

Marcelo Carboneri Carboni

Efeito da Viscosidade e da Taxa de Ataque aos Óxidos no Processo de Reciclagem das Latas de Alumínio

Trabalho de Formatura

Orientador
Prof.Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

nUSP: 1601030
Dezembro 1998

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800004215

*À
meus pais, Nivaldo e Sueley, pelo amor e carinho
e pela dedicação que trouxe-me subsídios
para chegar até aqui.*

“Eu vos exaltarei, Senhor, porque me livrastes; não permitistes que exultassem sobre mim meus inimigos.

Senhor, meu Deus, clamei e fui curado.

Senhor, minha alma foi tirada por vós da habitação dos mortos; dentre os que descem para o túmulo, vós me salvastes.

Ó vós, fiéis do Senhor, cantai e dai graças ao seu santo nome.

Porque a sua indignação dura apenas um momento, enquanto sua benevolência é para toda a vida. Pela tarde, vem o pranto, mas, de manhã volta a alegria.

Eu, porém, disse, seguro de mim: Não serei jamais abalado’”

Salm 29, 2 - 7

“A alma é um campo de batalhas onde a razão e o juízo combatem contra a paixão e o apetite.

A razão reinando sozinha restringe todo o impulso e a paixão, deixada a si, é um fogo que arde até a sua própria destruição”

Agradecimentos

- À Deus, doador da vida que me presenteou com este Dom tão valioso
- Ao Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório, pela valiosa orientação, amizade e paciência
- Ao técnico Danilo, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho
- Aos demais professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, pela disponibilidade
- À minha família, em especial Nivaldo, Suely e Renata, que viveram comigo estes momentos.
- Aos meus colegas de turma, em especial Carlos Henrique, Curti, Daniel, Marco, Rodrigo Alhdeff, Rodrigo Villalobos e Walter, que tornaram a convivência do dia-a-dia mais agradável
- Aos meus amigos da Paróquia Santa Teresa de Jesus
- Ao pessoal da banda Anima
- À Ana Carolina Fortes Iapichini, pela esperança em momentos difíceis e pela ajuda na escolha do curso de Engenharia
- À todos aqueles que, direta ou indiretamente, sofreram as consequências do stress e do meu mau humor gerado pelas provações do curso de Engenharia

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	4
1.1 A INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO	4
1.2 A RECICLAGEM NO BRASIL	9
1.3 A RECICLAGEM DO ALUMÍNIO	12
1.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA RECICLAGEM DE ALUMÍNIO	15
1.4.1 RECICLAGEM OU REFUSÃO DE SUCATAS	16
1.4.2 FUSÃO ASSISTIDA POR FLUXOS SALINOS	18
1.4.2.1 Viscosidade	20
1.4.2.1.1 Teoria molecular dos líquidos	20
1.4.2.1.2 Teoria do fluxo viscoso	21
1.4.2.1.3 Teoria da difusão	21
1.4.2.2 Métodos de medida de Viscosidade	22
1.4.2.2.1 Capilar (Capillary or run-out method)	22
1.4.2.2.2 Cilindro Rotativo (Rotation Method)	23
1.4.2.2.3 Pêndulo Oscilante (Oscillating body Method)	24
1.4.2.2.4 Viscosímetro Herty	24
1.4.2.2.5 Corpo Cadente (Body Falling Method):	25
1.4.3 CORROSÃO DE ÓXIDOS POR FLUXOS SALINOS	25
2 OBJETIVOS	28
3 METODOLOGIA	29
3.1 MEDIDAS DE VISCOSIDADE	29
3.1.1 PROCEDIMENTO	29
3.1.2 CONFECÇÃO DAS ESFERAS	33
3.1.3 SAIS UTILIZADOS	34
3.1.4 CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO	34
3.2 DISSOLUÇÃO DE ÓXIDOS	35
4 RESULTADOS	37
4.1 MEDIDAS DE VISCOSIDADE	37

5.1.5.3	Ensaio 3 - Base +20% NaF	82
5.1.5.4	Ensaio 4 - Base + 5% KF	83
5.1.5.5	Ensaio 5 - Base + 10% KE	84
5.1.5.6	Ensaio 6 - Base + 20% KF	85
5.1.5.7	Ensaio 7 - Base + 5% CaF ₂	86
5.2	DISSOLUÇÃO DE ALUMINA	89
<u>6. CONCLUSÕES</u>		97
6.1	MEDIDAS DE VISCOSIDADE	97
6.2	DISSOLUÇÃO DE ÓXIDOS DE ALUMÍNIO	97
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>		98
<u>APÊNDICE I – TABELAS DE MEDIDAS DE DIÂMETRO DAS</u>		
<u>ESFERAS</u>		100
ENSAIO 1		100
ENSAIO 2		102
ENSAIO 3		103
ENSAIO 4		104
ENSAIO 5		105
ENSAIO 6		106
ENSAIO 7		107

4.1.1	PERFIS DE TEMPERATURA	37
4.1.1.1	Perfil Temperatura x Posição	37
4.1.1.2	Perfil Temperatura x Tempo	40
4.1.2	MEDIDAS DE VISCOSIDADE PARA CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO	41
4.1.2.1	Experiência de Calibração	41
4.1.3	MEDIDAS DE VISCOSIDADE COM ADIÇÃO DE FLUORETOS	44
4.1.3.1	Ensaio 1	44
4.1.3.2	Ensaio 2	45
4.1.3.3	Ensaio 3	47
4.1.3.4	Ensaio 4	48
4.1.3.5	Ensaio 5	49
4.1.3.6	Ensaio 6	50
4.1.3.7	Ensaio 7	52
4.2	DISSOLUÇÃO DE ALUMINA NOS FLUXOS SALINOS	53
4.2.1	ENSAIOS PRELIMINARES	53
4.2.2	ENSAIOS SISTEMÁTICOS	56
4.2.2.1	Ensaio 1 : Fluxo base	56
4.2.2.2	Ensaio 2 : Fluxo base Saturado com Alumina	57
4.2.2.3	Ensaio 3 : Fluxo Base + 2,5% NaF	58
4.2.2.4	Ensaio 4 : Fluxo base + 5% NaF	60
4.2.2.5	Ensaio 5 : Fluxo base + 10% NaF	61
4.2.2.6	Ensaio 6 : Fluxo base + 2,5% KF	62
4.2.2.7	Ensaio 7 : Fluxo base + 5% KF	64
4.2.2.8	Ensaio 8 : Fluxo base + 10% KF	65
4.2.2.9	Ensaio 9 : Fluxo base + 2,5% CaF2	66
4.2.2.10	Ensaio 10 : Fluxo base + 5% CaF2	68
4.2.2.11	Ensaio 11 : Fluxo base + 10% CaF2	69
4.2.2.12	Ensaio 12 : Fluxo base + 5% NaF Saturada com Alumina	70
4.2.2.13	Ensaio 13 : Fluxo base + 2,5% Na3AlF6	72
4.2.2.14	Ensaio 14 : Fluxo base + 5% Na3AlF6	73
4.2.2.15	Ensaio 15 : Fluxo base + 10% Na3AlF6	74
5. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO		76
5.1	MEDIDAS DE VISCOSIDADE	76
5.1.1	DADOS GERAIS	76
5.1.2	ENSAIO DE CALIBRAÇÃO	77
5.1.3	DADOS DE LITERATURA	78
5.1.4	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CORREÇÃO	78
5.1.5	ENSAIOS SISTEMÁTICOS	80
5.1.5.1	Ensaio 1 - Base + 5% NaF	80
5.1.5.2	Ensaio 2 - Base +10% NaF	81

1 Introdução

1.1 A Indústria de Alumínio

O Brasil é o sexto produtor mundial de alumínio primário, estando atrás de Estados Unidos, Rússia, Canadá, China e Austrália. O Brasil tem a terceira maior reserva de bauxita, minério do qual se extrai a alumina e o alumínio, do mundo, e dispõe também de grande potencial hidrelétrico, fatores que contribuíram para grande desenvolvimento da indústria nacional de alumínio.

A indústria do alumínio é hoje a segunda indústria do ramo metalúrgico do país, ficando atrás apenas da indústria siderúrgica, e produz anualmente cerca de 11,0 milhões de toneladas de bauxita (base seca), 2,8 milhões de toneladas de alumina e 1,2 milhão de toneladas de alumínio primário, enquanto o consumo brasileiro de produtos transformados de alumínio chegou às 556,0 mil toneladas em 1996.

A indústria do alumínio é formada por seis empresas produtoras de metal primário, cerca de trinta empresas produtoras de metal secundário (reciclado), aproximadamente 300 empresas transformadoras de alumínio e cerca de 35.000 pequenas e microempresas entre aplicadoras, transformadoras e revendedoras de produtos de alumínio.

A tabelas a seguir apresentam o perfil produtivo da indústria de alumínio primário no Brasil:

Tabela 1.1 Produção Brasileira de Alumínio Primário
Unidade: (1000 toneladas)

Empresas	1997		1998		Variação 98/97 (%)	
	Outubro	Jan- Outubro	Outubro	Jan- Outubro	Agosto	Jan- Agosto
Albras (PA)	28,6	283,3	30,0	285,6	4,9	0,8
Alcan	8,1	76,9	8,7	85,6	7,4	11,3
Ouro Preto (MG)	4,2	39,4	4,1	40,9	-2,4	3,8
Aratu (BA)	3,9	37,5	4,6	44,7	17,9	19,2
Alcoa	23,7	233,5	24,1	233,6	1,7	0,0
Poços de Caldas (MG)	7,8	75,1	7,7	76,1	-1,3	1,3
São Luís (MA)	15,9	158,4	16,4	157,5	3,1	-0,6
Aluvale (RJ)	4,3	41,7	4,5	42,6	4,7	2,2
Billiton	17,1	171,9	17,6	171,1	2,9	-0,5
São Luis (MA)	13,7	136,8	14,1	136,0	2,9	-0,6
Rio de Janeiro (RJ)	3,4	35,1	3,5	35,1	2,9	0,0
CBA (SP)	18,8	184,1	18,8	183,5	0,0	-0,3
Total	100,6	991,4	103,7	1.002,0	3,1	1,1

Fonte: ABAL

Tabela 1.2 Produção de Alumínio Primário -1998

Unidade: (1000 toneladas)

Período	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1995	100,7	90,3	100,3	97,1	99,9	97,3	101,5	101,3	97,8	101,9	98,0	102,0	1.188,1
1996	100,9	95,1	101,5	97,7	100,9	98,2	101,7	102,0	97,5	101,5	98,8	101,6	1.197,4
1997	100,3	91,0	101,0	98,9	101,4	98,3	101,1	100,7	98,1	100,6	96,7	101	1.189,0
1998	99,4	91,1	100,5	98,3	101,8	99,5	102,4	104,6	-	-	-	-	797,6

Nota:

Capacidade definida em 31 de dezembro de cada ano.

A partir do ano de 1990, os dados refletem a capacidade efetiva de produção de alumínio primário. Nos períodos anteriores a 1990, os dados indicados referiam-se a capacidade nominal.

Fonte: ABAL

Tabela 1.3 - Capacidade de produção instalada de alumínio primário

Unidade: (1000 toneladas)

Produtores	Localização	1995	1996	1997
Albras	Belém - PA	345	345	345
Alcan		109	109	109
	Ouro Preto - MG	51	51	51
	Aratu - BA	58	58	58
Alcoa		284	284	284
	Poços de Caldas - MG	91	91	91
	São Luis - MA	193	193	193
Aluvale	Santa Cruz - RJ	51	51	51
Billiton		211	211	211
	São Luis - MA	169	169	169
	Santa Cruz - RJ	42	42	42
CBA	Mairinque - SP	222	222	222
Total	

Tabela 1.4 - Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio

O Brasil é o sexto maior produtor de alumínio primário, precedido do Estados Unidos, Rússia, Canadá, China e Austrália.

