho e por colaborar com meus anseios. Acreditou e confiou em mim em muitos momentos em que precisei. E também quero agradecer a um professor que especialmente se tornou um grande amigo. O Humberto fez em vários momentos papel de pai, me apoiou, me ensinou e persistiu várias vezes em meu aprendizado. Ele tornou o meu mestrado uma experiência profissional me colocando no mercado de trabalho de forma qualificada. E é o maior exemplo de profissional que eu tenho. Sempre esteve perto e disponível, mesmo que o assunto em questão fosse irrelevante. Nunca se recusou a discutir um assunto e sempre elevou nossas conversas ao mesmo patamar. Ele me fez acreditar que sou uma engenheira.

Todas essas pessoas citadas são as maiores influências que eu tive em minha vida. Em muitos momentos eu confiei a minha felicidade nas mãos delas e nunca me decepcionei. De alguma forma elas contribuíram para fazer dos meus sonhos grandes realizações.

*“Para alcançar a prosperidade é preciso persistência, ter clareza de onde quer chegar e muita dedicação para chegar lá.”*



---

# RESUMO

---

O produto proveniente do processo de hidratação da cal, o leite de cal, é um dos subprodutos da cal mais utilizados industrialmente, pois está presente nos processos das indústrias siderúrgicas, químicas e usinas de açúcar e álcool. Porém o processo de hidratação ainda é pouco estudado e esta dissertação tem como objetivo estudar a influência do processo de hidratação da cal na qualidade do produto e a influência da qualidade do leite de cal na eficiência do processo industrial no qual a leite de cal é utilizado. Através de dados industriais verificou-se que o processo de hidratação atual e mais usado pelas industriais é inadequado e produz quantidades altas de resíduos, proporcionando a empresa perdas. No processo industrial a qualidade do leite de cal melhora o desempenho do processo industrial diminuindo a quantidade de material utilizado e a quantidade de resíduos formados, conseqüentemente o seu acúmulo nos equipamentos. E para se produzir um leite de cal de boa qualidade, com alta área superficial e baixa quantidade de resíduos, deve-se utilizar um processo de mistura adequado as suspensões de leite de cal: Granulometrias baixas de cal e aquecimento da água inicial de hidratação. E principalmente uma agitação eficiente e adequada. Por isso, o projeto piloto de uma unidade de hidratação foi proposto e através deste fez-se o estudo reológico das suspensões de leite de cal e com esses dados, fez-se o estudo da potência consumida pelo agitador. Também foi proposto mudanças no agitador para melhorar a eficiência da agitação e um sistema de remoção de resíduos ao final da hidratação através de peneiras rotativas.

**Palavras-chave:** Cal, leite de cal, reologia, hidratador, agitador, potência consumida.



---

# ABSTRACT

---

The product of the hydration process of lime, milk of lime, is a byproduct of lime commonly used industrially because it is present in the industrial processes of steel mill, chemical and sugar and alcohol. But the hydration process has been little studied and this dissertation aims to study the influence of the hydration process in the quality of product and the influence of quality of milk of lime in the efficiency of the industrial process which milk of lime is used. Through industry data found that the hydration process current and more useful for industrial is inappropriate and produces high amounts of residues that provide the company losses. In the industrial process the quality of milk of lime improves the performance of the industrial process by reducing the amount of material used and the amount of residue formed, consequently its accumulation in the equipment. And to produce a lime milk of good quality, high surface area and low amount of residue, you should use a mixing process suitable for the suspensions of lime milk with low particle sizes of lime and heating of initial water of hydration. And especially an efficient and appropriate agitation Therefore, the pilot of a unit of hydration was proposed and through this became the rheological behavior of suspensions of milk of lime and with these data, made up the study of power consumed by the agitator. It was also proposed changes on impeller to improve the efficiency of agitation and a system of residue removal at the end of hydration through rotary screens.

**Palavras-chave:** Lime, lime milk, rheology, slaked lime, impeller, power.



---

# LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 2.1- O CALCÁRIO E A SUA EXTRAÇÃO. ....	5
FIGURA 2.2- (A) FORNO DE BARRANCO, (B) FORNO ROTATIVO E (C) FORNO VERTICAL. ....	6
FIGURA 2.3- APLICAÇÕES DA CAL PRODUZIDA NO BRASIL EM 2006. ....	7
FIGURA 2.4 – AJUSTE DA EQUAÇÃO DE ARRHENIUS. ....	11
FIGURA 2.5 - DESEMPENHO NA COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO. ....	13
FIGURA 2.7 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE CAL CALCÍTICA SINTERIZADA (A) E POROSA (B). ....	15
FIGURA 2.8 – REATOR DE HIDRATAÇÃO DE CAL. ....	16
FIGURA 2.9 – REATOR DE HIDRATAÇÃO DE CAL. ....	17
FIGURA 2.10 – REATOR DE HIDRATAÇÃO DE CAL. ....	19
FIGURA 2.11 – REATOR DE HIDRATAÇÃO DE CAL. ....	20
FIGURA 3.1- HASTE UTILIZADA NA REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO. ....	24
FIGURA 3.2 - ESQUEMA DA UNIDADE EXPERIMENTAL. ....	25
FIGURA 3.3 - WDS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X. ....	26
FIGURA 3.4- MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA. ....	27
FIGURA 3.5 – ESQUEMA DA UNIDADE EXPERIMENTAL DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EXTINÇÃO DA CAL. ....	28
FIGURA 3.6 - MASTERSIZER MICRO. ....	29
FIGURA 3.7 - UNIDADE DE CALAGEM DO CALDO. ....	29
FIGURA 3.8 – MEV DAS CALES C1 E C2 . ....	33
FIGURA 3.9 – MEV DAS CALES C3 E C4. ....	33
FIGURA 3.10 – MEV DOS LEITES DE CAL L1 E L2. ....	34
FIGURA 3.11 – MEV DOS LEITES DE CAL L3 E L4. ....	35
FIG. 3.12 - SEDIMENTAÇÃO DO CALDO CALEADO. ....	37
FIGURA 4.1 – ESQUEMA DA UNIDADE DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EXTINÇÃO DA CAL. .....	43
FIGURA 4.2 – HASTE UTILIZADA EM UM REATOR DE BANCADA. ....	44

FIGURA 4.4 – ESQUEMA DO REATOR DE HIDRATAÇÃO. ....	45
FIGURA 4.5 – VISTA FRONTAL (A) E SUPERIOR (B) DO REATOR. VÁLVULA DE DESCARGA (C). ....	45
FIGURA 4.6 – AGITADOR UTILIZADO NO PROCESSO. ....	46
FIGURA 4.7 – MOTOREDUTOR FIXADO A TAMPA DO REATOR (A) E INVERSOR DE FREQUÊNCIA (B). ....	47
FIGURA 4.8 – TERMORESISTOR (A) E TRANSMISSOR DIGITAL (B). ....	47
FIGURA 4.6 – GRÁFICO DE REATIVIDADE DE CAL EM REATORES DE ESCALAS DIFERENTES. .....	50
FIGURA 4.7 – CARBONATO DE CÁLCIO EVIDENTE NO RESÍDUO DE HIDRATAÇÃO.....	51
FIGURA 4.8 – RESÍDUO DE HIDRATAÇÃO DE CAL COM GRANULOMETRIA DE 0 A 7 MM E DE 7 A 14 MM.....	52
FIGURA 4.9 - TESTE DE HIDRATAÇÃO EM REATOR COM ESCALA PILOTO. ....	54
FIGURA 5.1 – LAYOUT DA PLANTA DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO. ....	57
FIGURA 5.2 – FORÇA DE CISALHAMENTO.....	58
FIGURA 5.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS.....	59
FIGURA 5.4 – COMPORTAMENTOS REOLÓGICOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS DEPENDENTES DO TEMPO .....	60
FIGURA 5.5 – CURVAS DE FLUIDOS NEWTONIANOS E NÃO NEWTONIANOS .....	60
FIGURA 5.6 – (A)BROOKFIELD LV-III ULTRA, (B) SPINDLE LV-3C E (C) DESCRIÇÃO DO SPINDLE CILINDRICO.....	62
FIGURA 5.7 – TEMPO DE EXTINÇÃO DE CALES EM DIFERENTES GRANULOMETRIA E CONCENTRAÇÕES. ....	66
FIGURA 5.8 – REOLOGIA DAS AMOSTRAS.....	68
FIGURA 5.9 – (A) REATOR COM FUNDO ESFÉRICO, (B) REATOR COM FUNDO RETO E CANTOS ABAUADOS E (C) REATOR COM FUNDO CÔNICO. ....	72
FIGURA 5.10 – VÓRTICES EM REATOR SEM CHICANA. ....	73
FIGURA 5.11 – LINHAS DE FLUXO EM UM REATOR COM DEFLETOR. ....	74
FIGURA 5.12 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DE TANQUE DE MISTURA. ....	75
FIGURA 5.13 – REATOR PILOTO DE 50 LITROS.....	75
FIGURA 5.14 – (A) TERMORESSISTORES E (B) TRANSMISSOR/INDICADOR DIGITAL. ....	76
FIGURA 5.15 – (A) FLUXO AXIAL E (B) FLUXO RADIAL.....	77
FIGURA 5.16 – IMPELIDORES TIPO: (A) TURBINA DE DISCO (RUSHTON), (B) HÉLICE NAVAL E (C) PÁS INCLINADAS.....	78

FIGURA 5.17 – IMPELIDORES FLUXO LAMINAR TIPO (A) PÁS RETAS, (B) HELICOIDAL E (C) ÂNCORA. ....	78
FIGURA 5.18 – GUIA DE SELEÇÃO DE AGITADORES .....	79
FIGURA 5.19 – ESQUEMA DO AGITADOR PROJETADO PARA UNIDADE PILOTO.....	80
FIGURA 5.20 – AGITADOR COM DOIS IMPELIDORES E RASPADOR DE METAL. ....	81
FIGURA 5.21 – GRÁFICO DE $N_p$ VERSUS $Re$ PARA IMPELIDORES PADRÕES EM FLUIDOS NEWTONIANOS.....	85
FIGURA 5.22 – POTÊNCIA CONSUMIDA DO IMPELIDOR PARA O SISTEMA LEITE DE CAL.....	86
FIGURA 5.23 – CURVA DE DESEMPENHO DE UM MOTOR.....	88
FIGURA 5.24 – BALANÇO DE MASSA DO REATOR. ....	89
FIGURA 5.26 – ESQUEMA DO SISTEMA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS. ....	91
FIGURA A.1 – GRÁFICO DE REOLOGIA DA AMOSTRA 1.....	102
FIGURA A.2 - GRÁFICO DE REOLOGIA DA AMOSTRA 2. ....	103
FIGURA A.3 - GRÁFICO DE REOLOGIA DA AMOSTRA 3. ....	103
FIGURA A.4 - GRÁFICO DE REOLOGIA DA AMOSTRA 4. ....	103
FIGURA A.5 - GRÁFICO DE REOLOGIA DA AMOSTRA 5. ....	104
FIGURA A.6 - AJUSTE AO MODELO BINGHAM DA AMOSTRA DO TESTE 1. ....	104
FIGURA A.7 - AJUSTE AO MODELO CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 1.....	105
FIGURA A.8 - AJUSTE AO MODELO HERSCHEL BULKLEY DA AMOSTRA DO TESTE 1.....	105
FIGURA A.9 - AJUSTE AO MODELO IPC PASTE DA AMOSTRA DO TESTE 1.....	106
FIGURA A.10 - AJUSTE AO MODELO NCA/CMA CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 1. ...	106
FIGURA A.11 - AJUSTE AO MODELO POWER LAW DA AMOSTRA DO TESTE 1.....	107
FIGURA A.12 - AJUSTE AO MODELO BINGHAM DA AMOSTRA DO TESTE 2. ....	107
FIGURA A.12 - AJUSTE AO MODELO CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 2. ....	108
FIGURA A.13 - AJUSTE AO MODELO HERSCHEL BULKLEY DA AMOSTRA DO TESTE 2.....	108
FIGURA A.14 - AJUSTE AO MODELO IPC PASTE DA AMOSTRA DO TESTE 2.....	109
FIGURA A.15 - AJUSTE AO MODELO NCA/CMA CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 2....	109
FIGURA A.16 - AJUSTE AO MODELO POWER LAW DA AMOSTRA DO TESTE 2.....	110
FIGURA A.17 - AJUSTE AO MODELO BINGHAM DA AMOSTRA DO TESTE 3. ....	110
FIGURA A.18 - AJUSTE AO MODELO CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 3. ....	111
FIGURA A.19 - AJUSTE AO MODELO HERSCHEL BULKLEY DA AMOSTRA DO TESTE 3.....	111
FIGURA A.20 - AJUSTE AO MODELO IPC PASTE DA AMOSTRA DO TESTE 3.....	112
FIGURA A.21 - AJUSTE AO MODELO NCA/CMA CASSON DA AMOSTRA DO TESTE 3....	112
FIGURA A.22 - AJUSTE AO MODELO POWER LAW DA AMOSTRA DO TESTE 3.....	113

FIGURA A.23 - AJUSTE AO MODELO BINGHAM DA AMOSTRA DO TESTE 4. ....	113
FIGURA A.24 - AJUSTE AO MODELO CASSOM DA AMOSTRA DO TESTE 4. ....	114
FIGURA A.25 - AJUSTE AO MODELO HERSCHEL BULKEY DA AMOSTRA DO TESTE 4.....	114
FIGURA A.26 - AJUSTE AO MODELO IPC PASTE DA AMOSTRA DO TESTE 4.....	115
FIGURA A.27 - AJUSTE AO MODELO NCA/CMACASSOM DA AMOSTRA DO TESTE 4.....	115
FIGURA A.28 - AJUSTE AO MODELO POWER LAW DA AMOSTRA DO TESTE 4.....	116
FIGURA A.29 - AJUSTE AO MODELO BINGHAM DA AMOSTRA DO TESTE 5. ....	116
FIGURA A.30 - AJUSTE AO MODELO CASSOM DA AMOSTRA DO TESTE 5. ....	117
FIGURA A.31 - AJUSTE AO MODELO HERSCHEL BULKEY DA AMOSTRA DO TESTE 5.....	117
FIGURA A.32 - AJUSTE AO MODELO IPC PASTE DA AMOSTRA DO TESTE 5.....	118
FIGURA A.33 - AJUSTE AO MODELO NCA/CMACASSOM DA AMOSTRA DO TESTE 5.....	118
FIGURA A.34 - AJUSTE AO MODELO POWER LAW DA AMOSTRA DO TESTE 5.....	119



---

# LISTA DE TABELAS

---

TABELA 3.1 – DADOS EXPERIMENTAIS. ....	32
TABELA 3.2: DADOS EXPERIMENTAIS. ....	38
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA DE CAL CALCÍTICA DA CAL CRUZEIRO .....	49
TABELA 4.2 - DADOS EXPERIMENTAIS. ....	53
TABELA 5.1 – PARÂMETROS DOS TESTES. ....	65
TABELA 5.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO. ....	66
TABELA 5.3 – DADOS DO MODELO DE BINGHAM. ....	69
TABELA 5.4 – DADOS DO MODELO DE <i>HERSCHEL-BULKLEY</i> . ....	69
TABELA 5.5 – DADOS DO MODELO DE <i>POWER LAW</i> . ....	70
TABELA 5.6 – DADOS DO MODELO DE <i>CASSON</i> . ....	70
TABELA 5.7 – DADOS DO MODELO <i>NCA/CMA CASSON</i> . ....	71
TABELA 5.8 – DADOS DO MODELO <i>IPC PASTE</i> . ....	71
TABELA 5.9 - VALORES PARA AS CONSTANTES $K_L$ E $K_p$ .....	83
TABELA 5.10 – RENDIMENTO DE MOTOR ELÉTRICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA. .....	87
TABELA 5.11 – FOLGA RECOMENDADA PARA OS MOTORES. ....	87
TABELA 5.12 - POTÊNCIAS USUAIS DE MOTORES ELÉTRICOS FABRICADOS NO BRASIL (HP). .....	87
TABELA 5.13 – PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA DO REATOR. ....	90
TABELA 5.14 – PARÂMETROS QUE DEVEM PERMANECER CONSTANTES EM FUNÇÃO DO CRITÉRIO DE AUMENTO DE ESCALA. ....	94
TABELA 5.15 – CONSUMOS TÍPICOS DE ENERGIA PARA DIVERSOS PROCESSOS .....	96



---

---

# SUMÁRIO

---

---

RESUMO.....	IX
ABSTRACT .....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XVII
SUMÁRIO .....	XIX
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 <i>O processo de calcinação da cal</i> .....	5
2.2 <i>O processo de hidratação da cal</i> .....	9
2.3 <i>Características desejáveis do produto</i> .....	12
2.4 <i>Fatores que influenciam o processo de hidratação da cal</i> .....	14
2.5 <i>Unidades de produção de leite de cal</i> .....	16
CAPÍTULO III .....	21
A IMPORTÂNCIA DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO E O DESEMPENHO DO LEITE DE CAL EM UM PROCESSO INDUSTRIAL.....	21
3.1 <i>Introdução</i> .....	21
3.2 <i>Materiais</i> .....	23
3.3.1 <i>Preparação do leite de Cal</i> .....	24
3.3.2 <i>Composição química das amostras</i> .....	25
3.3.3 <i>Análise morfológica das partículas</i> .....	26
3.3.4 <i>Análise da área superficial</i> .....	27

3.3.5	Determinação do tempo de extinção da cal .....	28
3.3.6	Distribuição granulométrica do leite de cal .....	28
3.3.7	Consumo específico de base na correção do pH de caldo de cana .....	29
3.3.8	Sedimentação do caldo caleado .....	30
3.3.9	Retenção de sólidos na filtração .....	30
3.3.10	Cor do caldo clarificado .....	30
3.4	<i>Variáveis importantes no processo de hidratação</i> .....	32
3.4.1	Reatividade da cal .....	32
3.4.2	Análise Morfológica das partículas .....	33
3.4.3	Distribuição granulométrica .....	35
3.4.4	Área Superficial .....	36
3.5	<i>Influência da qualidade do leite de cal na clarificação do caldo de cana</i> .....	37
3.5.1	Sedimentação do Caldo Caleado .....	37
3.5.2	Consumo específico de hidróxido de cálcio na correção do pH .....	37
3.5.3	Cor do Caldo Clarificado .....	38
3.5.4	Retenção de sólidos na filtração. ....	38
3.6	<i>Conclusão</i> .....	40
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>42</b>
AUMENTO DE ESCALA DO PROCESSO DE ANÁLISE DO TEMPO DE EXTINÇÃO DA CAL .....		42
4.1	<i>Introdução</i> .....	42
4.2	<i>Projeto do reator</i> .....	45
4.3	<i>Metodologia</i> .....	48
4.3.1	Tempo de extinção em reator em escala piloto .....	48
4.3.2	Determinação do resíduo de hidratação em reator com escala piloto .....	48
4.3.3	Determinação da densidade relativa da suspensão de leite de cal .....	48
4.4	<i>Resultados e discussões</i> .....	49
4.4.1	Diferença no tempo de hidratação entre os reatores .....	49
4.4.2	Granulometria da cal: Comercial versus Científico .....	51
4.4.3	Temperatura inicial da água de hidratação e determinação da granulometria ideal de projeto .....	52
4.5	<i>Conclusões</i> .....	55
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>56</b>

UNIDADE DE PRODUÇÃO DE LEITE DE CAL .....	56
5.1 <i>Introdução</i> .....	56
5.2 <i>Reologia</i> .....	58
5.3 <i>Reologia das suspensões de leite de cal</i> .....	62
5.3.1 <i>Método para reologia</i> .....	62
5.3.2 <i>Caracterização das amostras</i> .....	65
5.3.3 <i>Resultados de Reologia</i> .....	67
5.3 <i>Sistema de hidratação: Reator</i> .....	72
5.4 <i>Sistema de hidratação: Agitador</i> .....	77
5.5 <i>Sistema de hidratação: Potência Consumida pelo Motor</i> .....	82
5.6 <i>Sistema de alimentação</i> .....	89
5.7 <i>Sistema de remoção de resíduos</i> .....	91
5.8 <i>Scale-up</i> .....	93
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
<i>OUTRAS REFERÊNCIAS:</i> .....	100
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>102</b>
<b>REOLOGIA</b> .....	102



---

# CAPÍTULO I

---

## *INTRODUÇÃO*

O mercado consumidor de cal no Brasil abrange praticamente todos os setores industriais como siderurgia, usina de açúcar e álcool, tratamento de efluentes, produção química entre outros. Mesmo com um mercado tão promissor, a produção de cal na maioria das indústrias de calcinação é feita de forma rudimentar, em fornos de barranco, ou de forma desprovida, sem controle das variáveis de processo. E isto é proveniente de uma gestão sem interesses em investimentos tecnológicos em longo prazo.

Essa contenção de despesas na produção de cal gera para a própria empresa gastos excessivos com manutenção e com energia, aumentando o custo de produção do produto e diminuindo os lucros da empresa. Entretanto o mais agravante é a qualidade do produto formado e o quanto isso influencia nos processos industriais que utilizam a cal. Todas essas falhas na produção da cal geram produtos com grandes quantidades de resíduos que se acumulam nos equipamentos industriais aumentando a necessidade de manutenções e diminuindo o tempo de operação dos equipamentos.

Além da produção ineficiente da cal outro agravante devido a falta de conhecimentos técnicos é o fato da hidratação da cal ser feita também de forma rudimentar pela indústria, em sua maioria a hidratação é feita diretamente na planta da indústria que utiliza a cal em seu processo. A cal nessas industriais sofre um processo de hidratação onde o óxido de cálcio, em cales calcíticas, e o óxido de magnésio, presente em quantidades significativas em cales dolomíticas, reage com moléculas de água produzindo hidróxido de cálcio e/ou hidróxido de magnésio. Juntamente com esses componentes há a presença de resíduos insolúveis como sílica, carbonato de cálcio e cal “afogada”. Esse produto é denominado comercialmente como leite de cal.

Esses resíduos são o principal problema nas indústrias e sua formação depende do controle adequado de algumas variáveis de processo. A presença de carbonato de cálcio

no leite de cal, por exemplo, é proveniente de um processo de calcinação ruim onde o interior da pedra calcária não atinge a temperatura ideal para se transformar em óxido de cálcio. Outro resíduo proveniente de controle de operação inadequado é a cal “afogada”, ou cal não hidratada, que se forma através de um processo com agitação ineficiente e sem aquecimento da água de hidratação.

O processo de produção de leite de cal ainda é considerado primitivo em relação à tecnologia empregada. Algumas indústrias, inclusive de âmbito internacional, que utilizam o leite de cal como matéria-prima na produção de seus principais produtos, não consideram relevantes a otimização do processo de mistura e a melhoria da qualidade do produto.

Em várias visitas feitas a empresas que utilizam a cal em seu processo verificou que todos os processos de hidratação proporcionavam problemas de incrustações e acúmulo de resíduos nos equipamentos adjacentes. Em alguns casos a produção é interrompida por até 12 horas para manutenção. Através destes problemas iniciou um estudo sobre as variáveis de processo na produção de cal e na sua hidratação. Verificou-se que quando se submete a cal a um processo de calcinação em temperaturas de aproximadamente 900 °C durante quarenta e cinco minutos ocorre a calcinação de toda a partícula de cal não havendo carbonato de cálcio em seu interior (SOARES, 2007).

Já no processo de hidratação da cal as variáveis que mais influenciam a sua eficiência são granulometria da cal, agitação e temperatura da água inicial de hidratação. Quando se utiliza uma cal micropulverizada em um processo de hidratação com a temperatura da água inicial próxima a 75 °C ocorre a maior diminuição possível da formação de resíduos (SILVA, 2007). Porém há outros fatores que devem ser relevantes no processo de hidratação, como o projeto do hidratador utilizado. Quando dados como geometria do tanque, geometria do agitador e propriedades do fluido não são consideradas no projeto da unidade há uma grande perda na transferência de massa e de calor durante o processo reacional, mas a principal preocupação é com a perda energética.

Para cada tipo de suspensão há um agitador adequado, através do qual se faz um levantamento da potência consumida na agitação das suspensões com a variação da velocidade de rotação do agitador. Quando não se escolhe adequadamente o motor para suprir a potência consumida pelo agitador ocorre o sobre dimensionamento do motor, ou seja, a potência utilizada no motor é inferior a potência fornecida por este e isto aumenta o gasto energético do processo.



Este trabalho tem como foco verificar através de processos industriais a influência da qualidade do leite de cal no desempenho do processo, a influência do processo de hidratação na qualidade do leite de cal e intercalar as variáveis ideais no processo de hidratação da cal, como granulometria da cal, com as variáveis comerciais, como preço. E finalmente propor um projeto de um hidratador inovador que produza um leite de cal com alta qualidade e sem resíduo de hidratação.

Embora determinar a melhor característica de projeto de um reator de hidratação seja um dos objetivos dessa pesquisa, o maior impasse se encontra no estudo reológico da solução que diretamente influencia na determinação da potência consumida durante o processo. As características fluidodinâmicas da suspensão variam drasticamente com a proporção de água adicionada, a característica da cal, a temperatura da água e o grau de agitação. Há também a dificuldade de leitura nos reômetros devido à presença de sólidos suspensos, pois aumentam a abrasividade da solução. Por isso, ainda não é encontrado na literatura estudos reológicos da suspensão de leite de cal. E neste trabalho fez-se esse levantamento da reologia das suspensões de leite de cal com ajuste em diferentes modelos reológicos utilizando variação estipulada da granulometria da cal e da concentração da suspensão. Através destes dados determinaram-se os parâmetros de projeto de uma unidade piloto e posteriormente a extrapolação destes para a unidade industrial.



---

# CAPÍTULO II

---

## *REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*

### *2.1 O processo de calcinação da cal*

O calcário é uma rocha sedimentar que contém mais de trinta por cento de carbonato de cálcio, sendo considerado um dos principais produtos brasileiros utilizados em diversos setores industriais. A sua importância na economia se torna mais relevante quando utilizada na produção de cal.



Figura 2.1- O calcário e a sua extração. Fonte (<http://www.desenvolvimento.gov.br>)

O calcário depois de extraído (Figura 2.1), selecionado e moído, é submetido ao processo de calcinação. A calcinação é o processo no qual a substância é submetida a altas temperaturas, sem, contudo atingir seu ponto de fusão, de forma a conseguir sua decomposição química e consequentemente, a eliminação dos produtos voláteis.

A cal é produzida através da decomposição do calcário cálcico, magnésiano ou dolomítico em fornos industriais rotativos, verticais ou de barranco (Figura 2.2), com temperaturas superiores a 850 °C, sendo a maior eficiência da calcinação atingida entre

900 e 1000°C (SOARES, 2007). Essa eficiência se refere à calcinação de todo o carbonato presente na pedra, o que em alguns casos ocorre apenas superficialmente.

As impurezas contidas no calcário permanecem na cal após o processo de calcinação, por isso é importante a qualidade da rocha calcária para determinados fins industriais. As principais impurezas contidas no calcário são: matéria orgânica, silicatos, fosfatos, sulfetos, sulfatos, óxidos e outros. Se no calcário houver pequenas porcentagens de sílica, de argila e de ferro, a cal poderá reagir com a sílica e a alumina durante o processo de calcinação, produzindo silicatos de cálcio, cujas propriedades hidráulicas não são desejáveis.

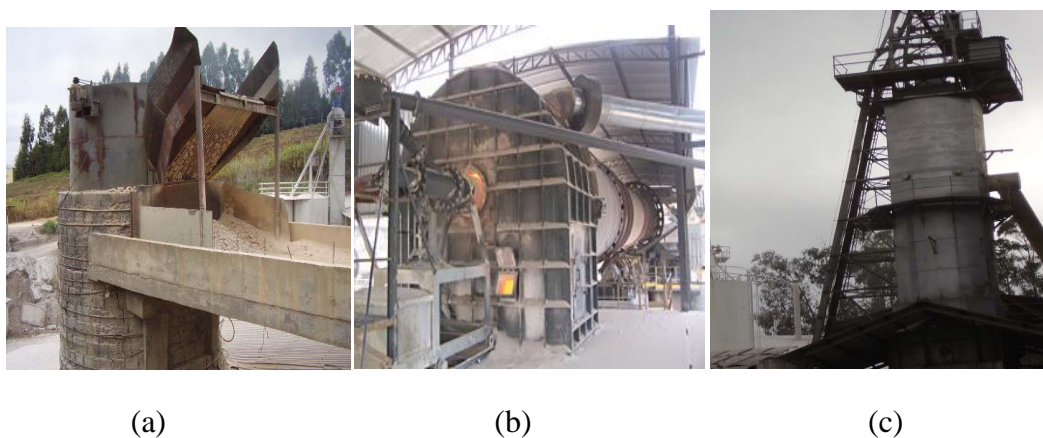


Figura 2.2- (a) Forno de barranco, (b) Forno rotativo e (c) Forno vertical. Fonte (<http://www.desenvolvimento.gov.br>)

O óxido de cálcio também conhecido como cal virgem ou viva, é produzido de acordo com a Equação 2.1 através da decomposição do carbonato de cálcio com liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A cal também é composta por óxido de magnésio em proporções variadas de acordo com o tipo de calcário empregado.



A qualidade da cal depende principalmente do processo escolhido pela indústria produtora de cal e da rocha calcária empregada na produção. É relevante que a qualidade da cal depende do setor industrial no qual a cal produzida será empregada, pois para cada tipo de setor industrial há um tipo adequado de cal. A cal é classificada de acordo com a proporção de óxidos predominantes.

- Cal virgem calcítica: Óxido de cálcio entre 100% e 90% dos óxidos totais presentes;

- Cal virgem magnesiana: Teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% dos óxidos totais presentes;
- Cal virgem dolomítica: teores de cálcio entre 65% e 58% dos óxidos totais presentes.

A temperatura do forno é estabelecida com a queima de combustível que pode ser carvão vegetal ou mineral, coque, lenha, óleo combustível, gás natural e material reciclado, desde que esteja de acordo com a lei estabelecida pelo Congresso Nacional, onde o órgão de fiscalização ambiental monitora e aprova as condições de queima de combustíveis nos fornos (<http://www.camara.gov.br>).

A cal na sua forma virgem ou hidratada tem inúmeras aplicações. A Figura 2.3 mostra a distribuição das aplicações do volume produzido em 2006, considerando apenas o mercado livre. Através da segmentação do mercado nota-se que o consumo de cal na construção civil era de 37% da produção nacional (<http://www.abpc.org.br>). Provavelmente, esse percentual aumentou devido ao crescimento do setor civil na economia brasileira nesses três últimos anos.

Considerando apenas as aplicações industriais o setor de siderurgia predomina, seguida por importantes aplicações na pelotização do minério de ferro, nas indústrias químicas, de papel e celulose e de produção de açúcar.

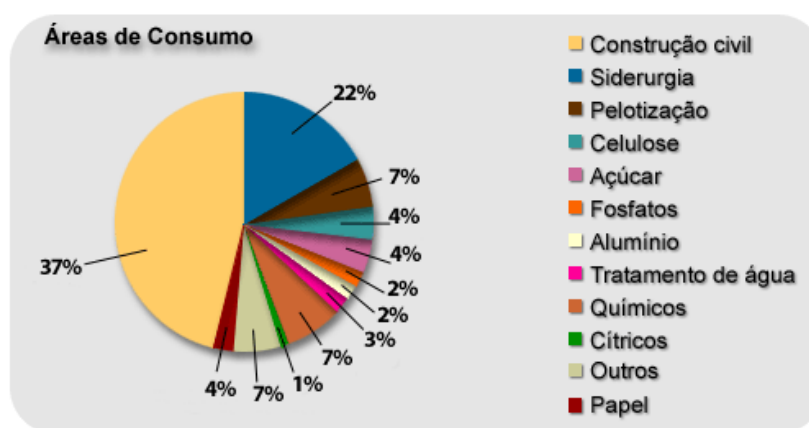


Figura 2.3-Aplicações da cal produzida no Brasil em 2006.

Fonte: (<http://www.abpc.org.br>).

Na siderurgia, a cal calcítica é empregada no processo de sinterização principalmente como aglomerante do minério de ferro e a cal dolomítica é empregada na aciaria como protetor do material refratário (<http://www.csn.com.br>).

No setor de celulose e papel é utilizada na recuperação da soda cáustica, na caustificação do licor negro e como agente redutor de acidez na produção de papéis alcalinos (<http://www.aracruz.com.br>). Já na produção de açúcar, a cal é utilizada na remoção de compostos fosfáticos e orgânicos e principalmente no clareamento do açúcar.

## 2.2 O processo de hidratação da cal

A hidratação da cal resulta em produtos com diferentes aspectos e características dependendo do processo utilizado, mas todos possuem a mesma característica química. O volume de água, a agitação e a temperatura de hidratação são as principais variáveis que afetam o produto de hidratação da cal. Dependendo destas variáveis o produto formado pode ter um aspecto de um pó seco micropulverizado denominado cal hidratada e pode ter um aspecto de solução sólido-líquida denominada leite de cal que terá uma viscosidade variada de acordo com o processo utilizado. A suspensão de hidróxido de cálcio pode ser obtida pela diluição da cal hidratada em água ou pela adição de água em excesso diretamente a cal virgem (BUTTERS e MCLEOD, 2002).

O processo para produção de cal hidratada é um processo mais simples e rústico necessitando apenas da adição estequiométrica de água à cal virgem com um misturador em um determinado recipiente. Por isso sua qualidade é inferior a do leite de cal.

O processo para produção do leite de cal exige uma quantidade de água superior a estequiométrica e uma agitação mais vigorosa. Embora muitas indústrias utilizem um processo simples na sua preparação há a necessidade de um processo mais complexo para se obter um produto de elevada qualidade. Essa qualidade é determinada pela capacidade de neutralização e coagulação do leite de cal e são a área superficial e o diâmetro da partícula os principais fatores que afetam o desempenho da solução de leite de cal.

A composição química do leite de cal varia de acordo com as características da cal virgem utilizada. No caso da cal calcítica, a reação se processa com liberação de aproximadamente 272 kcal/kg (Equação 2.2):



E no caso da cal dolomítica com liberação de aproximada de 211 kcal/kg (Equação 2.3):



Os óxidos de cálcio iniciam o processo de hidratação com velocidade superior aos óxidos de magnésio. No primeiro contato com a água, a cal virgem implode e em torno de seu grão forma-se uma solução supersaturada com os íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{OH}^-$ . Com um número suficiente de íons começa a formação e cristalização do hidróxido de cálcio (GUIMARÃES, 1998).

GUIMARÃES (1998) cita que o excesso de água no processo de hidratação da cal provoca o “afogamento da cal”. Quando a água em excesso é adicionada ao processo rapidamente, os torrões de cal, ou cal em grãos maiores, também se hidratam rapidamente na superfície ocorrendo perda de porosidade que impede a passagem de água para o interior da partícula que permanece sem se hidratar. Também pode ocorrer a “requeima da cal” quando se adiciona quantidades de água inferiores a estequiométrica. Com isto ocorre a formação de calor excessivo em determinados pontos da partícula, de 200 °C até 280 ° C, provocando eventualmente a desidratação da partícula vizinha de hidrato formado aumentando, assim, as dimensões dos cristais e impedindo a penetração da água para o interior da partícula.

RITCHIE e XU (1990) estudaram a cinética de reação de hidratação da cal. As amostras analisadas estavam micropulverizadas e em forma de disco e continham alto teor de óxido de cálcio. Em ambas as amostras a reação é de ordem zero e a taxa de dissolução é fortemente influenciada pela velocidade de rotação do sistema. Por isto e também por constatarem que velocidade de reação diminui ao se processar em meio alcalino eles determinaram que a reação fosse controlada pela etapa de difusão. Sugeriram que a reação ocorra em três etapas: na primeira ocorre a conversão de óxido de cálcio em hidróxido de cálcio liberando 65,2 kJ/mol, a segunda a dissolução do hidróxido de cálcio formando os íons cálcio e hidróxido liberando 16,3 kJ/mol e a terceira a difusão desses íons na solução bulk.

$$k = 0,62D(\text{Ca}(\text{OH})_2)^{\frac{2}{3}} v^{\frac{-1}{6}} \omega^{\frac{1}{2}} [\text{Ca}(\text{OH})_2]_s \quad (2.4)$$

Ao estudarem o efeito da temperatura na cinética da reação de hidratação da cal em disco RITCHIE e XU (1990) determinaram a expressão para a constante da taxa (Equação 2.4) e um gráfico (Figura 2.4) da constante da taxa com a variação da temperatura no qual se fez um ajuste da equação de Arrhenius obtendo  $13,6 \pm 1,2$  kJ/mol de energia de ativação.



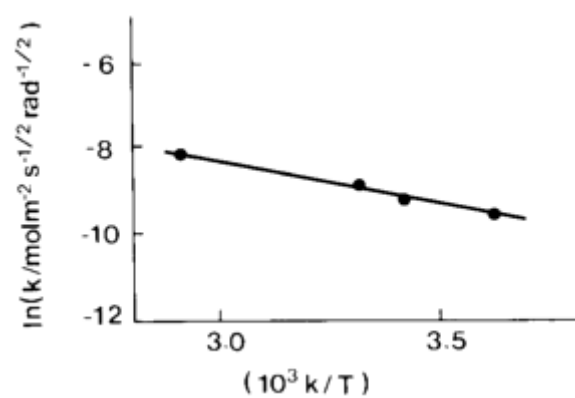


Figura 2.4 – Ajuste da Equação de Arrhenius ( RITCHIE e XU, 1990).

## ***2.3 Características desejáveis do produto***

Para que o hidróxido de cálcio tenha uma alta eficiência nos processos industriais que o utilizem, como neutralização de efluente, absorção de compostos sulfurados de gases combustíveis e refino do açúcar, é necessário que tenha uma alta taxa de reação. Essa reatividade está ligada diretamente ao baixo diâmetro médio e a alta área superficial das partículas em suspensão. Também é desejável que o produto tenha uma baixa viscosidade, estabilidade de sedimentação e alta concentração de sólidos para minimizar os custos de produção e transporte (BUTTERS e MCLEOD, 2002).

Os autores adicionaram a um béquer contendo água deionizada cal hidratada a 40% em peso. A agitação de 15 minutos foi suficiente para manter um pequeno vórtice na suspensão e foi proporcionada através de um agitador de laboratório. A viscosidade da amostra foi determinada através do viscosímetro de Brookfield LVT com variação da rotação do spindle de 3 a 60 rpm. A suspensão apresentou diâmetro médio das partículas de 6,8 micrometro e viscosidade superior a 2000 cP.