Composição	1995	1996	1997
Empregos diretos (30/06)	57.912	53.140	50.801
Faturamento (US\$ bilhões)	5,5	6,0	6,6
Investimentos (US\$ bilhões)	0,9	1,0	0,8
Participação no PIB (%)	1,0	1,0	0,8
PIB Industrial (%)	2,8	2,4	2,3
Produção de Alumínio Primário (mil t)	1.188	1.197	1.189
Consumo Doméstico de Transformados de Alumínio (mil t)	503	547	647
Consumo "Per Capita" (kg/hab./ano)	3,2	3,5	4,1
Exportação (mil t) (peso alumínio)	799	806	805
Importação (mil t) (peso alumínio)	96	86	137
Balança Comercial da Indústria do Alumínio (US\$ milhões FOB)			
Exportações	1.799	1.664	1.685
Importações	479	368	479
Saldo	1.320	1.298	1.206

Tabela 1.5 - Mercado Interno de Produtos

Transformados de Alumínio

Produção (1000 t)

Tipos de produtos	1995	1996	1997
Chapas e lâminas	129,6	155,2	165,3
Laminação Pura	91,0	113,8	127,2
Laminação Artefatos	32,4	34,7	31,5
Laminação Impactados	6,2	6,7	6,2
Folhas	43,4	48,9	46,6
Extrudados	120,2	124,6	135,0
Fios e cabos condutores	81,2	95,8	103,4
Fundidos e forjados	98,5	100,9	104,6
Pó	13,7	13,2	15,0
Usos destrutivos	28,0	28,2	31,2
Outros	3,6	2,9	3,6
Total	518,2	569,7	604,3

Tabela 1.6 - Consumo doméstico (1000 t)

Tipos de produtos	1995	1996	1997
Chapas e lâminas	172,3	191,2	256,9
Laminação Pura	134,2	150,2	220,0
Laminação Artefatos	31,8	34,2	30,4
Laminação Impactados	6,3	6,8	6,5
Folhas	41,9	45,8	46,0
Extrudados	123,0	127,7	138,1
Fios e cabos condutores (2)	22,5	32,1	54,8
Fundidos e forjados	84,4	88,9	91,4
Pó	13,4	12,6	15,1
Usos destrutivos	28,0	28,2	31,2
Outros	17,6	20,7	13,2
Total	503,1	547,2	646,7

Fonte: Empresas do setor

Tabela 1.7 - Importações Brasileiras de Alumínio

(PESO TOTAL)

Capítulo 76 da NCM	Janeiro-Setembro/97		Janeiro-Setembro/98		Variação 98/97 (%)	
	Volume (mil t)	Valor FOB (milhões US\$)	Volume (mil t)	Valor FOB (milhões US\$)	Volume	Valor FOB
Alumínio Primário/Ligas	4,7	9	4,3	7	-8,5	-22,2
Sucata	1,1	1	3,3	3	-	-
Semi/Manufaturados	96,6	334	110,4	382	14,3	14,4
Total	102,4	344	118,0	392	15,2	14,0
Peso Alumínio (e)	97,2	-	116,1	-	19,4	-

(e) - estimado com base em pesquisa de mercado NAP/MA

Tabela 1.8 - Importações Brasileiras de Alumínio

(PESO ALUMÍNIO)

Volume: (1000 t)	1994	1995	1996	1997
Alumínio Primário/Ligas	7,3	15,1	8,6	5,7
Sucata	1,0	2,3	2,6	1,4
Sémi/Manufaturados	47,7	78,6	74,3	129,4
Total	56,0	96,0	85,5	136,5

Fonte: Divisão de Estudos Tributários da Secretaria da Receita Federal.

Tabela 1.9 - Exportações Brasileiras de Alumínio

(PESO TOTAL)

Capítulo 76 da NCM + Posição 8409	Janeiro-Setembro/97		Janeiro-Setembro/98		Variação 98/97 (%)	
	Volume (mil t)	Valor FOB (milhões US\$)	Volume (mil t)	Valor FOB (milhões US\$)	Volume	Valor FOB
Alumínio Primário/Ligas	556,2	889	500,3	709	-10,1	-20,2
Sucata	3,5	4	7,2	7	-	-
Semi/Manufaturados	75,9	266	53,5	224	-29,5	-15,8
Total	635,6	1.159	561,0	940	-11,7	-18,9
Peso Alumínio (e)	619,4	-	558,5	-	-9,8	-

(e) - estimado com base em pesquisa de mercado NAP/MA

Tabela 1.10 - Exportações Brasileiras de Alumínio**(PESO ALUMÍNIO)**

Volume: (1000 t)	1994	1995	1996	1997
Alumínio	777,8	703,0	709,0	716,2
Primário/Ligas				
Sucata	-	1,1	1,0	4,8
Semi/Manufaturados	98,3	94,4	95,9	83,5
Total	876,1	798,5	805,9	804,5

Fonte: Depto. de Operações de Comércio Exterior

1.2 A Reciclagem no Brasil

A atividade da reciclagem tem-se mostrado no Brasil e no mundo todo um investimento, que apesar de oneroso, revela-se bastante rentável além de contar com o apoio da opinião pública. Assim sendo, é uma atividade que apresenta crescimento nos últimos anos. Além disso, aumenta a atividade econômica, gera empregos e melhora a qualidade de vida do planeta. Estima-se que o Brasil perde por ano cerca de R\$ 4,6 bilhões quando deixa de reciclar o lixo que produz⁽¹⁾. Este cálculo, referente a 1996, considera os gastos que poderiam ser evitados com energia elétrica, água, matéria prima e atendimento à legislação ambiental, ao se fabricar papel, vidro, plástico, e latas de alumínio e de aço. Além disso, o Brasil perde quando não faz compostagem de lixo orgânico que poderia ser utilizado como fertilizante, perde com a exploração desnecessária de recursos naturais substituíveis por materiais reciclados, com a construção de aterros sanitários e incineração de resíduos.

Mesmo assim, o governo brasileiro não possui sequer números atualizados específicos sobre nível de reciclagem de resíduos sólidos. Os últimos dados, fornecidos pelo IBGE⁽¹⁾, datam de 1992: à época apenas 1% do lixo urbano era destinado à incineração, compostagem ou reciclagem. A grande

maioria, 76% do total era jogada em lixões a céu aberto. Aterros controlados, em que o lixo é apenas coberto com uma camada de terra, recebiam 13%. E somente 10% iam para aterros sanitários, construídos de forma a evitar contaminação do meio ambiente. Com as crescentes taxas de reciclagem de alumínio e outros materiais, com certeza pode-se afirmar que este cenário já apresenta-se bastante distinto do panorama atual de descarte de resíduos sólidos.

Do pouco material reciclado no país, grande parte é colhida na rua e nos lixões por catadores que fazem disso uma fonte de renda. A coleta seletiva é praticada em pouco mais de 80 municípios brasileiros⁽¹⁾, sendo a maior parte destes municípios localizados nas regiões Sul e Sudeste, onde a população aparenta estar melhor informada e conscientizada dos problemas ambientais.

Em Curitiba, a atuação da prefeitura é fundamental para a coleta seletiva, que hoje corresponde a 20% do lixo doméstico produzido – o maior índice do país, segundo o governo local⁽¹⁾.

O principal impecílio para a reciclagem é de ordem econômica. Embora o material reciclável tenha valor econômico, os custos da coleta seletiva podem tornar inviáveis os projetos de reciclagem, principalmente em países com dimensões continentais como o Brasil, onde o gasto com transporte tende a não compensar os ganhos. Algumas das soluções são a prefeitura subsidiar a coleta, a população pagar uma taxa extra pela reciclagem, ou as empresas fabricantes das embalagens descartáveis se responsabilizarem pelo destino ambientalmente correto do lixo fabricado por elas.

Por enquanto não há nada definido. O Brasil nem sequer tem uma legislação sobre gerenciamento de resíduos sólidos, mas há vários projetos

tratando no Congresso. Uma das propostas é criar o Programa Brasileiro de Reciclagem, cuja uma das medidas seria oferecer linhas de crédito para pequenas empresas recicadoras e para catadores de lixo adquirirem prensas. O objetivo é reduzir desperdícios na economia e melhorar a imagem do produto nacional exportado, pois, o mercado internacional tem valorizado cada vez mais as companhias adeptas da reciclagem.

A seguir é apresentado um ranking de limpeza, com a destinação dos resíduos sólidos em diversos países, por ordem decrescente nos índices de reciclagem e compostagem⁽¹⁾:

- **1º Suíça:** 59% incinerado, 12% depositado em aterros, 7% compostado, 22% reciclado
- **2º Áustria:** 11% incinerado, 65% aterros, 18% compostado, 6% reciclado
- **3º Dinamarca:** 48% incinerado, 29% aterros, 4% compostado, 19% reciclado
- **4º Holanda:** 35% incinerado, 45% aterros, 5% compostado, 15% reciclado
- **5º Suécia:** 47% incinerado, 34% aterros, 3% compostado, 16% reciclado
- **6º França:** 42% incinerado, 45% aterros, 10% compostado, 9% reciclado
- **7º Alemanha:** 34% incinerado, 46% aterros, 2% compostado, 16% reciclado
- **8º Estados Unidos:** 16% incinerado, 67% aterros, 2% compostado, 15% reciclado

- **9º Noruega:** 22% incinerado, 67% aterros, 4% compostado, 7% reciclado
- **10º Itália:** 16% incinerado, 74% aterros, 7% compostado, 3% reciclado
- **11º Japão:** 75% incinerado, 20% aterros, 5% compostado (reciclado não entra na conta)
- **12º Reino Unido:** 8% incinerado, 90% aterros, 2% reciclado
- **13º Brasil:** 1% incinerado, 89% aterros, 0,9% compostado, 1% reciclado

Cumpre ressaltar que no Brasil, dos 89% do lixo que vão para aterros, 76% vai para lixões a céu aberto e apenas 13% vai para aterros controlados.

1.3 A Reciclagem do Alumínio

A metalurgia secundária do alumínio, como em todos processos de reciclagem, permite a economia de matérias primas minerais e de energia. Assim, consome-se 17000 kWh de energia elétrica para a produção de 1 tonelada de alumínio a partir do Bauxito, enquanto que a mesma tonelada de alumínio é produzida por reciclagem com um consumo de cerca de 750 kWh. Portanto, o alumínio reciclado substitui o alumínio primário com um ganho de 95%⁽²⁾.

Outro aspecto positivo da reciclagem do alumínio está ligado ao impacto ambiental. A produção de 1 tonelada de alumínio primário implica no consumo de aproximadamente 4 toneladas de Bauxito e na produção de 2 toneladas de lama

vermelha²⁾, além da emissão de fluoretos. A atividade de mineração também causa distúrbios ao meio ambiente.

Desta maneira, o balanço energético totalmente favorável faz do alumínio um excelente produto para reciclagem. O alumínio leva, ainda, outra vantagem sobre os demais materiais por possuir um maior valor de mercado agregado à sucata.

A latinha, o mais precioso material reciclável, custa de R\$ 350 a R\$ 650 a tonelada (62 mil unidades), dependendo da região do país e do estado da sucata: se estiver limpa tem mais valor. Vale 26 vezes mais que o vidro, 18 vezes mais que o papel e papelão e 7 vezes mais que o plástico. É valiosa porque tem quem pague por ela. Além disso, assim como qualquer metal pode ser reciclada infinitas vezes sem perder nenhuma das suas propriedades.

Em 1990, a Latasa produziu a primeira lata de alumínio no Brasil e, no ano seguinte iniciou o programa de reciclagem. No início a dificuldade era conseguir as latinhas numa época em que a coleta seletiva no país era ainda mais incipiente? A solução foi colocar postos de recompra em alguns supermercados. Em 1993 o programa se estendeu a escolas, e depois a entidades sem fins lucrativos. Só que, em vez de pagar pelas latas, a Latasa passou a trocá-las por equipamentos – computadores, ventiladores, bebedouros – comprados diretamente dos fornecedores a preços abaixo do mercado.

No primeiro semestre de 1998, o Brasil atingiu um índice de reciclagem de latas de alumínio de 66%, recorde desde que este tipo de embalagem foi introduzido no país. O índice, um dos maiores do mundo, incluindo-se países desenvolvidos e com tradição em reciclagem como o Japão, foi apurado pela

ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), e representa aumento de 2 pontos percentuais em relação ao último índice, de 1997.

Em volume, este índice representa mais de 36 mil toneladas de alumínio, correspondendo a quase 2,5 bilhões de latas recicladas. O critério de cálculo do índice de reciclagem das latas é obtido através da relação entre *Consumo* e *Disponibilidade*, conforme segue:

Consumo: Compra de sucata de latas usadas informada pelas empresas refusoras de sucata, mais exportações de sucata de latas de empresas não refusoras. A partir de 1996, é utilizado um redutor médio de 6% no volume de compras, relativo a umidade e outros materiais que podem ser encontrados nos lotes, sendo que, a partir de 1997, algumas empresas passaram a informar redutores específicos.

Disponibilidade: Vendas efetivas de latas, considerando: vendas no mercado interno informadas pelos produtores de latas, mais importação de latas cheias e de latas para envase.

A figura 1.1, abaixo apresenta a evolução do índice de reciclagem de latas de alumínio em vários países⁽³⁾:

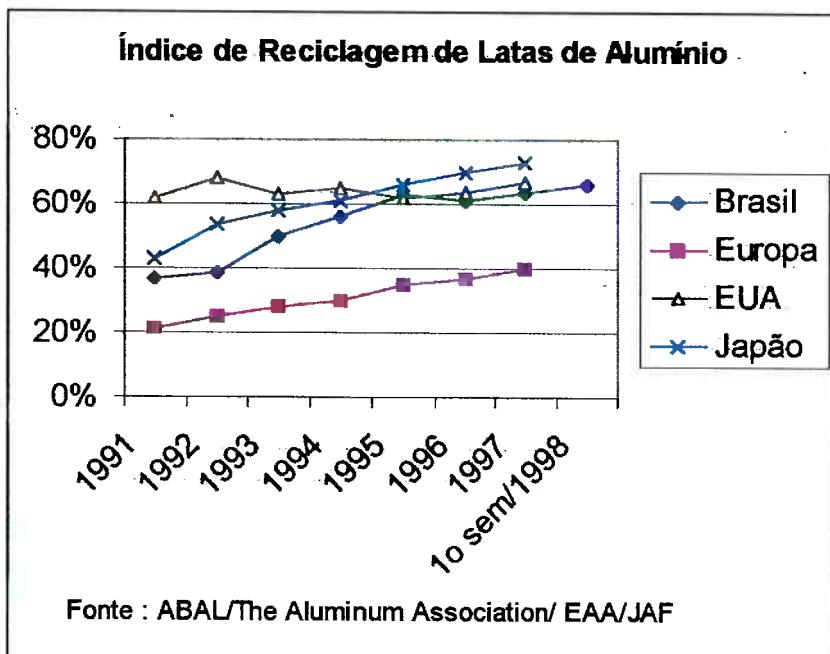


Figura 1.1 – Evolução do índice de reciclagem de latas de alumínio em vários países

1.4 Aspectos Tecnológicos da Reciclagem de Alumínio

A metalurgia secundária do alumínio pode ser dividida em dois grupos principais: refusão de sucatas e tratamento de drosses.

As drosses são resultantes dos processos de fundição de alumínio. Devido a alta reatividade do alumínio com o oxigênio ocorre a formação de uma camada superficial de óxido, a qual separa o metal líquido da atmosfera oxidante, atuando assim como barreira para o processo de oxidação. As eventuais turbulências geradas pelo manuseio do banho líquido fazem com que haja a nova exposição do alumínio causando um aumento da camada de óxido. A remoção posterior desta camada superior acarreta o arraste de alumínio juntamente com o óxido, gerando assim uma fase heterogênea chamada de

drosse que é constituída basicamente de óxidos, alumínio e demais impurezas que se encontrem na superfície do banho líquido.

Como a oxidação é um fenômeno superficial, a menor espessura da matéria prima a ser fundida implica em uma mais intensa formação de óxido, uma vez que a relação área de superfície/volume torna-se maior.

A drosse é também popularmente chamada entre os fundidores de borra.

Assim, na metalurgia secundária do alumínio visa-se recuperar o alumínio contido em sucatas e drosses bem como dar uma destinação aos sub-produtos destas operações.

1.4.1 Reciclagem ou Refusão de Sucatas

A refusão de sucatas é normalmente feita em fornos rotativos ou, em menor escala, em fornos a cadiño e nesta operação são eventualmente usados fluxos protetores e eliminadores de inclusões⁽⁴⁾. O volume destes fluxos não ultrapassa 2% do volume da carga, passando o metal fundido para o lingotamento ou para fornos de manutenção e a drosse é armazenada em recipientes de aço ao lado dos fornos. Exceto quando se trabalha com sucatas de baixa espessura (por exemplo cavacos, latas de bebidas ou papel alumínio) não é comum o uso de frações de sais fundidos acima de 2%.

As temperaturas envolvidas nos processos de fundição de alumínio estão na faixa de 700 a 800°C, o mesmo vale para a recuperação do alumínio contido em drosses.

Na reciclagem de sucatas de baixa espessura existe uma formação de drosses mais intensa, assim nestes casos os procedimentos são semelhantes aos utilizados na recuperação de alumínio a partir de drosses.

Na Tabela 1.11⁽⁴⁾ abaixo são apresentadas as principais fontes de sucata de alumínio juntamente com as impurezas físicas mais comuns a cada tipo.

Tabela 1.11- Fontes de sucata e principais impurezas⁽⁴⁾.

SUCATA	IMPUREZAS FÍSICAS
Cabos	Fe, Zn, Cu e orgânicos
Estamparia	Vernizes, tintas e orgânicos
Perfis	Fe, Cu, plásticos
Chapas	Fe, óxidos, terra
Papel alumínio	Óleos, restos de alimentos, papel
Cavacos	Óleos, Fe, Zn, Cu, Si
Persianas	Tintas
Bisnagas	Fe, tintas, plásticos
Radiadores	Fe, Sn, Pb, plásticos
Blocos de motores	Fe, Zn, Sb
Pistões	Fe, Cr, óleo, orgânicos
Latas de bebidas	Fe, Cu, Mg, tintas, vernizes

A seguir, tem-se na Tabela 1.12 a composição química das ligas de alumínio encontradas nas respectivas sucatas⁽⁴⁾ (sem contaminações - teores médios)

Tabela 1.12- Composição química média das principais fontes de sucata⁽⁴⁾.

SUCATA	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Ti
Cabos	0,2	0,02	0,26	0,08	0,01	0,03	0,003	0,008
Estamparia	0,12	0,13	0,4	0,004	0,008	0,005	0,001	0,004
Perfil	0,37	0,45	0,2	0,003	0,05	0,004	0,003	0,02
Chaparia	0,45	0,02	0,75	0,18	1,2	0,01	0,008	0,02
Panelas	0,11	0,04	0,5	0,009	0,002	0,02	0,005	0,02
Papel alumínio	0,15	0,02	0,4	0,05	0,02	0,008	0,001	0,004
Cavaeo	0,3	0,26	0,3	0,02	0,05	0,02	0,004	0,02
Persianas	0,24	1,6	0,2	0,01	0,04	0,02	0,03	0,01
Bisnagas	0,12	0,01	1,4	0,2	0,05	0,2	-	-
Cabeçotes	6	0,03	0,6	4,5	0,3	1,2	0,13	0,11
Pistões	0,11	0,8	0,45	2	0,01	0,2	0,9	0,02
Telhas	0,2	0,29	0,58	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02
Latas de bebidas	0,3	4	0,4	0,2	1	0,25	0,01	0,02

1.4.2 Fusão Assistida por Fluxos Salinos

A função primária dos fluxos salinos é a de atuar como barreira para o prosseguimento do processo de oxidação superficial do alumínio. Assim, os processos de recuperação do alumínio disponível em drosses ou recuperação de sucatas de baixa espessura assistidos por fluxos salinos são efetuados em fornos rotativos, os quais possuem capacidade de processamento entre 1 e 10 t de drosse ou alumínio por hora. Estes fornos usam como fonte de calor a queima de um combustível. O combustível queimado depende muito da oferta local do mesmo.

Os fornos rotativos são empregados por permitirem a constante agitação da carga, o que causa um aumento no rendimento do processo⁽⁵⁾.

A quantidade de fluxo salino, adicionado no início do aquecimento, varia entre 20 a 65% da carga^(6,7).

Os fluxos devem ter os seguintes requisitos:

ponto de fusão inferior ao do alumínio;

- baixa viscosidade;
- facilmente separáveis do banho líquido;
- não devem reagir com o metal;
- não devem introduzir contaminantes ao metal;
- não devem ser higroscópicos;
- baixa pressão de vapor;
- baixo custo;
- serem recicláveis a um baixo custo.

As principais funções dos fluxos salinos são:

- proteger o metal fundido contra a oxidação;
- ajudar na remoção da camada superficial de óxido formada no alumínio (previamente ou durante o aquecimento no forno rotativo) a ser recuperado;
- promover o coalescimento das gotas de alumínio;
- manter os óxidos em suspensão.

Os fluxos salinos são constituídos de misturas de NaCl e KCl, sendo mais comumente empregadas misturas equimolares por constituírem a composição eutética deste sistema. Além destes cloretos, fluoretos também podem ser adicionados aos fluxos. Os principais fluoretos utilizados são⁽⁸⁾: criolita, NaF, KF, CaF₂ e MgF₂.

1.4.2.1 Viscosidade

Tendo em vista o objetivo final deste trabalho como sendo a medida do efeito da viscosidade dos fluxos salinos na reciclagem do alumínio, convém relacionar algumas teorias propostas para explicar o comportamento viscoso de um fluxo, dentre as quais destacam-se três:

- Teoria molecular dos líquidos
- Teoria do fluxo viscoso
- Teoria da difusão

1.4.2.1.1 Teoria molecular dos líquidos

Esta teoria apresenta-se relacionada com a estrutura molecular do líquido, ou seja, o arranjo atômico que o líquido apresenta. Sabe-se que as fases líquidas apresentam ordenação de forma descontínua e de curta distância, diferentemente dos sólidos. Portanto, de acordo com esta teoria, quanto mais ordenada a estrutura e quanto mais próximas estiverem as regiões de ordenação, maior será a viscosidade do líquido, devido à maior ação das forças intermoleculares, responsáveis pela maior facilidade de transferência de quantidade de movimento, quando da solicitação mecânica de uma região do líquido.

1.4.2.1.2 Teoria do fluxo viscoso

A Teoria do fluxo viscoso afirma que para a movimentação de moléculas em relação a seus vizinhos, é necessário vencer uma barreira de potencial considerando-se que duas moléculas suficientemente livres, podem ser impedidas de se moverem por outras moléculas. Havendo tensão de cisalhamento, a barreira de potencial será deformada, favorecendo a rotação em um sentido, que pode ser uma medida de fluidez. A fluidez é proporcional ao inverso da viscosidade.

1.4.2.1.3 Teoria da difusão

A teoria da difusão é uma teoria da viscosidade desenvolvida em termos do coeficiente de auto difusão do líquido. Supõe-se, segundo esta teoria, que uma tensão de cisalhamento acarreta um aumento de deslocamento na direção de cisalhamento, diminuindo na direção oposta.

Assim como na difusividade, a viscosidade é expressa em termos de uma energia de ativação do fluxo viscoso, na forma da equação:

$$\eta = \eta_0 \exp(E_\eta/RT)$$

Onde:

- η : viscosidade, poise ou centipoise
- η_0 : constante característica do líquido, poise ou centipoise
- E_η : energia de ativação do fluxo viscoso, cal/mol
- R : constante universal dos gases, (1,987 cal/K mol)
- T : temperatura absoluta, K

Cumpre ressaltar que a viscosidade de líquidos de alta temperatura, como são conhecidas as substâncias que à temperatura ambiente são sólidas, como por exemplo o caso dos sais fundidos em estudo, é de fundamental importância para o estudo tanto da estrutura dos líquidos quanto para aplicações industriais em fenômenos de transporte⁽⁹⁾, e que a medida das propriedades desses fluxos apresenta sempre dificuldades devido às altas temperaturas envolvidas.

1.4.2.2 Métodos de medida de Viscosidade

Neste tópico citaremos alguns métodos pelos quais pode-se medir viscosidade de líquidos⁽¹⁰⁾, além do método por este estudo adotado que é o “body falling method”.

O objetivo deste tópico é apenas citar os métodos sem entrar em muitos detalhes.

1.4.2.2.1 Capilar (Capillary or run-out method)

Este método consiste na passagem de um fluido por um capilar sob uma pressão exercida por um elemento que penetra o capilar, considerando-se a saída deste mesmo fluido pelo espaço entre a parede do capilar e o elemento que penetra o capilar. A grandeza medida é o tempo de passagem do líquido pelo capilar. A figura 1.2 ilustra esquematicamente o método.

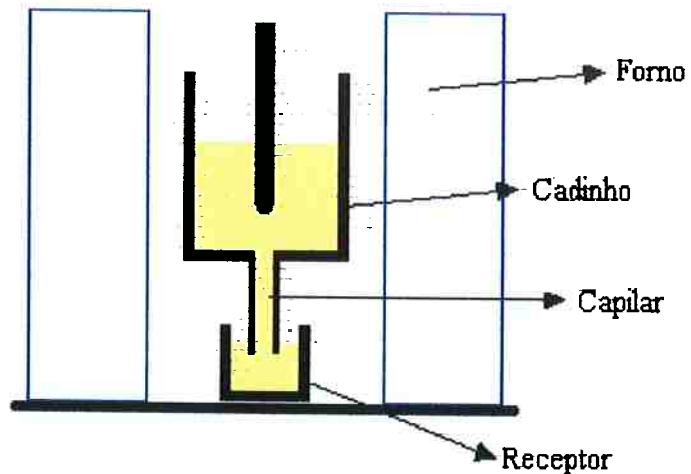


Figura 1.2 – Representação esquemática do método

1.4.2.2.2 Cilindro Rotativo (Rotation Method)

Este consiste na rotação contínua de um cilindro em um líquido movido por um motor que medem rotação com velocidade angular constante, onde a viscosidade do líquido encontra-se relacionada com o torque exercido pelo motor que gira o cilindro, torque este que é a grandeza medida experimentalmente. A figura 1.3 representa esquematicamente o método.