Nos processos industriais de tratamento de efluentes, além do poder de neutralização a outra principal característica da suspensão de hidróxido de cálcio é a sua capacidade em formar flóculos. A floculação promove a clarificação do efluente a ser tratado através do poder que a solução alcalina possui em agregar as impurezas em suspensão formando flocos, os quais decantam. Quanto maior o floco mais rápida é a decantação e melhor será o resultado obtido.

Industrialmente os produtos mais utilizados na neutralização de efluentes são a suspensão de hidróxido de cálcio e a soda cáustica. Embora ambas as soluções possuam alto grau de alcalinidade e baixo custo comercial, as suas diferenças no desempenho industrial vêm se acentuando.

A bivalência da molécula de hidróxido de cálcio promove uma neutralização e clarificação mais eficientes com formação de flocos maiores e velocidade de decantação mais rápida em contrapartida a monovalência da molécula de hidróxido de sódio (Figura 2.5). Embora a solução de hidróxido de cálcio seja a mais eficiente no processo de clarificação e neutralização é imprescindível a escolha de leite de cal de boa qualidade para corresponder ao desempenho desejado.



Figura 2.5 - Desempenho na coagulação, floculação e decantação  
(<http://www.qualical.com.br>).

Em alguns processos industriais o leite de cal é utilizado como fonte de hidróxido de cálcio. Por isso há a necessidade de um leite de cal com alto teor de hidróxido de cálcio e baixo teor de impurezas, principalmente os silicatos. Há na literatura muitas patentes e artigos que se referem a um processo de hidratação da cal com minimização da formação de resíduos insolúveis, mas o enfoque é a retirada de cales afogadas ou requeimadas e carbonato de cálcio proveniente de um processo de calcinação ineficiente. Os resíduos de silicatos são bastante finos e seu processo de remoção requer uma atenção maior.

A grande semelhança entre os setores que utilizam a cal virgem e a hidratada menciona uma falsa igualdade entre as cales. Mas para cada fim industrial existe uma cal que proporciona uma ótima eficiência. E também há para cada cal categorias que se diferenciam em suas características e aplicabilidade. Ressaltando que os setores onde se utilizam cales virgens promovem, em sua maioria, a hidratação da mesma anteriormente a introdução ao processo.

Devido a utilização incorreta dos produtos provenientes de cal virgem ocorrem os seguintes problemas na linha industrial: desgaste excessivo de rotores de bomba por causa da acentuada ação abrasiva, repetitivos entupimentos de linhas, incrustação exagerada em tanques, tubulações, agitadores, vertedores etc, inclusive com perdas de equipamentos devido à alta concentração de carbonato de cálcio, aumento da necessidade de limpeza e manutenção de tanques e reatores (equivale a horas paradas) e aumento expressivo do consumo de cal para compensar a baixa quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  dessas cales, fato esse que fomenta ainda mais os sintomas acima.

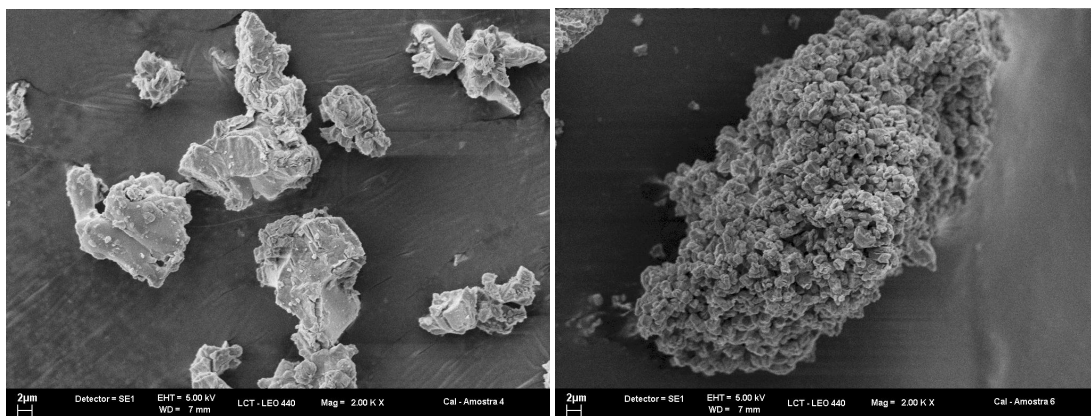
## ***2.4 Fatores que influenciam o processo de hidratação da cal***

Os principais fatores que afetam a qualidade das suspensões de leite de cal são o processo de hidratação e a qualidade da cal empregada. De acordo com GUIMARÃES (1998) o tipo, impurezas e granulometria da cal afetam a qualidade do leite de cal. Esses fatores são caracterizados pela reatividade da cal, em princípio, uma cal de boa qualidade possui uma alta temperatura no início e uma baixa temperatura no final da hidratação. A reatividade permite prever o tempo de duração da hidratação e a temperatura atingida pela liberação do calor da reação.



Figura 2.6 – Cal com núcleo não calcinado (SOARES, 2007).

A qualidade da cal depende especificamente do processo de calcinação da mesma. Uma cal mal calcinada, ou calcinada em temperaturas inferiores a ideal, possui em seu interior carbonato de cálcio (Figura 2.6). Esse núcleo no processo de hidratação permanece inalterado formando, assim, as impurezas não solúveis em água. Quando se submete a cal a uma temperatura de calcinação acima da ideal ocorre uma supercalcinação promovendo a sinterização da superfície da partícula. Essa sinterização diminui a porosidade da cal dificultando a hidratação da mesma. Essa característica é mais evidenciada quando o processo de calcinação ocorre em fornos de barranco (Figura 2.7). De acordo com SOARES (2007) um processo de calcinação otimizado para se obter uma cal de boa qualidade deve ser efetuado a 900 °C com tempo de residência de 45 minutos no interior do forno rotativo.



(a)

(b)

Figura 2.7 – Microscopia eletrônica de varredura de cal calcítica sinterizada (a) e porosa (b).

No processo de hidratação os principais fatores que afetam a qualidade do leite de cal são: agitação, temperatura da água inicial e concentração. SILVA (2007) verificou através de experimentos com cal calcítica micropulverizada que o resíduo de hidratação diminui quando se assume temperaturas de hidratação próximas a 75 °C e concentração próxima a 230 g/l. Já para se obter um leite de cal com a maior área específica deve-se proceder a hidratação em concentrações baixas, 175 g/l, e altas temperaturas, 75 °C. A autora constatou que a variação da agitação utilizada, de 300 para 700 rpm, não tem efeito significativo nas variáveis resíduo, área específica e diâmetro da suspensão de leite de cal.

## 2.5 Unidades de produção de leite de cal

Embora a utilização de um processo complexo de hidratação de cal seja pouco utilizado industrialmente, há um grande número de patentes que descrevem um processo completo de hidratação. Este tipo de processo tem uma configuração que diminui alguns problemas encontrados em plantas comuns como acúmulo de resíduo no fundo do reator e nas tubulações adjacentes e formação de uma camada de cal hidratada nas paredes do reator e do alimentador devido à presença de vapor de água. De acordo com a patente de LANE (1984), Figura 2.8, a diminuição destes problemas é proporcionada pelo sistema de alimentação de água, sistema de retirada de vapor e pelo sistema de retirada de resíduo do fundo do reator. A alimentação de água é feita lateralmente a tubulação de alimentação de cal ocorrendo, assim, uma lavagem e diminuição do acúmulo de cal hidratada. A retirada de vapor de água é feita através da introdução de água que condensa o vapor e o leva até um recipiente de coleta abaixo do reator. A solução é retirada por transbordo através de um orifício localizado na parte superior do recipiente que contém a rosca sem fim.

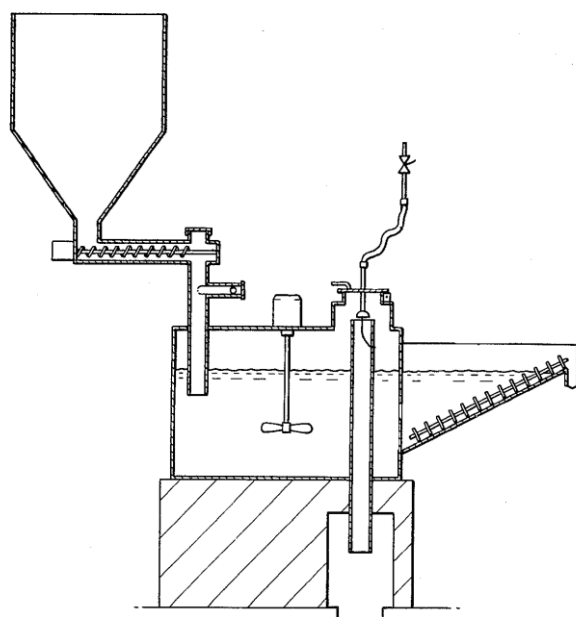


Figura 2.8 – Reator de hidratação de cal (LANE, 1984).

LANE (1984) conseguiu neste sistema separar adequadamente os equipamentos necessários em uma boa hidratação de cal. A cal é alimentada diretamente em um reator com agitação, sem que ocorra uma pré-hidratação, proporcionando a hidratação de toda a partícula de cal. Outra preocupação do autor foi com a retirada dos resíduos que se

acumulam ao fundo do reator através da rosca sem fim. Os detalhes como, sistemas de alimentação de cal juntamente com a água e sistema de retirada de vapor, também elevam a patente a categoria ideal de um processo de hidratação. Porém, esse processo não retira totalmente os resíduos presentes na solução de hidróxido de cálcio, apenas retira os resíduos “grossos”. A sílica é um resíduo fino e indesejável em determinados processos industriais, pois reage com determinados componentes do processo formando compostos indesejáveis que posteriormente requer uma unidade apenas para removê-la, e também se agrega a parede dos equipamentos.

A solução de hidróxido de sódio é utilizada também em processos de lavagem de gases efluentes para remoção de  $\text{SO}_2$ , o qual deve ser altamente reativo ao hidróxido. Porém, a cal altamente reativa quando hidratada na proporção de 10 a 20 % em peso forma uma solução de leite cal viscosa, caracterizada como fluido plástico de Bingham (EMMETT, 1986). Essa solução viscosa dificulta o processo de remoção de resíduos na ordem de + 100 mesh em classificadores gravitacionais. Quando não se promove a retirada dos resíduos sólidos da suspensão ocorre o desgaste no equipamento de lavagem (“scrubbing”), principalmente nos orifícios de spray, devido à abrasão e ao depósito de cálcio.

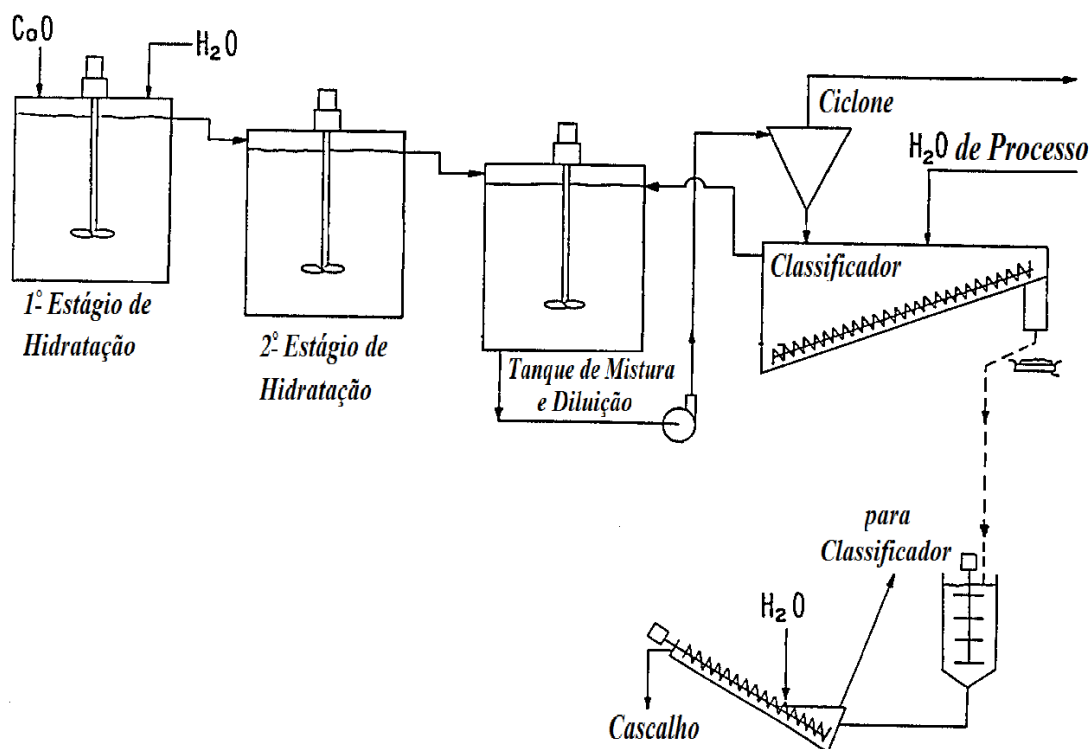


Figura 2.9 – Reator de hidratação de cal (EMMETT, 1986).

EMMETT (1986), em sua patente, descreve um sistema de hidratação de cal (Figura 2.9) o qual promove a hidratação em alto grau (98%) dentro dos vasos principais de hidratação, com redução do tempo total de retenção e a minimização do contato entre as partículas de cal não hidratadas e o diluente licor, proveniente do processo de lavagem e que contém quantidades apreciáveis de íons sulfato. A alta viscosidade do leite de cal produzido é decorrente da proporção de água/ cal alimentada, entre 3:1 e 5:1, e a alta reatividade da cal utilizada, 3 minutos. O tanque de hidratação possui a seguinte dimensão: 2,7m de altura e 3,6m de diâmetro. O agitador utilizado foi um impelidor de quatro pás com diâmetro de 1,7m e localizado a 1 ou 1,5 metros do fundo do reator. O motor tem 30HP de potência e a velocidade de rotação utilizada foi de 56 RPM.

Um tanque de mistura e separação é utilizado para diminuir a viscosidade aparente da lama de cal e promover a rápida e eficiente separação dos grossos materiais indesejáveis denominados “grit”. A diluição promovida proporciona a produção de leite de cal com 18% de sólidos. Por ter a função apenas de diluição esse equipamento possui volume menor do que os tanques de hidratação, 1,5m de altura e 3m de diâmetro.

Posteriormente a diluição, a solução passa por um hidrociclone onde são removidos os resíduos pelo underflow e o leite de cal é retirado pelo overflow com viscosidade e concentração desejadas e sem resíduos. Estes são submetidos a mais um processo, de classificação, onde os resíduos entram em contato com a água residual do processo de lavagem e são retirados do processo através de uma rosca sem fim. Caso haja necessidade há outro processo de classificação opcional há uma unidade.

A grande vantagem da utilização do esquema descrito na patente de EMMETT (1986) é a garantia de um leite de cal com baixa concentração de resíduos devido à alta taxa de conversão da reação e eficiência dos equipamentos em série. Porém a grande desvantagem é o aumento da unidade de hidratação que proporciona um aumento no gasto energético e no valor do produto final diminuindo, assim, a sua propensão comercial.



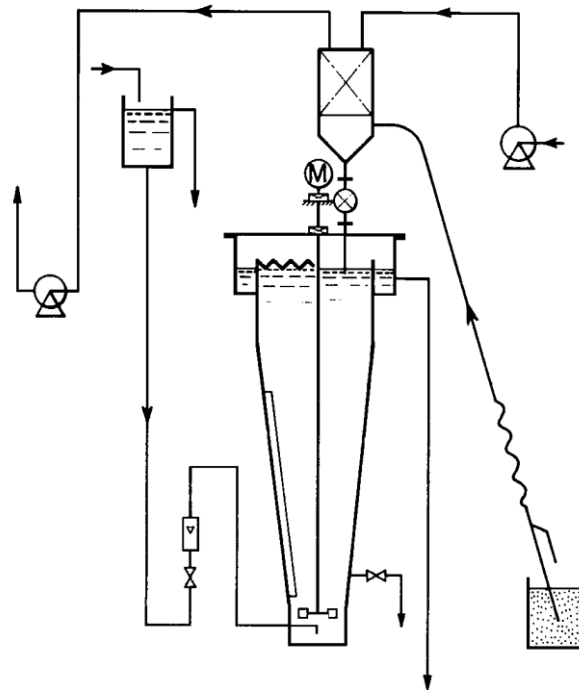


Figura 2.10 – Reator de hidratação de cal (KOJIMA *et al*, 1982).

Na tendência em diminuir os custos e aumentar a eficiência KOJIMA *et al* (1982) patenteou um equipamento, Figura 2.10, que promove a reação de hidratação e ao mesmo tempo a sedimentação. Embora a idéia seja promover a reação e a sedimentação em um único equipamento, ocorre uma pré-hidratação da cal antes desta ser alimentada ao equipamento. A solução de cal é alimentada ao vaso pela parte superior, mas anteriormente passa por filtro, “bag filter”, onde se retira o excesso de água. Quando a cal, provavelmente já hidratada, deposita-se no fundo do equipamento, onde se localiza o reator, inicia-se a agitação e de acordo com os autores a hidratação. A alimentação da água é feita continuamente e diretamente ao reator, no fundo do equipamento. O sedimentador está localizado na parte superior para garantir que apenas a solução com cal totalmente hidratada e com partículas menores saia do equipamento por transbordo.

Embora a idéia de reunir todos os equipamentos necessários para uma boa hidratação em um único equipamento seja a ideal, os autores erram ao promover uma pré-hidratação da cal. Quando a hidratação da cal é feita de modo precário ocorre a formação de cal afogada que posteriormente, independente do processo, não se hidrata e se acumula nos equipamentos. Mesmo que isto não ocorra, quando a solução com “cal” é adicionada ao processo descrito na patente e é necessário que ocorra a sedimentação para posteriormente a reação se iniciar, o processo de hidratação já ocorreu. Então o reator ao fundo do equipamento é inútil, apenas suspende as partículas

de hidróxido de cal e os resíduos finos com a agitação e o fluxo ascendente promovido pela alimentação da água.

Uma sugestão, nesta patente, seria alimentar a cal diretamente ao fundo, mas anteriormente promover a hidratação da mesma em um reator de menor volume. Assim, a reação de hidratação iniciaria adequadamente e continuaria no outro reator. Haveria dois reatores em série e um sedimentador.

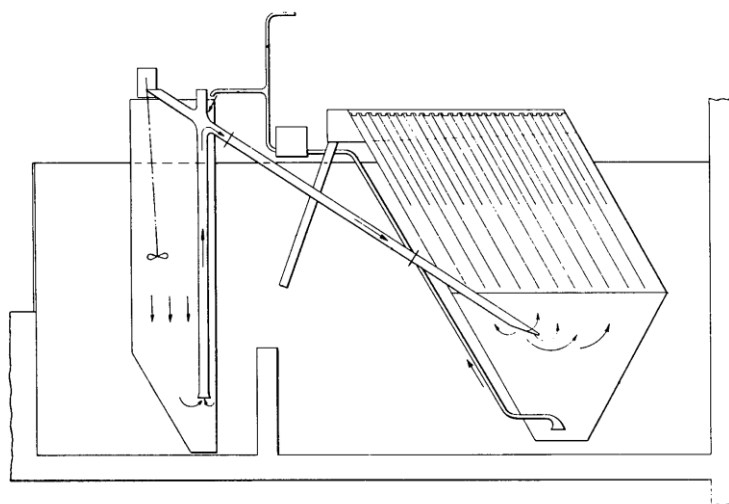


Figura 2.11 – Reator de hidratação de cal (HENRIKSON, 1978).

Também com o propósito de eliminar os resíduos de hidratação, HENRIKSON (1978) patenteou um equipamento com duas funções: hidratação e sedimentação (Figura 2.11). Porém o objetivo era obter uma solução de cal com propriedades adequadas a floculação em tratamento de esgoto ou afins. Após a hidratação no reator, a solução de hidróxido de cálcio é descarregada ao centro do compartimento cônico que segue através de lamelas para o topo do equipamento onde a solução desejada é captada. Durante a subida as diferenças de tamanhos das lamelas criam uma zona de estagnação onde a solução flui lentamente e as partículas maiores se depositam, sendo esse processo denominado pelo autor de filtração. Assim, apenas a água com partículas finas são recolhidas ao topo, a parte que contém resíduos com partículas não hidratadas são reenviadas ao reator.

A maior desvantagem deste sistema é o tamanho necessário dos equipamentos para obter-se uma alta eficiência. Essa grandeza aumenta o tempo de retenção do hidróxido e seu acúmulo ao fundo do reator e na zona de estagnação das lamelas.

---

# CAPÍTULO III

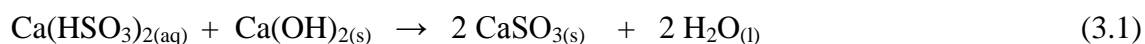
---

## *A IMPORTÂNCIA DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO E O DESEMPENHO DO LEITE DE CAL EM UM PROCESSO INDUSTRIAL*

### **3.1 Introdução**

O álcool é considerado o principal substituto dos combustíveis fósseis como fonte de energia por ser um recurso renovável e por ter um processo de produção relativamente simples. No entanto, a etapa de branqueamento da solução de açúcar pode ser considerada um passo fundamental no processo de produção devido aos problemas de incrustação nos encanamentos, nos trocadores de calores e nos evaporadores causada pela deficiência desta etapa. O leite de cal é utilizado no clareamento da solução de açúcar que é um processo de eliminação de partículas corantes, sólidos suspensos e outras impurezas (<http://www.abpc.org.br>).

De acordo com o processo industrial, na clarificação, o leite de cal é adicionado ao caldo misto após a sulfitação em um processo denominado calagem que facilita a floculação de substâncias coloidais. O objetivo é promover a decantação de sais insolúveis a pH neutro reagindo com os sulfitos e com os fosfatos presentes. A reação abaixo demonstra a formação de compostos insolúveis (Equação 3.1):



A utilização da cal comum no processo de lavagem e clarificação do caldo da cana traz alguns problemas para o processo de produção do açúcar, como a geração de

incrustações nos aquecedores, evaporadores e tachos de cozimentos, obrigando a usina a parar a produção de açúcar para fazer a limpeza das linhas de evaporação, o que dura em média de 12 a 13 horas.

Com isso é importante que a cal seja hidratada totalmente antes de ser adicionada ao caldo e o tipo de cal seja a mais adequada ao processo, pois o tamanho da partícula, a área superficial e a composição química da cal influenciam no processo de floculação e decantação.

### **3.2 Materiais**

Este trabalho utilizou como amostras industriais cales e leites de cal oriundos das usinas, as cales proveniente dos fornecedores de cada unidade e os leites de cal produzidos de acordo com seus processos de hidratação e em seus hidratadores. Como amostras de comparação foram utilizadas cales de diferentes fornecedores e hidratadas em laboratório nas condições de temperatura e agitação consideradas mais eficientes no processo de produção de leite de cal. Todas as amostras envolvidas no processo estão descritas abaixo:

***Amostra L1:*** Leite de cal calcítico coletado na Usina Junqueira.

***Amostra L2:*** Leite de cal calcítico da Cal Ferreira produzido em laboratório.

***Amostra L3:*** Leite de cal dolomítico coletado na Usina Dois Córregos.

***Amostra L4:*** Leite de cal dolomítico da Cal Ferreira produzido em laboratório.

***Amostra C1:*** Cal virgem calcítica coletada na Usina Junqueira.

***Amostra C2:*** Cal virgem calcítica da Cal Ferreira calcinada em forno de barranco.

***Amostra C3:*** Cal virgem dolomítica coletada na Usina Dois Córregos.

***Amostra C4:*** Cal virgem dolomítica da Cal Ferreira calcinada em forno vertical.

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Preparação do leite de Cal

O processo de preparação do leite de cal na Usina Dois Córregos ocorre de forma “rústica”. A cal com granulometria de 10 a 40 mm é depositada no reator com fundo cilíndrico até enchê-lo. Posteriormente, a cal é coberta com água fria e nesta condição, a cal permanece por vinte quatro horas, quando o leite de cal é bombeado para os tanques de estocagem que possuem agitação constante. Os dados fornecidos pela usina revelam que para cada 1000 kg de cal utilizados no processo há formação de 300 kg de resíduos no “tanque de reação”. A diferença da preparação do leite de cal da Usina Dois Córregos para a Usina Junqueira é a presença de um agitador. O “batedor de cal” como é chamado o agitador possui o eixo na horizontal e suas pás com formato em L na vertical. O reator também é um cilindro posicionado na horizontal e a cal também permanece por vinte quatro horas no reator antes de seguir para os tanques de estocagem.

Embora algumas amostras de leite de cal utilizadas neste trabalho tenham sido coletadas e preparadas nas respectivas usinas, houve-se a necessidade de se produzir em laboratório leite de cal com cal dolomítica e calcítica oriunda da empresa Cal Ferreira para a comparação no desempenho destas com as coletadas nas usinas no processo industrial de calagem.



Figura 3.1- Haste utilizada na reação de hidratação.

Para isto utilizou-se um banho termostatzado onde inicialmente a temperatura estava em 80°C e um agitador mecânico da marca FISATOM modelo 713, série 639863 com potência de 70-130 W e agitação de 85-5000 rpm. Esse agitador garantiu a

homogeneidade do sistema com uma agitação constante de 400 rpm e uma haste no formato observado na Figura 3.1.

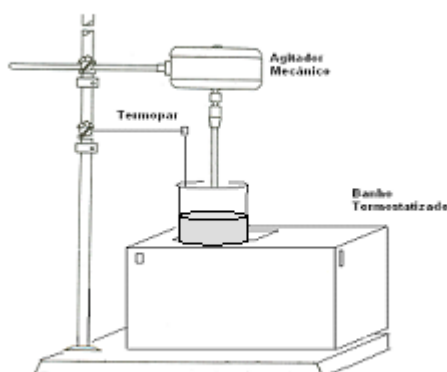


Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental.

O reator utilizado para promover a reação de hidratação da cal foi um béquer com volume de 2 litros contendo 1000 mL de água destilada a qual se adicionou 200g da cal. O tempo de duração da reação de hidratação foi de 40 minutos. Este valor foi estipulado de acordo com o teste de tempo de extinção da cal realizada e descrita posteriormente. O esquema da reação da produção do leite de cal pode ser observado na Figura 3.2.

### 3.3.2 Composição química das amostras

A composição química das amostras foi determinada através de uma fluorescência de raio X que proporciona uma análise quantitativa e qualitativa das amostras de cales virgens e hidratadas. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, utilizando um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios X, modelo Axios Advanced da Panalytical que é mostrado na Figura 3.3.

A amostra é prensada em forma de pastilha e calcinada em temperaturas de 1050°C por trinta minutos denominado como perda ao fogo e posteriormente os resultados são expressos em termos de óxidos dos elementos e normalizado a 100 %.



Figura 3.3 - WDS de Fluorescência de Raios X, modelo AXIOS da Panalytical.

### 3.3.3 Análise morfológica das partículas

As condições em que as amostras de cal e leite de cal são preparadas influenciam na morfologia das partículas formadas. Assim, pode se determinar através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) a melhor técnica de hidratação que proporciona a formação de partículas de hidróxido de cálcio menores e menos sinterizada. Essas características denotam uma cal hidratada com alta reatividade.

O teste de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi feito no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo com o equipamento FESEM 1530 LEO que possui uma capacidade de aumento de 50 a 150.000 vezes. Os resultados são armazenados em arquivo digital.

A amostra é preparada pesando-se 50 mg e adicionando 10 mL de acetona. Uma gota dessa mistura é transferida a uma lamínula e aquecida a 40 °C em uma estufa por três horas. Posteriormente, a amostra é metalizada com ouro como mostra a Figura 3.4.





Figura 3.4- Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo FESEM 1530, LEO.

### 3.3.4 Análise da área superficial

A medida de área específica pela técnica de BET se baseia na determinação da quantidade de um adsorvato necessária para recobrir uma monocamada da superfície de um adsorvente. Os adsorvatos utilizados para esse fim geralmente são os gases. Quando um sólido é exposto a um gás ou vapor em um sistema fechado à temperatura constante, o sólido pode adsorver o gás, ocorrendo assim um aumento da massa do sólido e um decréscimo da pressão do gás. Após um determinado tempo, a massa do sólido e a pressão do gás assumem valores constantes.

A área específica da cal e do leite de cal foi determinada pelo método de BET no laboratório do grupo de Catálise da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. As medidas foram realizadas em um equipamento Quantasorb Jr. da Quantachrome. O leite de cal foi anteriormente a esse procedimento secado em estufa por 24 horas e posteriormente peneirado. A amostra de óxido e hidróxido de cálcio foi previamente seca em fluxo de hélio a 423 K, durante 16 horas. A adsorção de nitrogênio na temperatura de nitrogênio líquido foi realizada em diferentes pressões parciais de  $N_2$  e He. Variou-se a pressão parcial  $P/P_0$  de 0,05 a 0,2.

### 3.3.5 Determinação do tempo de extinção da cal

O tempo de extinção de uma cal determina a qualidade da cal e o tempo mínimo para que essa cal seja hidratada. Para este método utilizou-se a norma da ABNT NBR 10791, de novembro de 1989, na qual se utiliza uma haste de agitação específica, um recipiente adiabático e um termopar acoplado a tampa. A Figura 3.5 representa o esquema da unidade descrita acima.

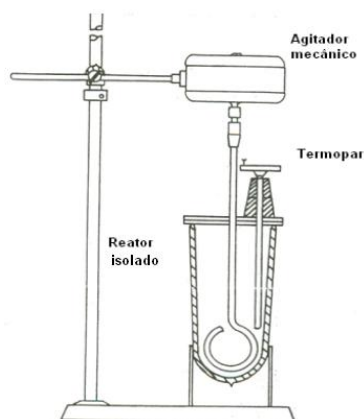


Figura 3.5 – Esquema da unidade experimental de determinação do tempo de extinção da cal.

Ao reator foi adicionado 100 g de cal com granulometria inferior a 0,106 mm onde já constava 400 mL de água destilada. Imediatamente o recipiente foi fechado e a elevação da temperatura foi medida a cada 30 segundos até os cinco primeiros minutos. Posteriormente, a temperatura foi medida a cada minuto até permanecer constante. Esse critério especifica que a variação das três últimas temperaturas não deve ultrapassar 0,5°C. O tempo total de extinção da cal refere-se ao primeiro das três últimas temperaturas anotadas.

### 3.3.6 Distribuição granulométrica do leite de cal

O diâmetro médio das partículas de hidróxido de cálcio foi determinado pela técnica de difração de raios laser no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, em um equipamento Mastersizer Micro da Malvern Equipments, utilizando-se o modelo polidisperso. Na Figura 3.6 pode ser observado esse equipamento. As análises foram feitas utilizando-se água e calgon como dispersantes em uma concentração de 1,25 g/L e para garantir uma

boa dispersão, as amostras foram submetidas a um banho supersônico. Para cada amostra de cal foram realizadas três análises.



Figura 3.6 - Mastersizer Micro.

### 3.3.7 Consumo específico de base na correção do pH de caldo de cana

As amostras de caldo caleado foram preparadas com um procedimento semelhante aos das usinas açucareiras. Adicionou-se um litro de caldo bruto à um béquer e aqueceu-o até a temperatura de 45°C em um banho termostatzado com agitação constante de 400 rpm. Posteriormente o pH da solução foi corrigido com o auxílio de um peagâmetro para 7,5 através da adição do leite de cal. Para cada correção de pH anotou se a quantidade de leite de cal utilizada. O processo pode ser observado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Unidade de calagem do caldo.

### **3.3.8 Sedimentação do caldo caleado**

No processo industrial de produção de açúcar ocorre após o processo de calagem a floculação. Em laboratório o procedimento industrial foi seguido e a solução de caldo foi aquecida até a temperatura de aproximadamente 100°C, mantida durante o processo por um banho termostaticado. Em seguida adicionou 0,025g de polímero floculante fornecido pela Usina Junqueira, para cada litro de caldo, de acordo com o procedimento industrial.

Como mencionado anteriormente a qualidade do leite de cal influencia no processo de sedimentação. Por isso optou-se por padronizar a adição do polímero a fim de se verificar a influência do hidróxido de cálcio na sedimentação. Esta foi analisada através da velocidade de sedimentação de cada amostra em uma proveta de um litro após a adição do polímero.

### **3.3.9 Retenção de sólidos na filtração**

Na indústria após a floculação e sedimentação o lodo segue para o processo de filtração onde se obtém o caldo clarificado. A retenção de sólidos na filtração é de extrema importância, pois é verificada a ocorrência de uma boa formação de flóculos que é o objetivo da adição do polímero. Para analisar esse fator as amostras após a floculação foram submetidas a uma filtração sob vácuo de 250 mmHg. A massa retida no filtro para cada amostra de caldo foi medida.

### **3.3.10 Cor do caldo clarificado**

A cor do caldo clarificado foi analisada através da sua transmitância, ou seja, a capacidade que a solução possui de permitir a passagem de luz, medida em porcentagem. Então, quanto maior a transmitância maior será a passagem da luz no meio e mais translúcido será o caldo. Essa análise foi feita em um espectrofotômetro UV/Visível utilizando um comprimento de onda de 500 nm. Para a realização deste

procedimento o caldo clarificado foi diluído em uma proporção de 1:20 em água destilada.

### 3.4 Variáveis importantes no processo de hidratação

#### 3.4.1 Reatividade da cal

A reatividade de uma cal virgem é medida em relação ao seu tempo de hidratação. Este tempo varia de acordo com o tipo e com a granulometria da cal, já que a quantidade adicionada é fixada em 100g. Uma cal muito reativa freqüentemente se hidrata de 2 a 3 minutos. Uma cal de reatividade média se hidrata de 5 a 10 minutos, enquanto que uma cal com baixa reatividade se hidrata de 15 a 30 minutos. Amostras de cales virgens usadas nesse estudo foram analisadas em laboratório conforme a norma NBR 10791. A Tabela 1 mostra os resultados experimentais obtidos.

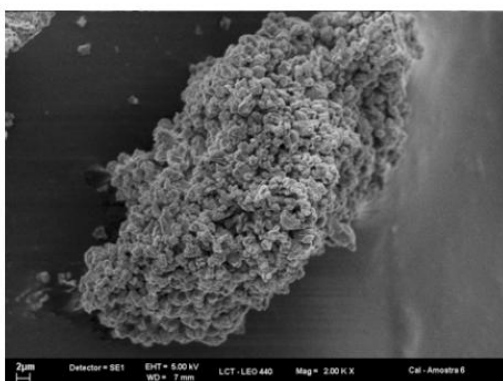
A Tabela 1 mostra que a cal virgem C3 é de reatividade média para alta, e a cal virgem C4 é de média a baixa reatividade. As cales virgens C1 e C2 são de baixa reatividade. Esta última possui um tempo de hidratação muito alto para um processo industrial e isto provavelmente foi causado por uma calcinação ruim, fato este explicado pelo forno utilizado de barranco que promove uma sinterização da superfície do calcário. E quando essa cal é submetida a uma hidratação o interior da partícula torna-se de difícil acesso e provavelmente não ocorrerá a hidratação completa da cal.

Tabela 3.1 – Dados experimentais.

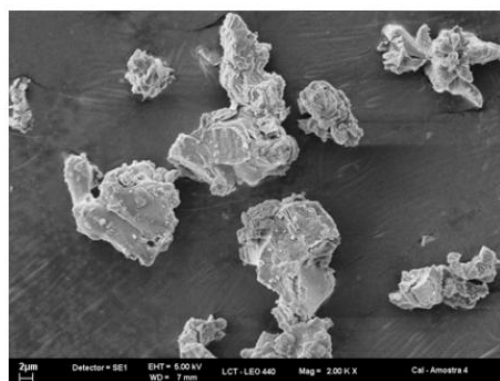
Amostras	Tempo de Hidratação (min)	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	Área Superficial ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
C1	28	-	10,17
C2	50	-	3,37
C3	5	-	13,35
C4	17	-	10,77
L1	-	19,89	23,67
L2	-	10,17	38,43
L3	-	17,67	19,51
L4	-	30,81	26,99

### 3.4.2 Análise Morfológica das partículas

A análise morfológica das partículas foi analisada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Fig. 3.8 revela claramente que a cal virgem calcítica da Cal Ferreira calcinada em forno de barranco, C2, está bastante sinterizada (fechamento dos poros) o que fatalmente leva a baixa área superficial e consequentemente a reatividade muito baixa. Já a cal virgem calcítica C1 apresenta partículas mais porosas, o que caracteriza cales mais reativas.



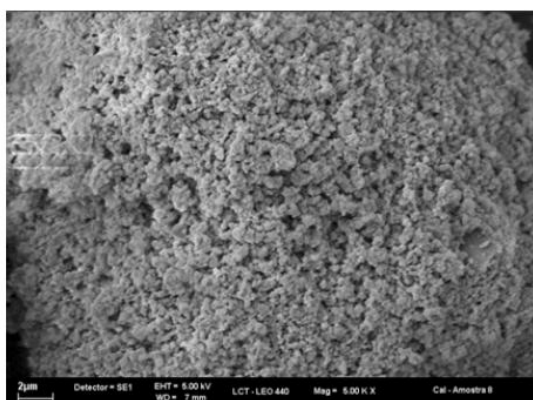
Cal C1



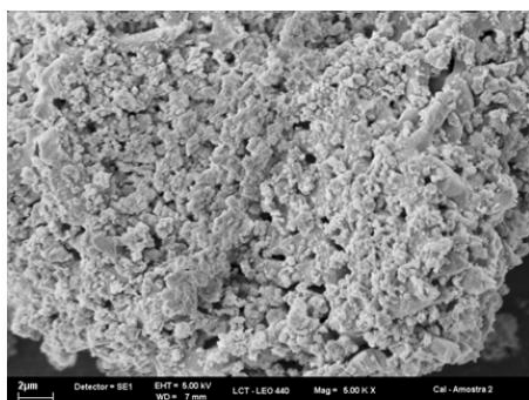
Cal C2

Figura 3.8 – MEV das cales C1 e C2 (Zoom de 2µm).

A Fig. 3.9 revela uma morfologia adequada (porosa) para as cales virgem dolomíticas C4 e C3. Contudo, comparando as figuras se observa uma sinterização da cal virgem C4 em relação à cal virgem C3. Este fato explica a maior reatividade dessa última em relação à primeira, fato evidenciado pela reatividade mostrada na Tabela 3.1.