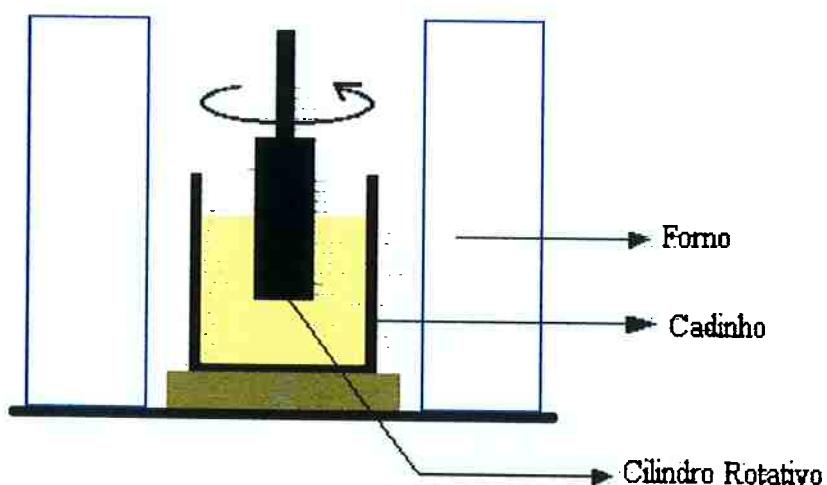


Figura 1.3 – Representação esquemática do método

1.4.2.2.3 Pêndulo Oscilante (Oscillating body Method)

O método do pêndulo oscilante consiste em aplicar uma torção a uma fibra à qual está presa um cilindro que fica submerso no líquido e uma escala, cujo decréscimo logarítmico ao longo das contínuas oscilações é a grandeza experimental. Este método apresenta dificuldades experimentais para medir-se a cada oscilação qual foi a magnitude da mesma, por tratar-se de um modelo dinâmico. A figura 1.4 apresenta representação esquemática do processo.

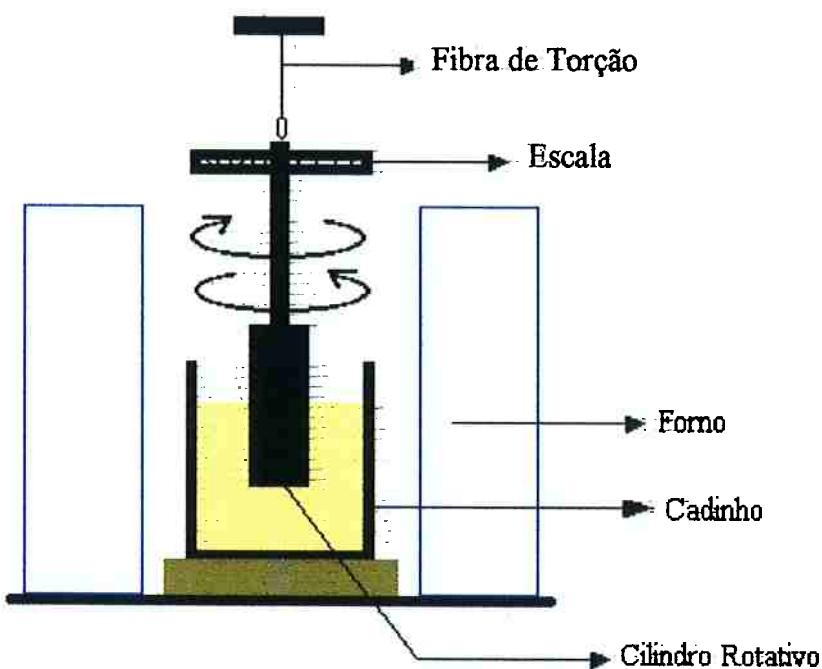


Figura 1.4 – Representação esquemática do método

1.4.2.2.4 Viscosímetro Herty

A viscosidade Herty é medida pelo vazamento do material líquido em um molde metálico que apresenta um canal fino no qual o material se solidifica, tendo maior ou menor avanço de acordo com o material líquido ser mais ou menos viscoso. A partir daí, mede-se a distância que o material percorreu no

canal até se solidificar. Este é um método muito utilizado para a medida de viscosidade de escórias. A figura 1.5 abaixo ilustra o viscosímetro Herty esquematicamente.



Figura 1.5 – Representação esquemática do viscosímetro Herty

1.4.2.2.5 Corpo Cadente (Body Falling Method):

Este procedimento foi o escolhido por ser considerado o mais viável e preciso nas condições de ensaio a serem consideradas. Consiste na queda de um corpo esférico de raio conhecido através de um fluido o qual deseja-se medir a viscosidade. Este método é regido pela Lei de Stokes, e a grandeza a ser medida é o tempo que o corpo leva para percorrer uma distância conhecida, podendo-se calcular a velocidade média do corpo em queda. Este método será mais detalhado ao longo dos procedimentos experimentais.

1.4.3 Corrosão de Óxidos por Fluxos Salinos

Outro aspecto da influência dos fluxos salinos na reciclagem de latas de alumínio a ser abordado neste trabalho é o da dissolução dos óxidos que formam uma camada contínua e impermeável sobre as latas.

Para este trabalho é, portanto, interessante que se estude a corrosão de materiais cerâmicos, em especial óxidos, em meio corrosivo composto por sais fundidos, em especial cloretos e fluoretos. Segundo Lay ⁽¹¹⁾, um dos fatores mais

importantes na determinação da resistência de um material cerâmico à corrosão é a solubilidade deste material no banho. Lay⁽¹¹⁾ apud Elwell & Scheel aponta uma série de valores importantes para esta compreensão, como fonte de informação sobre os efeitos corrosivos de haletos, sais e óxidos. Há ênfase em solventes baseados em composto de chumbo e bismuto, boratos, vanadatos, molibdatos e tungstatos de metais alcalinos, haletos básicos, em especial fluoretos.

A alumina é considerada um dos óxidos mais versáteis e mais resistentes à corrosão por uma variedade de fluxos, sendo resistente à ataque corrosivo de cloretos, brometos e iodetos, sendo, todavia sujeita ao ataque de fluoretos.

Os fluoretos formam compostos bastante corrosivos, que atacam severamente a maioria dos materiais cerâmicos; são capazes de dissolver a maioria dos óxidos, e agir como fluxante para a remoção de filmes de óxidos protetores sobre não-óxidos. Cloretos são bem menos corrosivos que os fluoretos, tendo poder de dissolução de óxidos. Têm ação muito restrita sobre alumina abaixo de 1000°C.

O estudo da viscosidade objetiva a definição de uma composição que apresente viscosidade o mais baixa possível, para que se possa ter a menor perda possível de alumínio na borra, pois a baixa viscosidade favorece o coalescimento e a decantação do alumínio.

Por outro lado é preciso garantir-se que a dissolução dos óxidos será também bastante eficiente, sendo este o outro objetivo principal deste trabalho.

É preciso, portanto, estabelecer-se uma relação de compromisso entre os dois aspectos estudados, considerando-se as influências das diferentes adições de fluoretos sob os dois aspectos estudados. Um posterior estudo mais

abrangente pode analisar outros fatores também importantes ao estudo da adição de fluoretos aos fluxos salinos utilizados na reciclagem de latas de alumínio.

2 Objetivos

O objetivo fundamental deste trabalho é estudar a influência da adição de fluoretos aos fluxos salinos empregados na reciclagem de latas de alumínio enfocando-se dois aspectos principais: a influências dessas adições de fluoreto sobre a viscosidade do fluxo, a sobre a capacidade de dissolver óxidos de alumínio.

3 Metodologia

Neste capítulo serão descritos os procedimentos, materiais e dispositivos empregados nas duas frentes de pesquisa, tanto nas medidas de viscosidade quanto nas medidas de dissolução de óxidos.

3.1 *Medidas de Viscosidade*

3.1.1 *Procedimento*

O método a ser empregado é o do corpo em queda “falling body method”. Este método consiste em medir a velocidade de queda de uma esfera em um líquido incompressível⁽¹⁰⁾. O método baseia-se na Lei de Stokes e supõe que o movimento de queda é resultante da ação da gravidade. A viscosidade é dada por:

$$\eta = 2 * r_0^2 * g * (\rho_e - \rho_l) / (9 * v_e)$$

Onde:

η : viscosidade, Poise

r_0 : raio da esfera, cm

g : aceleração da gravidade, cm.s⁻²

ρ_e : densidade da esfera, g.cm⁻³

ρ_l : densidade do líquido, g.cm⁻³

v_e : velocidade da esfera, cm.s⁻¹

Levando-se em conta, porém, a expansão finita do líquido dentro do tubo, uma correção na Lei de Stokes se faz necessária⁽¹⁰⁾ a nova equação fica:

$$\eta = 2 * r_0^2 * g * (\rho_e - \rho_l) / 9 * (1 + 2,1d/D) * v_e$$

Onde:

d : diâmetro da esfera, cm

D: diâmetro do tubo, cm

O dispositivo especialmente construído para este experimento foi constituído de um forno tubular, com diâmetro interno de 7,5 cm e comprimento de 75 cm, colocado na posição vertical. Neste forno foi colocado um tubo de quartzo transparente de 20 mm de diâmetro interno. O tubo tinha a extremidade inferior previamente fechada com o auxílio de um maçarico. No tubo foi introduzido o fluxo salino, que também é transparente nas temperaturas de ensaio, o que permitia a perfeita visualização da esfera cadente. A velocidade de queda foi calculada pelo tempo medido entre dois pontos do tubo. Como o forno permanecia aberto para a visualização da esfera cadente, foi necessária a vedação desta abertura durante aquecimento do forno. Esta vedação foi feita com manta isolante de alumina de forma a deixar apenas uma pequena janela removível para a visualização.

A figura 3.1 ilustra esquematicamente a montagem.

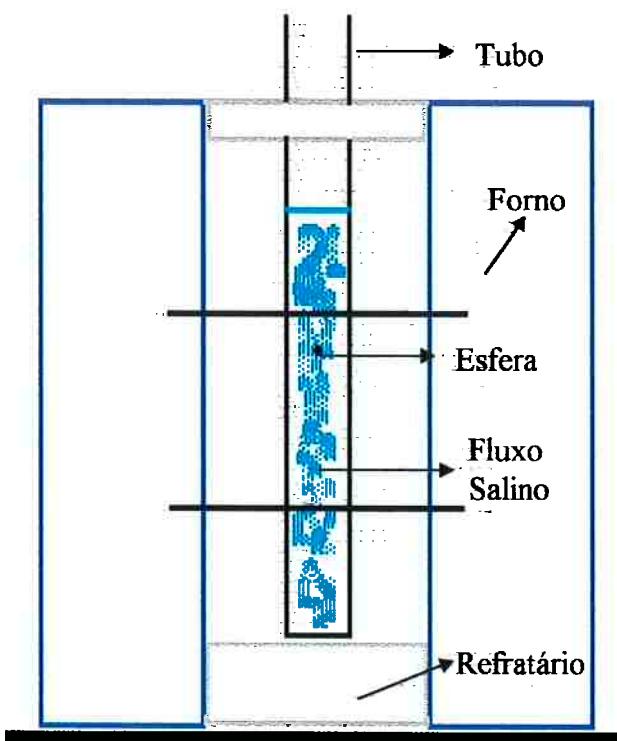


Figura 3.1: Representação esquemática da aparelhagem

Para efetuar-se a medida, inseria-se uma esfera que já teve seu diâmetro previamente medido com o auxílio de um paquímetro na extremidade superior do tubo, aguardando-se cerca de 5 segundos para que a esfera pudesse desvincilar-se de eventuais bolhas de ar às quais esta pudesse estar presa. Então abria-se a janela de observação do forno retirando-se a manta de alumina para fazer-se a observação da descida da esfera, cronometrando-se o tempo que esta leva para descer. Fechava-se novamente o forno, a aguardava-se cerca de 5 minutos para efetuar-se nova medição para que a perda de calor do forno não seja tão acentuada.

As composições utilizadas para os ensaios foram: Base com adições de 5%, 10%, e 20% de cada um dos seguintes fluoretos: NaF, KF e CaF₂.