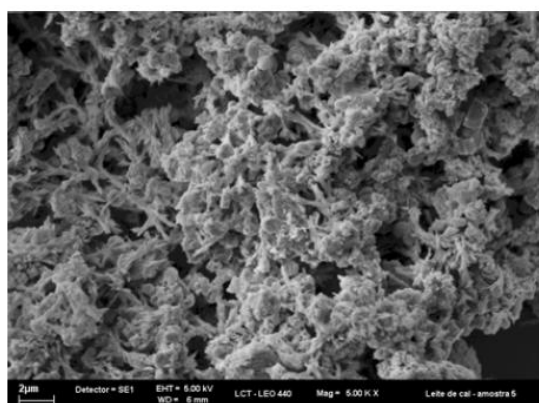
Cal C3



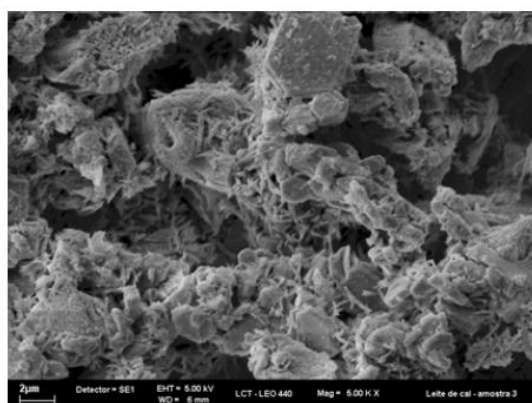
Cal C4

Figura 3.9 – MEV das cales C3 e C4 (Zoom de 2µm).

A Fig. 3.10 revela um leite de cal L2 com algumas partículas provavelmente não hidratadas (grandes flocos) devido à sinterização da cal virgem usada para produzir o leite de cal. Já o leite de cal L1 apresentou uma porosidade um pouco maior e um menor tamanho de partículas, o que para uma suspensão de leite de cal é altamente satisfatório, pois haverá mais reação com as impurezas do caldo misto promovendo uma melhor floculação e decantação. Porém, fica evidente que o método de hidratação utilizado na preparação do leite de cal L2 é altamente eficiente, pois ele hidratou uma cal de área específica inferior a C1 formando um leite de cal com características próximas a um leite de cal proveniente de cal porosa.



Leite de cal L1



Leite de cal L2

Figura 3.10 – MEV dos leites de cal L1 e L2 (Zoom de 2µm).

A Fig. 3.11 mostra um leite de cal L4 com boa porosidade e área superficial, mesmo sendo preparada com a cal virgem C4 que apresentou um grau de sinterização maior em relação à cal virgem C3. Isto evidencia a importância do método de preparação do leite de cal com temperatura da água e agitação adequadas. A Fig. 3.11 mostra claramente este fato, pois o leite de cal L3 apresenta “grumos” que são aglomerados de partículas formados durante a fase de hidratação da cal. Esses “grumos” se formaram por deficiência no processo de hidratação.



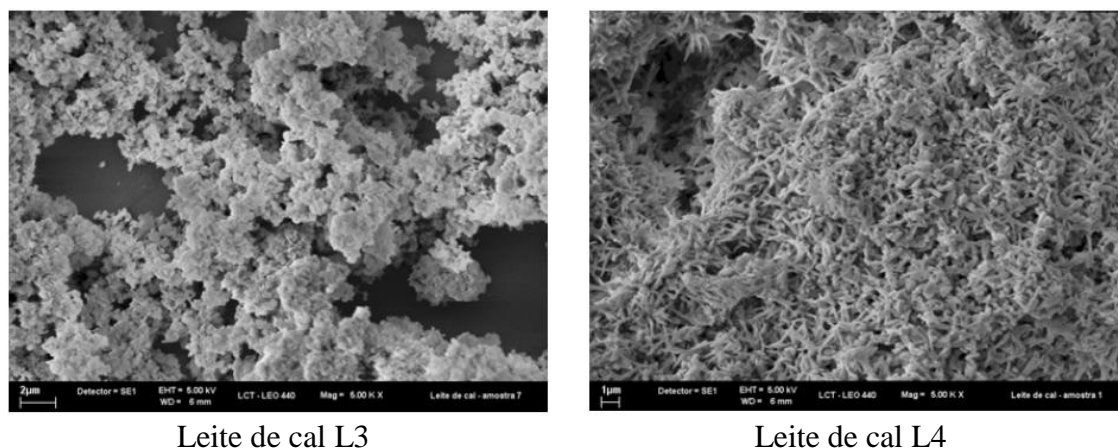


Figura 3.11 – MEV dos leites de cal L3 e L4  
(Zoom de 2µm e 1µm respectivamente).

### 3.4.3 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica das partículas foi mensurada através do equipamento Mastersizer. Em um processo industrial onde se utiliza como matéria-prima uma solução com partículas em suspensão tem como característica desejável um diâmetro menor das partículas, pois estas permanecem por mais tempo em suspensão e assim facilita o processo de bombeamento e agitação do sistema. Porém, quando se analisa um processo reativo e com sedimentação, as partículas com diâmetros maiores são consideradas mais eficientes quando se ignora a variável área superficial, considerando a partícula lisa. Entretanto, quando esta variável está presente é ela que mais influencia o processo reativo. Então, neste caso do processo de calagem a variável diâmetro médio pouco influencia no desempenho do leite de cal.

A Tabela 3.1 revela que a suspensão com distribuição granulométrica mais adequada a um sistema em suspensão é o leite de cal preparado com a cal C2, pois esta suspensão apresenta um diâmetro médio menor (10,17 µm). A Tabela 3.1 também revela que a suspensão menos adequada é a suspensão preparada com a cal C4, pois esta apresentou o maior diâmetro médio, de 30,81 µm.

### 3.4.4 Área Superficial

A área superficial das partículas de cal e leite de cal foi analisada através do método BET. Com relação às cales virgens, a Tabela 3.1 revela que a de maior área superficial é a C3 e a de menor área superficial é a cal virgem calcítica C2. Esta última apresentou uma área superficial muito baixa, revelando uma cal totalmente sinterizada. Este fato já tinha sido evidenciado nas análises de morfologia e tempo de extinção desta cal. Contudo, vale ressaltar que mesmo usando uma cal virgem sinterizada ( $S_g = 3,37 \text{ m}^2/\text{g}$ ) a tecnologia empregada no preparo do leite cal conseguiu produzir um grande aumento na área superficial da partícula de leite de cal ( $S_g = 38,43 \text{ m}^2/\text{g}$ ), o que mais uma vez evidencia a adequação da tecnologia.

### 3.5 Influência da qualidade do leite de cal na clarificação do caldo de cana

#### 3.5.1 Sedimentação do Caldo Caleado

A Fig. 3.12 revela que os caldos de cana tratados com as suspensões de Leite de cal L2, L4 e L3 tiveram desempenhos semelhantes na etapa de sedimentação, mas o leite de cal L1 obteve o pior desempenho. Principalmente na formação do lodo, pois a altura da interface é a maior. Com isso temos um volume maior de lodo que exigirá do filtro uma maior potência aumentando os custos do processo.

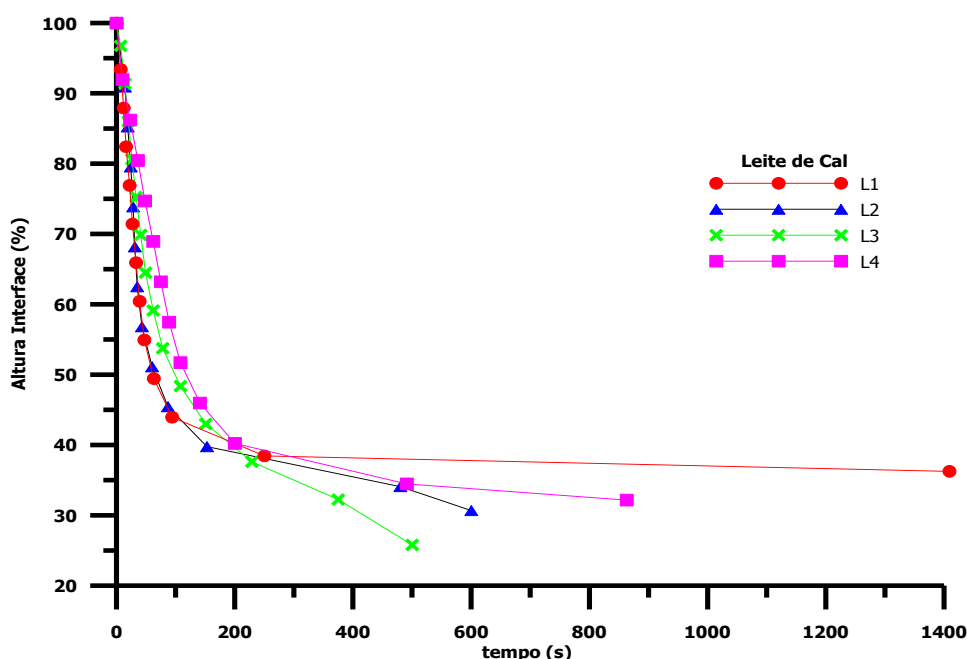


Fig. 3.12 - Sedimentação do caldo caleado.

#### 3.5.2 Consumo específico de hidróxido de cálcio na correção do pH

A Tabela 3.2 revela que a suspensão de leite de cal L2 apresenta o menor consumo específico na correção do pH da solução de caldo de cana. Ressaltando que esta amostra obteve na sua caracterização o menor diâmetro médio, 10,17  $\mu\text{m}$ , e a maior área específica, 38,43  $\text{m}^2/\text{g}$ . As suspensões de leite de cal L3 e L4 apresentaram maiores consumos específicos de leite de cal por litro de caldo tratado, ressaltando que foram preparadas com cales dolomíticas.

Tabela 3.2: Dados experimentais.

<b>Amostras</b>	<b>Consumo específico (g sólidos/L)</b>	<b>Transmitância (%)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>
<b>L1</b>	1,488	89,6	70,96
<b>L2</b>	1,333	89,7	88,46
<b>L3</b>	1,670	89,6	59,46
<b>L4</b>	1,863	89,8	72,96

### 3.5.3 Cor do Caldo Clarificado

A transmitância mede a fração da luz incidente de certo comprimento de onda que atravessa o meio. Portanto, quanto maior a transmitância maior será transparência do meio. A Tabela 3.2 revela que nenhum efeito na cor da solução de caldo de cana foi observado usando diferentes suspensões de leite de cal.

### 3.5.4 Retenção de sólidos na filtração.

A Tabela 3.2 mostra também a retenção de sólidos no filtro após a filtração com vácuo de 250 mmHg. As amostras L1, L2 e L4 retiveram altas porcentagens de sólidos, sendo estas as amostras com as maiores áreas superficiais (ver Tabela 3.1). Este resultado evidencia a associação da baixa área superficial, amostra L3, com a baixa retenção de sólidos, aumentando, assim, a importância da qualidade do leite de cal na eficiência do processo de clarificação do caldo de cana.



### **3.6 Conclusão**

De acordo com os estudos feitos por SILVA (2007) e SOARES (2007) as variáveis que afetam a qualidade do leite de cal são: o processo de calcinação, tipo de forno, empregado para fabricar a cal, a razão cal/água na entrada do reator, o grau de agitação durante a hidratação e a temperatura da água de reação.

O processo de calcinação influencia na qualidade do leite de cal quando produz uma cal mal calcinada, ou seja, com a sua superfície sinterizada, a qual dificulta a penetração da água de hidratação no interior da partícula aumentando assim a quantidade de resíduo e diminuindo a área superficial das partículas de leite de cal. Um processo ruim de calcinação, por exemplo, em forno de barranco, produz uma cal como a amostra C2.

A razão cal/água influencia no “afogamento” ou “requeima” da cal como mencionado na revisão bibliográfica por GUIMARÃES (1998), mas influencia principalmente na viscosidade do leite de cal produzido. Um leite de cal muito viscoso dificulta a manuseio do mesmo durante o processo industrial que o utiliza como matéria-prima. Porém, um estudo mais aprofundado sobre a viscosidade do leite de cal ainda não foi mencionado na literatura devido a sua complexidade.

Outro fator que influencia a qualidade do leite de cal é o grau de agitação, mais especificadamente a qualidade de agitação da suspensão. Para uma boa agitação é necessário não só uma velocidade de agitação adequada como também o tipo de agitador empregado, o formato do reator e o uso de chicanas.

Embora todos esses fatores afetarem a qualidade do leite de cal, a variável em destaque nos testes do item 3.4 é a temperatura da água de hidratação. Pois, mesmo utilizando uma cal com boa qualidade, C1 e C3, os leites de cal produzidos com cales de baixa reatividade e área superficial, C2 e C4, tiveram características parecidas ou até melhores quando se compara cales de mesma classificação, calcítica e dolomítica. Portanto, fica evidente que para a produção de um leite de cal com boas características deve se utilizar um processo de hidratação com agitação e razão cal/água adequados, mas principalmente utilizar água inicial aquecida.

Já quando se analisa a qualidade do leite de cal no processo de clarificação do caldo de cana, item 3.5, o leite de cal com melhor desempenho foi obtido usando a suspensão L2, pois obteve alta retenção de sólidos, baixo consumo específico de leite de cal e um bom desempenho na sedimentação. Esta amostra de leite de cal possui o menor diâmetro médio e a maior área superficial. Ambas as características estão associadas

com o processo de preparação do leite de cal. É importante enfatizar que esta amostra foi obtida através de uma cal com características ruins e também é importante que se note a possibilidade de obter as características desejáveis em um leite de cal a partir de uma cal mal calcinada. Com base nisto, volta-se as atenções para o melhoramento do processo de hidratação de cal para a produção de um leite de cal com grande área superficial e partículas menores.

---

# CAPÍTULO IV

---

## *AUMENTO DE ESCALA DO PROCESSO DE ANÁLISE DO TEMPO DE EXTINÇÃO DA CAL*

### ***4.1 Introdução***

A variável tempo de extinção de uma cal está entre as mais importantes do processo de hidratação, pois ela evidencia a qualidade da cal que está sendo utilizada e seu tempo de reação. Esse tempo de reação direciona o cálculo do tempo de retenção da partícula dentro do reator industrial e o volume deste. Quando esse tempo é estimado de forma errônea a partícula de cal permanece dentro do reator por tempo insuficiente ou extrapolado para que a reação ocorra totalmente, gerando custos ao processo.

De acordo com a norma da ABNT NBR 10791 – Cal virgem: Determinação do tempo de extinção, o tempo de reação de uma cal virgem é determinado por um equipamento de bancada, Figura 4.1, com volume aproximado de um litro onde a cal micropulverizada é introduzida em 400g de água dentro do recipiente termicamente isolado e com agitação constante. A temperatura da solução é monitorada por um termopar até que a temperatura se estabelece, então, ocorre o fim da reação e a determinação do tempo de extinção.

Devido a sua dimensão esse equipamento torna-se distante do processo industrial, pois não se permite monitorar a hidratação de cales com diâmetros maiores, comercialmente as mais utilizadas são de 10 a 40 mm, e em volumes maiores de solução, apenas em um litro. É visível à distância na diferença entre o reator utilizado no teste e um reator industrial.



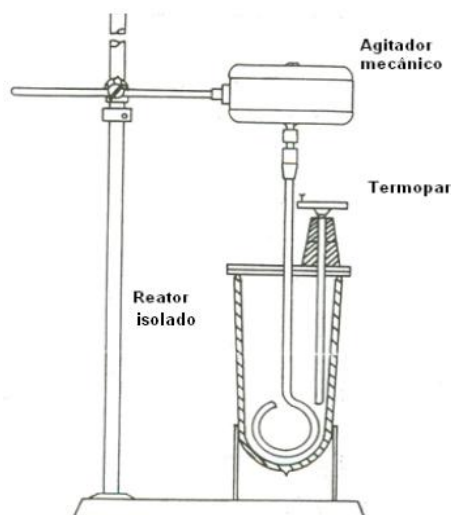


Figura 4.1 – Esquema da unidade de determinação do tempo de extinção da cal.

Enquanto um reator industrial possui uma haste com dimensões proporcionais ao reator menores, a haste do reator de bancada possui formato e dimensão que cobre totalmente o volume do reator proporcionando uma agitação mais eficiente, sem depósitos ao fundo e com menor formação de resíduos. Em um reator industrial há volume morto onde ocorre a não hidratação das partículas de cal e a sua aglomeração, principalmente quando se faz uma hidratação sem as condições necessárias a uma boa hidratação, como agitação eficiente e temperatura inicial da solução adequada. Outro afastamento dos testes se faz com o monitoramento da temperatura, em um reator industrial há pontos com temperaturas diferentes evidenciando que o termopar pode estar localizado erroneamente em uma zona onde a cal já foi totalmente hidratada. Porém esse fator em escala industrial é corrigido com a utilização de agitadores e reatores adequados e também pela utilização de chicanas que obstrui a formação de vórtice central.

Com o propósito de estudar o comportamento da reação de hidratação de uma cal em um reator de escala piloto fez-se o projeto de um reator de 5 litros com monitoramento da temperatura automatizado. E devido ao custo de produção o reator foi projetado com camisa tendo como objetivo não ocorrer perdas de calor da solução, acrescentando, assim, ao equipamento a função de hidratador.



Figura 4.2 – Haste utilizada em um reator de bancada (SILVA, 2007).

Um hidratador em escala de bancada (Figura 4.3) é meramente um béquer imerso em um banho termostatzado com um agitador mecânico padrão, por exemplo, um agitador tipo turbina, Figura 4.2. O esquema de bancada proporciona uma hidratação em condições inferiores à industrial em alguns aspectos, pois ocorre uma grande perda de calor em forma de vapor na superfície da solução por ser um recipiente aberto, ocorre na haste um grande acúmulo de cal mal hidratada devido ao seu formato e também ocorre a formação de vórtice central devido à ausência de chicanas, proporcionando apenas a agitação não a mistura completa das partículas. Industrialmente, para aumentar a eficiência da transferência de calor, o vaso deve ser fechado e a agitação ser alta. Lembrando que industrialmente em um reator batelada a temperatura inicial da reação é inferior, pois ocorre a absorção de calor pela parede de inox que possui uma alta condutividade térmica.

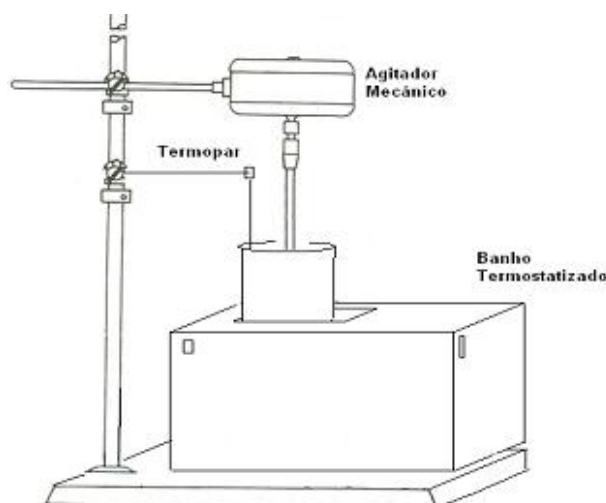


Figura 4.3 – Esquema da unidade de hidratação em escala de bancada (SILVA, 2007).

## 4.2 Projeto do reator

O reator de hidratação para um volume de 5 litros foi projetado com três compartimentos. O primeiro, no interior, é o reator, o segundo é a camisa de troca térmica e o terceiro a camisa de isolamento como pode ser observado na Figura 4.4.

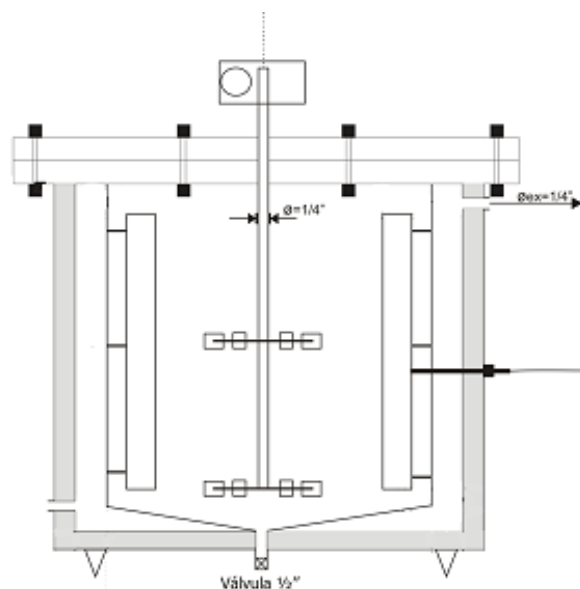


Figura 4.4 – Esquema do reator de hidratação.

O reator foi construído em aço inox e suportado por um tripé. No seu interior há quatro chicanas, um orifício para entrada de material e uma válvula de  $\frac{1}{2}$  polegada para descarga de material (Figura 4.5). O fundo do reator possui formato cônico.

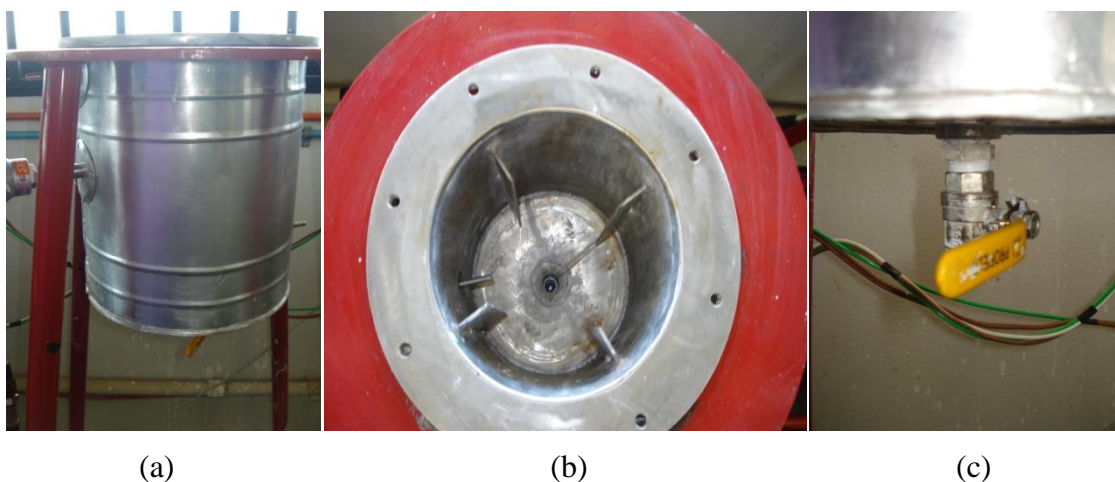


Figura 4.5 – Vista frontal (a) e superior (b) do reator. Válvula de descarga (c).

De acordo com JOAQUIM (2007) um agitador tipo turbina (Rushton) é utilizado em processos que necessitam de alta turbulência e tensão de cisalhamento, geram componentes de velocidade radial e tangencial e geralmente trabalham com fluidos de baixa viscosidade, menor que 50 Pa.s, e com rotações entre 100 e 350 rpm. Com base em JOAQUIM (2007) o agitador utilizado neste estudo é um impelidor tipo turbina, porém modificado, Figura 4.6. O agitador possui duas turbinas para aumentar a uniformidade da mistura, onde em cada uma há duas pás em tamanhos maiores e todas são fixadas ao eixo do agitador. Nas pás maiores da turbina inferior acoplou-se um raspador de borracha em formato cônico para diminuir o acúmulo de material ao fundo do reator, fato este verificado experimentalmente e proporcionado pela alta capacidade de aglomeração das partículas de cal, e também para aumentar a eficiência de suspensão das partículas, consequentemente aumentar a eficiência da reação de hidratação.



Figura 4.6 – Agitador utilizado no processo.

A agitação é garantida por um motoredutor helicoidal modelo MC50 com capacidade de rotação na entrada de 1680 rpm e fator de redução efetiva de 6,2. O motor tem potência de 1/3 CV, modelo B14 com fixação na base, carcaça 63 – C90-4. O controle da agitação é feita por um inversor de frequência CFW10 com 0,25 CV de potência, conforme Figura 4.7.

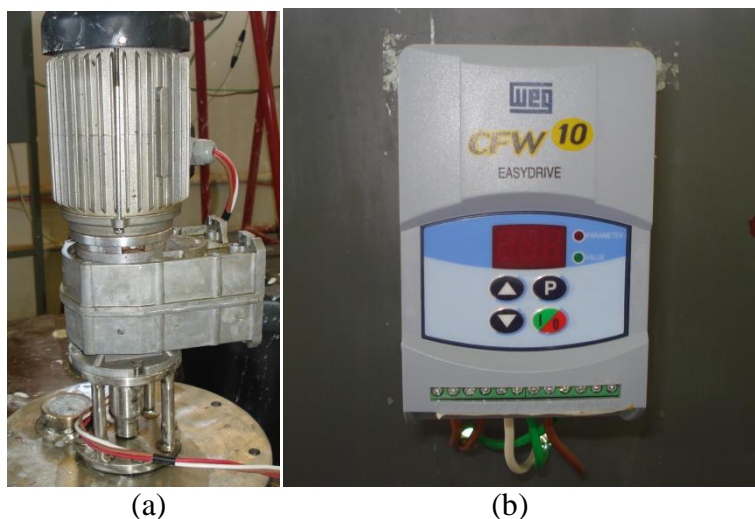


Figura 4.7 – Motoredutor fixado a tampa do reator (a) e inversor de frequência (b).

A variação da temperatura da solução durante a reação foi adquirida através de termoresistor posicionado na parte central do reator. Termoresistor em aço inox modelo RCCB com sensor PT-100 tipo 1, o qual mede variação de temperatura entre -50 e 200 °C e possui diâmetro de  $\frac{1}{4}$  polegadas e comprimento de 70 mm. O indicador e o transmissor de temperatura possuem display digital conforme a Figura 4.8. Estes conectados a uma placa de aquisição de dados que transmite os dados ao computador através do software Labview.

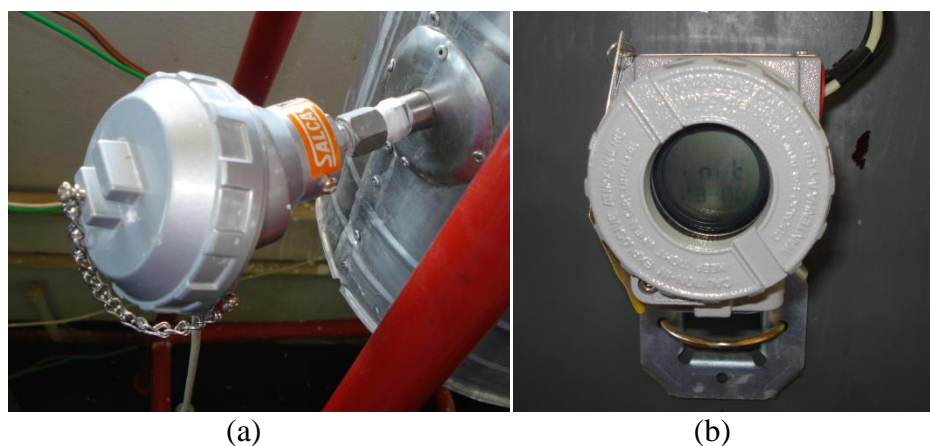


Figura 4.8 – Termoresistor (a) e transmissor digital (b).

## **4.3 Metodologia**

### **4.3.1 Tempo de extinção em reator em escala piloto**

O tempo de extinção de uma cal é determinado pela variação da temperatura da solução durante a reação da cal virgem em um reator isolado termicamente. No reator em escala piloto a metodologia para este teste é semelhante, diferenciando apenas pelo método de medição e pelo equipamento utilizado. O reator é preenchido com cinco litros água, aquecida ou não, posteriormente inicia-se a agitação de aproximadamente 180 RPM para homogeneizar a temperatura da solução. No computador, através do programa labview, acompanha-se a estabilização da temperatura da água inicial. Então, adiciona-se a cal na proporção desejada e inicia-se a aquisição da temperatura da solução. Quando a temperatura é estabelecida interrompe-se a aquisição. O tempo de extinção da cal em determinada proporção e temperatura inicial é determinado através do gráfico de temperatura versus tempo quando neste inicia-se a estabilidade da temperatura.

### **4.3.2 Determinação do resíduo de hidratação em reator com escala piloto**

O resíduo de hidratação é determinado pelo método B de acordo com a norma ABNT NBR 6472: Cal – Determinação do resíduo de hidratação, onde o leite de cal é peneirado em uma peneira com abertura de 0,106 mm e lavado até que a água não tenha cor. Posteriormente, o resíduo é secado em estufa a 110 °C por vinte e quatro horas e pesado. O cálculo da porcentagem de resíduo tem como base a quantidade de sólidos presentes na solução, em sua maioria hidróxido de cálcio.

### **4.3.3 Determinação da densidade relativa da suspensão de leite de cal**

A densidade relativa do leite de cal foi determinada por picnometria tendo como referência a água destilada a uma determinada temperatura. O procedimento consiste na pesagem da amostra de leite de cal e da água destilada em um picnômetro de 50 ml com três repetições. A temperatura de ambas as amostras é medida durante os testes.

## 4.4 Resultados e discussões

### 4.4.1 Diferença no tempo de hidratação entre os reatores

Em uma amostra de cal calcítica da indústria Cal Cruzeiro cuja composição química fornecida pela empresa está exposta na Tabela 4.1, fez-se dois testes de reatividade, um na unidade de bancada e outro em escala piloto. No teste de bancada colocou-se 80g de cal com granulometria na faixa de 0 a 4,76 mm ao reator com 400g de água e agitação constante em 500 rpm. A temperatura foi monitorada a cada meio minuto até cinco minutos e posteriormente a cada minuto até a sua constância. No teste na unidade em escala piloto adicionou-se 1000g de cal com granulometria na faixa de 0 a 5 mm ao reator com 5 litros de água com agitação constante em 180 RPM. A temperatura foi monitorada a cada segundo até que permanecesse constante.

Tabela 4.1 – Composição química da amostra de cal calcítica da Cal Cruzeiro

<i>CaO disponível</i>	<i>CaO total</i>	<i>MgO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>CaCO<sub>3</sub></i>
91,68 %	96,06%	0,63%	1,12%	1,62

A Figura 4.6 mostra o gráfico de temperatura versus tempo das análises de reatividade de ambos os reatores. Na curva do teste no reator em escala de bancada observa-se a ascensão rápida da temperatura nos primeiros segundos finalizando a reação em aproximadamente 3 min. Já a temperatura do teste em escala piloto tem uma ascensão branda cessando a reação em aproximadamente 7 min. Essa diferença se deve, em grande parte, a diferença do material utilizado na construção dos reatores. O reator em escala piloto foi construído em aço inox tendo este uma alta condutividade térmica que absorve o calor liberado inicialmente pela reação de hidratação, porém o isolamento permite que a temperatura não decline ao longo do tempo. Já o reator de bancada possui uma parede interna espelhada que é um “isolante térmico” e não permite a perda de calor.

Fica evidenciado através do teste que a análise de reatividade de cal em um reator de bancada, Figura 4.1, é superestimada. E isto acontece porque aos fatores que influenciam a hidratação de uma cal são minimizados ou até mesmo eliminados em uma unidade de bancada como esta. A razão entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do

reator é superior ao reator industrial, a distância das pás do agitador ao fundo do reator é diferente e o formato do fundo do reator de bancada é esférico, o que diminui a formação de zonas de estagnação.

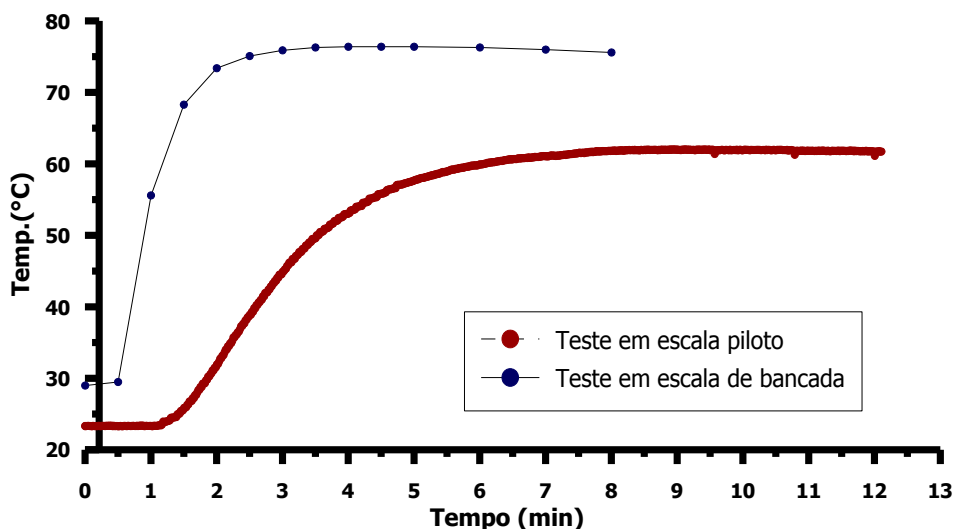


Figura 4.6 – Gráfico de reatividade de cal em reatores de escalas diferentes.

De acordo SHARMA *et al* (2003) que estudaram o comportamento de suspensões em um reator de fundo chato e com impelidor tipo turbina de pás fixas inclinadas em ângulo de  $45^\circ$  (PBT), quando se aumenta a distância entre o impelidor e o fundo do reator aumenta-se a velocidade necessária para suspender todas as partículas e aumenta-se a potência necessária para este fato. Os autores também relatam que essa relação é constante até que a razão entre a distância ao fundo do reator e o diâmetro do reator seja de 0,1. Posteriormente a essa razão e até a razão de 0,35 o comportamento do fluxo se mantém, mas aumenta-se a necessidade de rotação, pois ocorre o aparecimento de zonas de estagnação. E posteriormente a razão de 0,35, na terceira região, o fluxo característico do impelidor muda e oscila entre radial e axial acentuando mais o aumento de rotação e potência.

Entretanto quando foi estudado o comportamento da suspensão com a variação da razão entre o diâmetro do impelidor e do reator mantendo a distância do impelidor até o fundo do reator, na segunda região, verificou-se a presença de um ponto de mínimo. A potência e a velocidade de rotação mínima para suspender todas as partículas diminuem com o aumento do diâmetro do impelidor até que a razão entre este o diâmetro do reator atinja 0,35. Posteriormente a potência e a velocidade de rotação aumentam. Sendo assim há um ponto em que o consumo de energia é menor e a eficiência do impelidor é



máxima. Contudo os autores afirmam ainda que essa tendência seja generalizada para todos os impelidores, mas que o valor do ponto crítico é específico. Por isso há a necessidade de um estudo real da reação de hidratação de cal através de um reator em escala piloto com um impelidor adequado.

#### 4.4.2 Granulometria da cal: Comercial versus Científico

Comercialmente a granulometria da cal calcítica ou dolomítica mais vendida está entre 10 mm e 40 mm. As empresas preferem essa granulometria devido à facilidade de manuseio. Uma cal micropulverizada além do custo mais elevado ela forma uma nuvem de poeira alta ao ser despejadas no silo, no reator e até mesmo durante o transporte. Essa nuvem significa perda de material, problemas ambientais e de saúde aos funcionários. Por isso as empresas preferem cales com granulometrias maiores.

Já do ponto de vista técnico quando se diminui a granulometria da cal diminui-se também a granulometria do resíduo, principalmente do carbonato de cálcio não calcinado. Esses resíduos são transportados através do processo e causam entupimento de equipamentos, principalmente os com orifícios pequenos e com manutenção difícil e de custo elevado.



Figura 4.7 – Carbonato de cálcio evidente no resíduo de hidratação.

Para se retirar o resíduo com maior eficiência deve-se promover uma hidratação de cales com granulometrias maiores, pois dessa forma a partícula de carbonato de cálcio presente na cal torna-se evidente (Figura 4.7) e de fácil remoção. Mas deve-se lembrar

que quanto maior a granulometria mais difícil é a penetração da molécula de água no interior da partícula de cal, ocasionando a formação de resíduos como cal “afogada” ou “requeimada”. Esse fato pode ser observado pela Figura 4.8 que mostra os resíduos de hidratação de cales com granulometria entre 0 e 7 mm com partículas homogêneas e entre 7 e 14 mm com partículas de cal “afogada” ou “requeimada”. Após o processo de hidratação de cales com granulometria superiores a micropulverizada, caso haja um processo de remoção de resíduos, ele se torna mais eficiente, já que remover partículas maiores por sedimentação, rosca sem fim ou peneiramento é mais rápido e eficiente.

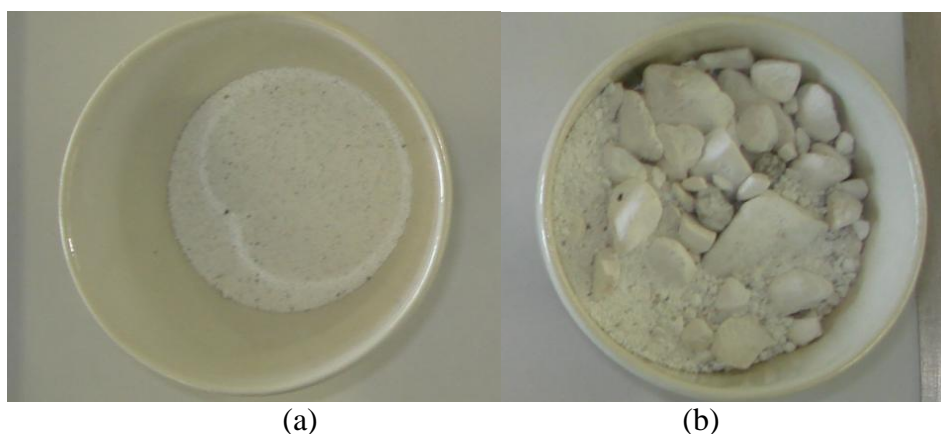


Figura 4.8 – Resíduo de hidratação de cal com granulometria de 0 a 7 mm e de 7 a 14 mm.

#### **4.4.3 Temperatura inicial da água de hidratação e determinação da granulometria ideal de projeto**

Outro fator importante, já mencionado anteriormente, é a temperatura inicial da água de hidratação. Quando se submete a cal a uma hidratação em temperaturas altas, superior a 60°C, a mesma se hidrata com maior rapidez e com maior eficiência. Para monitorar essa ocorrência fizeram-se testes de hidratação no reator em escala piloto com variação da granulometria da cal e da temperatura inicial da água. A cal calcítica utilizada foi fornecida pela empresa Unical e suas características para cada teste são as seguintes:

**Teste 1:** Cal de 0 a 7 mm hidratada sem aquecimento da água.

**Teste 2:** Cal de 0 a 7 mm hidratada com aquecimento da água.

**Teste 3:** Cal micropulverizada hidratada sem aquecimento da água.

**Teste 4:** Cal micropulverizada hidratada com aquecimento da água.

Tabela 4.2 - Dados experimentais.