Uma dificuldade foi encontrada na fase final dos ensaios com adição de fluoretos: Conforme pode-se observar pelo diagrama de fases ternário⁽¹³⁾ NaCl - KCl - CaF₂, o ponto de fusão da mistura sobe muito com pequenas adições de CaF₂:

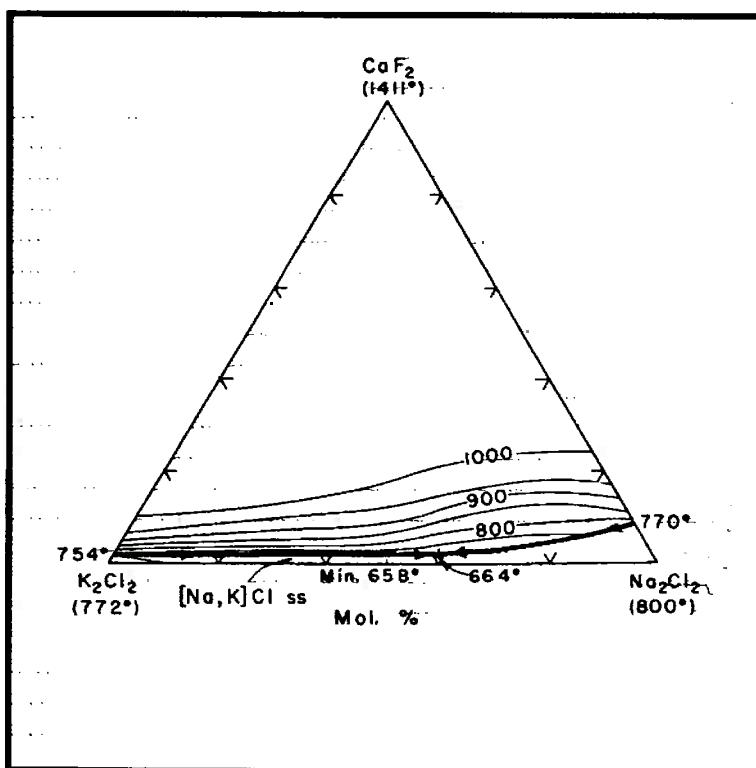


Figura 3.2 - Diagrama de Fases do sistema NaCl / KCl / CaF₂

Dado que as condições experimentais tornaram-se desfavoráveis e, principalmente, com o aumento de temperatura de fusão, que ficou bastante acima dos 700 °C a 800 °C usuais na reciclagem de alumínio por fluxos salinos, desistiu-se de realizar-se estas medidas por considerar-se essas composições economicamente inviáveis, dadas as altas temperaturas envolvidas.

3.1.2 Confecção das esferas

O material utilizado para a confecção das esferas foi o grafite. Inicialmente buscou-se utilizar grafite de eletrodo, que é mais mole, facilitando o trabalho de confecção das esferas, mas, uma vez que sua densidade não era conhecida com precisão, optou-se pela utilização de grafite de baixa porosidade, de densidade 1,7 g/cm³

Para a confecção das esferas, inicialmente quebrava-se com marteladas o grafite em pequenos pedaços, que apresentavam-se em forma que tendia de planar a acicular devido ao hábito de fratura do grafite, tendo cerca de 5 a 7mm cada pedaço. Esses pedaços tinham suas pontas mais acentuadas lixadas manualmente em lixa 180, de modo a ficarem o mais equiaxial possíveis. Esses pedaços equiaxiais eram girados, então, em um gabarito de furos circulares de diâmetro decrescente de modo a adotarem forma esférica e terem seu diâmetro reduzido, pois, segundo L. R. Bacon⁽¹²⁾ , a equação da Lei de Stokes corrigida só vale para $d / D \leq 0,1$,

O gabarito consiste em uma chapa de aço de espessura 1mm com furos de 3,8mm, 3,3mm, 2,7mm e 2,2mm de diâmetro, que resultam esferas de 1,9 a 2,1mm de diâmetro final.

3.1.3 Sais Utilizados

Os sais utilizados para os ensaios foram os seguintes:

- **KCl** : Pureza Analítica, fornecedor: Dinâmica reagentes analíticos, teor mínimo: 99,5%, Lote: 785, Responsável: CRQ 04424460 4^a região.
- **NaCl** : Pureza Analítica, fornecedor: Dinâmica reagentes analíticos, teor mínimo: 99,5%, Lote: 752, Responsável: CRQ 04424460 4^a região.
- **KF** : Pureza Analítica, fornecedor: Nuclear reagentes analíticos, Lote: 011872, Responsável: CRQ 04308930.
- **NaF** : Pureza Analítica, fornecedor: Nuclear reagentes analíticos, Lote: 011654, Responsável: CRQ 04308930.
- **CaF₂** : Extra Puro, fornecedor: BDH Chemicals Ltd, Poole England, teor mínimo: 99,8%, lote : 27594.

3.1.4 Calibração do Dispositivo

Para a calibração do dispositivo foram feitas experiências com sais de viscosidade conhecida, para comparação com os dados de literatura⁽¹⁴⁾. São estes: NaCl P.A., KCl P.A., e a mistura equimolar de NaCl e KCl. A partir destes resultados pode-se estabelecer um coeficiente de correção para o dispositivo, como de costume, pois cada dispositivo apresenta um fator de correção diferente⁽¹⁰⁾.

Para melhor controle da temperatura do fluxo foram traçados perfis de temperatura, garantindo que a temperatura do fluxo era a desejada para o ensaio. Foram feitos dois perfis de temperatura: um primeiro com o forno

fechado, medindo a temperatura em diferentes pontos do fluxo (de 5 em 5 cm), para estudar a variação da temperatura com a posição. O outro perfil foi feito para a posição central do tubo (centro da região onde foi medida a velocidade de descida da esfera), em função do tempo em que o forno permanecia aberto, para poder-se saber quando interromper uma medida, pois se o tempo de abertura do forno fosse muito longo, a temperatura do fluxo caía, não fornecendo valores consistentes de viscosidade, sendo a medida, então, descartada e refeita posteriormente.

3.2 Dissolução de Óxidos

Para esta série de experimentos utilizou-se um forno tipo poço, no qual foi colocado um cadinho de grafita número 4 com fluxo salino para o estudo da velocidade de dissolução do óxido de alumínio nos fluxos salinos e a influência que a adição de fluoretos exerce sobre esta velocidade.

Para o estudo do efeito da composição dos fluxos salinos na dissolução de alumina, principalmente enfocando a adição de fluoretos nestes fluxos, utilizou-se como amostra pequenas barras de alumina de cerca de 5 cm de comprimento e 5,9 mm de diâmetro, que permaneciam mergulhadas em um fluxo salino a 750°C, sendo feitas medidas de diâmetro iniciais e nos tempo de 5,10, 20, 40, 60 e 120 minutos com o auxílio de um micrômetro.

Foram utilizados como fluxos a mistura equimolar de NaCl e KCl, que será chamada de base, e fluxos compostos pela base com adições de 2,5%, 5% e 10% em massa de fuloretos. Os fluoretos utilizados foram: Na_3AlF_6 , NaF, KF e CaF_2 . Todos os sais utilizados apresentaram as mesmas características dos

utilizados nas experiências de viscosidade. O Na_3AlF_6 , foi fornecido pela CBA, e tem pureza comercial. Efetuou-se ainda uma experiência com a base e uma com a base com adição de 5% de NaF ambas com 10% em massa de alumina para garantir a saturação do banho, visando a observação da influência da saturação do fluxo na dissolução da alumina. As amostras permaneceram com cerca de dois terços de seu volume submerso, mantendo-se condições de convecção natural semelhantes para todas as amostras. A amostra foi constituída de tubos capilares de 4 furos de alta alumina (97% Al_2O_3) normalmente usados para termopares.

A figura 3.3 apresenta uma representação esquemática do montagem experimental e da amostra.

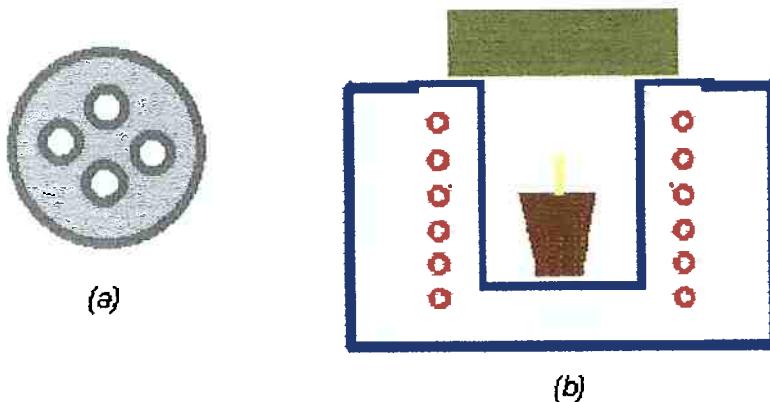


Figura 3.3 – Aspecto da seção transversal da amostra (a) e representação esquemática da montagem experimental (b)

Inicialmente utilizou-se seis amostras por corrida, apenas retirando-se uma amostra a cada tempo de medida. Este procedimento, porém, mostrou-se ineficaz pelo fato das amostras não serem homogêneas o suficiente para ter-se parâmetro de comparação entre uma amostra e outra, tendo-se que efetuar cada corrida com uma única amostra, que a cada tempo de medida era retirada,

resfriada, lavada, medida e recolocada no fluxo, reiniciando-se, só então, a contagem do tempo restante para a corrida.

4 Resultados

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados experimentais obtidos para que estes possam ser tratados e discutidos posteriormente.

4.1 *Medidas de Viscosidade*

4.1.1 *Perfis de Temperatura*

Considerando-se o comprimento do tubo e o fato de ter-se que abrir o forno para efetuar-se as medições, tirou-se dois tipos de perfil de temperatura do fluxo. Um de temperatura contra posição e o outro de temperatura contra tempo.

4.1.1.1 Perfil Temperatura x Posição

Com este perfil, tirado com variação de 5 em 5cm observa-se como varia a temperatura em função da posição e como encontra-se uma região bem estável no centro do tubo, onde são feitas as medidas de velocidade da esfera. A temperatura marcada no controlador do forno era 850°C. Na figura 4.1, encontram-se ilustradas algumas temperaturas medidas na região do forno utilizada para a medida da velocidade de queda da esfera.

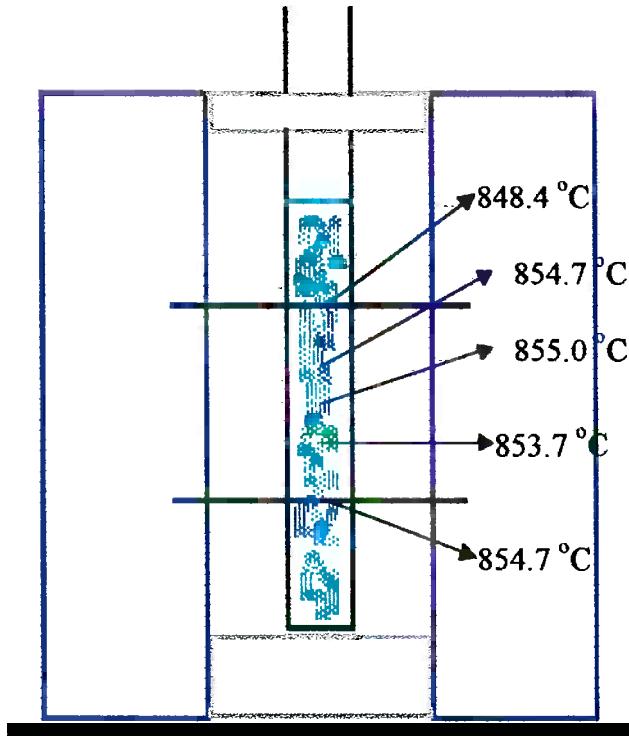


Figura 4.1 - Temperaturas medidas na região do fluxo utilizada para medida de viscosidade

Na figura 4.2 apresenta-se medidas de temperatura realizadas ao longo de todo o fluxo salino. A temperatura do forno era de 850 °C.

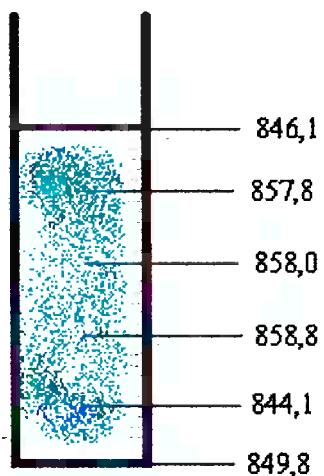


Figura 4.2 - Perfil de temperatura ao longo do todo o tubo.