<i>Testes</i>	<i>R<sub>C/A</sub> (g/L)</i>	<i>Concentração final (g/L)</i>	<i>Densidade Relativa (g/ml)</i>	<i>Resíduo (%)</i>
<b>1</b>	150,00	198,64	1,09	2,67
<b>2</b>	150,00	235,88	1,11	1,28
<b>3</b>	150,00	221,11	1,10	6,28
<b>4</b>	150,00	239,67	1,11	2,06

A hidratação foi feita com a adição de 700g de cal a 5 litros de água fornecendo uma concentração inicial, razão cal/água, de 150 g/L como pode ser observado na Tabela 4.2. A concentração final mencionada nesta tabela refere-se à concentração de sólidos presentes na solução final por litro de água. A densidade relativa foi mensurada por picnometria e o resíduo de hidratação de acordo com a norma ABNT NBR 6472: Cal – Determinação do resíduo de hidratação.

Os resultados dos testes de hidratação estão expostos na Figura 4.9. De acordo com a figura observa-se que o desempenho da hidratação de uma cal micropulverizada e de uma cal com granulometria de 0 a 7 mm é praticamente o mesmo, independente se for feita com aquecimento da água inicial de hidratação ou não. Conclui-se com isso que em termos de reatividade não há perdas quando se varia um pouco a granulometria e por isso utilizar uma cal com granulometria de 0 a 7 mm para produzir um leite de cal de boa qualidade é vantajoso tanto quanto uma micropulverizada.

Outra observação feita de acordo com a figura é em relação à variação da temperatura inicial da água. Quando se aumenta a temperatura inicial da água a reação de hidratação da cal se processa de forma mais rápida e eficiente. A eficiência, neste caso, é observada pela redução da formação de resíduo de acordo com a Tabela 4.2. O resíduo de hidratação nestes testes diminuiu com o aumento da temperatura inicial de hidratação, porém aumentou com a diminuição da granulometria.

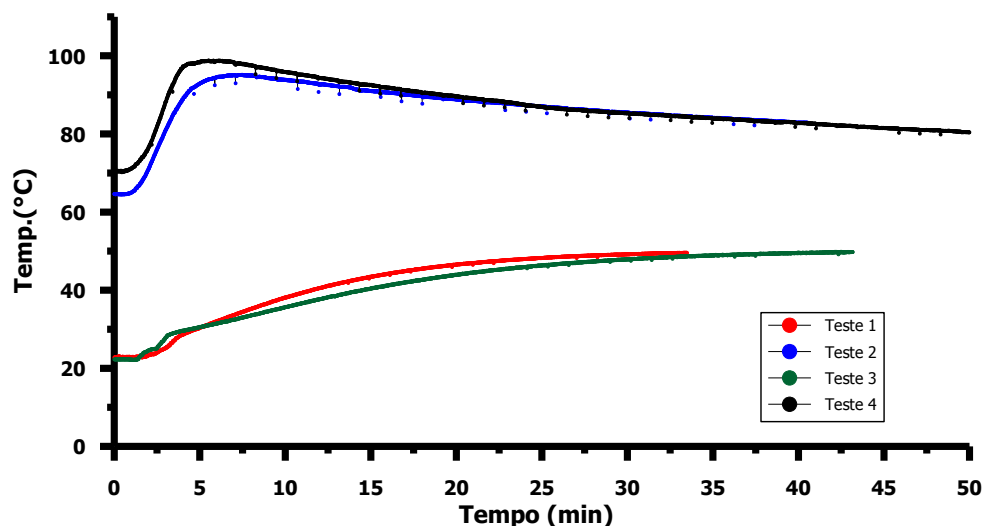


Figura 4.9 - Teste de hidratação em reator com escala piloto.

Este fato contradiz com o estudo feito por SILVA (2007) que concluiu que o aumento do resíduo está relacionado ao aumento da granulometria. Porém vale ressaltar que seu estudo foi feito com faixas diferentes de granulometria e no presente estudo as faixas escolhidas se intercalam. Provavelmente essa faixa de granulometria intercalada contribuiu para aumentar a hidratação das partículas diminuindo a formação de resíduos. Geralmente a hidratação da cal ocorre com a “explosão” da partícula e dessa forma as moléculas de água conseguem reagir em uma superfície maior formando mais moléculas de hidróxido de cálcio. Essa faixa granulométrica contribuiu para aumentar essas “explosões” e diminuir a formação de resíduos não hidratados.

A influência da temperatura inicial da água de hidratação é observada pela diferença nos tempos de hidratação dos testes feitos com aquecimento e sem aquecimento da água inicial. Ambos os testes, teste 1 e 3, feitos com cales em diferentes granulometrias terminaram a reação de hidratação em aproximadamente 35 minutos. Em contrapartida os testes 2 e 4, feitos também com cales em diferentes granulometrias, cessaram suas reações em aproximadamente 5 minutos, evidenciando assim o grande ganho no tempo de residência das partículas necessário para que a reação se processe completamente e conseqüentemente o ganho na diminuição do volume do reator necessário para que isto ocorra.

## 4.5 Conclusões

Há neste capítulo o esclarecimento que uma unidade de bancada de hidratação de cal não representa adequadamente o processo industrial, pois ocorre minimização das falhas do processo industrial. Também fica evidente que para diminuir o consumo de energia e aumentar a eficiência da agitação é necessária a operação adequada do agitador no processo. E neste caso, o agitador adequado deve possuir um raspador, pois a cal quando se hidrata possui uma alta capacidade de se aglomerar formando ao fundo do reator uma pasta que impermeabiliza algumas superfícies de cal ainda não hidratada e em alguns casos dependendo da concentração da suspensão ocorre a interrupção da agitação.

Neste capítulo também concluímos que uma pouca variação da granulometria da cal utilizada no processo de hidratação não diminui a reatividade desta de forma significativa podendo então aumentar-se a granulometria da cal sem perda de eficiência no processo. A necessidade do estudo da hidratação com uma cal com granulometria superior a micropulverizada tem como base o uso comercial de cales com alta granulometria, o custo elevado do material micropulverizado e o processo de remoção de resíduos já que a sua eficiência aumenta com o aumento da granulometria do resíduo.

A temperatura da água inicial é a variável indispensável para a produção de uma cal com boa qualidade como descrito no capítulo três. Pois aumenta a área superficial, diminui a sinterização da superfície das partículas e diminui a formação de resíduo. Nos testes feitos em uma unidade piloto verificou-se através do gráfico a diferença no comportamento da reação quando há aumento de temperatura na água inicial de hidratação. Dessa forma observa-se que o aquecimento da água inicial de hidratação aumenta a velocidade da reação diminuindo, assim, o tempo de reação de forma significativa. O tempo de reação é o tempo necessário de retenção das partículas dentro do reator para que ocorra toda a reação de hidratação e esse tempo está diretamente ligado ao cálculo do volume do reator. Quanto menor o tempo necessário de retenção menor será o volume do reator e menor será o custo de produção do equipamento e de funcionamento, pois a potência necessária para promover uma ótima agitação é menor quanto menor for o volume do reator.

---

# CAPÍTULO V

---

## *UNIDADE DE PRODUÇÃO DE LEITE DE CAL*

### **5.1 Introdução**

Nos capítulos anteriores foram feitas análises das melhores condições de operação das variáveis: temperatura inicial da água, razão cal/água, agitação e granulometria da cal, na preparação do produto leite de cal. No capítulo III ressaltou-se o quanto o método de preparação é importante para produção de suspensões de leite de cal com características melhores, independente da qualidade da cal utilizada no preparo. Também foi ressaltado que o desempenho de leite de cal em um processo industrial depende da qualidade do produto e que a utilização de produtos de qualidade acarreta em diminuição significativa do tempo gasto em manutenção de equipamentos devido ao acúmulo de materiais não hidratados e em diminuição da quantidade de matérias-primas necessárias para manter a eficiência do processo, já que um processo de hidratação adequado diminui a formação de resíduos e aumenta o desempenho das partículas de leite de cal durante o processo industrial.

Entretanto apenas no capítulo IV foi feita uma aproximação das variáveis importantes no processo de hidratação com o mercado comercial da cal. A granulometria da cal é a principal variável nesta aproximação, pois quando se aproxima do melhor desempenho no processo de produção com a utilização de cal micropulverizada ocorre o afastamento aos interesses comerciais com utilização de cal com granulometria entre 10 e 40 mm. Em contrapartida ao se utilizar uma cal com granulometria superior a micropulverizada na sua hidratação ocorre o aumento da formação de resíduos através do processo de “afogamento” e “requeima” da cal e isto diminui o rendimento da reação. Assim, concluiu-se experimentalmente que a

granulometria da cal que atende ambos os aspectos, comercial e de processo de hidratação, deve estar entre 0 e 7 mm, pois nesta faixa o desempenho da cal na hidratação é semelhante ao processo com a variável otimizada.

O aquecimento da água inicial de hidratação também foi uma questão analisada, pela qual ficou comprovado que o tempo de hidratação através de um sistema com aquecimento inicial diminui consideravelmente e proporciona a diminuição da formação de resíduos e do volume do reator necessário para uma hidratação completa.

Todas essas análises e também o estudo de patentes de hidratadores de cal proporcionou o desenvolvimento de um projeto inovador de um hidratador de cal onde este possui um sistema de agitação com raspador, um sistema de aquecimento e um sistema de remoção de resíduo que está esquematizado pela Figura 5.1. Através da revisão de patentes feita constataram-se falhas nesses processos e nenhum autor conseguiu associar eficientemente uma boa hidratação a uma eficiente remoção de resíduos. Para se obter uma boa associação é necessário um estudo abrangente dos termos mais importante de um projeto com agitação, como reologia das suspensões e posteriormente um gráfico de número de potência versus número de Reynolds para determinar o consumo energético na agitação. Com isso, inicialmente fez-se um estudo da reologia das suspensões de leite de cal nas faixas de variações consideradas adequadas. Esses parâmetros serão descritos nos próximos itens e posteriormente será descrito a unidade piloto do hidratador proposto pela autora.



Figura 5.1 – Layout da planta do processo de hidratação.

## 5.2 Reologia

A reologia é a ciência que estuda o comportamento mecânico das substâncias fluidas, classificando-as de acordo com a deformação sofrida através da variação da tensão aplicada. E esse comportamento do fluido depende de propriedades como viscosidade, elasticidade e plasticidade, sendo a viscosidade de um fluido a resistência interna ao fluxo quando submetido a uma tensão. E quanto maior o valor da viscosidade mais difícil é o escoamento do fluido.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5.1)$$

A viscosidade é denominada como uma constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) do fluido, de acordo com a Equação 5.1 conhecida como lei de Newton da Viscosidade. A taxa de deformação é o gradiente de velocidade entre duas placas que surge quando uma força é aplicada em uma das duas placas que separam o mesmo fluido conforme Figura 5.2. Essa força gera uma força ( $\vec{F}$ ) de reação na superfície do fluido que se encontra próxima a parede da placa sendo denominada de força de cisalhamento. O fluido próximo a parede da placa em movimento possui a mesma velocidade que a placa quando se considera que haja atrito, e o fluido próximo a placa fixa possui velocidade zero. Essa diferença nas velocidades gera o perfil de velocidade que define a taxa de deformação. E a tensão de cisalhamento é a razão da força aplicada a placa pela sua área.

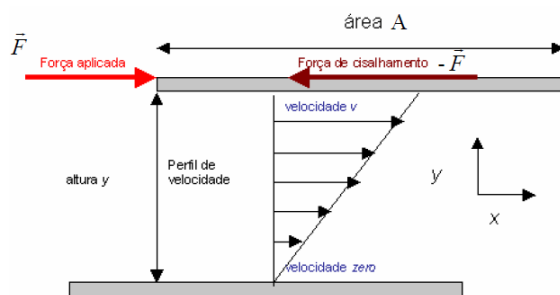


Figura 5.2 – Força de cisalhamento

(Fonte: [http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa\\_figu.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cisa_figu.htm)).

Fluidos que seguem esse perfil de escoamento, onde a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear, Equação 5.2, são classificados como fluidos Newtonianos. O comportamento newtoniano define que a viscosidade é



independente da tensão de deformação aplicada ao corpo em uma determinada temperatura e como exemplos temos: Gases, água, solução de sacarose e leite.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5.2)$$

Os fluidos que não apresentam a taxa de deformação diretamente proporcional à tensão de cisalhamento são classificados como fluidos não Newtonianos. Esses fluidos são subclassificados em: viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo (Figura 5.3).

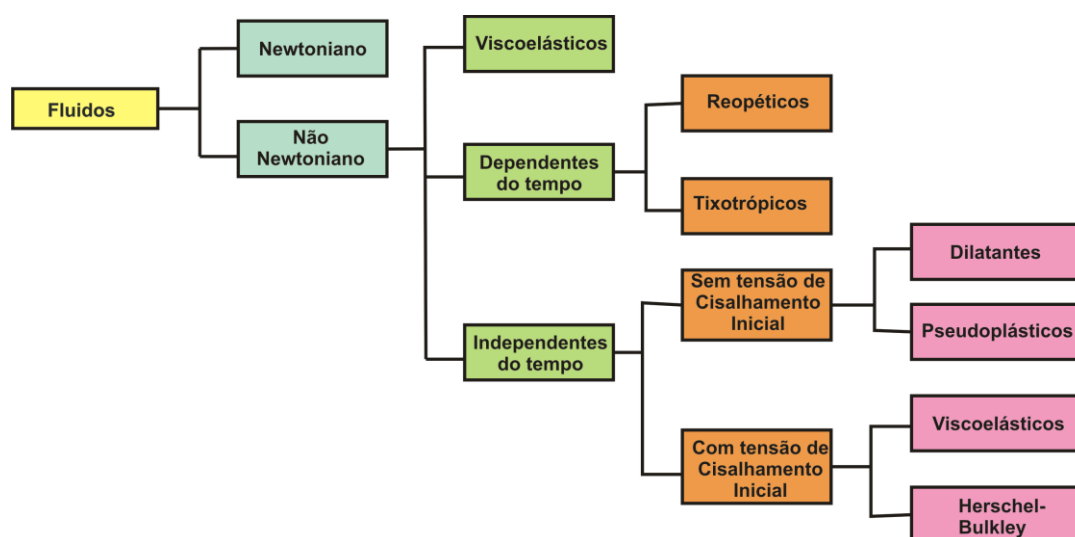


Figura 5.3 – Classificação dos fluidos

(Fonte: [http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cla\\_ssi.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cla_ssi.htm)).

Muitos materiais apresentam um comportamento intermediário entre características líquidas viscosas e sólidas elásticas. Esses materiais são classificados como viscoelásticos e tem como exemplificação a clara de ovo. Os fluidos dependentes do tempo apresentam uma histerese em seu gráfico, ou seja, a viscosidade varia com o tempo de aplicação da força até que atinja um equilíbrio (Figura 5.4).

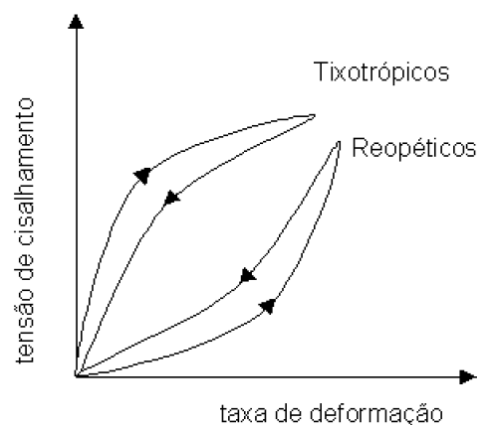


Figura 5.4 – Comportamentos reológicos de fluidos não newtonianos dependentes do tempo (Fonte: [http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva\\_depe.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva_depe.htm)).

Como fluidos dependentes do tempo há os fluidos tixotrópicos que apresentam uma diminuição da viscosidade com o tempo de aplicação da taxa de deformação, ou seja, são materiais com características em gel, mas que se tornam fluidos quando submetidos a uma agitação. Exemplos de fluidos tixotrópicos são suspensões concentradas, emulsões, petróleo cru, tintas, Ketchup. Em contrapartida os fluidos reopéticos (Figura 5.4) tornam se sólidos com a agitação, ou seja, a viscosidade aumenta com o tempo quando sujeitos a uma taxa constante de deformação. Esse tipo de comportamento não é comum aos materiais e um exemplo é a argila bentonita.

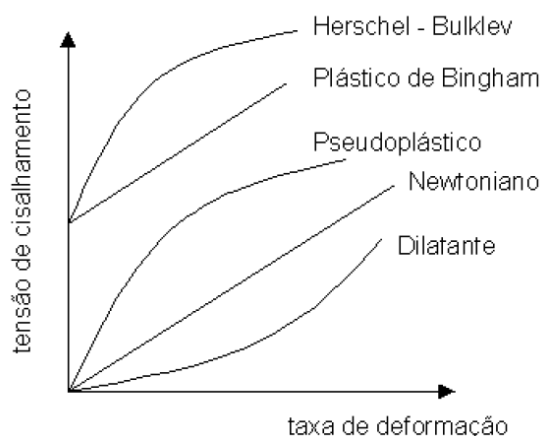


Figura 5.5 – Curvas de fluidos newtonianos e não newtonianos (Fonte: [http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva\\_inde.htm](http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva_inde.htm)).

Os fluidos não newtonianos subclassificados em independentes do tempo, os quais possuem sua viscosidade independente do tempo de aplicação da força, são divididos em fluidos que necessitam de uma tensão inicial para escoar e os que não necessitam. A Figura 5.5 mostra os comportamentos de fluidos newtonianos e não newtonianos independentes do tempo.

Entre os fluidos que não necessitam de uma tensão inicial para escoar tem-se os fluidos dilatantes que são fluidos que aumentam sua viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento. Exemplos desse comportamento são soluções de amido, soluções de milho e açúcar e soluções de areia. Entretanto, os fluidos pseudoplásticos possuem comportamento inverso aos dilatantes, quando aplicada uma força sobre as moléculas do fluido, elas se orientam na direção da força aplicada e consequentemente sua viscosidade diminui. Exemplos de fluidos pseudoplásticos são: Polpas de frutas, melão de cana e caldos de fermentação. Ambos os fluidos podem ser representados pelos modelos de Ostwald-de-Waele ou Power Law.

O fluido de Bingham inicia o escoamento somente quando o valor da tensão de cisalhamento ultrapassa o valor limite ( $\tau_0$ ). Após o escoamento, o fluido comporta-se como fluido newtoniano o qual possui a relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de deformação linear. Como exemplos têm-se a maionese e a margarina. Outro fluido que possui tensão inicial de cisalhamento é o fluido que se comporta de acordo com o modelo de Herschel- Bulkley, também considerado como um fluido de Bingham generalizado, porém não possui uma relação linear entre a tensão e taxa de cisalhamento. Essa relação é dependente do adimensional  $n$ , característico de cada fluido.

Há na literatura vários outros modelos que representam o comportamento de fluidos não descritos acima. Esses modelos permitem relacionar propriedades reológicas com grandezas como concentração, velocidade de rotação do eixo do impelidor e temperatura, que são fundamentais para o controle da produção, segurança dos equipamentos e dimensionamento dos mesmos. O reômetro é o equipamento utilizado para levantar a reologia de fluidos não newtonianos, pois este possui a capacidade de medir a tensão de cisalhamento com a variação da taxa de deformação. Os viscosímetros, capilar ou de Stokes, são utilizados para medir a viscosidade de fluidos newtonianos.

## 5.3 Reologia das suspensões de leite de cal

### 5.3.1 Método para reologia

Para determinarmos o comportamento reológico de suspensões de leite de cal utilizamos um reômetro Brookfield modelo LV-III ultra (Figura 5.6) com controle externo através do programa RHEOCALC32. Acompanham o equipamento diferentes formas de spindles: cilíndricos, cônicos e discos, escolhidos de acordo com as propriedades do fluido. Quanto mais viscoso for o fluido menor deve ser o diâmetro do spindle.

Para medir a tensão de cisalhamento de soluções em suspensões de leite de cal utilizaram-se dois spindles de forma cilíndrica nos modelos: LV-3C e LV-2C (Figura 5.6). A diferença entre ambos está no diâmetro, sendo o modelo LV-2C o que possui o maior diâmetro e por isso adequado a suspensões mais diluídas e/ou menos viscosas. Apenas para os testes 1 e 2 foi necessário utilizar o spindle LV-2C, nos demais testes o modelo LV-3C produziu uma leitura consistente.

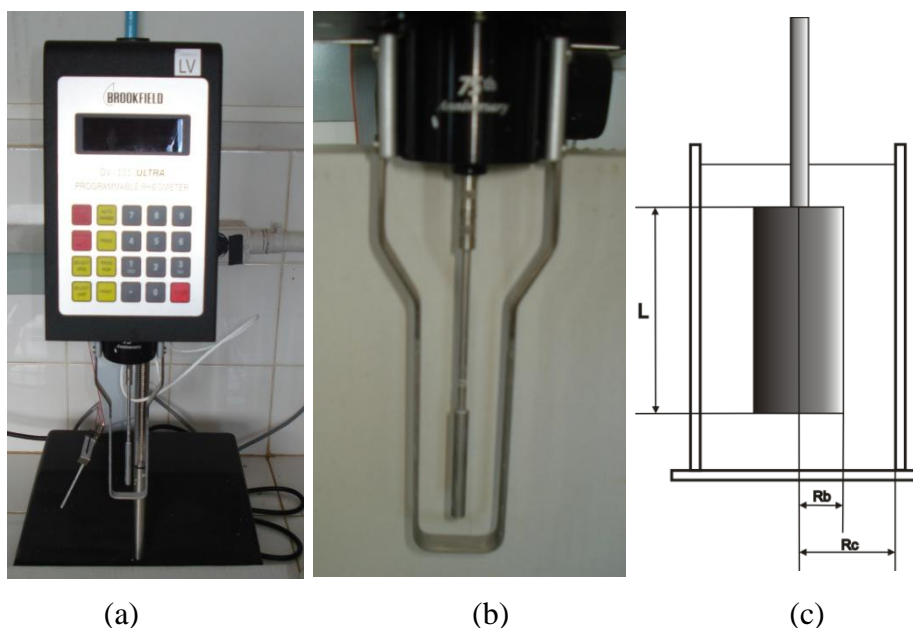


Figura 5.6 – (a) Brookfield LV-III ultra, (b) spindle LV-3C e (c) descrição do spindle cilíndrico.

O cálculo da tensão e da taxa de cisalhamento através de um spindle cilíndrico no equipamento Brookfield é feito através das equações 5.3 e 5.4 e esquematizado pela Figura 5.6c.

Taxa de deformação:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2(R_c^2 - R_b^2)} \quad (5.3)$$

Tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad (5.4)$$

Para o cálculo da viscosidade é utilizada a equação 5.1, definida anteriormente. As definições das variáveis das equações acima são:

$\omega$  : Velocidade angular do spindle [rad/sec]

$R_c$  : Raio do recipiente [cm]

$R_b$  : Raio do spindle [cm]

$x$  : Raio onde se inicia o cálculo da taxa de deformação [cm]

$M$  : Torque fornecido pelo equipamento [ dina.cm]

$L$  : Comprimento efetivo do spindle [cm]

No programa RHEOCALC fa-sez a leitura dos dados de tensão de cisalhamento, taxa de deformação, viscosidade e torque. Posteriormente, faz-se o ajuste da curva aos modelos de comportamento dispostos no programa. Os modelos utilizados como parâmetro foram:

*Modelo de Bingham*

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (5.5)$$

*Modelo de Herschel-Bulkley*

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (5.6)$$

*Modelo de Power Law*

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (5.7)$$

*Modelo de Casson*

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{(\eta \dot{\gamma})} \quad (5.8)$$

*Modelo NCA/CMA Casson*

$$(1 + \alpha)\sqrt{\tau} = 2\sqrt{\tau_0} + (1 + \alpha)\sqrt{\eta \dot{\gamma}} \quad (5.9)$$

*Modelo IPC Paste*

$$\mu = k_0 R^{n_0} \quad (5.10)$$

Definições:

$\tau$  : Tensão de cisalhamento [dina/cm<sup>2</sup>]

$\dot{\gamma}$  : Taxa de deformação [ 1/sec]

$\eta$  : Viscosidade Plástica[cP]

$\tau_0$  : Tensão inicial ou Yield stress [ dina/cm<sup>2</sup>]

$k$  : Índice de consistência [ cP]

$n$  : Índice de fluidez

$\alpha$  : Relação de aspecto

$R$  : Rotação do eixo [RPM]

$\mu$  : Viscosidade [cP]

$k_0$  : Multiplicador de consistência[cP]

$n_0$  : Fator de sensibilidade de cisalhamento

Os testes de reologia foram feitos em amostras de leite de cal produzidas a partir de cal calcítica calcinadas em forno rotativo da indústria Cal Cruzeiro. As variáveis: Razão de cal/água inicial e granulometria da cal adicionada sofreram variações conforme Tabela 5.1. Quando se adiciona cal com granulometria superior a 7 mm provoca a interrupção da agitação no reator de cinco litros projeto conforme descrição no capítulo

IV, por isso alguns testes foram feitos em um reator de cinquenta litros que será descrito posteriormente neste capítulo.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos testes.

<i>Testes</i>	<i>Granulometria (mm)</i>	<i>R<sub>C/A</sub> (g/L)</i>	<i>Reator (L)</i>	<i>Agitação (RPM)</i>
<b>1</b>	0 - 7	100	5	180
<b>2</b>	0 - 7	150	5	180
<b>3</b>	0 - 7	200	5	180
<b>4</b>	7 - 14	100	50	105
<b>5</b>	7 - 14	150	50	105
<b>6</b>	7 - 14	200	50	105

A frequência enviada ao motor pelo inversor de frequência foi de 40 Hz no reator de cinco litros e 60 Hz no reator de cinquenta litros. Porém, os motoredutores produzem uma redução efetiva desta frequência de 6,2 no reator de cinco litros e de 16 no reator de cinquenta litros. Isto produz uma velocidade de rotação no eixo do agitador de aproximadamente 180 RPM para o reator de menor volume e de 105 RPM para o outro reator.

### 5.3.2 Caracterização das amostras

Para caracterizar as soluções obtidas fez-se uma análise da concentração final de sólidos presentes por litro de água através da pesagem e secagem de amostras da suspensão de cal. Também como caracterização determinou-se a densidade relativa através de picnometria e determinação do resíduo através da norma ABNT NBR 6472: Cal – Determinação do resíduo de hidratação.

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos com desvio padrão dos valores das concentrações e das densidades. Observamos que a amostra cinco possui um desvio alto em relação a concentração final e este fato se explica pelo aumento da formação de resíduo e do diâmetro dos resíduos provenientes de cales “afogadas” e “requemadas”. E isto proporciona uma descontinuidade na amostragem durante a coleta para análise da concentração.

Tabela 5.2 – Caracterização das soluções de hidróxido de cálcio.

<i>Testes</i>	<i>Concentração final (g/L)</i>	<i>Densidade relativa (g/ml)</i>	<i>Resíduo (%)</i>
<i>1</i>	138,48 ± 1,72	1,0577 ± 0,002	4,59
<i>2</i>	190,76 ± 0,10	1,0943 ± 0,0002	4,01
<i>3</i>	267,71 ± 1,50	1,1304 ± 0,0004	5,94
<i>4</i>	130,70 ± 0,47	1,069 ± 0,0007	10,97
<i>5</i>	249,58 ± 42,46	1,0876 ± 0,0003	25,16

Quando ocorre um aumento efetivo da granulometria aumenta-se a ineficiência da agitação que não consegue manter os sólidos suspensos até a sua total hidratação em uma mesma velocidade de agitação. Então as partículas de cal “afogadas” se aglomeram ao fundo do reator onde o espaço para movimentação das partículas é limitada devido a presença do raspador. Essa aglomeração provoca o travamento do eixo do motor. E isto explica o erro no processo de fabricação da solução representada pelo teste 6.

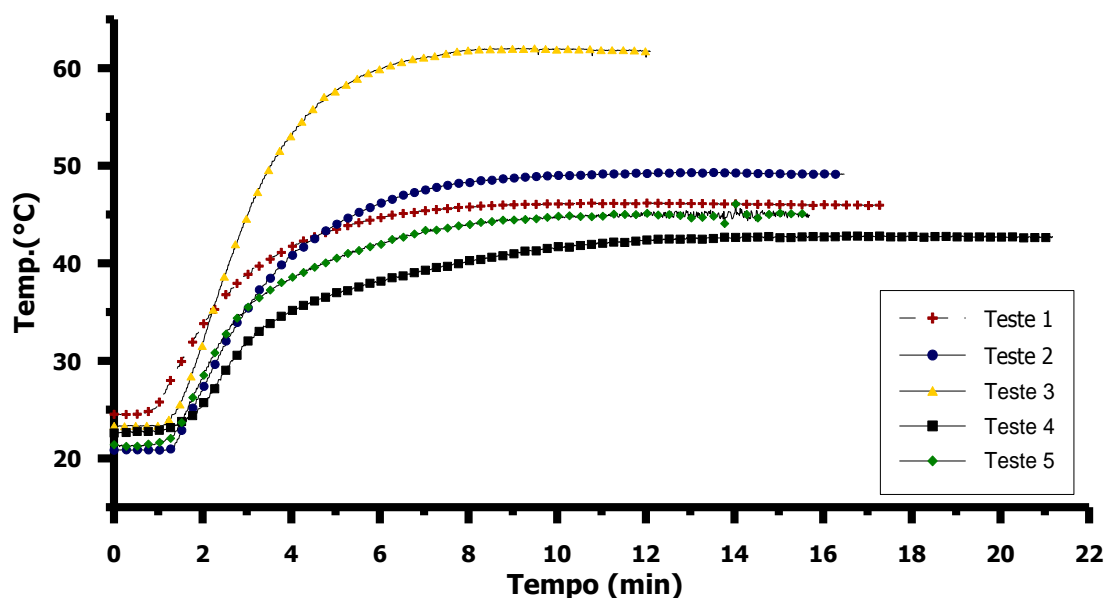


Figura 5.7 – Tempo de extinção de cales em diferentes granulometria e concentrações.

Como observado na Tabela 5.2 quando a granulometria da cal ultrapassa os 7 mm provoca uma série de problemas no processo, como: Aumento da formação de resíduos, aumento do diâmetro do resíduo e interrupção da agitação, tudo isso proporcionado por falhas na hidratação da cal causadas pelo seu “afogamento” e “requeima”. Por isso



ficou estipulado que a granulometria adequada para reatores com volume de até 50 litros e com a utilização de um agitador com raspador, está entre 0 a 7 mm com porcentagem de sólidos de 15%.

A curva de variação da temperatura durante a reação de hidratação de cal foi levantada para cada teste e pode ser observada na Figura 5.7. Quando se fixa a granulometria observa-se que a curva aumenta sua acentuação quando a concentração de cal aumenta atingindo uma temperatura final elevada e também diminuindo o tempo de reação. Porém o tempo de reação para a pior situação, teste quatro, não ultrapassa 12 minutos. Tempo este relativamente baixo quando comparado com os testes do capítulo 4 exposto na Figura 4.9 de aproximadamente 40 minutos e a razão para esta diferença está na qualidade ruim da cal utilizada naqueles testes.

### **5.3.3 Resultados de Reologia**

Uma curva característica no levantamento de reologia é a curva de tensão de cisalhamento por taxa de deformação. Esta curva nos mostra o comportamento do fluido com a variação da taxa de deformação e desta forma podemos classificá-los em Newtoniano ou não Newtoniano e subsequente de acordo com modelos de comportamentos disponíveis na literatura ou ajustar um novo modelo. Os dados de reologia das amostras dos testes feitos proporcionaram a curva do gráfico da Figura 5.8, onde todas as amostras se comportam como fluidos não Newtonianos independentes do tempo e provavelmente pseudoplásticos, pois todos os valores da tensão inicial estão próximos de zero. O comportamento da viscosidade com a variação da taxa de deformação para todas as amostras pode ser observado pelos gráficos individuais no apêndice A.

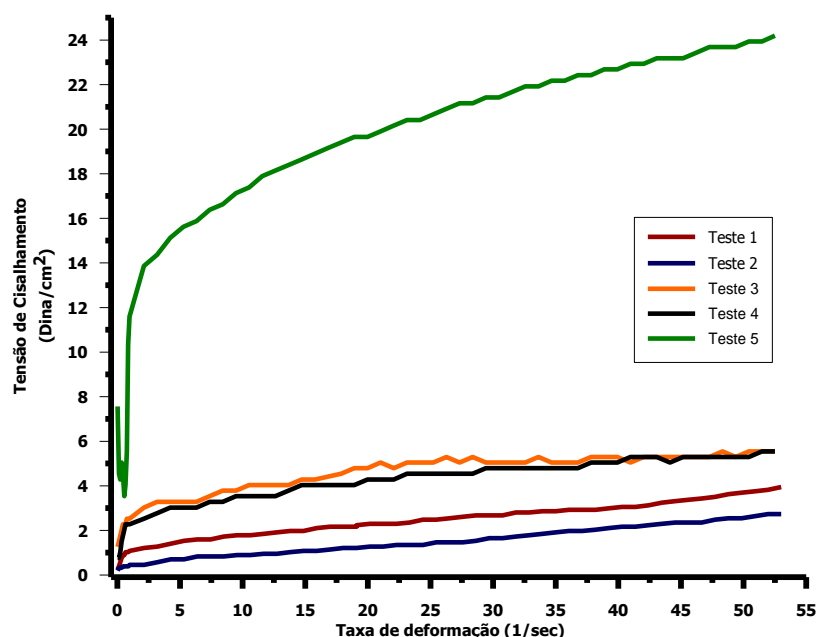


Figura 5.8 – Reologia das amostras.

De forma coerente ocorre o aumento da viscosidade quando se aumenta a concentração das suspensões de leite de cal. Porém, observando o gráfico constata-se que para uma mesma taxa de deformação o teste 1 possui uma tensão de cisalhamento maior que o teste 2, ou seja, a amostra do teste 1, menos concentrado, se apresenta mais viscosa do que a amostra do teste 2, mais concentrado. Este comportamento só foi observado entre essas duas amostras e provavelmente seja provocada pelo processo de liberação de calor da reação, a inclinação da curva de reatividade da cal, ou pela temperatura inicial da água de reação. A influência da inclinação da curva de reatividade da cal e da temperatura inicial da água de reação na reologia das suspensões de leite de cal ainda não foi estudada na literatura.

Alguns comportamentos no gráfico merecem destaque como a variação inicial da tensão de cisalhamento da amostra do teste 5 que provavelmente dificultará o ajuste aos modelos. E também merecem destaque os comportamentos das suspensões de leite de cal de mesma granulometria, pois através dos resultados comprova-se que quando ocorre um aumento da concentração nas suspensões a viscosidade das suspensões aumenta. O mesmo ocorre quando se compara suspensões de mesma concentração, a viscosidade aumenta com o aumento da granulometria.

Tabela 5.3 – Dados do modelo de Bingham.

<i>Testes</i>	<i>Viscosidade Plástica (<math>\eta</math>) (cP)</i>	<i>Tensão Inicial (<math>\tau_0</math>) (dina/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<b>1</b>	5,36	1,03	84,6
<b>2</b>	4,37	0,38	93,1
<b>3</b>	6,32	2,38	85,7
<b>4</b>	6,98	2,36	82,0
<b>5</b>	30,8	11,0	72,3

Com os dados da reologia das suspensões de leite de cal fizeram-se ajustes a modelos de comportamentos pré-estabelecidos pelo programa RHEOCALC. Os valores dos parâmetros do modelo de Bingham, definido pela Equação 5.5, podem ser visualizados na Tabela 5.3 para cada amostra de leite de cal juntamente com seus respectivos coeficientes de ajuste. Este é o parâmetro utilizado para avaliar o ajuste da curva aos modelos propostos e para o modelo de Bingham obteve-se bons ajustes.

Tabela 5.4 – Dados do modelo de *Herschel-Bulkley*.

<i>Testes</i>	<i>Índice de Consistência (k) (cP)</i>	<i>Tensão Inicial (<math>\tau_0</math>) (dina/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Índice de vazão (n)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<b>1</b>	26,9	0,64	0,61	98,1
<b>2</b>	4,68	0,37	0,98	99,3
<b>3</b>	254,2	-0,02	0,20	98,1
<b>4</b>	198,2	0,06	0,25	98,4
<b>5</b>	1410	-4,79	0,18	94,7

O modelo de Herschel-Bulkley é o modelo que define melhor o comportamento reológico das suspensões de leite de cal, pois os valores de seus coeficientes de ajustes se aproximaram de 100% como pode ser observado na Tabela 5.4. Os dados dos parâmetros do modelo definido pela Equação 5.6 estão dispostos na Tabela 5.4.

Tabela 5.5 – Dados do modelo de *Power Law*.

<i>Testes</i>	<i>Índice de Consistência (k) (cP)</i>	<i>Índice de vazão (n)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<i>1</i>	94,2	0,31	92,5
<i>2</i>	46,9	0,37	84,4
<i>3</i>	239,4	0,23	96,3
<i>4</i>	198,9	0,25	95,1
<i>5</i>	858,5	0,27	88,4

Embora o modelo Herschel-Bulkey seja o modelo que melhor se ajustou as curvas de reologia das amostras de leite de cal, outros modelos também podem ser usados para definir o comportamento dos fluidos em questão, pois obtiveram bons coeficientes de ajustes. O modelo de Power Law teve ajuste de todas as curvas dos testes acima de 80% como pode ser observado na Tabela 5.5 juntamente com os dados dos parâmetros do modelo definido pela Equação 5.7.

Tabela 5.6 – Dados do modelo de *Casson*.

<i>Testes</i>	<i>Viscosidade Plástica (<math>\eta</math>) (cP)</i>	<i>Tensão Inicial (<math>\tau_0</math>) (dina/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<i>1</i>	2,41	0,64	95,8
<i>2</i>	2,40	0,22	96,8
<i>3</i>	1,98	2,09	95,7
<i>4</i>	2,61	1,60	94,5
<i>5</i>	12,8	6,95	91,0

Tanto o modelo de Casson quanto o seu modelo modificado NCA/CMA Casson proporcionaram bons ajustes com coeficiente de ajuste superior a 90% conforme as Tabelas 5.6 e 5.7. Os parâmetros dos modelos definidos pelas Equações 5.8 e 5.9 também estão dispostos nas tabelas.