Esses dados de temperatura apresentam-se na tabela 4.1 relacionados com a altura no tubo medida a partir de sua extremidade inferior.

Tabela 4.1 - Temperatura x Posição

altura (cm)	temperatura (°C)
0	846,1
5	857,8
10	858,0
15	858,8
20	849,8
25	844,1

Na figura 4.3 apresenta-se uma curva da variação de temperatura ao longo do fluxo, mostrando pouca variação na região onde são efetuadas as medidas de viscosidade.

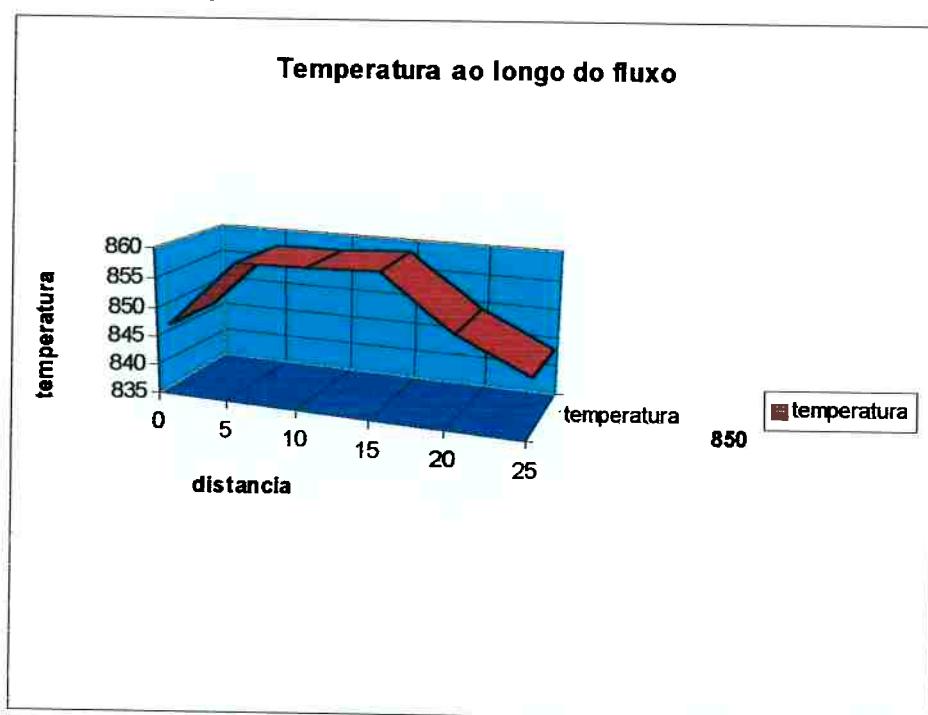


Figura 4.3 - Curva de Temperatura em função da posição

4.1.1.2 Perfil Temperatura x Tempo

Neste perfil observa-se como a temperatura da região central do fluxo varia com o tempo contado a partir da abertura do forno pela retirada da manta isolante. A temperatura marcada no controlador do forno era 850°C. A tabela 4.2 mostra os valores da temperatura conforme ela varia com o tempo de forno aberto.

Com a nova vedação feita, a queda de temperatura foi amenizada, otimizando-se a utilização do forno, conforme ilustra a figura 4.4, que compara a situação antiga à nova.

Tabela 4.2 - Variação da temperatura com o tempo de abertura do forno.

tempo (s)	temperatura (°C) antiga	temperatura (°C) atual
10	832,3	844,2
20	814,0	826,5
30	801,0	818,4
40	786,3	810,7
50	776,4	805,2
60	769,8	798,6
70	770,2	797,0
80	766,6	795,1
90	769,7	795,3
100	766,9	793,1
110	760,5	788,4
120	758,8	785,2

Esses dados estão representados na forma de curva na figura 4.4 . Pode-se observar pela curva que a variação de temperatura decresce em função do tempo sendo mais acentuada no seu início e que a situação nova é mais eficiente que a antiga.

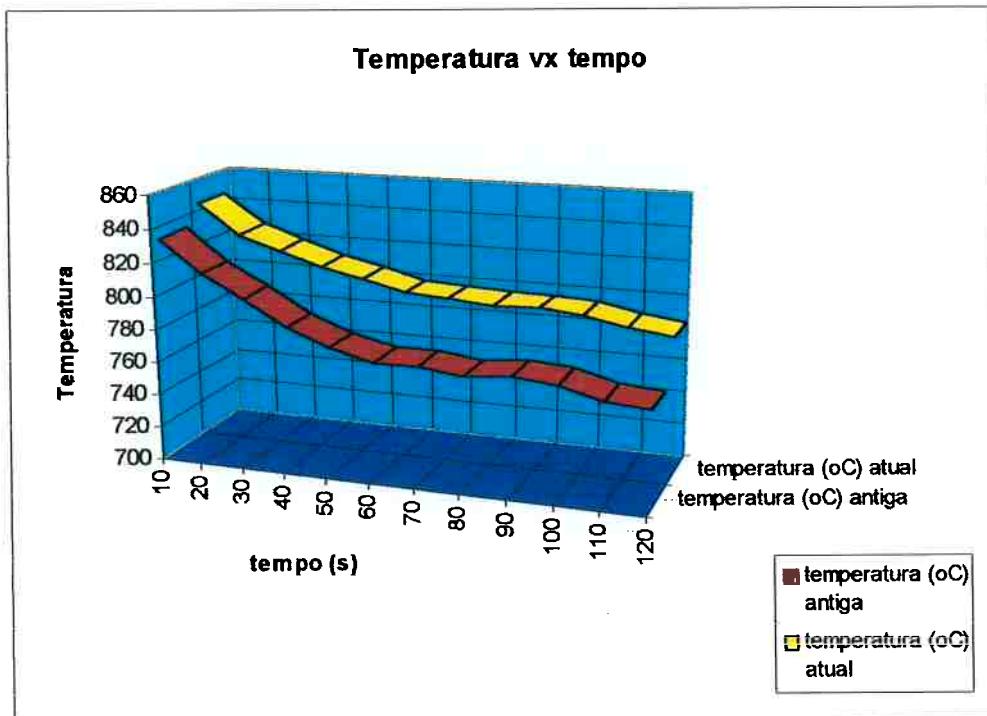


Figura 4.4 - Curva de variação da temperatura em função de tempo durante o qual o forno permanece aberto

4.1.2 Medidas de Viscosidade para Calibração do Dispositivo

Neste tópico serão apresentados os resultados das experiências de calibração do equipamento, realizadas para o cálculo do coeficiente de correção do dispositivo.

4.1.2.1 Experiência de Calibração

Esta experiência foi realizada com a mistura equimolar de NaCl e KCl, mistura esta de fundamental importância para este projeto, uma vez que esta mistura equimolar será a base sobre a qual serão efetuadas as adições de fluoreto. Utilizou-se esferas de grafite, efetuando-se o experimento em três etapas.

Etapa 1: Temperatura 750 °C

Inicialmente apresenta-se, na tabela 4.3 a medida dos diâmetros das esferas empregadas nesta etapa.

Tabela 4.3 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C
	2,10	2,20	2,00
	2,10	1,95	2,20
	2,15	1,95	2,20
	2,20	2,10	2,10
	2,05	2,15	2,20
média	2,12	2,07	2,14

Usando-se as esferas acima relacionadas, não deu certo esta etapa. Para esta temperatura de 750 °C as esferas não desceram no fluxo, não possibilitando a medida de nenhum tempo, não fornecendo dados para o cálculo da viscosidade.

Etapa 2: Temperatura 800 °C

Na tabela 4.4 apresentam-se as medidas das esferas utilizadas nesta etapa para a determinação do tempo de queda das mesmas.

Tabela 4.4 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	D	E	F	G	H	I
	2,10	2,10	2,05	2,10	2,20	2,00
	2,15	2,05	2,05	2,00	2,10	2,10
	2,10	2,10	2,10	2,00	2,05	2,20
	2,05	2,05	1,95	2,10	2,20	2,00
	2,05	2,10	2,15	2,05	2,15	2,00
média	2,09	2,08	2,06	2,05	2,14	2,06

Usando-se as esferas acima relacionadas obtive-se os seguintes resultados de tempo de queda, para um deslocamento de 17,2cm:

Tabela 4.5 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

esfera	tempo (s)
F	5,36
G	11,05
I	5,1

Etapa 3: Temperatura 850 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.6 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros, para o cálculo da viscosidade a 850°C

Tabela 4.6 - medidas das esferas usadas na etapa 3 (mm)

esfera	J	K	L	M	N
	2,00	1,95	2,05	2,05	2,05
	2,10	2,10	2,15	2,00	2,15
	2,15	2,05	2,05	2,10	2,10
	2,10	2,00	2,10	2,05	2,10
	2,10	2,05	2,15	2,00	2,15
média	2,09	2,03	2,10	2,04	2,11
esfera	O	P	Q	R	S
	2,45	2,50	2,40	2,40	2,60
	2,70	2,50	2,35	2,30	2,50
	2,50	2,45	2,45	2,20	2,40
	2,60	2,55	2,45	2,30	2,50
	2,60	2,45	2,40	2,25	2,65
média	2,57	2,49	2,41	2,29	2,53

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, para um deslocamento de 17,2cm, apresentados na tabela 4.7, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.7 - resultados obtidos na terceira etapa da experiência.

esfera	tempo (s)	esfera	tempo (s)
K	4,57	P	2,67
L	3,83	Q	3,82
M	6,27	R	2,84
O	2,98	S	3,69

4.1.3 Medidas de Viscosidade com Adição de Fluoretos

Agora apresentam-se os resultados dos ensaios sistemáticos realizados com as adições dos fluoretos. Os fluoretos utilizados foram NaF, KF e CaF₂ em adições de 5%, 10% e 20% em peso à base composta de mistura equimolar NaCl/KCl.

Nas tabelas de medidas de diâmetro das esferas são apresentados os valores médios, os quais são utilizados para os cálculos. Todas as medidas feitas para estas médias apresentam-se tabeladas no Apêndice I.

4.1.3.1 Ensaio 1

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% NaF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.8 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros, para o cálculo da viscosidade a 760°C

Tabela 4.8 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
A	2,55	E	2,11
B	2,40	G	2,46

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.9, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.9 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
A	4,57	E	2,67
B	3,83	G	3,82

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.10 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.10 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,49	K	2,14
I	2,13	M	2,14
J	2,15		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.11, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.11 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	3,40	K	4,95
I	4,49	M	6,13
J	3,70		

4.1.3.2 Ensaio 2

Neste ensaio utilizou-se Base + 10% NaF .

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.12 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.12 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
A	2,24	G	2,12
E	2,39		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.13, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.13 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
A	4,54	G	4,36
E	4,44		

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.14 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.14 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
I	2,17	K	2,07
J	2,18	L	2,53

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.15, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.15 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
I	3,56	K	3,15
J	3,60	L	3,63

4.1.3.3 Ensaio 3

Neste ensaio utilizou-se Base + 20% NaF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.16 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.16 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
A	2,20	F	2,16
B	2,32	G	2,17
D	2,13		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.17, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.17 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
A	3,92	F	4,00
B	4,00	G	3,63
D	3,86		

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.18 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.18 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,13	K	2,19
J	2,47		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.19, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.19 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	3,56	K	2,64
J	3,03		

4.1.3.4 Ensaio 4

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% KF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.20 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.20 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
A	2,49	E	2,52
C	2,19	G	2,23

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.21, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.21 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
A	5,15	E	4,78
C	4,75	G	4,62

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.22 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.22 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,15	J	2,16
I	2,36	L	2,11

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.23, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.23 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	4,46	J	4,40
I	4,90	L	4,32

4.1.3.5 Ensaio 5

Neste ensaio utilizou-se Base + 10% KF .

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.24 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.24 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
C	2,16	F	2,44
E	2,15		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.25, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.25 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
C	3,27	F	4,34
E	5,96		

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.26 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.26 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,56	J	2,24

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.27, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.27 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	2,99	J	3,73

4.1.3.6 Ensaio 6

Neste ensaio utilizou-se Base + 20% KF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.28 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.28 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
E	2,21		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.29, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.29 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
E	4,95		

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.30 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.30 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,59	L	2,22
J	2,18	M	1,99

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.31, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.31 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	2,22	L	2,36
J	2,35	M	2,06

4.1.3.7 Ensaio 7

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% CaF₂.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.32 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.32 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
A	2,01	E	2,09
C	2,14		

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.33, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.33 - resultados obtidos na primeira etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
A	4,42	E	4,33
C	4,19		

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela 4.34 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.34 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

Esfera	Diâmetro (mm)	Esfera	Diâmetro (mm)
H	2,11	K	2,11
I	2,07	L	2,05
J	2,12	M	2,14

Usando-se as esferas acima relacionadas obteve-se os seguintes resultados de tempo de queda, apresentados na tabela 4.35, conforme descrito abaixo:

Tabela 4.35 - resultados obtidos na segunda etapa da experiência.