Tabela 5.7 – Dados do modelo *NCA/CMA Casson*.

<i>Testes</i>	<i>Viscosidade Plástica (<math>\eta</math>) (cP)</i>	<i>Tensão Inicial (<math>\tau_0</math>) (dina/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<i>1</i>	2,41	0,20	95,8
<i>2</i>	2,40	0,07	96,8
<i>3</i>	1,98	0,58	96,7
<i>4</i>	2,61	0,44	94,5
<i>5</i>	12,8	1,92	91,0

Para o ajuste feito com o modelo IPC Paste temos coeficientes de ajuste acima de 80% em todas as amostras não se diferenciando dos demais. Porém quando se observa o gráfico de ajuste produzido pelo programa RHEOCALC e disposto no apêndice A, nota-se que o modelo é tão adequado quanto o modelo Herschel-Bulkey. A Tabela 5.8 mostra apenas os valores do parâmetro  $n_0$  e os valores da viscosidade do fluido para uma velocidade de rotação de 10 RPM. Para determinarmos o parâmetro multiplicador de consistência ( $k_0$ ) é necessário uma regressão dos dados de viscosidade com velocidade de rotação. E quando isso é feito determinamos que o parâmetro  $n_0$  encontrado é o valor  $n_0$  da tabela negativo.

Tabela 5.8 – Dados do modelo *IPC Paste*.

<i>Testes</i>	<i>Viscosidade em 10 RMP (cP)</i>	<i>Sensibilidade de Cisalhamento (<math>n_0</math>)</i>	<i>Coefficiente de ajuste</i>
<i>1</i>	56,3	0,69	92,5
<i>2</i>	29,2	0,63	84,4
<i>3</i>	139,3	0,80	96,7
<i>4</i>	114,4	0,75	95,1
<i>5</i>	499,4	0,73	88,4

### 5.3 Sistema de hidratação: Reator

Um reator é um tanque de mistura utilizado para introduzir a agitação dos componentes presentes de forma que estes se relacionem de forma eficiente proporcionando assim, em caso reacional rendimento elevado e em caso de fluidos heterogêneos suspensões homogêneas. Os fatores de projeto que afetam a qualidade da agitação são: forma do reator, defletores, posição do agitador e tipo de agitador. Porém todos esses fatores estão diretamente ligados as características do fluido, como: densidade, viscosidade, miscibilidade, forma do sólido e aderência. Então para cada tipo de fluido há um tanque de mistura com características adequadas.

Os formatos mais comuns de tanque de mistura são reatores cilíndricos verticais com fundo esférico, com fundo reto e cantos abaulados ou com fundo cônico, conforme figura 5.9. O reator com fundo esférico tem a menor perda de carga, pois a potência necessária para levantar todas as partículas do fundo é menor e a formação de zonas mortas também é menor. O reator de fundo cônico é utilizado em processos com descarga na parte inferior para manutenção ou como saída de material. Geralmente são os sistemas sólido-líquidos que mais necessitam de manutenção devido ao acúmulo de material ao fundo.

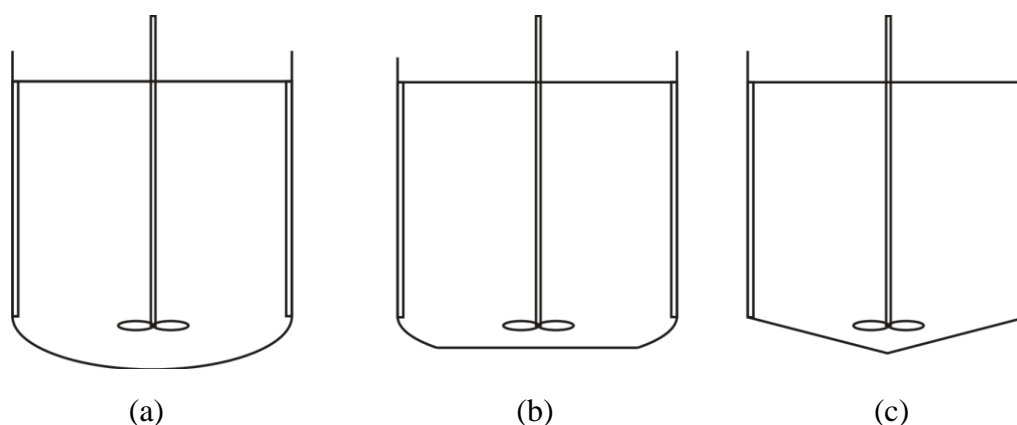


Figura 5.9 – (a) Reator com fundo esférico, (b) reator com fundo reto e cantos abaulados e (c) reator com fundo cônico.

Os defletores, ou também chamados de chicanas ou dificultores, são usados para introduzir turbulência ao fluido interceptando o fluxo tangencial do fluido promovido pela ação da força centrífuga em fluidos de baixa viscosidade. De acordo com

JOAQUIM et al (2007), as chicanas minimizam a “rotação sólida” do fluido (considera-se que o fluido se movimenta como um sólido) e a entrada de ar na superfície. Esse fluxo tangencial é denominado vórtice e é considerado prejudicial ao processo de mistura por proporcionar a classificação, estratificação e separação do sistema em várias fases. Nos vórtices, os componentes presentes no fluido tendem a permanecer nas linhas de correntes tangenciais em movimento contínuo e com isso diminui-se o contato entre as partículas e conseqüentemente diminui-se a conversão da reação (Figura 5.10).

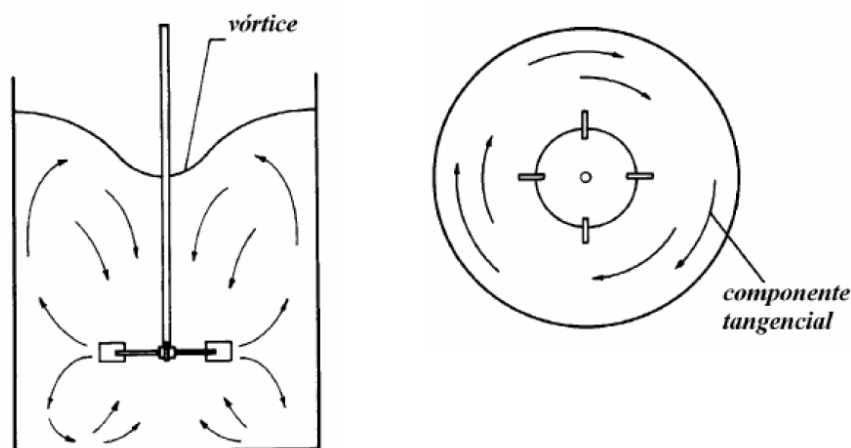


Figura 5.10 – Vórtices em reator sem chicana.

Há algumas maneiras para que não ocorra a formação desses vórtices como descentralizar a agitação, inclinar a agitação em quinze graus, colocar o agitador na horizontal ou incluir defletores. Quando há mistura de fluidos com baixa viscosidade deve-se posicionar o agitador próximo a parede do reator, para fluidos com viscosidade moderada e suspensões é posicionado afastado da parede e para fluidos com alta viscosidade, inclinado. Geralmente quando se utiliza defletores na eliminação dos vórtices, são utilizadas quatro chicanas afastadas de  $90^\circ$ , com largura entre  $1/10$  e  $1/12$  do diâmetro do reator e afastadas de  $1/2$  da sua largura, com o objetivo também de evitar acúmulo de sólidos. A Figura 5.11 mostra o fluxo do fluido em um reator com defletor.

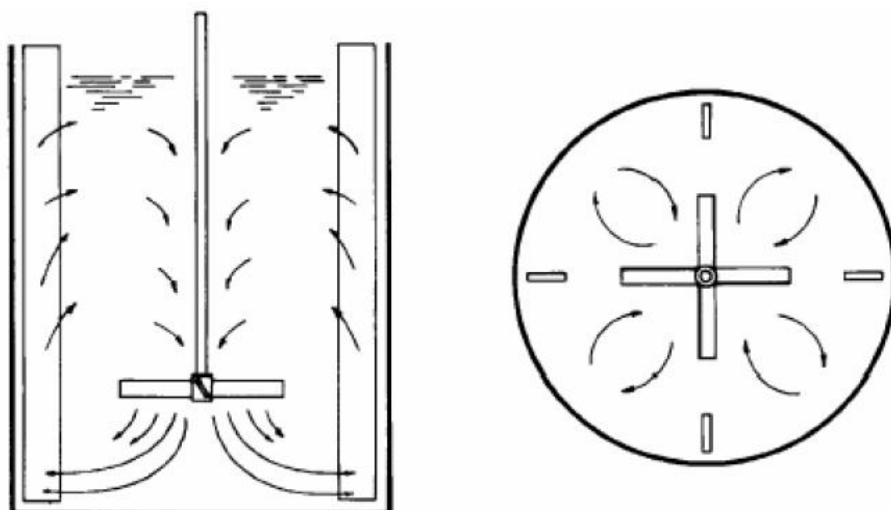


Figura 5.11 – Linhas de fluxo em um reator com defletor.

As dimensões características principais de um tanque de mistura, Figura 5.12, são: Diâmetro do impelidor ( $D$ ), diâmetro do tanque ( $T$ ), altura do líquido ( $Z$ ), largura da chicana ( $B$ ), largura do impelidor ( $w$ ) e distância entre o impelidor e o fundo do reator denominado “clearance” ( $C$ ). As relações entre essas dimensões variam conforme a característica da agitação e a sua melhor eficiência é dependente de cada sistema. Entretanto há um padrão normalmente utilizado e estudado:  $D/T$  variando entre  $1/4$  e  $1/2$ ,  $Z/T$  igual a um,  $C/T$  variando de  $1/6$  a  $1/2$  sendo mais comum  $1/3$ ,  $B/T$  variando entre  $1/10$  a  $1/12$  e  $w/D$  entre  $1/4$  e  $1/6$ .

Embora um tanque de mistura tenha suas relações geométricas específicas para cada tipo de mistura, o sistema formado por suspensões de leite de cal exige características diferenciadas do padrão porque a suspensão possui uma grande variação no comportamento reológico e no comportamento do fluxo, conseqüentemente na potencia consumida e na velocidade de rotação mínima, quando a sua concentração é aumentada significativamente e quando a qualidade da cal é melhor. A velocidade de rotação mínima é a mínima velocidade necessária para manter em suspensão todas as partículas presente e é um dos parâmetros utilizado no projeto de um sistema de mistura.



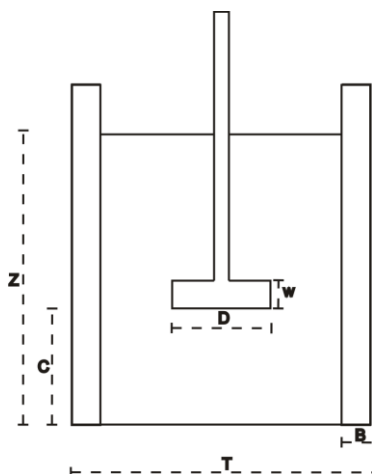


Figura 5.12 – Dimensões características de tanque de mistura.

O reator dimensionado para unidade piloto possui o fundo cônico com ângulo de  $5^\circ$  com a horizontal e com válvula de descarga de 2 polegadas para manutenção. O reator possui um volume útil de 50 litros (Figura 5.13), com altura de 480 mm e diâmetro de 400 mm, quatro chicanas com 50 mm de largura e espaçadas 10 mm da parede do reator para evitar acúmulo de material.

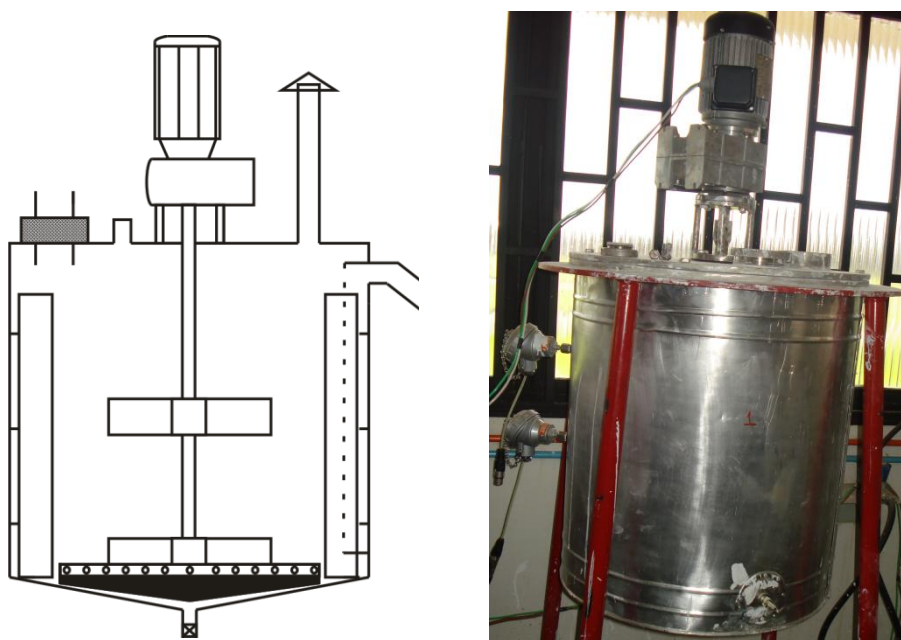


Figura 5.13 – Reator piloto de 50 litros.

A entrada de cal é separada da entrada de água. Há uma chaminé para saída de vapor formado pela liberação de calor da reação. A saída de leite de cal para o sistema de

peneiramento é feita através de um sifão na lateral posterior a alimentação a fim de evitar a saída de material não hidratado. Envolvendo o reator há um sistema de aquecimento, camisa de troca térmica com 40 mm de espessura, e na parte de fora do reator há um isolamento com lã de vidro de 40 mm de espessura.

A agitação é garantida por um motoredutor helicoidal modelo MC50 com capacidade de rotação na entrada de 1680 rpm e fator de redução efetiva de 16. O motor tem potência de 1/3 CV, modelo B14 com fixação na base, carcaça 63 – C90-4, conforme Figura 5.13. O controle da agitação é feita por um inversor de frequência CFW10 com 0,25 CV de potência. O agitador é composto por duas turbinas modificadas de Rushton que posteriormente será descrito.

A variação da temperatura é acompanhada através de dois termoresistores posicionados entre as duas turbinas de forma a medir variações de temperatura promovida pelo volume do reator. Os termoresistores são em aço inox, modelo RCCB, com sensor PT-100 tipo 1 com comprimento de 100 mm, o qual mede variação de temperatura entre -50 e 200 °C e possui diâmetro de ¼ polegadas. Os dados de temperatura são transmitidos e indicados por um transmissor/indicador de temperatura com display digital conforme Figura 5.14. O sinal de corrente emitido pelo transmissor é adquirido por uma placa de aquisição de dados que o transforma em sinal de temperatura através do programa Labview previamente calibrado.

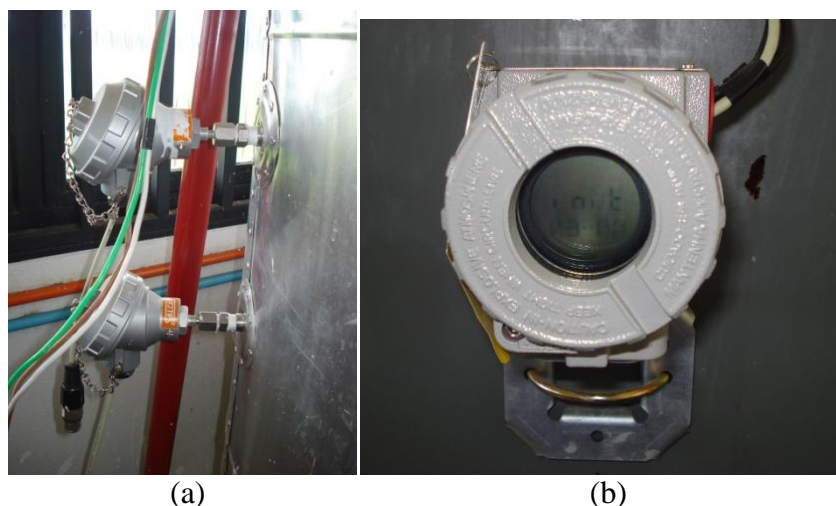


Figura 5.14 – (a) Termoresistores e (b) transmissor/indicador digital.

### 5.4 Sistema de hidratação: Agitador

O agitador mais adequado a um sistema dependerá do tipo de mistura desejada, da capacidade e do formato do tanque e das propriedades do fluido, principalmente a viscosidade. Os impelidores são classificados de acordo com o tipo de fluxo a que o fluido é submetido: laminar ou turbulento. Porém, o processo de mistura em fluxo turbulento é o mais importante, pois é onde ocorre a transferência de massa e de energia.

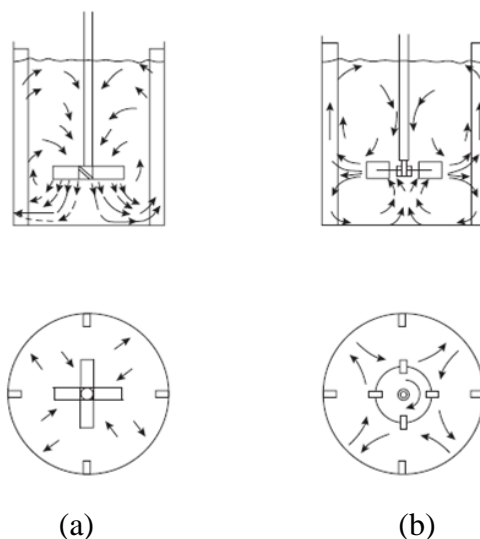


Figura 5.15 – (a) Fluxo axial e (b) fluxo radial.

Os agitadores utilizados nesse tipo de processo são subclassificados de acordo com o fluxo de saída do rotor formado dentro do tanque: axial ou radial. Os agitadores de fluxo axial geram uma componente de velocidade paralela ao eixo do impelidor e produzem um fluxo padrão em único estágio em todo o volume do reator. Os agitadores de fluxo radial geram componentes de velocidade no sentido radial e produzem uma circulação em dois estágios, uma acima do impelidor e outra abaixo (Figura 5.15).

Cada tipo de fluxo é mais eficiente em determinados processos, o axial em mistura de líquidos miscíveis e o radial em dispersões de gases. Porém o fluxo de certo impelidor pode ser alterado de acordo com as características geométricas, como diâmetro do impelidor e distância “clearance”, as características reológicas do sistema como viscosidade e também pelo uso de duas turbinas.

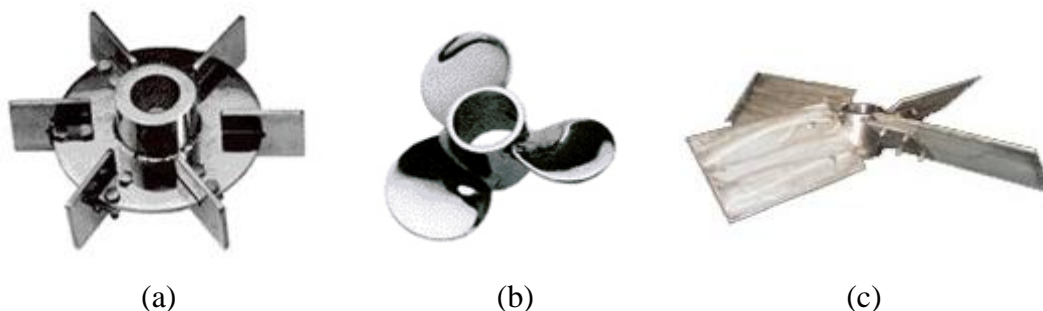


Figura 5.16 – Impelidores tipo: (a) Turbina de disco (Rushton), (b) hélice naval e (c) pás inclinadas.

Os agitadores tipo turbina de disco (Rushton) produzem fluxo radial e são adequados a sistemas controlados por mistura turbulenta (processos com controle de cisalhamento). Os agitadores tipo turbina de pás fixas inclinadas de  $45^\circ$  (PBT) e tipo hélice naval produzem fluxo axial e são adequados a sistemas líquidos com sólidos presentes (Figura 5.16).

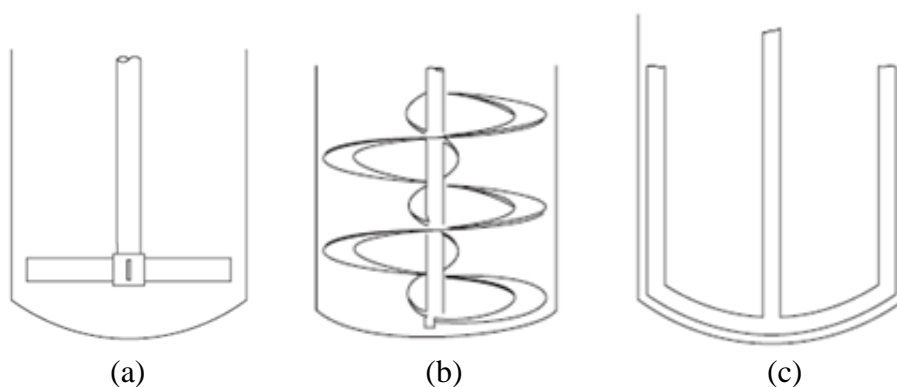


Figura 5.17 – Impelidores fluxo laminar tipo (a) pás retas, (b) helicoidal e (c) âncora.

Os agitadores típicos utilizados em escoamentos laminares são tipo pás retas, helicoidal e âncora, este produz um componente de velocidade tangencial forte e um axial fraco, atuando em sua maioria como raspadores (Figura 5.17). Esses impelidores são utilizados em mistura de líquidos ou pastas com alta viscosidade como, condicionadores de cabelo. A Figura 5.18 pode ser usada para determinar o tipo de impelidor adequado a um sistema de acordo com a viscosidade necessária e o volume do reator.

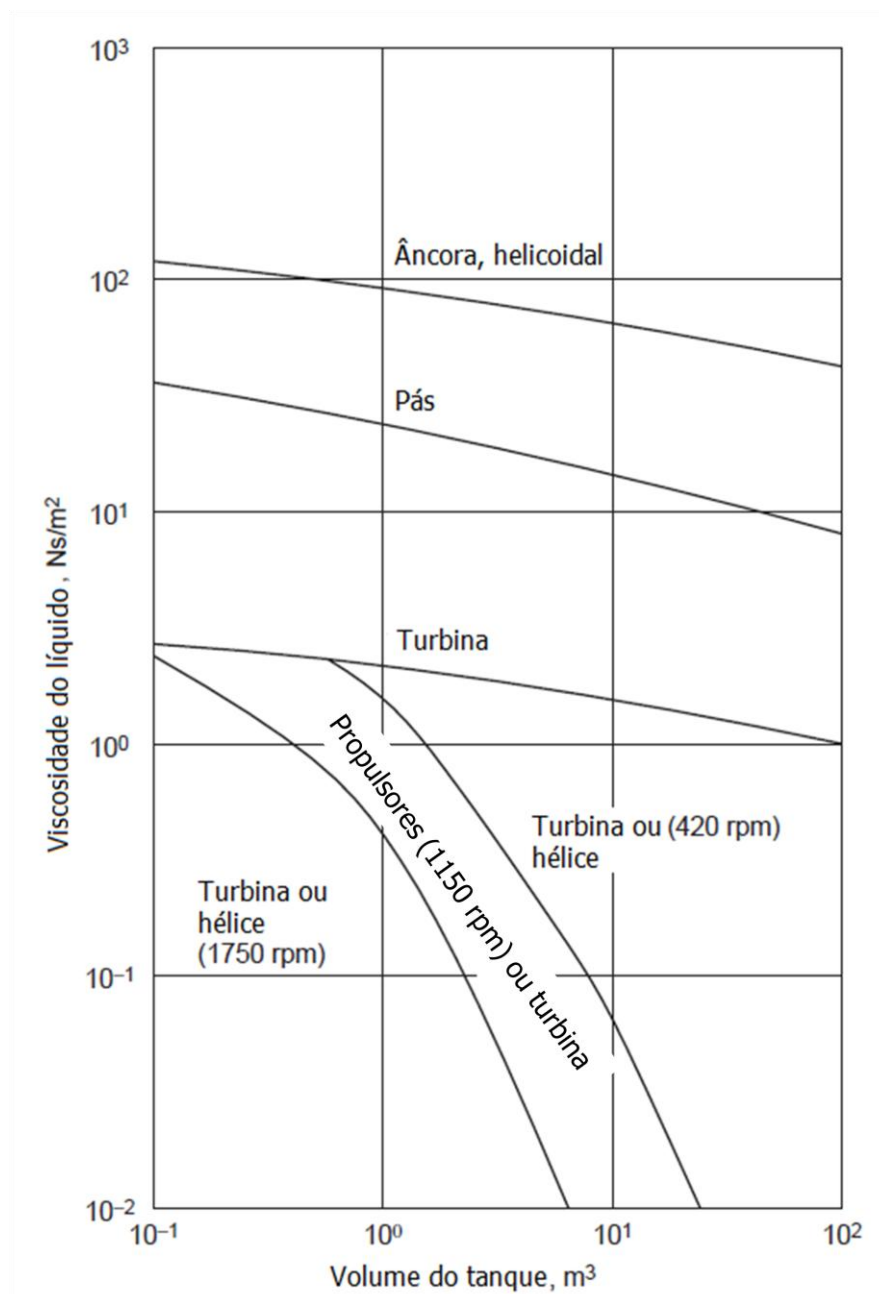


Figura 5.18 – Guia de seleção de agitadores (TOWLLER, 2008).

Embora haja na literatura um guia para seleção do agitador mais eficiente em determinados sistemas, o processo de hidratação da cal torna mais complexa a escolha adequada do agitador. Em ambos os casos, utilização de turbina ou propulsores, ocorre o acúmulo de material nas laterais e ao fundo do reator, fato este comprovado em laboratório. A característica aglomerante da cal ao se hidratar forma esta pasta de difícil dispersão. Isto provoca a formação de partículas de leite de cal sinterizadas, ou seja, com pouca área superficial, e também o aumento de resíduos devido a não hidratação das partículas de cal revestidas pelo leite de cal em pasta. Este tipo de hidratação é

ineficiente e indesejável para a formação de leite de cal com alta área superficial e baixa formação de resíduo requerido em processo com alta qualidade do produto.

Devido aos fatos, acoplaram-se ao eixo do agitador (Figura 5.19) duas turbinas de disco modificadas para aumentar o grau de turbulência e impedir que a cal, neste caso com granulometria superior a micropulverizada, direcionasse as zonas mortas sem se hidratar. Na turbina ao fundo do reator acoplou-se um raspador de borracha para impedir a estagnação das partículas e impedir que a agitação interrompa-se durante a hidratação.

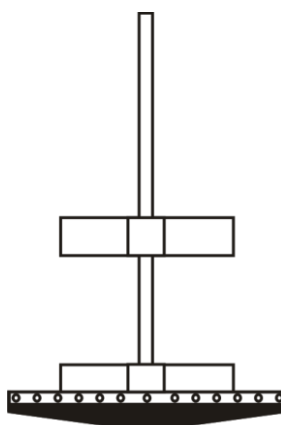


Figura 5.19 – Esquema do agitador projetado para unidade piloto.

O esforço consiste em impedir que partículas de cal com granulometria superior a micropulverizada não se hidratem e permaneçam no reator em zonas de estagnação que conseqüentemente provocam a interrupção da rotação do agitador e a ineficiência da reação, ou permaneçam no reator em linhas de fluidização como sólidos inertes causando danos a estrutura do sistema ou até mesmo o travamento do eixo do motor. A escolha da borracha como raspador também foi testada em laboratório, pois a utilização de um material menos flexível (Figura 5.20) provocou os problemas citados acima. Com a borracha o sistema de raspagem torna-se mais suave e mais eficiente.



Figura 5.20 – Agitador com dois impelidores e raspador de metal.

De acordo com os trabalhos de RUTHERFORD *et al* (1996) e MICALÉ *et al* (1999) citados por CAVADAS (1999), quando um impelidor tipo turbina está próximo ao fundo do reator este produz padrões de fluxos que se alternam entre radial e axial dependendo da faixa de escoamento em que o sistema está presente. Quando um impelidor está próximo da parede ou de outra turbina ocorre interferência provocando instabilidade no fluxo do sistema. Esta descrição de comportamento se aplica ao impelidor projetado para unidade piloto possuindo esta alternância nos fluxos radiais e axiais.

## 5.5 Sistema de hidratação: Potência Consumida pelo Motor

A obtenção da curva de potência em função do número de Reynolds obtida em laboratório é bastante utilizada para estimativa da potência em escala industrial. E há na literatura várias curvas de potência para determinadas geometrias do tanque e para determinados agitadores, porém é importante ressaltar que essas curvas são levantadas para fluidos Newtonianos e componentes sólidos inertes, sem meio reacional. Para se obter a curva precisa para determinada geometria do reator e agitador deve-se levantá-la com o fluido desejado.

Os números adimensionais: Número de potência ( $N_{PO}$ ) e número de Reynolds ( $Re$ ) são as variáveis de projeto mais importantes no estudo característico de determinado sistema de agitação, sempre considerando no estudo dessas variáveis a velocidade de rotação do impelidor ( $N$ ) e as propriedades do fluido: viscosidade ( $\mu$ ), densidade ( $\rho$ ) e tensão superficial ( $\sigma$ ). O número de Reynolds para sistema com agitação é definido de acordo com a equação 5.11, onde o comprimento característico é o diâmetro do impelidor ( $D$ ).

$$Re = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \quad (5.11)$$

O número de potência para fluidos em escoamento turbulento é descrito conforme a equação 5.12, onde o primeiro grupo adimensional é o número de Reynolds, o segundo grupo número de Froude e os demais são relações geométricas do tanque. O número de Froude é um adimensional utilizado em processos de mistura como uma variável de projeto que expressa a influencia dos efeitos da superfície, formação de vórtices, no cálculo da potência. Devido a isso, em processos com chicanas ele é considerado igual a um, pois nestes casos não há formação de vórtices.

$$N_{PO} = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = K \left( \frac{\rho N D^2}{\mu} \right)^a \left( \frac{N^2 D}{g} \right)^b \left( \frac{T}{D} \right)^c \left( \frac{C}{D} \right)^d \left( \frac{Z}{D} \right)^e \dots \quad (5.12)$$

A constante  $K$  é função do tipo e formato do agitador, sendo dependente também do tipo de escoamento do fluido. Já as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , etc. são valores determinados experimentalmente e também são dependentes do sistema. Quando o estudo da potência consumida pela rotação do agitador é feita em processos onde não ocorre mudança na



geometria do tanque e na posição do agitador, desconsideram-se os adimensionais de forma. E nestes casos o número de potência se resume a equação 5.13.

$$N_{PO} = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = K(Re)^a \quad (5.13)$$

Em processos turbulentos com Re muito elevado o número de potência é igual à constante K, totalmente independente do Reynolds, e alguns autores o nomeiam  $K_T$ . Esta constante quando em regime laminar de escoamento onde as forças viscosas predominam no sistema de agitação é chamada de  $K_L$ . A tabela 5.9 mostra alguns valores das constantes para determinados impulsores.

Tabela 5.9 - Valores para as constantes  $K_L$  e  $K_P$  (MC CABE, 2003).

<b>Tipo de Impulsor</b>	<b><math>K_L</math></b>	<b><math>K_T</math></b>
Hélice (passo 1e 3 lâminas)	41	0,32
Hélice (passo 1,5 e 3 lâminas)	48	0,87
Turbina de disco (6 lâminas planas, W/D = 0,2)	65	5,75
Turbina (6 lâminas curvas 45°, W/D = 0,2)	-	1,63
Turbina (4 lâminas curvas 45°, W/D = 0,2)	44,5	1,27
Pás planas (2 lâminas, W/D = 0,2)	36,5	1,70
Helicoidal	52	-
Âncora	300	0,35

Os valores da constante de proporcionalidade entre o número de Reynolds e o número de potência são determinados em fluidos Newtonianos e posteriormente no mesmo equipamento determina-se a relação entre Re e  $N_{PO}$  para fluidos não-Newtonianos.

A expressão para o número de potência é dependente do diâmetro do impelidor, valor fixo neste trabalho, velocidade de rotação do eixo, densidade do fluido e potência requerida pelo impelidor. Esta é determinada através da sua relação com o torque requerido para girar o eixo do impelidor ( $T_q$ ) e também pela sua velocidade de rotação, conforme a Equação 5.14.

$$P = 2\pi N T_q \quad (5.14)$$

O valor do torque é determinado por um sistema de aquisição de dados. Neste trabalho o sensor de torque dinâmico utilizado é do modelo MKDQ com capacidade de leitura de 10 N.m, acoplado ao eixo do motor. Um indicador digital modelo MMK-2030 controla e indica o valor de leitura do torque. Também retransmite o sinal para uma placa de aquisição de dados conectada ao software Labview que armazena a variação do torque em tempo real.

Ao combinar as equações 5.13 e 5.14, a expressão número de potência pode ser reescrita conforme a Equação 5.15, onde se torna dependente das variáveis torque [N.m] e velocidade de rotação [RPM] determinados através do torquímetro e do inversor de frequência, respectivamente.

$$N_{PO} = \frac{2\pi T_q}{\rho N^2 D^5} \quad (5.15)$$

Embora para cada tipo de impelidor deva-se levantar a curva de potência ( $N_{PO}$ ) versus número de Reynolds (Re) e determinar através dela a potência consumida pelo eixo do agitador em um determinado sistema e somente então escolher o motor com as especificações desejadas, fez-se inicialmente para o projeto piloto a análise para os impelidores padrões: turbina de disco, turbina de pás e hélice, pois se acreditou que quaisquer destes impelidores seriam adequados ao sistema.

Então, inicialmente determinou-se a potência do motor através de gráficos da literatura de número de potência versus número de Reynolds. O gráfico da Figura 5.21 foi plotado através da leitura de outros gráficos da literatura, apresentados por MC CABE (2003) e por PAUL *et al* (2004), para fluidos Newtonianos e separados para cada tipo de impelidor.

Porém, posteriormente e já mencionado nos capítulos anteriores, verificou-se a inadequação do impelidor tipo turbina ao sistema de leite de cal e adicionou ao estudo o levantamento da curva de número de potência versus número de Reynolds para o impelidor com raspador projetado através do torquímetro especificado acima. Embora o torquímetro tenha sido incluso no projeto piloto, essa análise será feita em trabalhos posteriores a este. Neste, apenas a base de cálculo será descrita e o cálculo da potência consumida nos impelidores padrões mencionado.

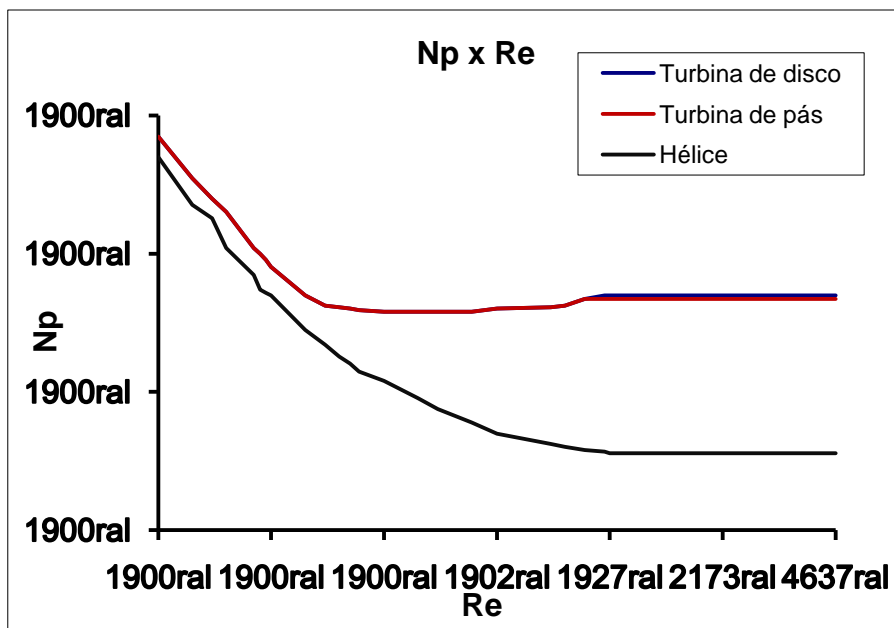


Figura 5.21 – Gráfico de  $N_p$  versus  $Re$  para impelidores padrões em fluidos Newtonianos.

Para determinarmos a potência consumida é necessário a escolha da equação que representa reologicamente o sistema de agitação de leite de cal, e neste caso será considerado a pior situação de hidratação, o teste 5 com densidade de 1,0876 g/ml. O diâmetro do impelidor tipo turbina projetado e descrito no item anterior é de 22 cm e este valor será considerado para o cálculo do número de Reynolds dos impelidores.

Para fluidos não Newtonianos, como é o caso de suspensões de leite de cal, a viscosidade varia de acordo com a variação da rotação e para representar essa variação será considerado os parâmetros do modelo de IPC Paste determinados para o teste 5. Através desses dados fez-se uma regressão e determinou-se que para o teste 5 o valor do parâmetro multiplicador de consistência ( $k_0$ ) é de 2683,83 cP e o parâmetro  $n_0$  é de -0,73. Com essa correlação e os dados de densidade da suspensão e do diâmetro do impelidor, a fórmula de Reynolds torna-se dependente apenas da velocidade de rotação do impelidor em RPM (Equação 5.16).

$$Re = 0,32689 N^{1,73} \quad (5.16)$$

Entretanto, com os mesmos dados, densidade da suspensão e diâmetro do impelidor, a equação do número de potência torna-se dependente da velocidade de rotação do impelidor em RPM e também da potência consumida por este em HP, conforme a Equação 5.17. Através das duas equações, 5.16 e 5.17, e do gráfico da Figura 5.21, fez-

se um gráfico com os valores da potência consumida com a variação da velocidade de rotação do eixo do impelidor em RPM para cada tipo de impelidor (Figura 5.22).

$$N_{PO} = \frac{2,87 \cdot 10^8 P}{N^3} \quad (5.17)$$

Para cada tipo de impelidor há uma velocidade de rotação adequada para manter todas as partículas em suspensão e promover uma mistura eficiente. O impelidor tipo hélice não produz uma mistura eficiente quando utilizado no processo de hidratação, mesmo aumentando consideravelmente a sua rotação. Já o impelidor tipo pás que neste caso são de pás planas é utilizado em processos de mistura com escoamento laminar que não são adequados a sistemas com sólidos suspensos, pois estes necessitam de turbulência para aumentar a eficiência da mistura. Desta forma descartaram-se os outros impelidores e optou-se pelo impelidor tipo turbina de disco. Com esse impelidor a velocidade de rotação mais adequada é de aproximadamente 105 RPM, essa é a velocidade em que os testes foram feitos, e com essa rotação determina-se um potência de consumo do eixo de aproximadamente 0,015 HP, conforme Figura 5.22.