Esfera	Tempo (s)	Esfera	Tempo (s)
H	3,23	K	3,52
I	3,75	L	3,13
J	3,79	M	3,17

4.2 Dissolução de Alumina nos Fluxos Salinos

Apresentam-se agora os resultados para os ensaios de dissolução de alumina em fluxos salinos de diferentes composições. Inicialmente foram realizados dois ensaios preliminares para se constatar a possibilidade de observação experimental da dissolução da alumina. Constatada a veracidade da afirmação, procederam-se os ensaios sistemáticos, que apresentaram resultados mais conclusivos.

4.2.1 Ensaios Preliminares

Os ensaios preliminares consistiram de montagem experimental semelhante à dos ensaios sistemáticos, porém com apenas uma medida, efetuada aos 30 minutos de experiência, e utilizando-se a base (mistura equimolar de NaCl e KCl) e base com adição de 5% de NaF, como fluxos salinos.

O primeiro ensaio, realizado com a base, apresentou os seguintes valores para diâmetros inicial e final, listados na tabela 4.36 abaixo:

Tabela 4.36 – Apresentação dos resultados do ensaio preliminar 1

Dinicial (mm)	Dfinal (mm)
5,92	5,95
5,95	5,95
5,96	5,98
5,96	5,96
5,92	5,95
5,91	5,94
5,95	5,92
5,97	5,94
5,98	5,96
5,98	5,94
5,96	5,95
5,97	5,92
5,98	5,91
5,98	5,93
5,97	5,98
5,957	5,945

A tabela 4.37 apresenta a análise destes dados:

Tabela 4.37 – Análise dos dados do ensaio preliminar 1

Redução	-0,012	mm
	-0,201	%

O segundo ensaio, realizado com a base com adição de 5% de NaF, apresentou os seguintes valores para diâmetros inicial e final, listados na tabela 4.38 abaixo:

Tabela 4.38 – Apresentação dos resultados do ensaio preliminar 2

Dinicial (mm)	Dfinal (mm)
5,84	5,83
5,83	5,82
5,85	5,81
5,87	5,8
5,83	5,82
5,86	5,84
5,87	5,83
5,85	5,82
5,83	5,82
5,82	5,82
5,84	5,81
5,85	5,81
5,83	5,83
5,84	5,84
5,86	5,81
5,845	5,821

A tabela 4.39 apresenta a análise destes dados:

Tabela 4.39 – Análise dos dados do ensaio preliminar 2

Redução	-0,024	mm
	-0,411	%

Com a obtenção destes dados preliminares pode-se não só observar a viabilidade do procedimento experimental, como também verificar experimentalmente a efetividade da adição de fluoretos ao fluxo, em termos de dissolução de alumina. Assim sendo, seguiu-se aos ensaios sistemáticos.

4.2.2 Ensaios Sistemáticos

Apresentam-se os resultados dos ensaios sistemáticos realizados de acordo com o procedimento experimental descrito no item 4.2.2, para as composições apresentadas. A partir destes dados obteve-se curvas de diâmetro em função do tempo para as diferentes composições de fluxos com o intuito de se fazer uma análise comparativa e não em números absolutos destes dados.

4.2.2.1 Ensaio 1 : Fluxo base

Na tabela 4.40 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.40 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 1

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,81	5,83	5,81	5,83	5,80	5,82	5,80
2	5,82	5,82	5,81	5,82	5,80	5,79	5,81
3	5,80	5,81	5,80	5,81	5,81	5,80	5,80
4	5,83	5,81	5,83	5,83	5,81	5,81	5,81
5	5,84	5,81	5,81	5,80	5,82	5,81	5,80
6	5,82	5,81	5,80	5,80	5,82	5,81	5,80
7	5,81	5,82	5,81	5,81	5,82	5,81	5,79
8	5,81	5,81	5,83	5,83	5,81	5,79	5,80
9	5,80	5,82	5,82	5,81	5,80	5,80	5,81
10	5,82	5,80	5,82	5,79	5,80	5,81	5,81
11	5,84	5,81	5,81	5,80	5,81	5,81	5,80
12	5,83	5,83	5,82	5,83	5,82	5,82	5,80
13	5,81	5,82	5,83	5,81	5,82	5,79	5,81
14	5,81	5,82	5,82	5,82	5,83	5,81	5,80
15	5,81	5,82	5,81	5,81	5,79	5,81	5,81
média	5,82	5,82	5,82	5,81	5,81	5,81	5,80

A figura 4.5 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

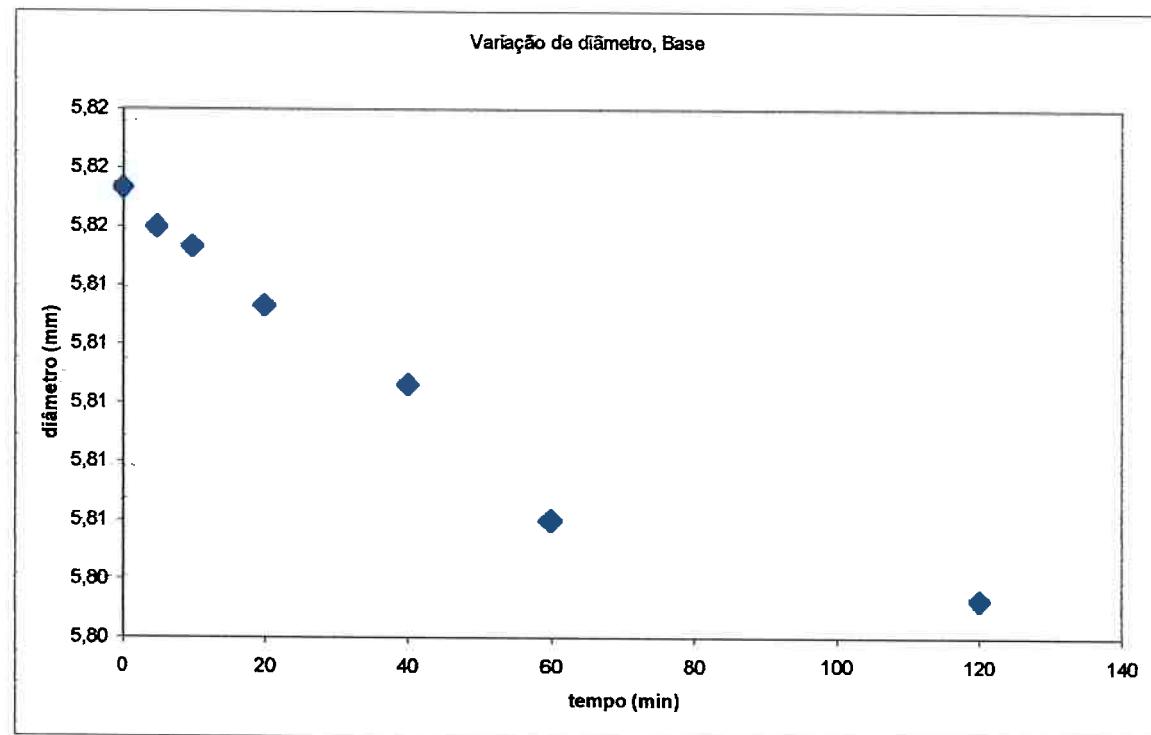


Figura 4.5 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base

4.2.2.2 Ensaio 2 : Fluxo base Saturado com Alumina

Na tabela 4.41 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.41 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min); ensaio 2

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,52	5,51	5,53	5,51	5,50	5,52	5,50
2	5,51	5,53	5,51	5,49	5,49	5,50	5,51
3	5,53	5,50	5,50	5,51	5,52	5,49	5,49
4	5,52	5,51	5,50	5,50	5,50	5,51	5,50
5	5,52	5,52	5,50	5,50	5,49	5,51	5,52
6	5,51	5,50	5,52	5,51	5,51	5,53	5,51
7	5,52	5,50	5,53	5,51	5,52	5,50	5,51
8	5,51	5,52	5,51	5,53	5,52	5,51	5,51
9	5,51	5,51	5,49	5,51	5,52	5,49	5,52
10	5,49	5,52	5,51	5,53	5,51	5,50	5,52
11	5,50	5,50	5,50	5,50	5,53	5,52	5,50
12	5,50	5,51	5,50	5,51	5,50	5,51	5,49
13	5,50	5,51	5,51	5,52	5,50	5,51	5,51
14	5,52	5,51	5,51	5,51	5,52	5,51	5,52
15	5,51	5,50	5,53	5,50	5,51	5,52	5,52
média	5,51						

A figura 4.6 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

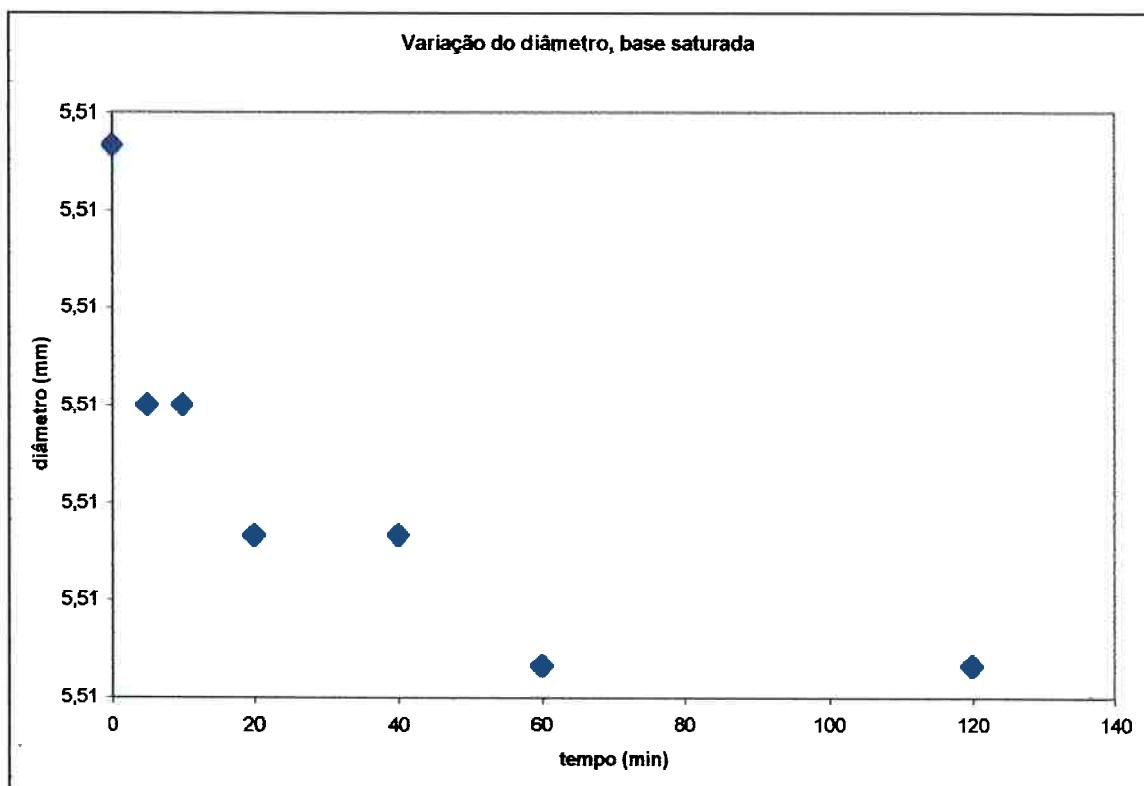


Figura 4.6 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base saturado com alumina

4.2.2.3 Ensaio 3 : Fluxo Base + 2,5% NaF

Na tabela 4.42 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.42 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 3

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,47	5,47	5,48	5,48	5,45	5,48	5,44
2	5,46	5,46	5,48	5,46	5,47	5,46	5,47
3	5,47	5,45	5,47	5,45	5,46	5,46	5,46
4	5,47	5,44	5,46	5,47	5,47	5,44	5,47
5	5,48	5,46	5,46	5,44	5,47	5,47	5,45
6	5,45	5,47	5,45	5,45	5,46	5,45	5,47
7	5,46	5,47	5,44	5,45	5,46	5,46	5,43
8	5,45	5,48	5,44	5,46	5,47	5,46	5,46
9	5,45	5,46	5,46	5,45	5,45	5,45	5,44
10	5,47	5,44	5,45	5,46	5,45	5,46	5,44
11	5,50	5,44	5,47	5,45	5,45	5,41	5,46
12	5,47	5,48	5,45	5,44	5,43	5,45	5,47
13	5,48	5,45	5,47	5,46	5,45	5,46	5,43
14	5,45	5,47	5,45	5,47	5,44	5,44	5,44
15	5,47	5,47	5,47	5,47	5,45	5,46	5,46
média	5,47	5,46	5,46	5,46	5,46	5,45	5,45