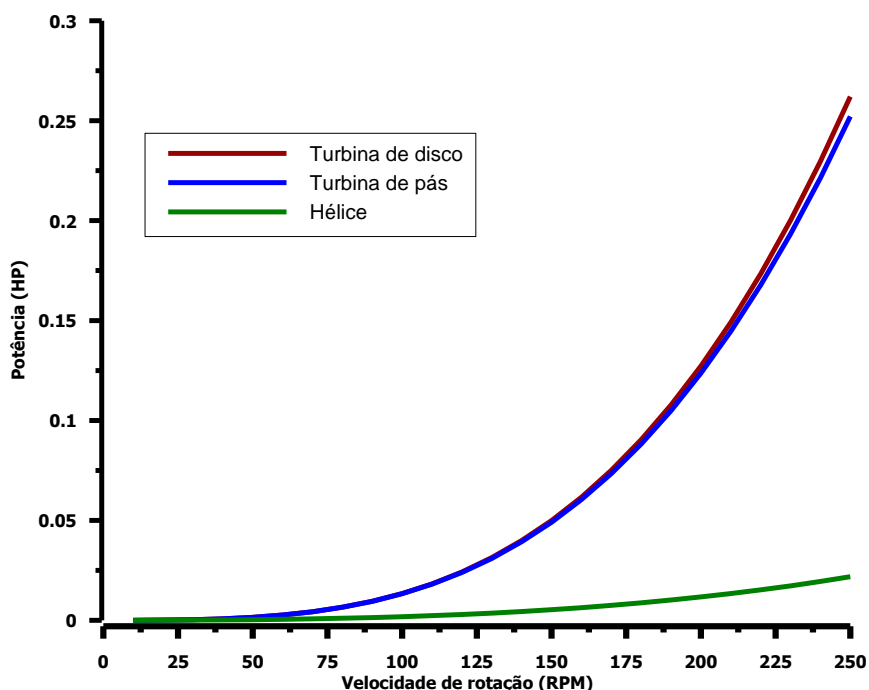


Figura 5.22 – Potência consumida do impelidor para o sistema leite de cal.

O valor encontrado para o consumo da potência do impelidor é tão baixo porque as dimensões do equipamento piloto são pequenas, com isso a velocidade de rotação

necessária para suspender todas as partículas das suspensões de leite de cal é baixa não sendo necessária muita potência.

Tabela 5.10 – Rendimento de motor elétrico em função da potência consumida.

HP	0,5	0,75	1	1,5	2	3	5	10	20	30	50	> 100
$\eta_M$	0,64	0,67	0,72	0,73	0,75	0,77	0,81	0,84	0,86	0,87	0,88	0,90

O rendimento do motor depende da potência consumida e varia de acordo com a Tabela 5.10. Com isso será considerado um rendimento do motor de aproximadamente 64% e devido a isso a potência necessária ao motor é de 0,023 HP. E considerando a folga recomendada para o motor de 50% pela norma ABNT NBR 15623 disposta pela Tabela 5.11, o motor deve ter uma potência mínima de 0,0468 HP.

Tabela 5.11 – Folga recomendada para os motores.

Bomba	Até 2 HP	2 a 5 HP	6 a 10 HP	11 a 20 HP	> 21 HP
Acréscimo	50%	30%	20%	15%	10%

Embora a potência do motor calculada seja menor que 0,05 HP, os valores de potências usuais no Brasil, determinados pela norma ABNT NBR 15623 e dispostos pela Tabela 5.12, possui a menor potência do motor de ¼ HP. Então o motor adequado para o sistema estudado deve ser de ¼ HP, mas a menor potência do motor disponível pelo fabricante no momento da compra do motor para a unidade piloto era de 1/3 de HP tornando o motor sobre dimensionado.

Tabela 5.12 - Potências usuais de motores elétricos fabricados no Brasil (HP).

¼, 1/3, ½, ¾, 1, 1 ½, 2, 3, 5, 6, 7 ½, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 125, 150, 200 e 250
---

O grande problema gerado pelo sobre dimensionamento do motor de acordo com GARCIA (2003) é que quando se utiliza um motor com carregamento inferior a 50%, Figura 5.23, o seu rendimento cai drasticamente o que indica um motor totalmente ineficiente. A faixa ideal de operação está acima de 75%. Porém, este é o único inconveniente ao se utilizar um motor sobre dimensionado, pois ao contrário ele terá uma vida útil maior e estará menos sujeito a defeitos.

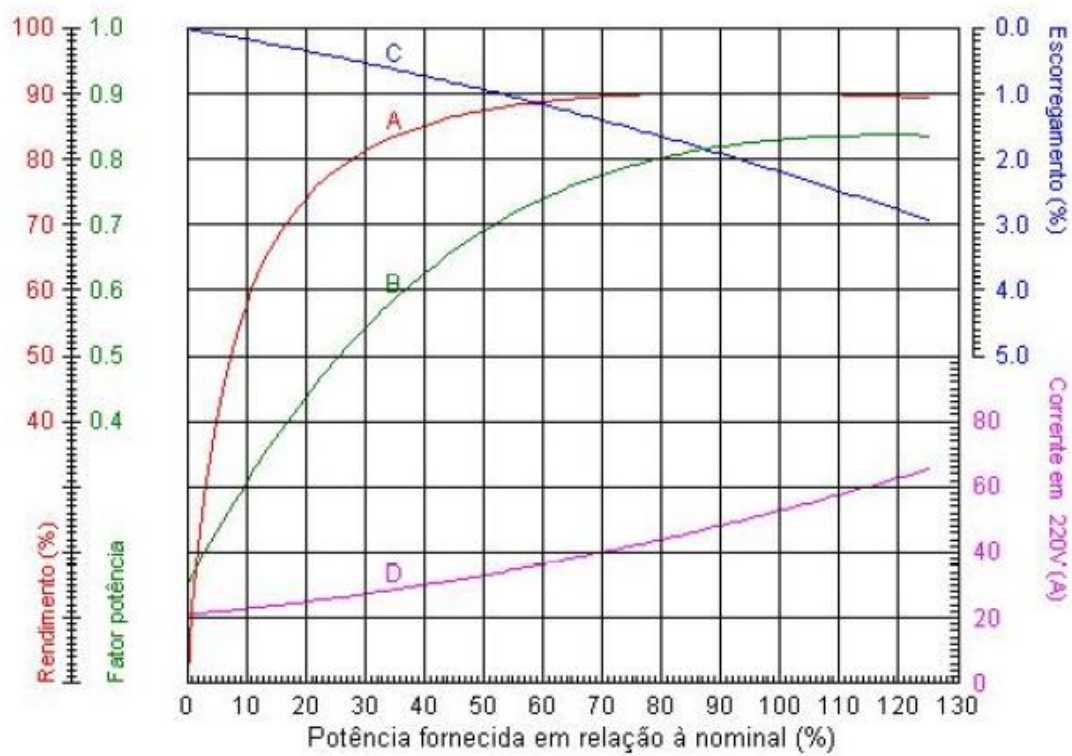


Figura 5.23 – Curva de desempenho de um motor (GARCIA, 2003).

## 5.6 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação do reator de hidratação é feito através de uma rosca sem fim que transporta a cal do silo onde fica armazenada até o reator. Porém, a dimensão desses equipamentos depende da capacidade requerida pelo reator de hidratação ao longo de um dia de funcionamento. Este tempo foi estipulado por se tratar de um reator piloto de capacidade inferior a um industrial. Essa capacidade exigida pela reação de hidratação depende do tempo de retenção das partículas dentro do reator de cinquenta litros. Esse tempo de retenção é definido pelo tempo de extinção da cal alimentada ao sistema e como já mencionado anteriormente, esse tempo de extinção é tempo necessário para que ocorra a hidratação completa da cal alimentada dentro de reator.

O tempo de retenção de uma cal é controlado pela vazão de alimentação ao reator. Então para definirmos a vazão necessária de acordo com cada tempo de extinção fez um balanço de massa no reator de hidratação como esquematizado pela Figura 5.24 através dos dados coletados experimentalmente, onde o menor tempo de extinção de uma cal foi de aproximadamente 5 minutos e o maior tempo de 50 minutos.



Figura 5.24 – Balanço de massa do reator.

Mesmo sabendo, através dos experimentos, que uma cal pode ter seu tempo de extinção inferior a dez minutos e mesmo definindo que a concentração de leite de cal adequada ao processo de hidratação seja inferior a 20%, devemos considerar que há variações na qualidade das cales para cada tipo de processo industrial e que isto modificará o tempo necessário de retenção das partículas, a concentração e a viscosidade do leite de cal. Portanto, devemos trabalhar com uma margem de erro significativa do padrão e dimensionar os equipamentos para suportar essa variação.

Tabela 5.13 – Parâmetros de entrada e saída do reator.

<b>Tempo de retenção (min)</b>	<b>Vazão de saída de Leite de cal (kg/h)</b>	<b>Vazão de entrada de H<sub>2</sub>O (kg/h)</b>	<b>Vazão de entrada de Cal (kg/h)</b>
50	64,80	54,99	12,26
40	81,00	68,74	15,32
30	108,00	91,65	20,43
20	162,00	137,48	30,65
10	324,00	274,96	61,30

A Tabela 5.13 mostra os balanços de massas no reator com as vazões de entrada de água e de cal e de saída do leite de cal em diferentes tempos de retenção para um mesmo volume de reator, cinquenta litros. Nos cálculos da tabela foi considerada uma concentração de saída de leite de cal de 20% e uma pureza da cal de 80%. Para determinarmos a capacidade do silo necessária para um dia de operação especificou-se a vazão de entrada de cal considerado um sistema em estado máximo de operação com tempo de retenção de 10 minutos, conforme a Tabela 5.13. Portanto, a maior vazão de entrada de cal determinada para esse sistema é de 61,30 kg de cal por hora.

Com esses dados o sistema de alimentação foi especificado com as seguintes dimensões: o silo com diâmetro de 530 mm, altura 490 mm e profundidade de 200 mm, e a rosca transportadora com comprimento de 1400 mm e passe da rosca de 45 mm. Ambos os equipamentos foram projetados conforme o esquema da Figura 5.25 onde o silo está próximo ao chão para facilitar a sua alimentação já que é um hidratador piloto. A velocidade de rotação da rosca é controlada por um inversor de frequência modelo CFW 10 e um motoredutor modelo MC 46 com fator de redução 9.

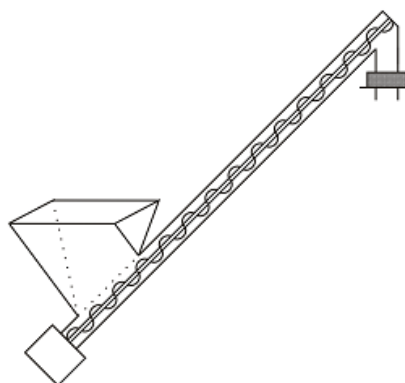


Figura 5.25 – Esquema do sistema de alimentação.



### 5.7 Sistema de remoção de resíduos

O objetivo do capítulo III foi enfatizar o processo de hidratação mostrando que uma cal com características ruins quando passa por um processo de hidratação eficiente forma uma suspensão de leite de cal de qualidades elevadas. Com isso definiu-se a importância das variáveis: Temperatura inicial da água de hidratação, granulometria da cal e agitação eficiente no processo hidratação e fez-se um projeto de hidratador que envolve adequadamente essas variáveis. Tudo isso com o intuito de diminuir a formação de resíduos e conseqüentemente diminuir o entupimento dos equipamentos industriais que proporciona grandes perdas em manutenção.

Embora uma boa hidratação diminua consideravelmente a formação de resíduos, ela não os elimina, permanecendo ainda na suspensão aproximadamente 5% de resíduos. Dos componentes desses resíduos o mais importante e de mais difícil remoção é a sílica, por ser um produto de granulometrias muito baixas. Em alguns processos industriais, principalmente indústrias químicas, há se a necessidade de uma pureza de hidróxido de cálcio próximo de 100% e com eliminação total da sílica presente na suspensão, pois esta reage com outros componentes produzindo compostos complexos de difícil remoção e de fácil deposição nos equipamentos.

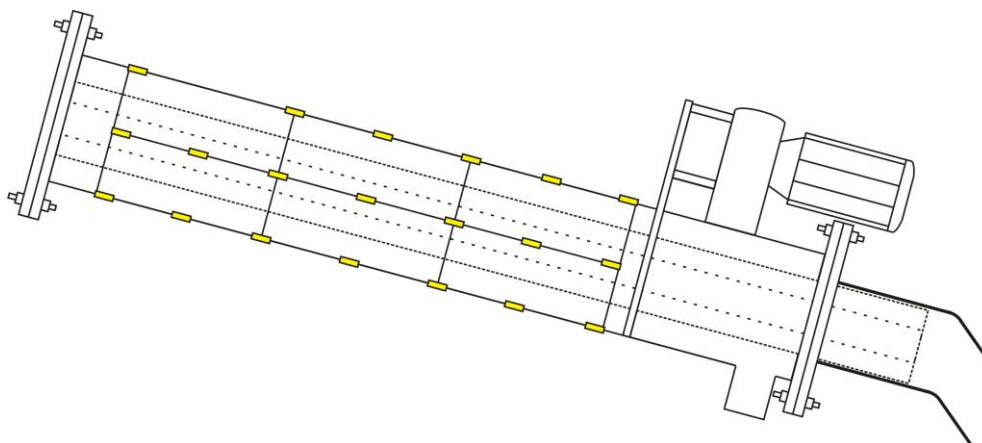


Figura 5.26 – Esquema do sistema de remoção de resíduos.

Uma revisão na literatura das patentes nos mostrou sistemas de remoção de resíduos com ênfase apenas nos resíduos “grossos” sem a preocupação com a sílica. Em outros processos onde a eficiência de remoção dos resíduos era alta, o processo se mostrou complexo, com vários equipamentos em série, aumentando o custo de

produção do produto. Devido a isto, estudaram-se algumas possibilidades de sistemas simples e eficientes de remoção de resíduos e a que melhor atende aos interesses comerciais e técnicos, é um sistema acoplado ao reator de peneiras rotativas conforme a Figura 5.26.

O sistema de remoção de resíduos é formado por duas peneiras rotativas internas, sendo a mais interna de malha maior 0,460 mm e a mais externa de malha menor 0,106 mm. A alimentação do leite de cal é feita no interior da peneira de malha maior onde os resíduos maiores são removidos pela rotação da peneira e posteriormente os resíduos mais finos, como a sílica, são removidos também através da rotação da peneira pela malha mais fina. O leite de cal, então, escoar pela parede do tubo externo do sistema e é removido sem resíduos para um tanque de armazenamento.

Por ocorrer variações na razão cal/água de alimentação proporcionando variações na viscosidade do fluido que quando alta dificulta a remoção dos resíduos pelo sistema de peneiras rotativas, incluiu ao processo um sistema de lavagem. Esse sistema de lavagem é acionado quando ocorre o aumento da viscosidade do leite de cal e funciona através de bicos com spray de água em vários pontos da peneira. A lavagem da peneira diminui a viscosidade da suspensão facilitando o peneiramento, mas diminui a concentração do leite de cal que posteriormente deve ser corrigida para a desejada.

## 5.8 Scale-up

Uma unidade piloto é uma forma de estudar os parâmetros que influenciam o processo de mistura e agitação antes de se projetar a unidade industrial. Após o estudo na unidade piloto é necessário fazer-se uma extrapolação, o scale-up, do sistema físico e químico do processo e para isso há diversos parâmetros na literatura. Quatro principais princípios de similaridade são utilizados em sistemas com agitação para fazer-se a extrapolação.

O parâmetro geométrico define uma similaridade nas relações geométricas do hidratador através de fator de escala:  $R = D_2/D_1 = T_2/T_1 = W_2/W_1 = Z_2/Z_1 = C_2/C_1 = B_2/B_1$ , onde o índice dois representa a unidade industrial e o número um a unidade piloto. Como um sistema agitado é complexo em sua extrapolação, o valor de  $R$  não deve ultrapassar 10.

A similaridade mecânica compreende a similaridade cinemática e dinâmica. A cinemática está relacionada a variável tempo e em sistemas de agitação a variável tempo está relacionada ao tempo de mistura. Já a similaridade dinâmica está relacionada a três números adimensionais: Reynolds, Froude e Weber e com apenas dois deles faz-se a similaridade dinâmica. Porém, há contradições nos parâmetros quando se tenta estabelecer a similaridade dinâmica com dois adimensionais. O adimensional Webber relacionado a interfaces líquido-líquido, gás-líquido e sólido-líquido, é definido de acordo com a equação 5.18, onde  $v$  é a velocidade,  $D$  o diâmetro,  $\rho$  a densidade e  $\sigma$  a tensão superficial.

$$We = v \sqrt{\frac{D \rho}{\sigma}} \quad (5.18)$$

A similaridade térmica define que o fluxo de calor de uma unidade piloto deve ser similar ao fluxo de calor de uma unidade industrial através de uma constante. A similaridade térmica pode ocorrer de três formas: radiação, condução e convecção, mas não simultaneamente, apenas quando uma é desprezível.

O critério adotado na extrapolação depende exclusivamente de quais efeitos deseja-se manter na unidade industrial e é através dos adimensionais que se estabelecem os critérios, mostrados na Tabela 5.14. De acordo com SOLTERMANN (1992) quando se faz grandes aumentos de escalas, o aumento torna-se incompatível aos três critérios

relacionados a resistência ao movimento do fluido (Reynolds), as forças gravitacionais (Froude) e as forças de tensão superficial (Weber). Então para processos físicos e químicos é vantajoso escolher condições em que a velocidade total do processo dependa apenas de um dos números adimensionais.

Tabela 5.14 – Parâmetros que devem permanecer constantes em função do critério de aumento de escala (JOAQUIM, 2007).

<b>Critério de Aumento de Escala</b>	<b>Parâmetros Envolvidos</b>	<b>Parâmetros que devem Permanecer Constantes</b>
Re	$ND^2\rho/\mu$	$ND^2$
$N_{FR}$	$N^2D/g$	$N^2D$
$N_B$	$N\theta$	N
$N_{We}$	$\rho N^2D^3/\sigma$	$N^2D^3$
$U_t$	$\pi ND$	ND
$T_q/V$	$\rho N^2D^2(D/T)^3$	ND
P/V	$\rho N^3D^2(D/T)^3$	$N^3D^2$

Os símbolos da Tabela 5.14 são definidos como:

Re: Número de Reynolds.

$N_{FR}$ : Número de Froude.

$N_B$ : Número de Mistura.

$N_{We}$ : Número de Weber.

$U_t$ : Velocidade média.

$T_q$ : Torque no agitador.

P: Potência consumida pelo agitador.

V: Volume do reator.

N: Velocidade de rotação do agitador.

D: Diâmetro do agitador.

T: Diâmetro do tanque.

$\rho$ : Densidade do fluido.

$\theta$ : Tempo de mistura.

$\sigma$ : Tensão superficial.

g: Velocidade gravitacional.

A complexidade da escolha do critério está em torno do sistema em que se está extrapolando. Então, para cada tipo de sistema de agitação há um critério mais adequado e compete ao engenheiro escolher os parâmetros que se devem manter constantes. Mas em primeira análise o critério mais usado é o de potência consumida por volume do reator.

Em nosso projeto piloto a potência consumida calculada inicialmente para um agitador tipo turbina de disco foi de 0,015 HP utilizando uma agitação de 105 RPM. O reator piloto tem volume de 50 litros e isso produz um valor do fator potência por volume de  $0,2237 \text{ kW/m}^3$ . Porém para determinarmos os parâmetros do reator industrial deve-se ter como dado inicial da produção desejada de leite de cal ou do consumo de cal na produção.

Como referências para este cálculo será utilizado dados da empresa Dow Química que usa o hidróxido de cálcio presente no leite de cal como matéria-prima na produção de óxido de propeno. Por isso, o leite de cal produzido para o processo deve ter alto teor de hidróxido de cálcio e baixo teor de sílica.

A Dow Química consome 280.000 toneladas de cal por ano no processo de hidratação. Com esse dado calculou-se o volume do reator necessário para manter a produção anual. Porém, o volume do reator necessário seria extremamente alto, de aproximadamente  $465 \text{ m}^3$ , e consumiria 140 HP de potência para a qual o motor é economicamente inviável. Com isso, optou-se por dispor 6 reator em paralelo para consumir anualmente a mesma massa de cal.

Cada reator de hidratação consome 16.000 kg de cal por hora, considerando o funcionamento dos equipamentos de oito horas diárias durante trezentos e sessenta e cinco dias no ano. Através deste dado calculou-se a vazão de saída de leite de cal para cada reator considerando uma cal com 80% de pureza, valor próximo de uma cal com péssimas características, e um leite de cal com 20% de sólidos. Esses valores foram utilizados como uma variante do processo onde este trabalharia nas piores condições estimadas.

O balanço de massa no reator, com esses dados de entrada de cal, fornece uma vazão de saída de leite de cal de aproximadamente  $93 \text{ m}^3/\text{h}$ . Entretanto, o cálculo do volume do reator dependerá do tempo de residência das partículas estimado com o tempo de extinção da cal em uso. Como esse tempo varia de acordo com a qualidade da cal, considerou-se nos cálculos uma faixa de variação entre 10 e 50 minutos. Os resultados dos parâmetros do reator industrial estão dispostos na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Parâmetros da unidade industrial.

<b>Tempo de retenção (min)</b>	<b>Volume do Reator (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Potência consumida (HP)</b>	<b>Diâmetro do Reator (m)</b>	<b>Diâmetro do Impelidor (m)</b>	<b>Velocidade de Rotação (RPM)</b>
50	77,60	23,28	4,62	2,31	47,04
40	62,08	18,62	4,29	2,15	49,43
30	46,56	13,97	3,90	1,95	52,69
20	31,04	9,31	3,41	1,70	57,66
10	15,52	4,66	2,70	1,35	67,26

O critério de extrapolação adotado, P/V, proporciona o cálculo da potência consumida para cada volume de reator possível. E o valor máximo da potência calculada foi de aproximadamente 23 HP, valor este ainda alto para os motores encontrados em catálogos. O valor mínimo da potência consumida foi de aproximadamente 5HP, porém esse valor foi calculado considerando um tempo de retenção de 10 minutos, muito próximo do tempo de extinção de cales altamente reativas e comercialmente mais caras.

Para intercalar uma baixa potência consumida e um alto rendimento na hidratação pode-se considerar um tempo de retenção de 30 minutos, pois este valor estipula um limite para a qualidade da cal utilizada e garante uma variação da qualidade desta entre uma alta reatividade e uma média reatividade. Não vantagens em se utilizar cales com reatividades acima de trinta minutos, e mesmo que esta seja usada por eventualidade seus resíduos serão removidos pelo sistema de remoção de resíduo com peneiras rotativas.

O cálculo do diâmetro do impelidor foi feito com o mesmo critério adotado no projeto do reator de hidratação piloto onde o diâmetro do impelidor é 1/2 do diâmetro do reator. E no cálculo da velocidade de rotação do impelidor utilizaram-se os parâmetros da Tabela 5.14 para o critério potência consumida por volume do reator.



---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

BUTTERS, M. P.; MCLEOD, G., "Fine particle size lime slurries and their production",  
Patente número WO 02/092701 A1, novembro de 2002.

CAVADAS, A. M. S., "*Potência de agitação e critério de suspensão em reator agitado por turbina hiberbolóide*", Dissertação de mestrado em engenharia mecânica da Universidade do Porto, Porto, 1999.

EMMETT, R.C., "*Lime slaking system including a cyclone and classifier for separating calcium hydroxide and grit particles from a slurry thereof*", United States Patent, Patente número 4.588.559, maio de 1986.

GARCIA, A. G. P., "*Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria*", Dissertação de mestrado em planejamento energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

GUIMARÃES, J. E. P., "*A cal: Fundamentos e aplicações na engenharia civil*", Associação Brasileiras dos Produtores de Cal, 285p., 1998.

HARBNY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W., "*Mixing in the process industries*", 2ª Ed., Butterworth Heinemann, 1992.

HENRIKSON, S.A., "*Process for the preparation of a substantially homogeneous lime water solution*", United States Patent, Patente número 4.110.211, agosto de 1978.

JOAQUIM, C.F.J.; CEKINSKI, E.; NUNHEZ, J. R., URENHA, L.C., "*Agitação e Mistura na Indústria*", Editora LTC, 2007.



- KOJIMA, S.; SHIMADA, M.; SAKAI, K.; HORIE, K., “*Method and apparatus for the preparations of slaked lime solution*”, United States Patent, Patente número 4.366.142, dezembro de 1982.
- LANE, S.C., “*Lime slaker*”, United States Patent, Patente número 4.436.703, março de 1984.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P., “*Unit operations of chemical engineering*”, Sétima edição, Editora McGraw Hill, 2003.
- PAUL, E. L.; OBENG, V. A. A.; KRESTA, S. M., “*Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*”, John Wiley & Sons, 2004.
- RITCHE, I. M.; XU, B. A., “*The kinetics of lime slaking*”, Hydrometallurgy, No 23, p. 377-396, 1990.
- ROUSE, H.; INCE, S., “*History of hydraulics*”, Dover publications Inc., New York, 1971.
- SHARMA, R. N.; SHAIKH, A. A. (2003), “*Solids suspension in stirred tanks with pitched blade turbines*”, Chemical Engineering Science, 58, 2123 - 2140.
- SILVA, A. C., “*Estudo e otimização da reação de hidratação do óxido de cálcio*”, Dissertação de mestrado em engenharia química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- SOARES, B. D., “*Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: Caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica*”, Dissertação de mestrado em engenharia química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- SOTERMANN, O. E., “*Condicionantes sócio-técnicos da extrapolação*”, Dissertação de mestrado em Política Científica e Tecnológica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.
- TOWLER, G.; SINNOTT, R., “*Chemical Engineering Design: Principles, practice and economics of plant and process design*”, Elsevier, 2008.

## ***OUTRAS REFERÊNCIAS:***

Aracruz Celulose:

[http://www.aracruz.com.br/show\\_inv.do?act=stcNews&orig=fin&id=643&lang=1](http://www.aracruz.com.br/show_inv.do?act=stcNews&orig=fin&id=643&lang=1), acesso em 07 de janeiro de 2010.

Associação Brasileira de Produtores de Cal: <http://www.abpc.org.br/frame.htm>, acesso em 07 de janeiro de 2010.

Associação Brasileira de Produtores de cal: <http://www.abpc.org.br>, acesso em 15 de fevereiro de 2010.

Câmara dos deputados: <http://www.camara.gov.br/sileg/integras/411879.pdf>, acesso em 07 de janeiro de 2010.

Companhia Siderurgia Nacional:

[http://www.csn.com.br/portal/page?\\_pageid=456,188482&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.csn.com.br/portal/page?_pageid=456,188482&_dad=portal&_schema=PORTAL), acesso em 07 de janeiro de 2010.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comercio exterior:  
[http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl\\_1198755535.pdf](http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1198755535.pdf), acesso em 07 de janeiro de 2010.

Qualical Indústria e Comercio Ltda:

<http://www.qualical.com.br/down/doc/Apostila%20cv.doc>, acesso em 08 de janeiro de 2010.

Site de divulgação de equipamentos: [www.setor1.com.br](http://www.setor1.com.br), acesso em 20 de janeiro de 2010.



---

# APÊNDICE A

---

## *REOLOGIA*

Neste apêndice serão apresentados gráficos individuais de viscosidade versus taxa de deformação para as amostras apresentadas no capítulo V. As Figuras A1, A2 e A3 representam as amostras de leite de cal produzidas por cales em granulometria entre 0 e 7 mm, variando apenas a razão de cal/água adicionada ao reator na seqüência de 100, 150 e 200 g/L. Observa-se nas figuras que o comportamento reológico das amostras são iguais, a viscosidade diminui drasticamente nos primeiros 2  $\text{sec}^{-1}$  de taxa de deformação atingindo valores próximos de zero. As Figuras A.4 e A.5 refere-se a amostras de leite de cal produzidas por cales de granulometria entre 7 e 14 mm e razões de cal/ água variando entre 100g/L na Fig. A.4 e 150 g/L na Fig. A.5.

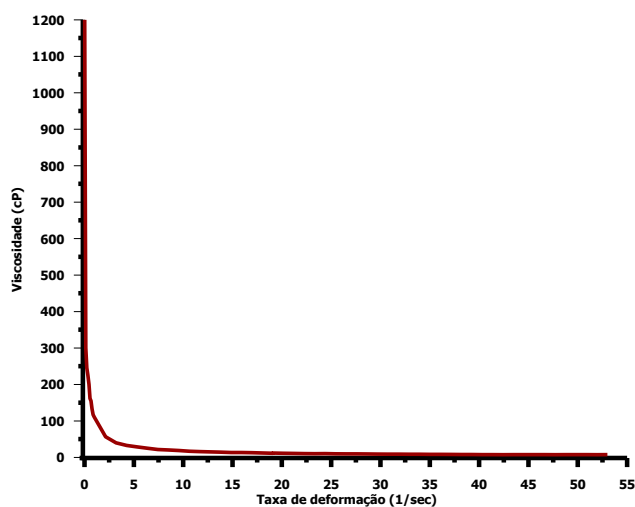


Figura A.1 – Gráfico de reologia da amostra 1.

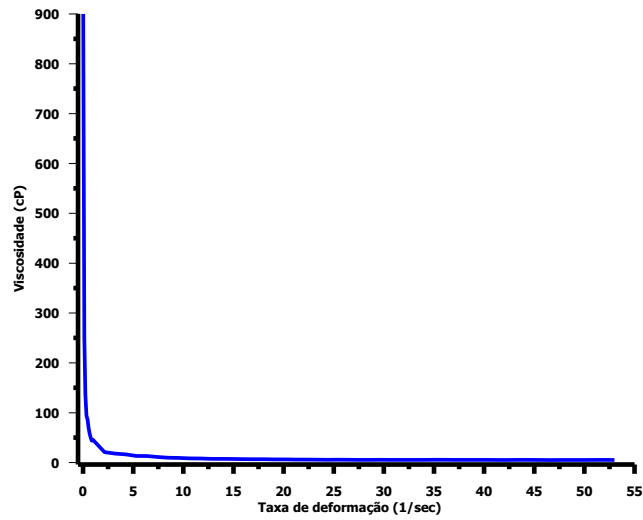


Figura A.2 - Gráfico de reologia da amostra 2.

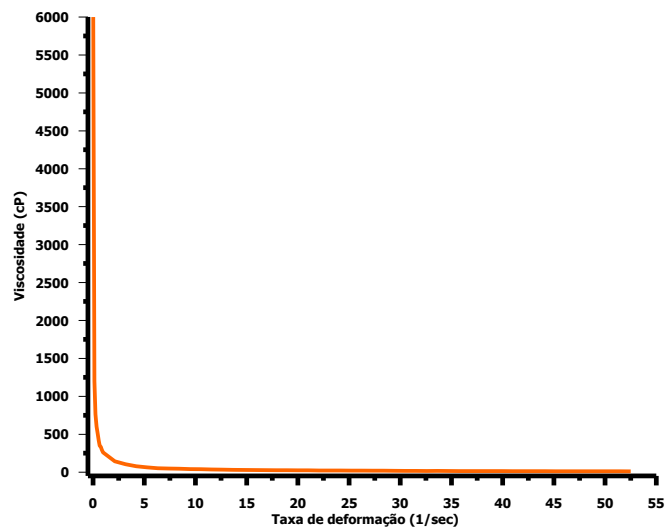


Figura A.3 - Gráfico de reologia da amostra 3.

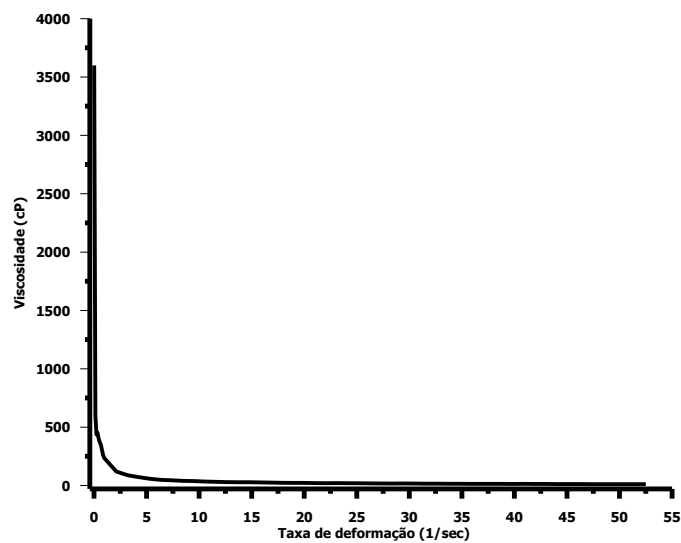


Figura A.4 - Gráfico de reologia da amostra 4.

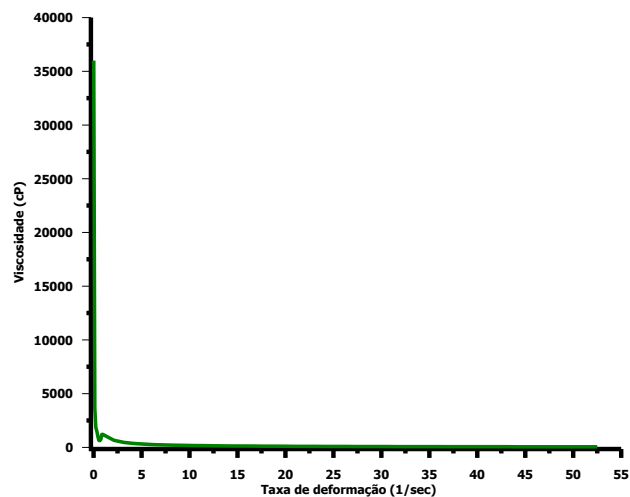


Figura A.5 - Gráfico de reologia da amostra 5.

Para cada amostra de leite de cal analisado fez-se ajuste a modelos pré-estabelecidos pelo programa RHEOCALC, o qual também gera os gráficos de ajuste com os parâmetros do modelo e o coeficiente de ajuste. Para cada amostra dispôs-se de seis modelos.

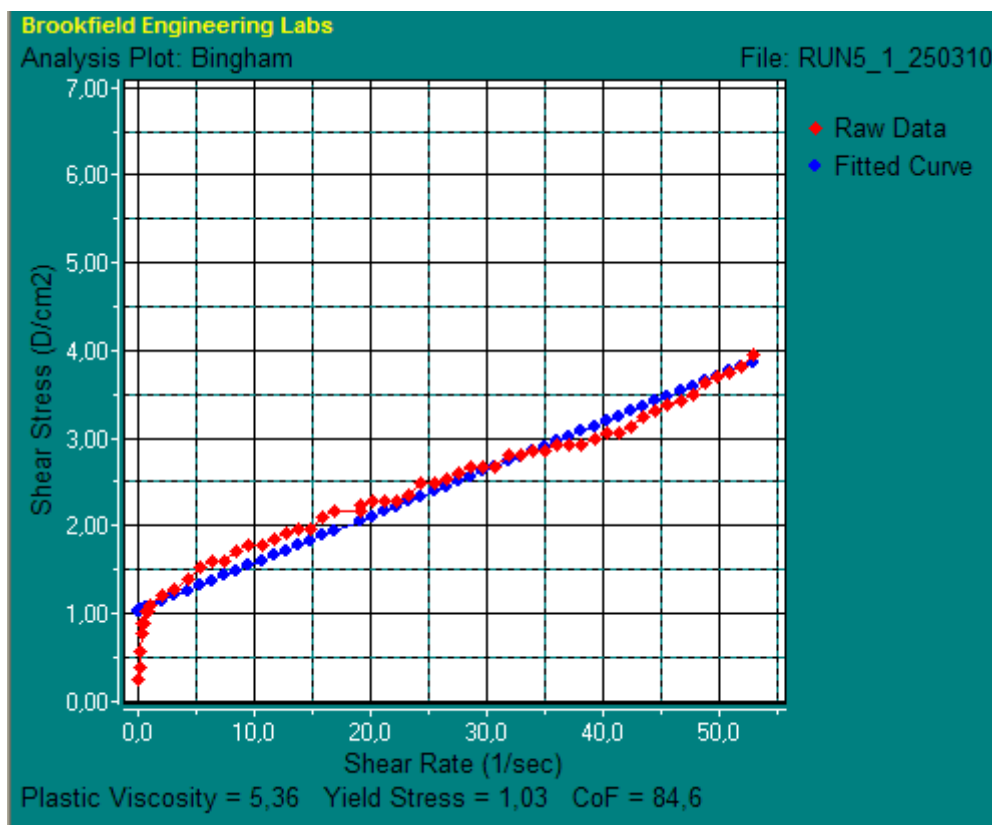


Figura A.6 - Ajuste ao modelo Bingham da amostra do teste 1.

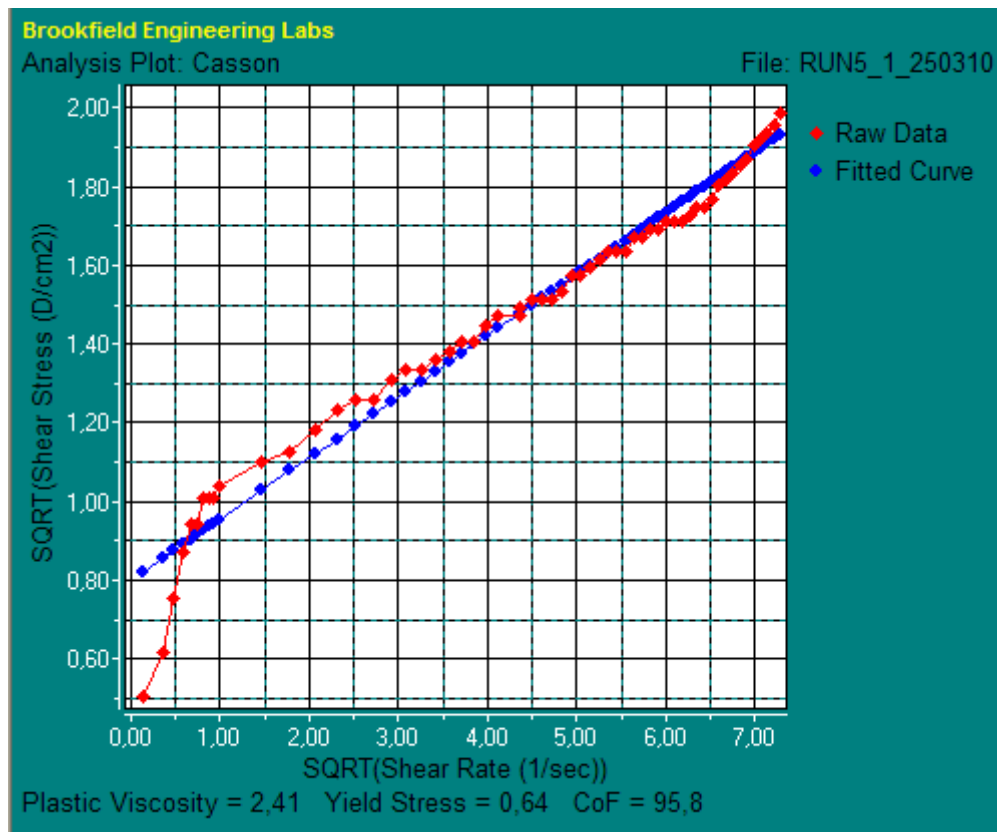


Figura A.7 - Ajuste ao modelo Casson da amostra do teste 1.

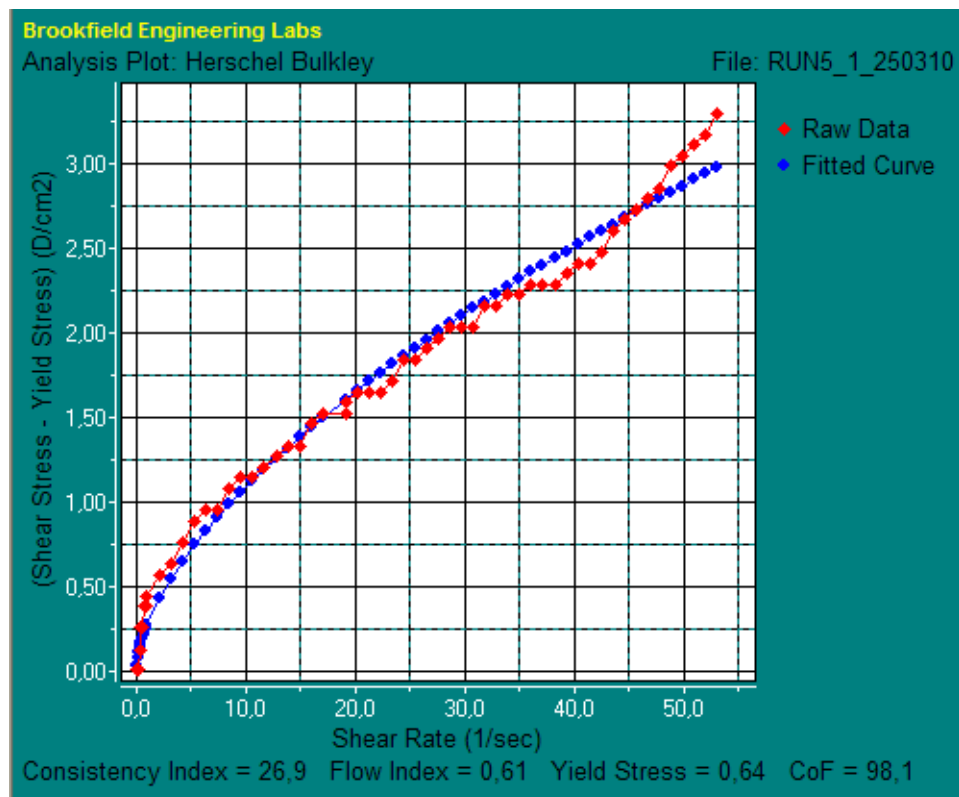


Figura A.8 - Ajuste ao modelo Herschel Bulkley da amostra do teste 1.

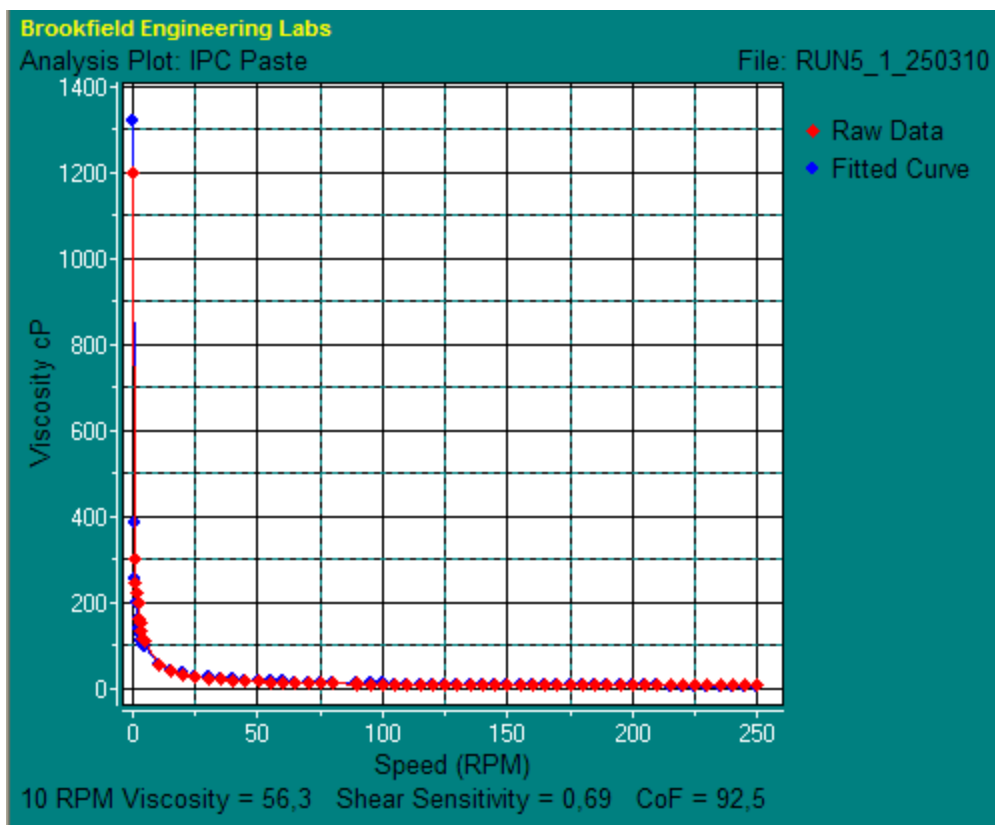


Figura A.9 - Ajuste ao modelo IPC Paste da amostra do teste 1.

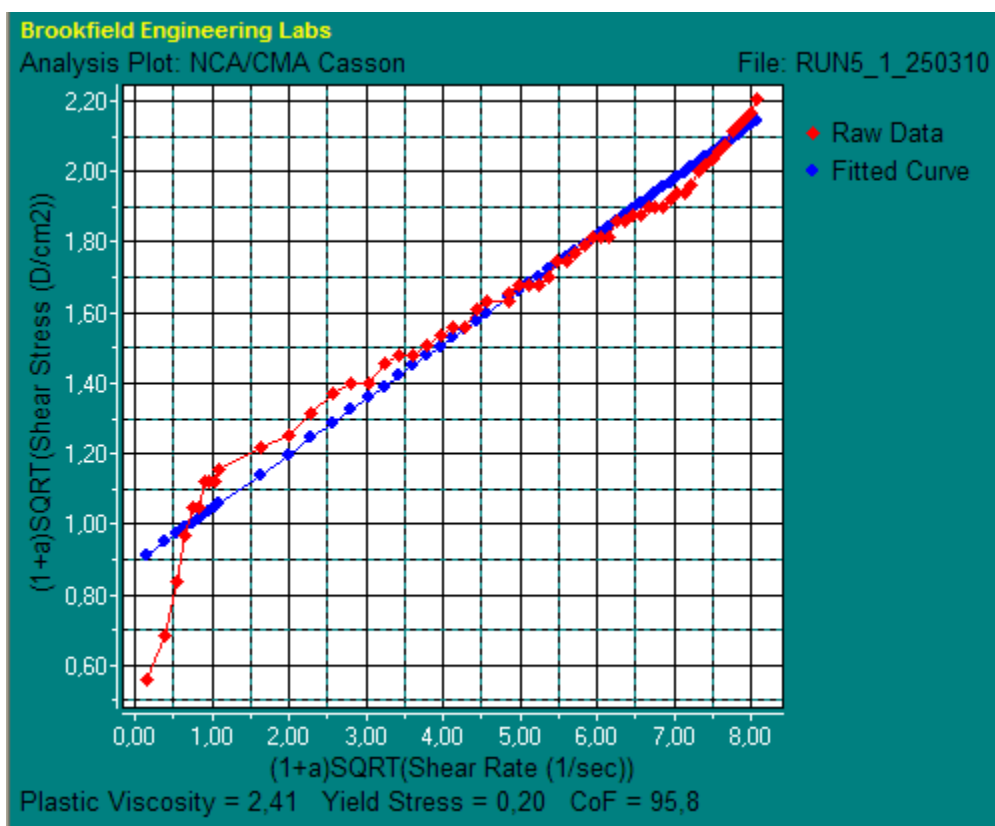


Figura A.10 - Ajuste ao modelo NCA/CMA Casson da amostra do teste 1.



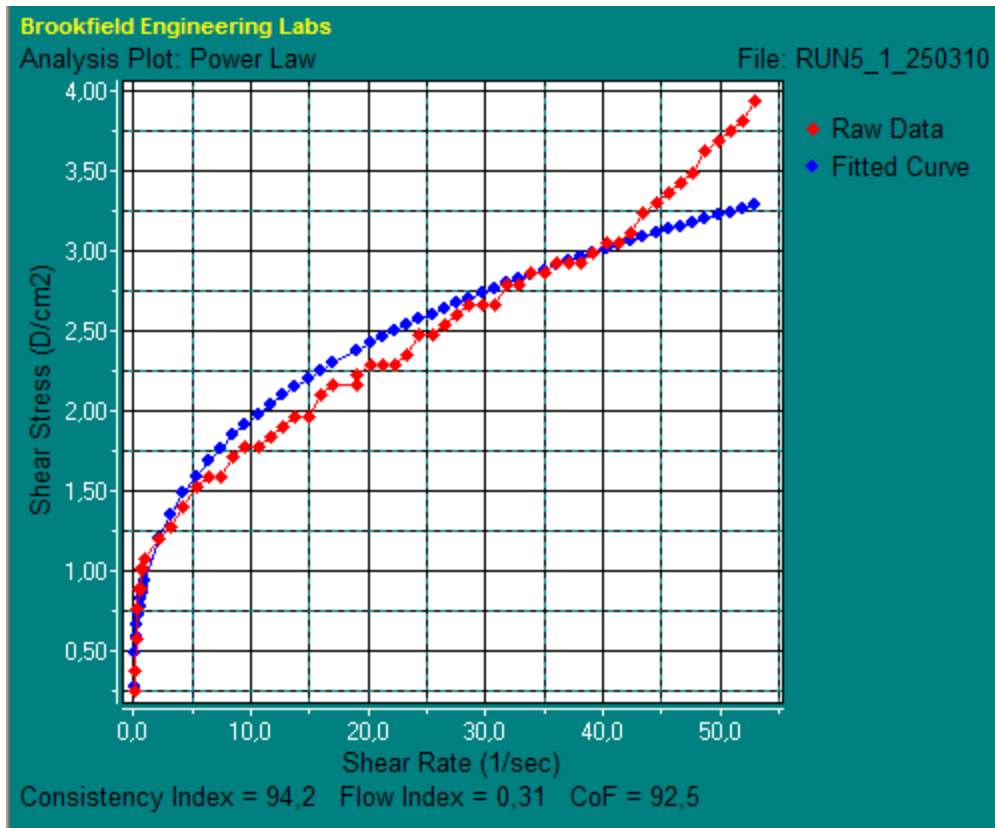


Figura A.11 - Ajuste ao modelo Power Law da amostra do teste 1.

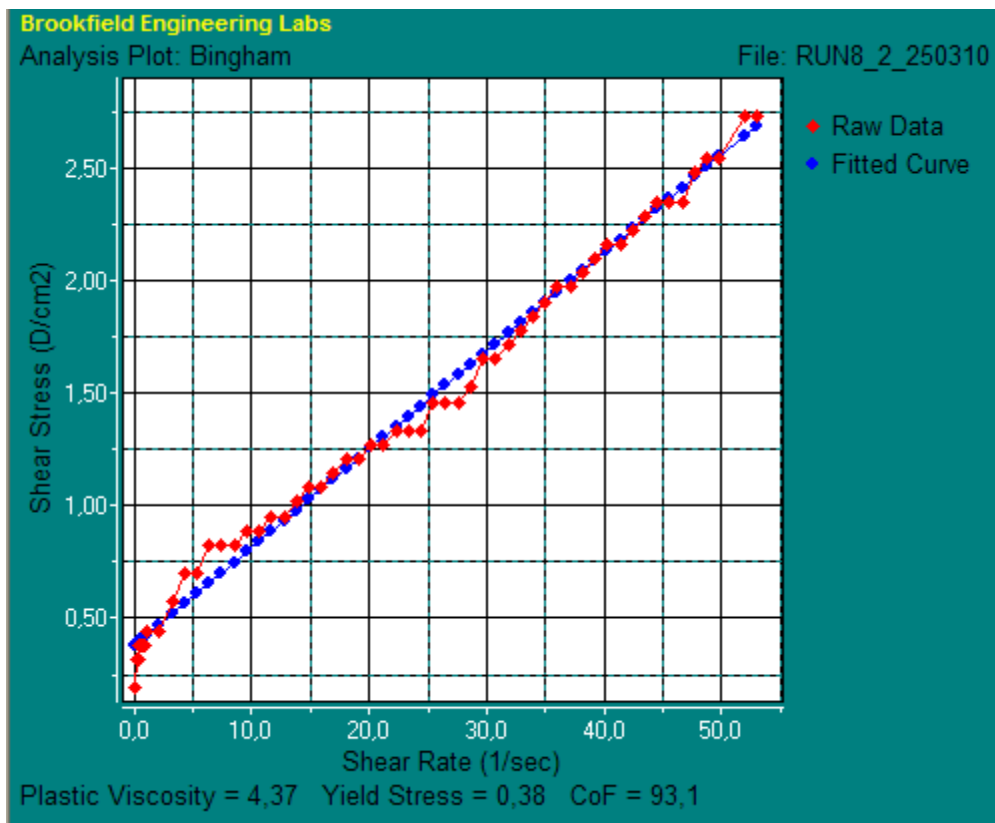


Figura A.12 - Ajuste ao modelo Bingham da amostra do teste 2.

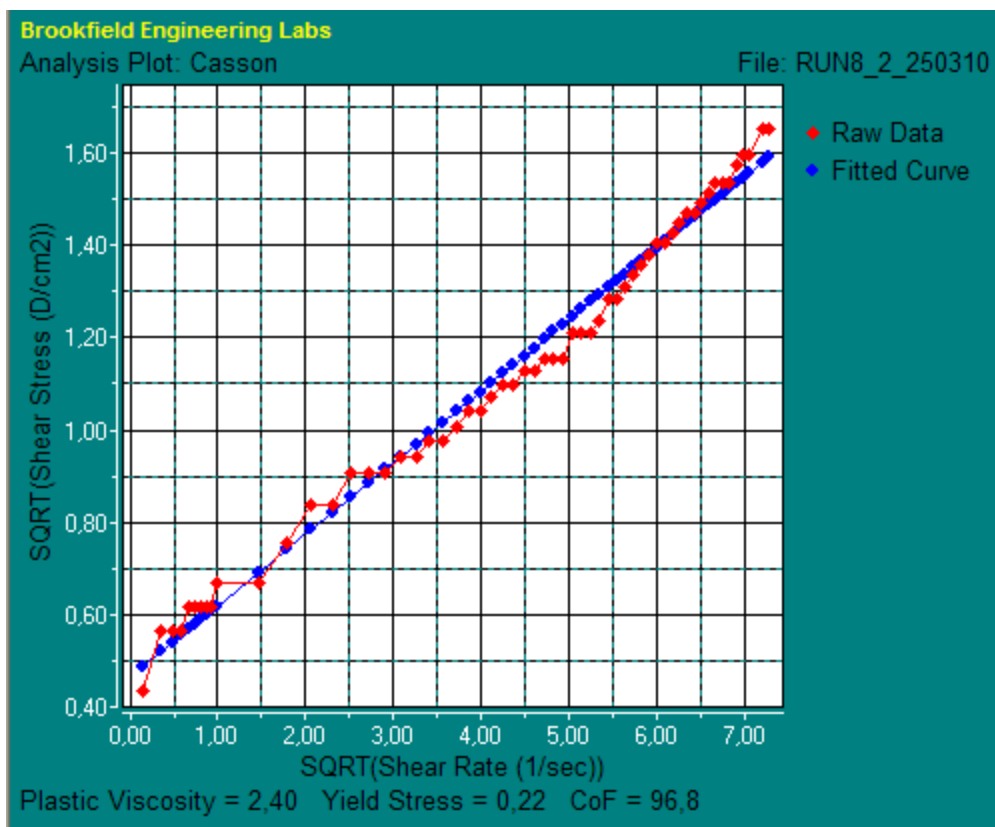


Figura A.12 - Ajuste ao modelo Cassom da amostra do teste 2.

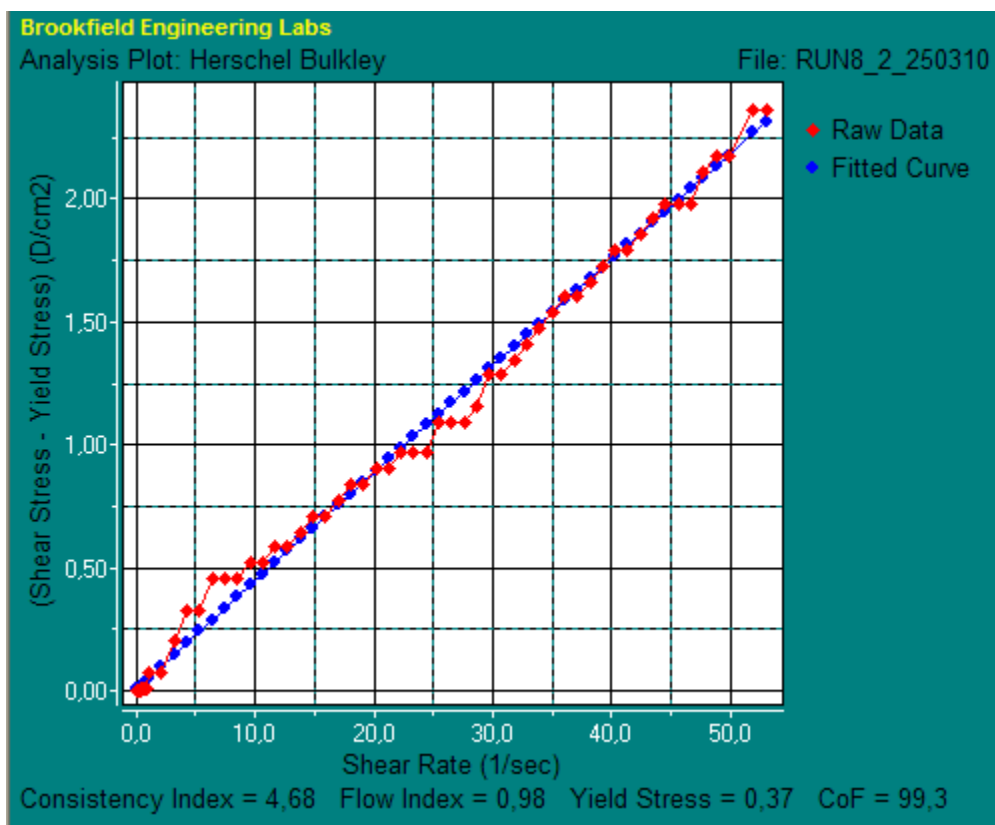


Figura A.13 - Ajuste ao modelo Herschel Bulkey da amostra do teste 2.

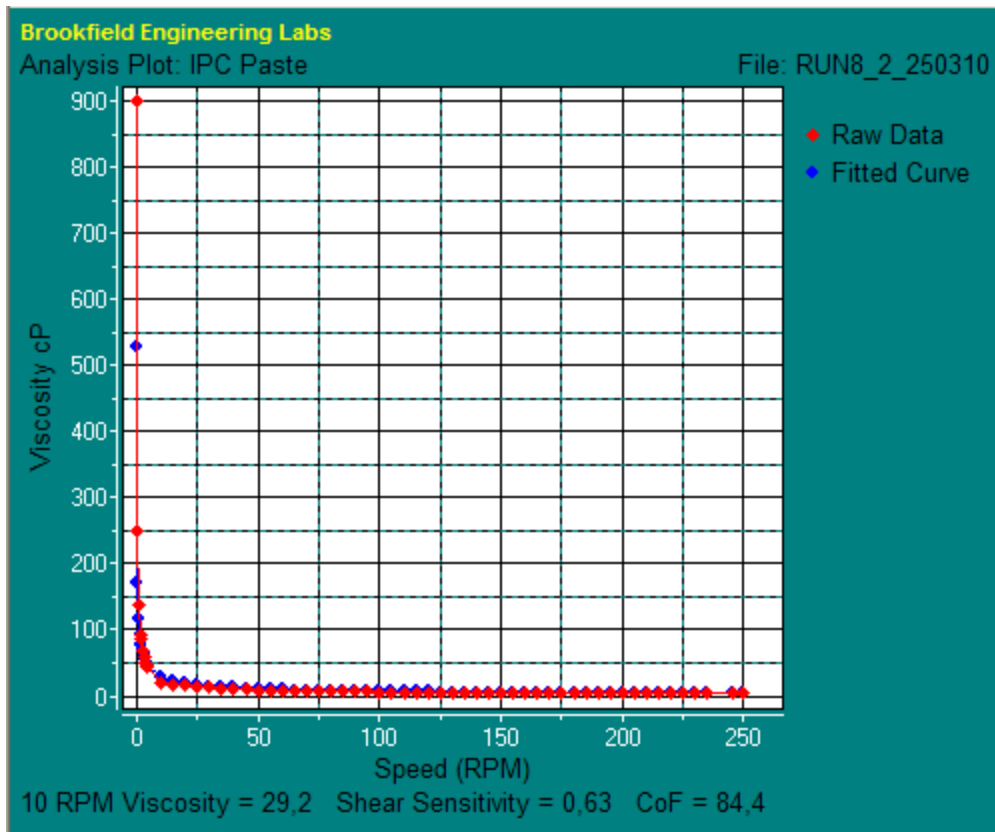


Figura A.14 - Ajuste ao modelo IPC Paste da amostra do teste 2.

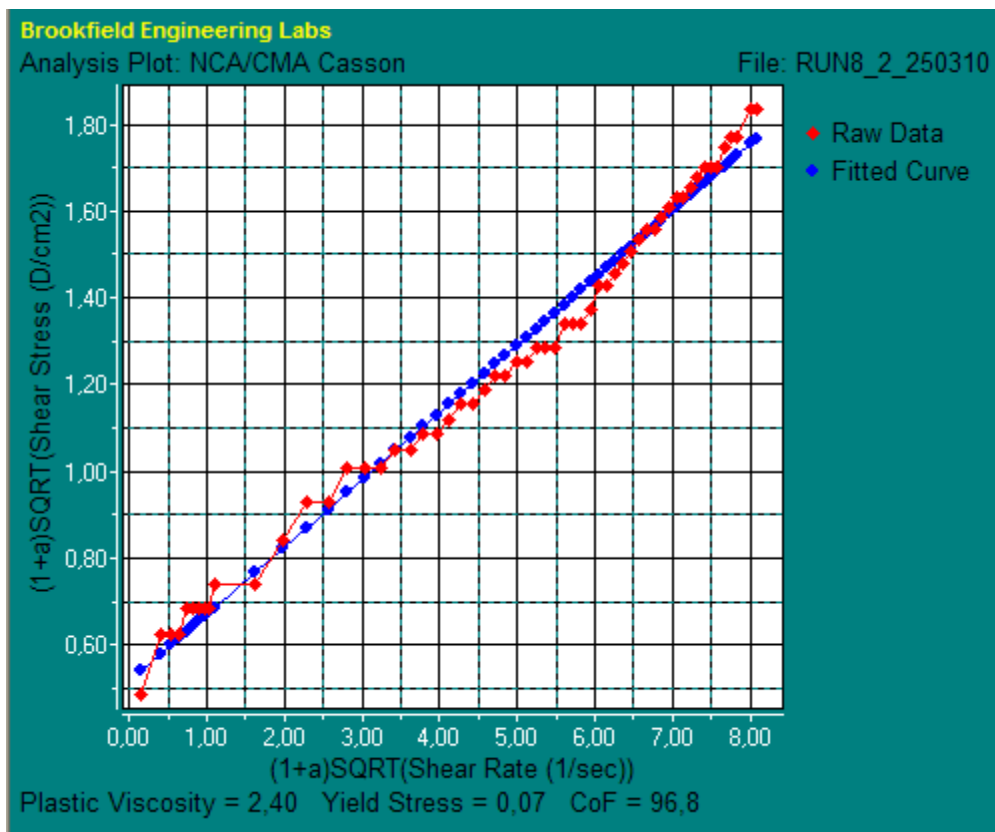


Figura A.15 - Ajuste ao modelo NCA/CMA Casson da amostra do teste 2.

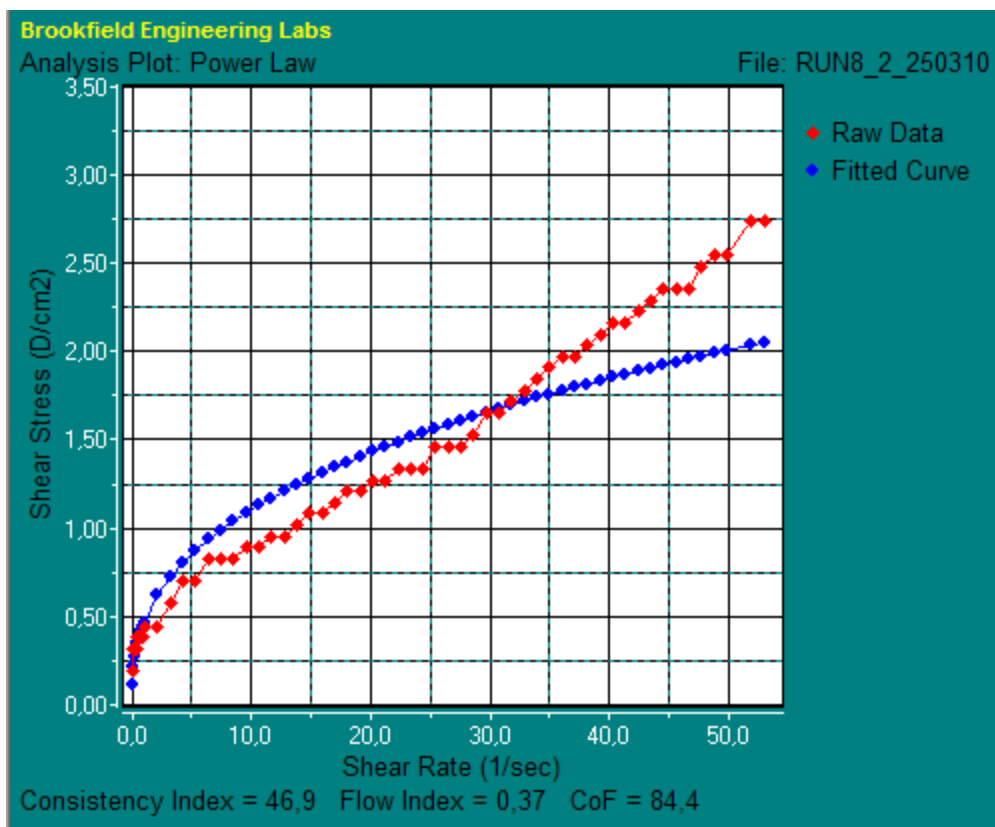


Figura A.16 - Ajuste ao modelo Power Law da amostra do teste 2.

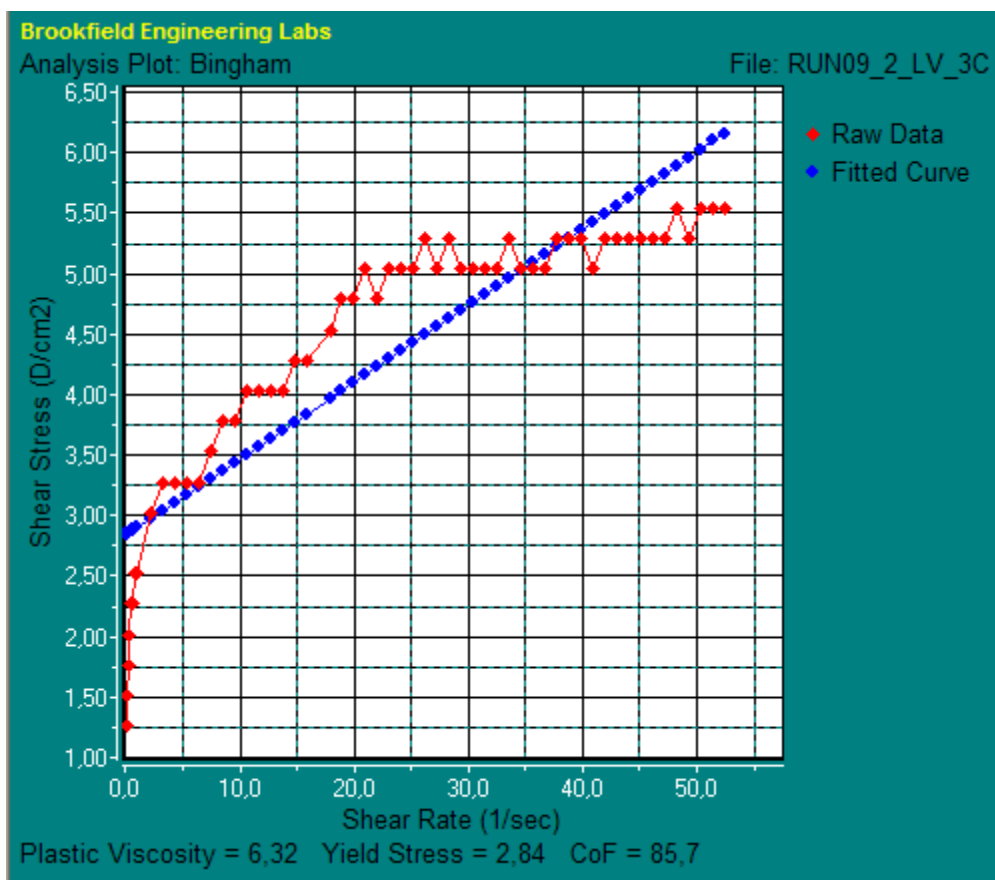


Figura A.17 - Ajuste ao modelo Bingham da amostra do teste 3.

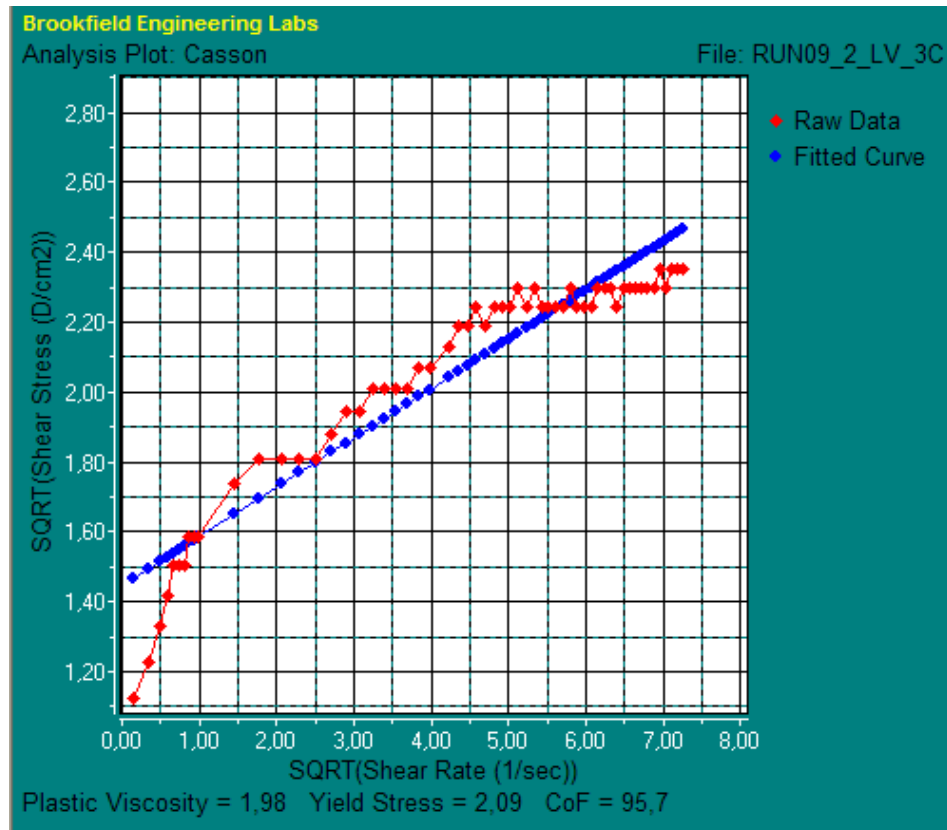


Figura A.18 - Ajuste ao modelo Cassom da amostra do teste 3.

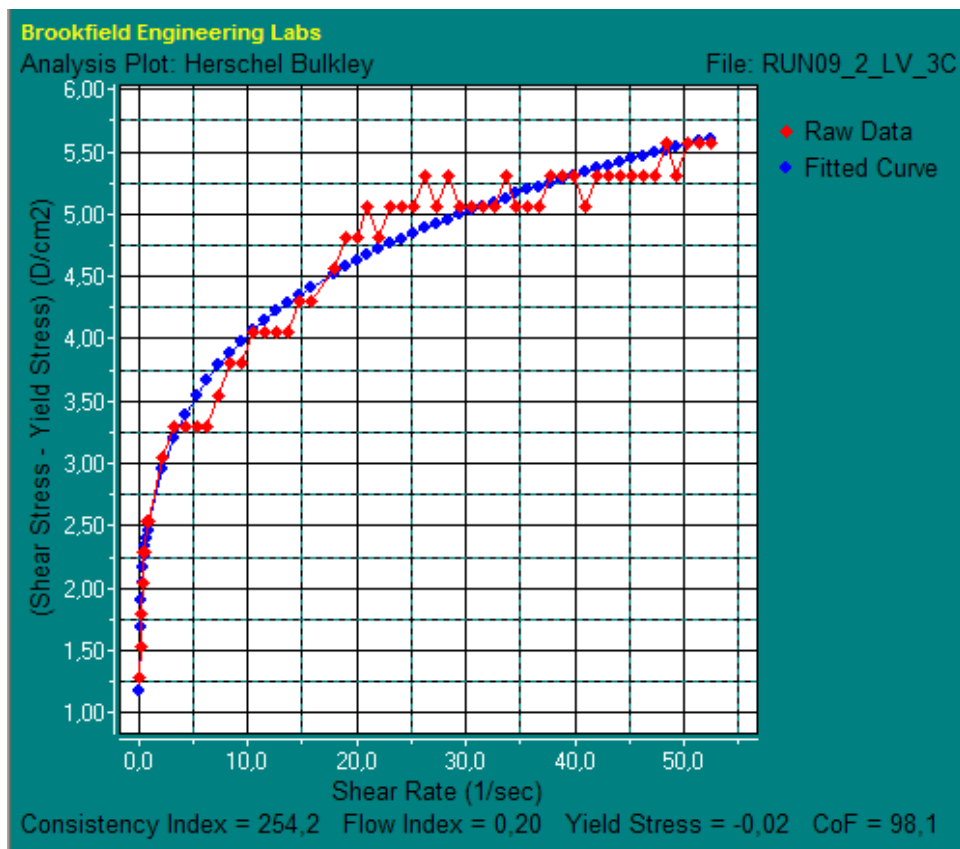


Figura A.19 - Ajuste ao modelo Herschel Bulkey da amostra do teste 3.

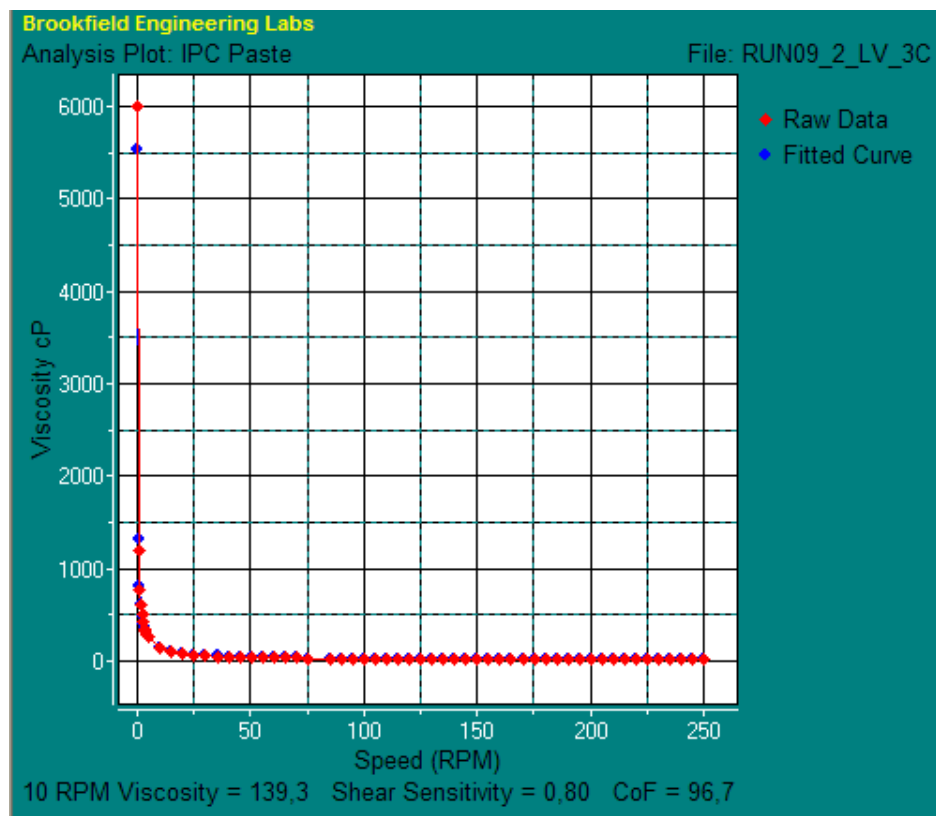


Figura A.20 - Ajuste ao modelo IPC Paste da amostra do teste 3.

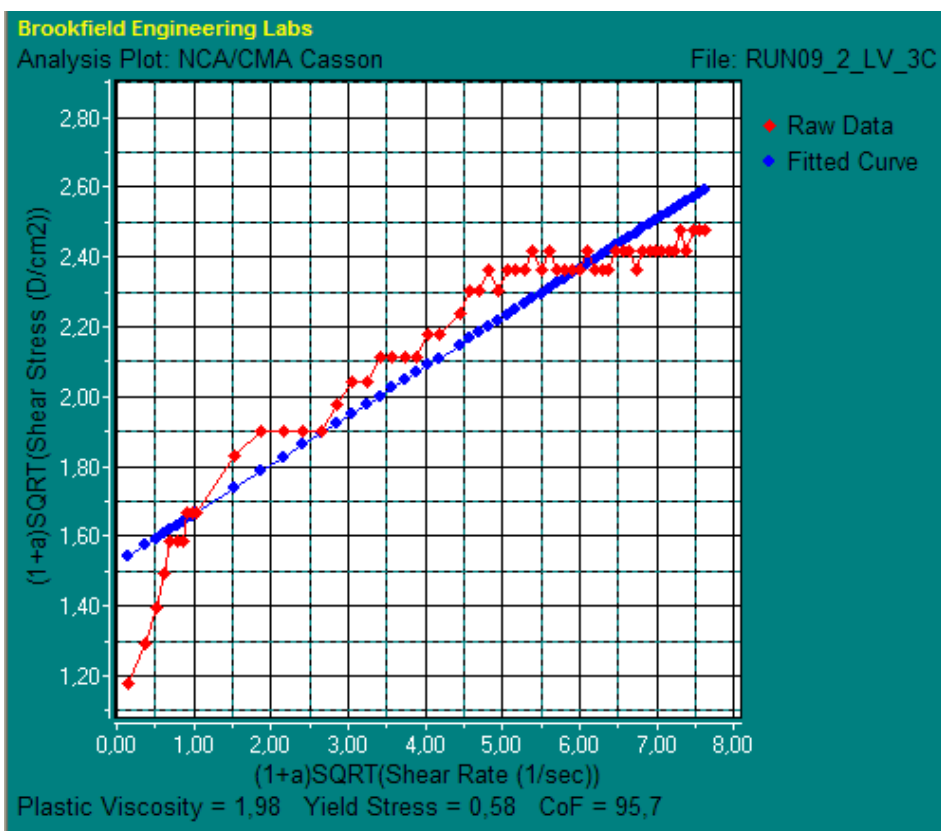


Figura A.21 - Ajuste ao modelo NCA/CMA Casson da amostra do teste 3.

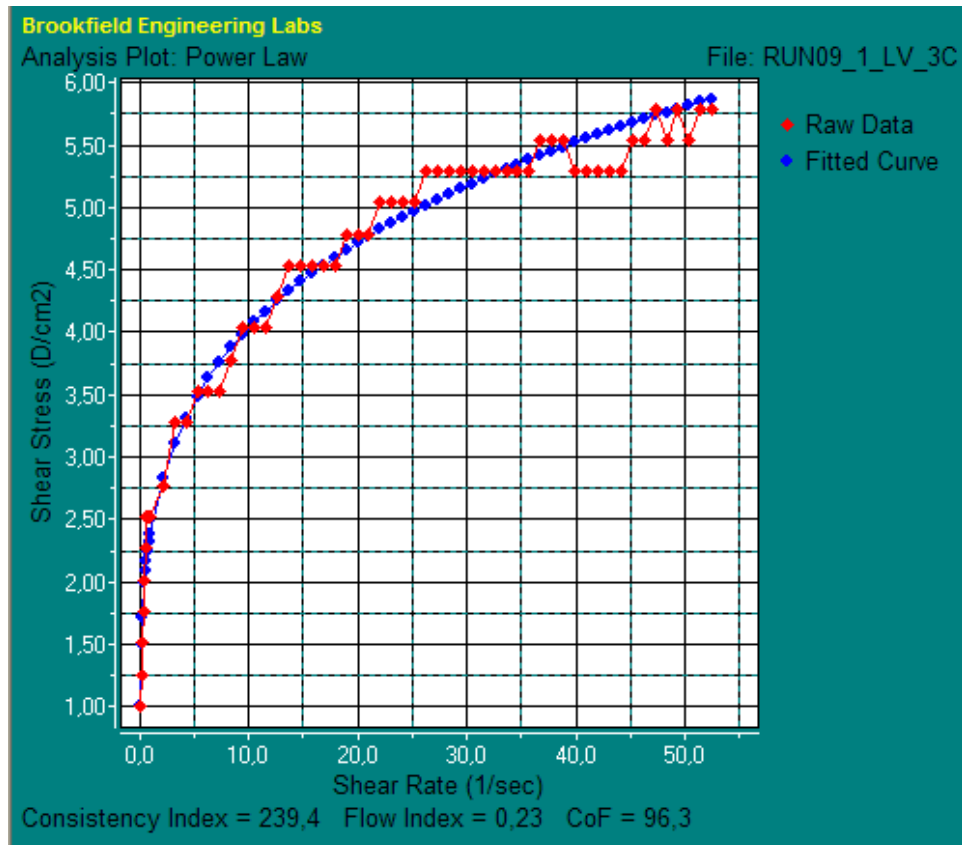


Figura A.22 - Ajuste ao modelo Power Law da amostra do teste 3.

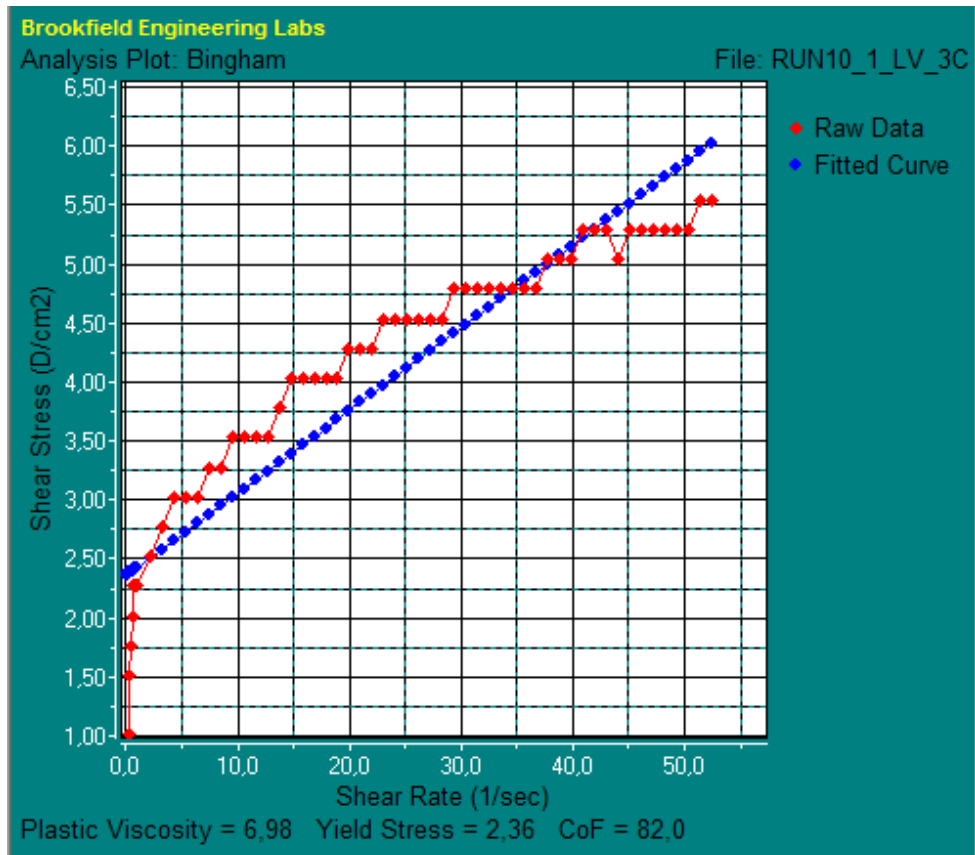


Figura A.23 - Ajuste ao modelo Bingham da amostra do teste 4.

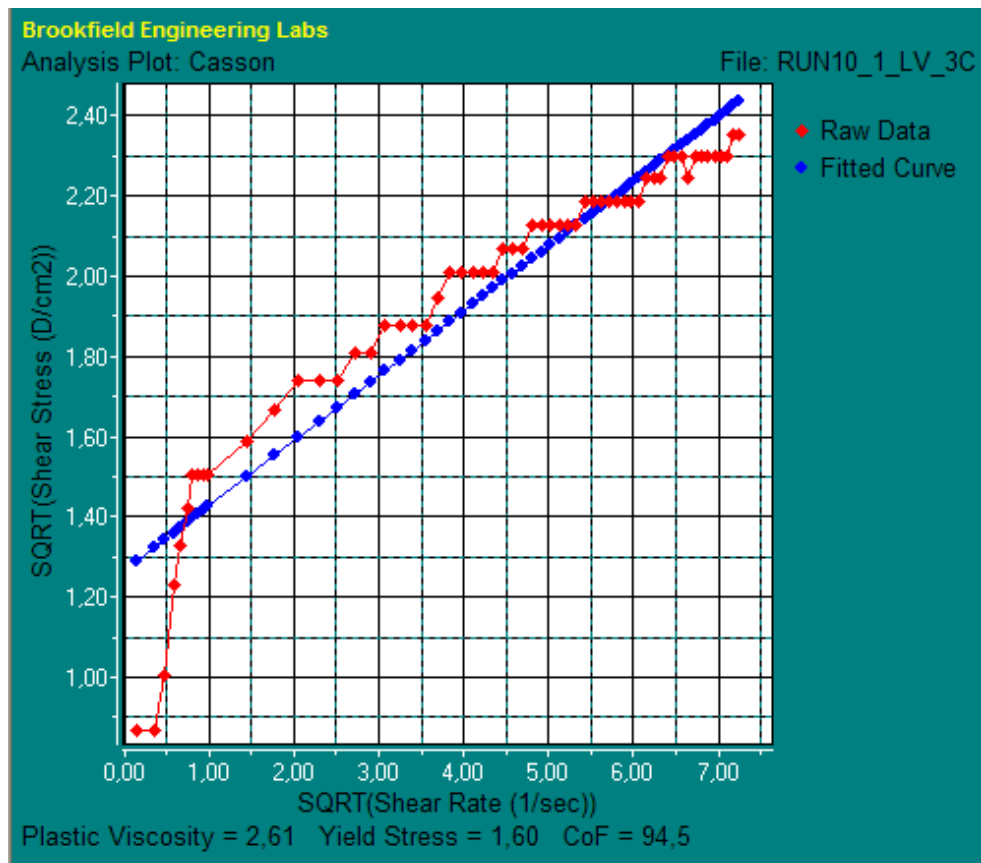


Figura A.24 - Ajuste ao modelo Cassom da amostra do teste 4.

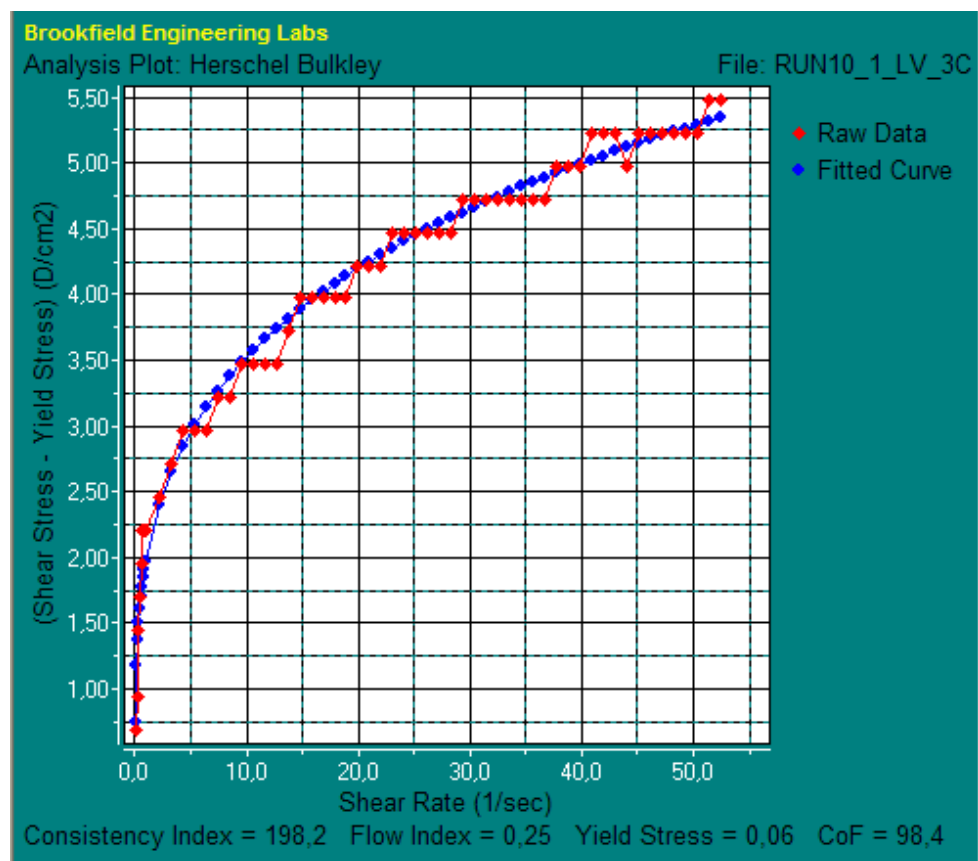


Figura A.25 - Ajuste ao modelo Herschel Bulkey da amostra do teste 4.



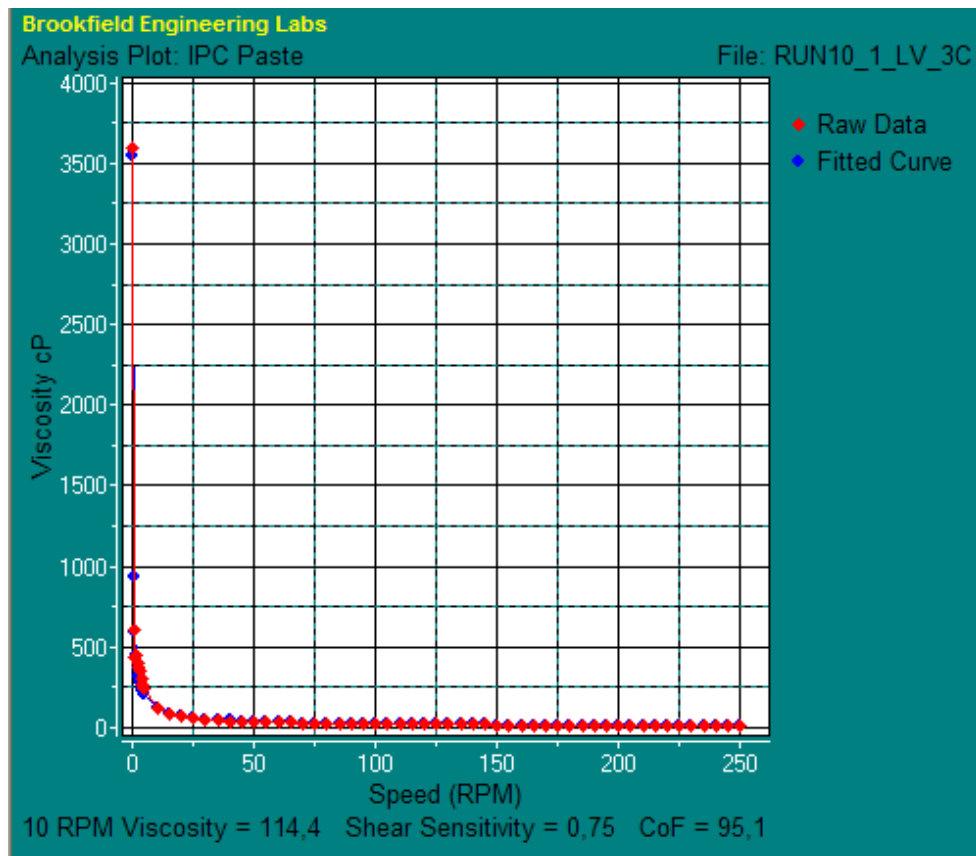


Figura A.26 - Ajuste ao modelo IPC Paste da amostra do teste 4.

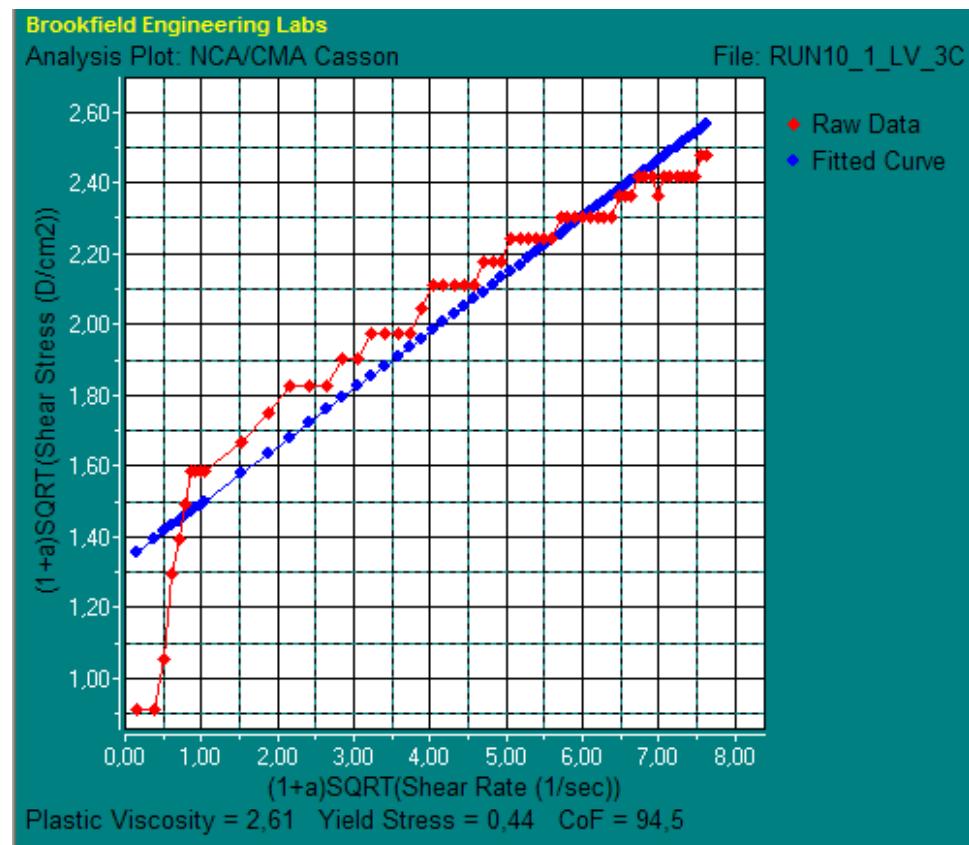


Figura A.27 - Ajuste ao modelo NCA/CMA Casson da amostra do teste 4.

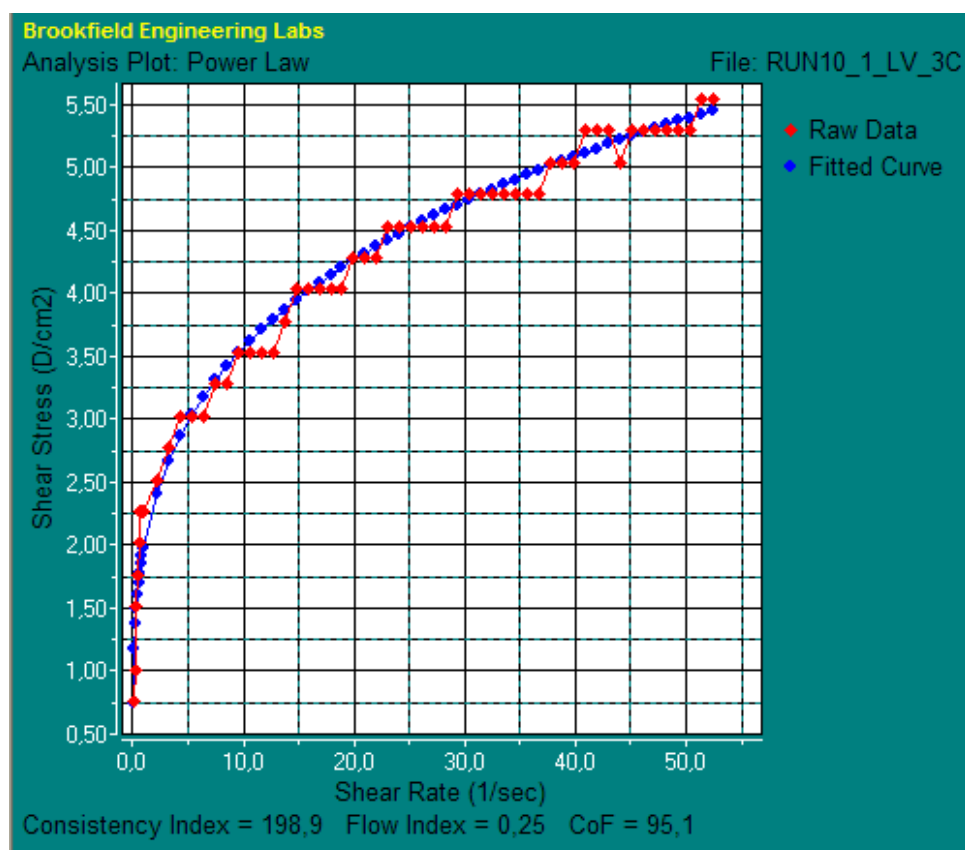


Figura A.28 - Ajuste ao modelo Power Law da amostra do teste 4.

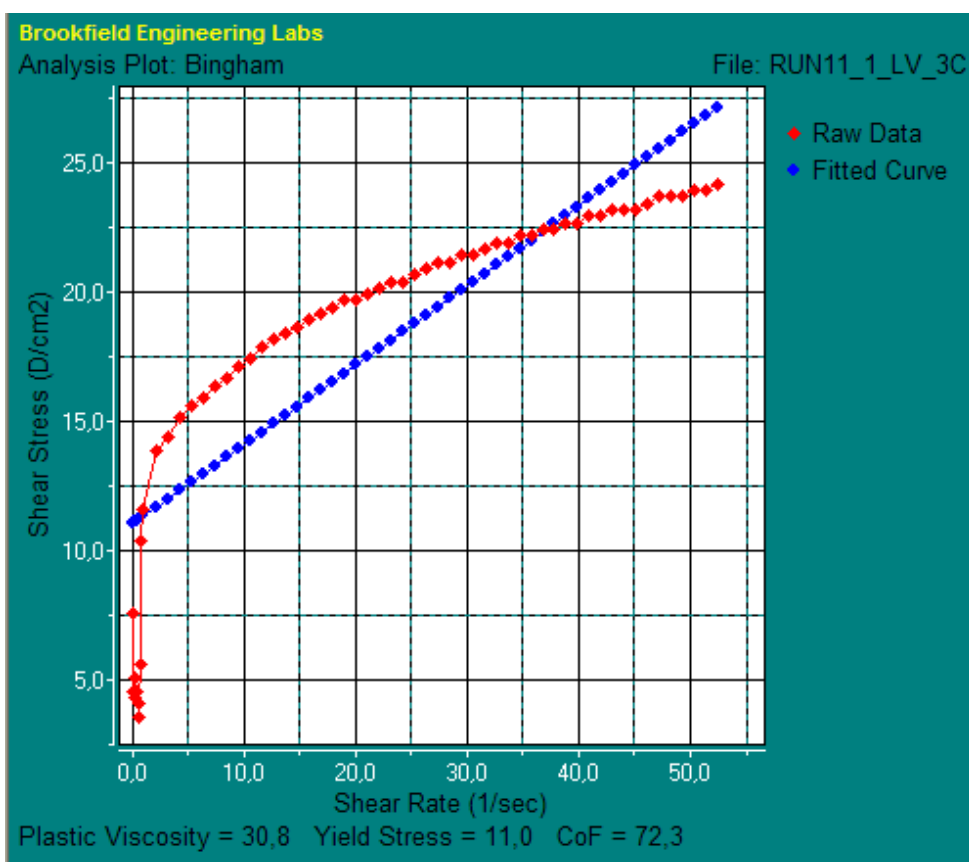


Figura A.29 - Ajuste ao modelo Bingham da amostra do teste 5.

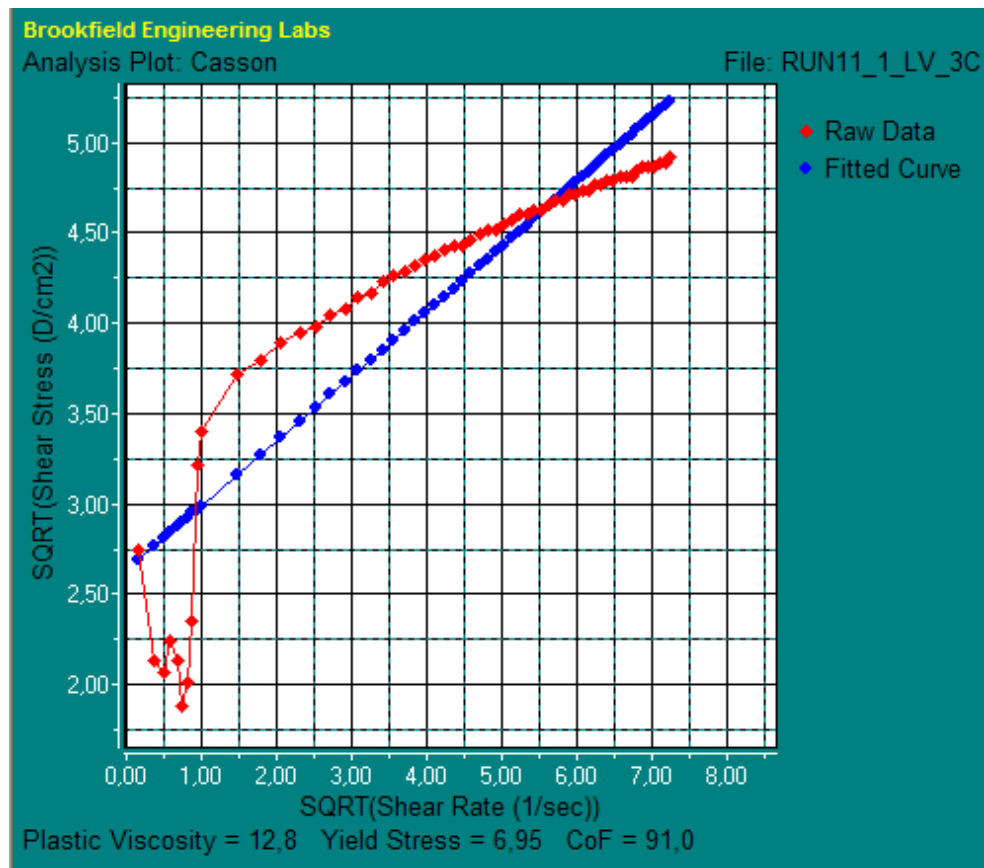


Figura A.30 - Ajuste ao modelo Cassom da amostra do teste 5.

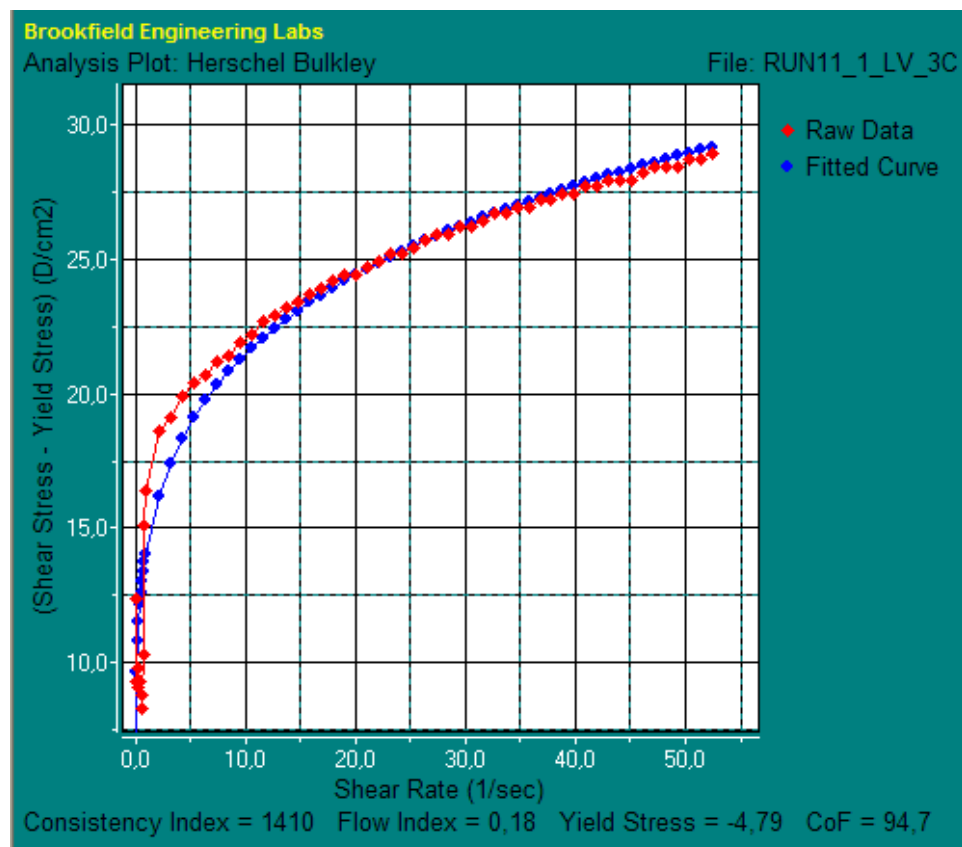


Figura A.31 - Ajuste ao modelo Herschel Bulkey da amostra do teste 5.

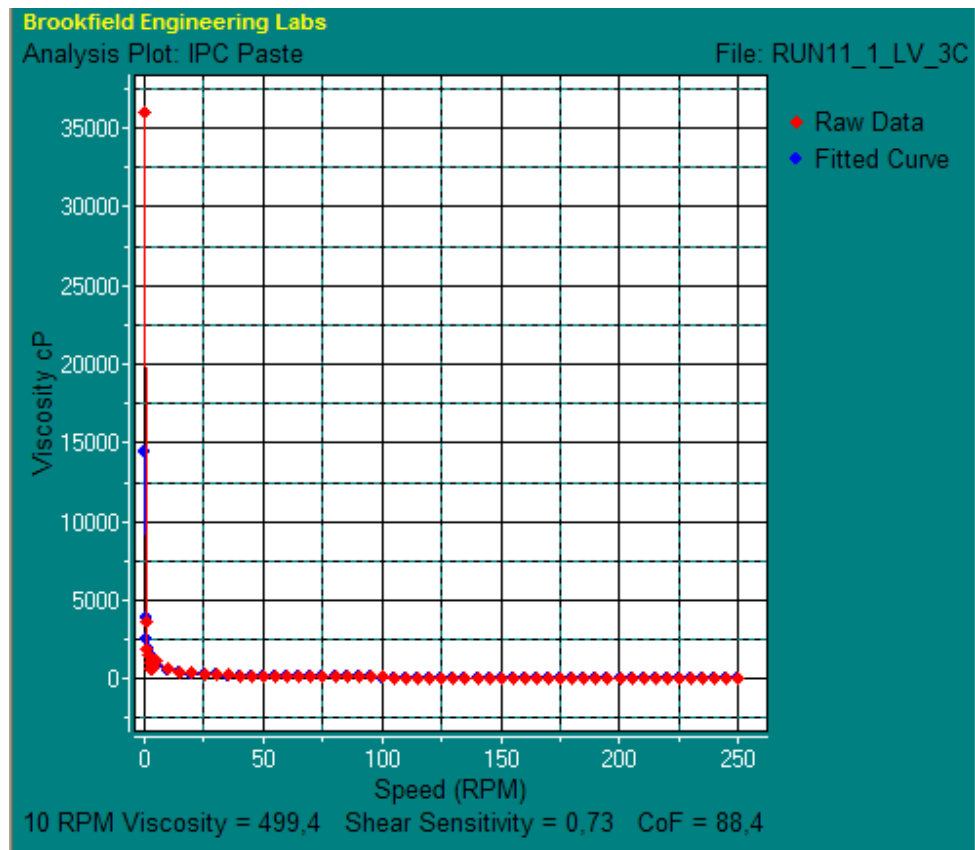


Figura A.32 - Ajuste ao modelo IPC Paste da amostra do teste 5.

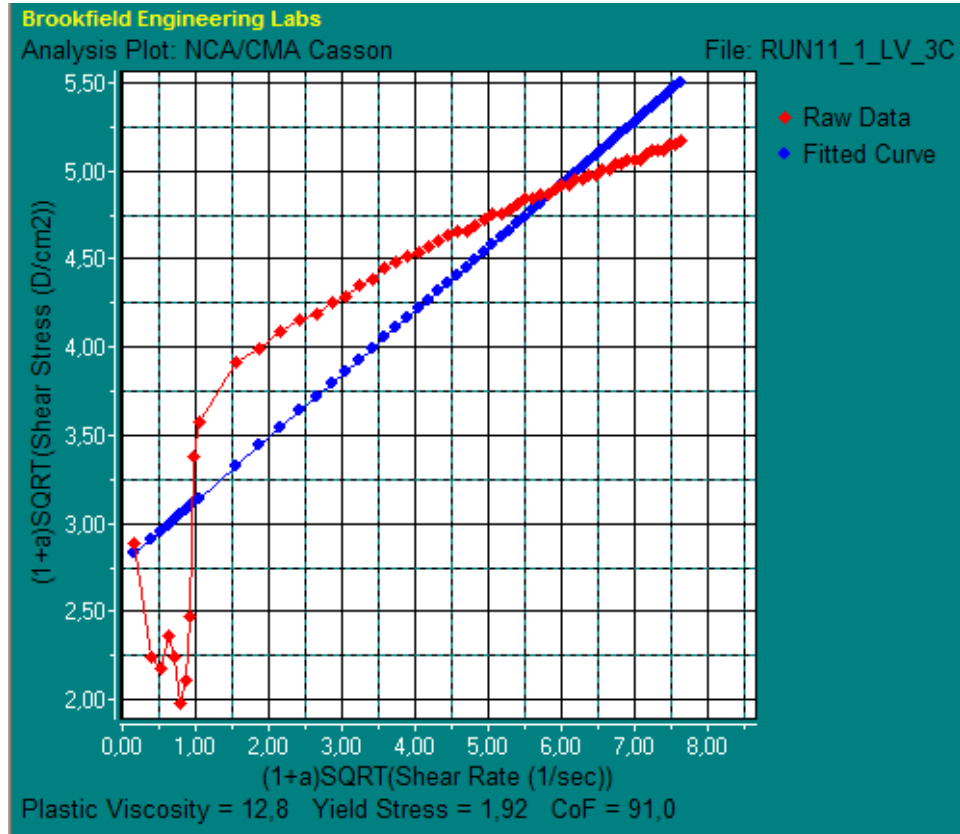


Figura A.33 - Ajuste ao modelo NCA/CMA Casson da amostra do teste 5.

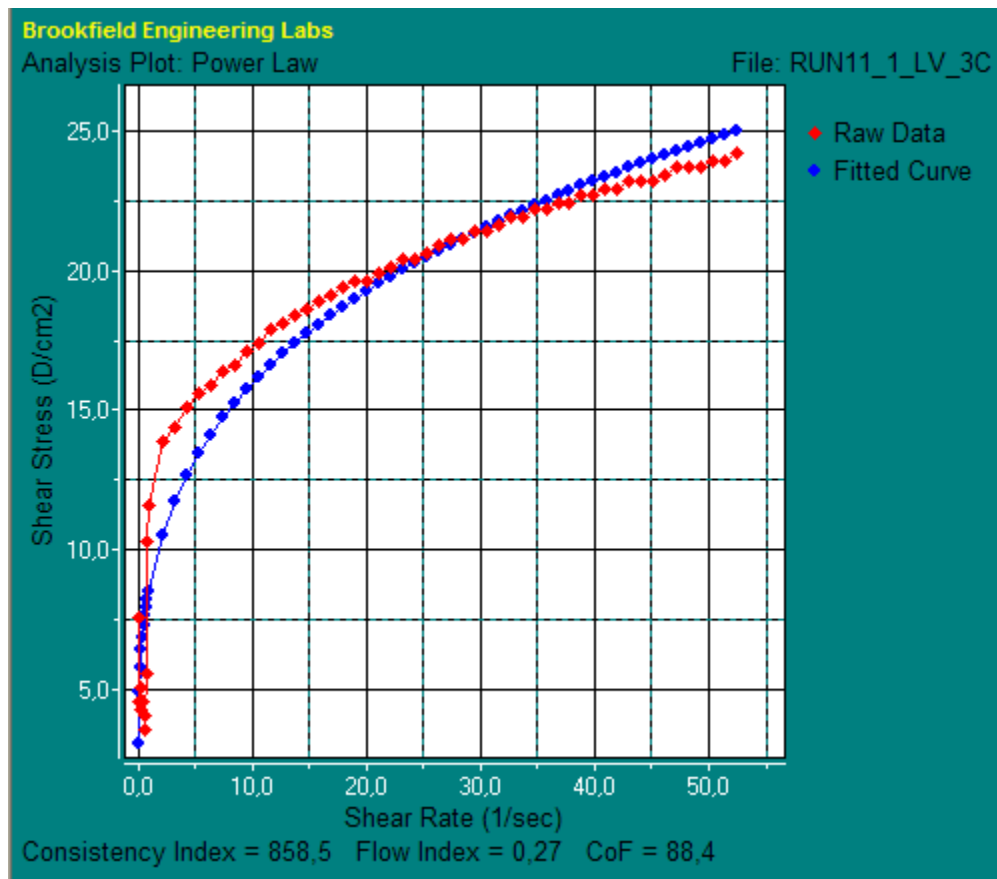


Figura A.34 - Ajuste ao modelo Power Law da amostra do teste 5.