A figura 4.7 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

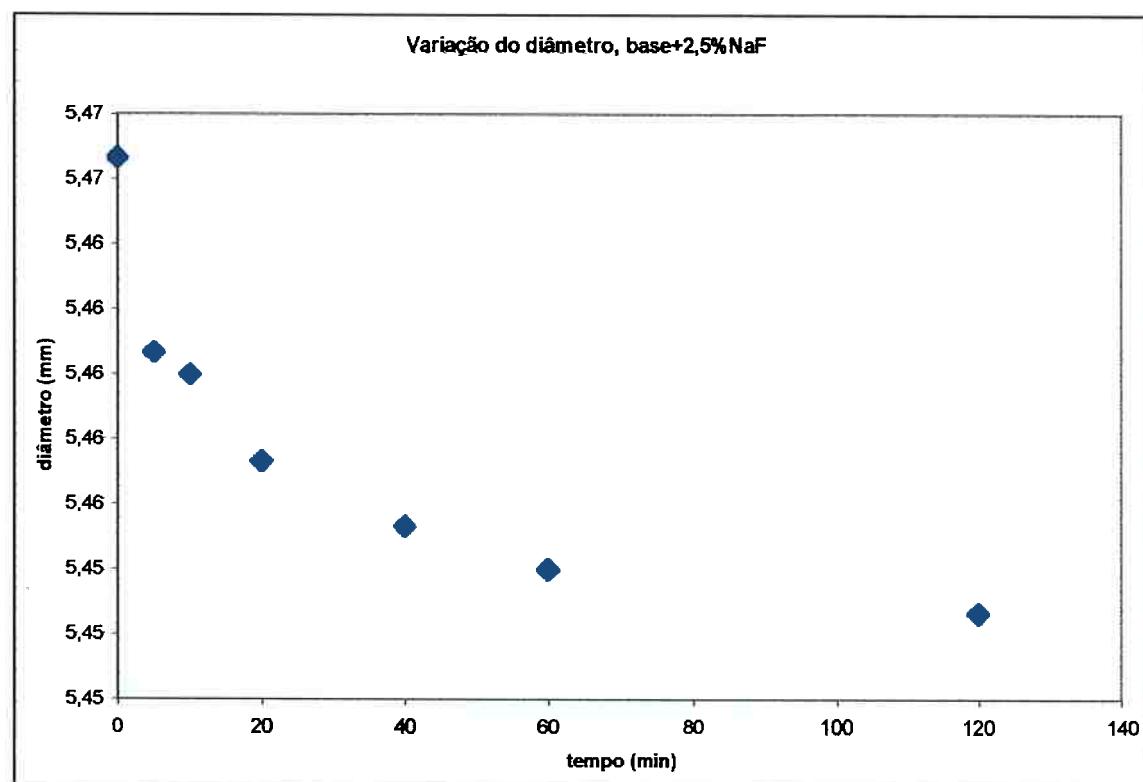


Figura 4.7 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 2,5%NaF

4.2.2.4 Ensaio 4 : Fluxo base + 5% NaF

Na tabela 4.43 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.43 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 4

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,90	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
2	5,92	5,88	5,90	5,90	5,89	5,89	5,90
3	5,93	5,89	5,89	5,89	5,88	5,88	5,88
4	5,89	5,90	5,89	5,88	5,88	5,88	5,86
5	5,89	5,88	5,87	5,86	5,86	5,86	5,86
6	5,91	5,89	5,90	5,89	5,89	5,89	5,88
7	5,91	5,88	5,90	5,90	5,89	5,87	5,87
8	5,90	5,87	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88
9	5,93	5,90	5,88	5,87	5,87	5,87	5,86
10	5,89	5,91	5,88	5,88	5,88	5,87	5,87
11	5,89	5,89	5,89	5,88	5,86	5,86	5,86
12	5,89	5,90	5,88	5,88	5,87	5,87	5,87
13	5,90	5,89	5,88	5,87	5,87	5,87	5,86
14	5,92	5,90	5,90	5,90	5,90	5,88	5,87
15	5,91	5,88	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
média	5,90	5,89	5,89	5,88	5,88	5,88	5,87

A figura 4.8 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

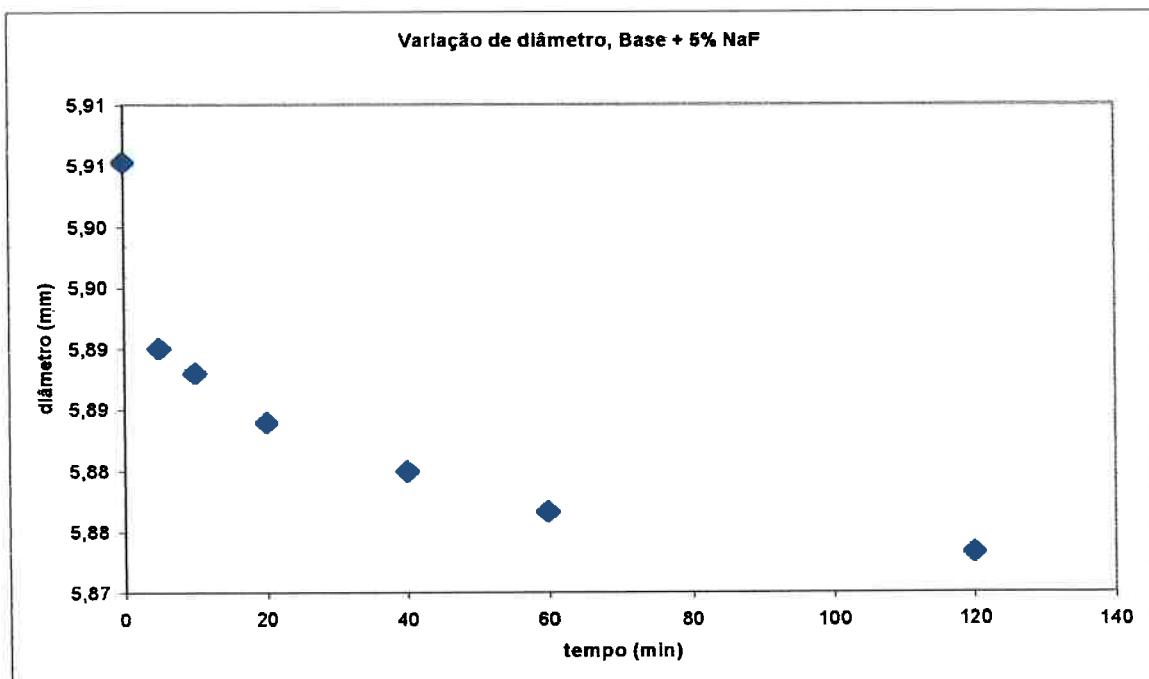


Figura 4.8– Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base +5% NaF

4.2.2.5 Ensaio 5 : Fluxo base + 10% NaF

Na tabela 4.44 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.44 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 5

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,49
2	5,50	5,49	5,50	5,51	5,48	5,49	5,50
3	5,49	5,50	5,51	5,50	5,48	5,51	5,50
4	5,49	5,50	5,50	5,50	5,51	5,50	5,50
5	5,50	5,49	5,50	5,49	5,50	5,47	5,49
6	5,51	5,49	5,48	5,51	5,50	5,47	5,48
7	5,50	5,50	5,51	5,49	5,51	5,49	5,50
8	5,48	5,50	5,49	5,50	5,50	5,47	5,49
9	5,51	5,51	5,51	5,48	5,50	5,48	5,49
10	5,48	5,48	5,51	5,51	5,51	5,50	5,47
11	5,52	5,50	5,49	5,48	5,48	5,50	5,50
12	5,50	5,51	5,50	5,50	5,50	5,48	5,48
13	5,50	5,52	5,48	5,51	5,48	5,49	5,49
14	5,51	5,48	5,50	5,51	5,50	5,48	5,48
15	5,50	5,50	5,49	5,47	5,49	5,51	5,49
média	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,49	5,49

A figura 4.9 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

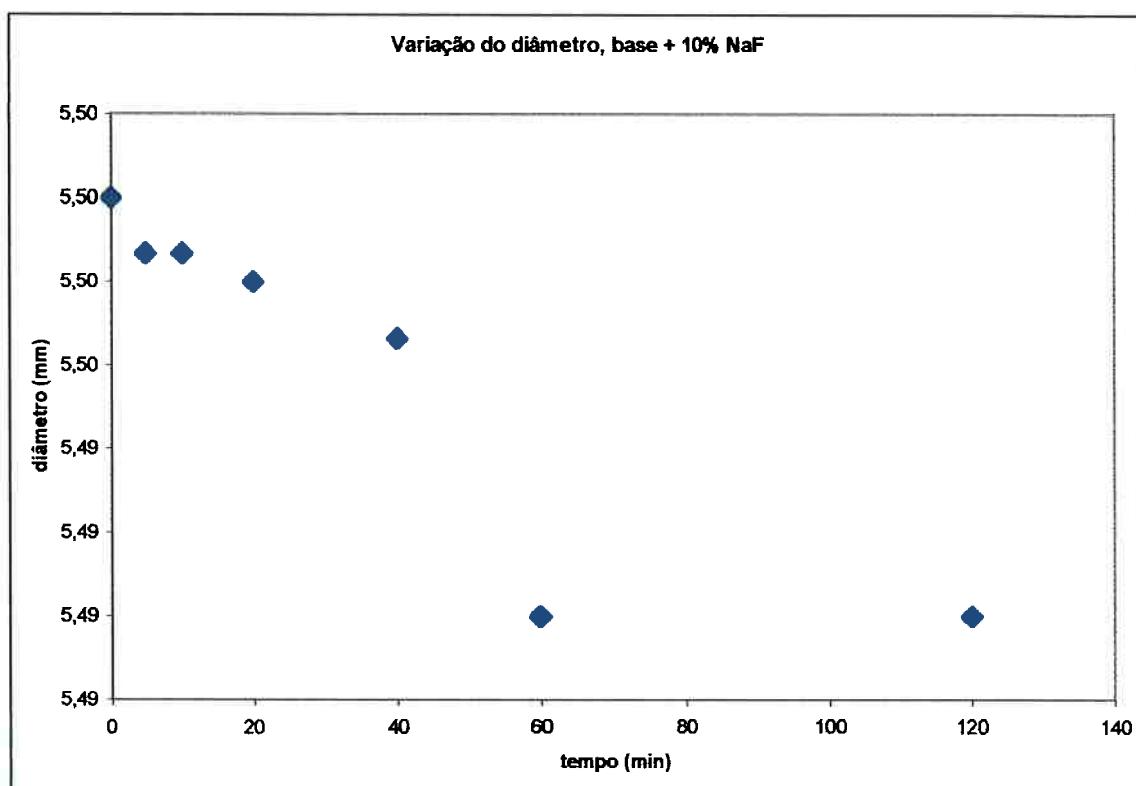


Figura 4.9– Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 10% NaF

4.2.2.6 Ensaio 6 : Fluxo base + 2,5% KF

Na tabela 4.45 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.45 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 6

Medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,54	5,52	5,51	5,51	5,50	5,52	5,52
2	5,52	5,52	5,52	5,51	5,52	5,51	5,51
3	5,52	5,51	5,49	5,52	5,52	5,50	5,50
4	5,53	5,52	5,51	5,52	5,52	5,53	5,53
5	5,53	5,52	5,50	5,50	5,52	5,52	5,52
6	5,54	5,53	5,50	5,53	5,52	5,52	5,52
7	5,51	5,52	5,53	5,51	5,53	5,51	5,51
8	5,52	5,53	5,54	5,52	5,51	5,51	5,52
9	5,53	5,50	5,52	5,52	5,50	5,50	5,51
10	5,51	5,51	5,53	5,51	5,52	5,52	5,51
11	5,52	5,53	5,51	5,51	5,51	5,51	5,49
12	5,53	5,51	5,53	5,53	5,51	5,51	5,52
13	5,52	5,52	5,52	5,52	5,50	5,52	5,52
14	5,52	5,53	5,51	5,52	5,52	5,52	5,52
15	5,52	5,53	5,51	5,50	5,52	5,52	5,51
média	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,51

A figura 4.10 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

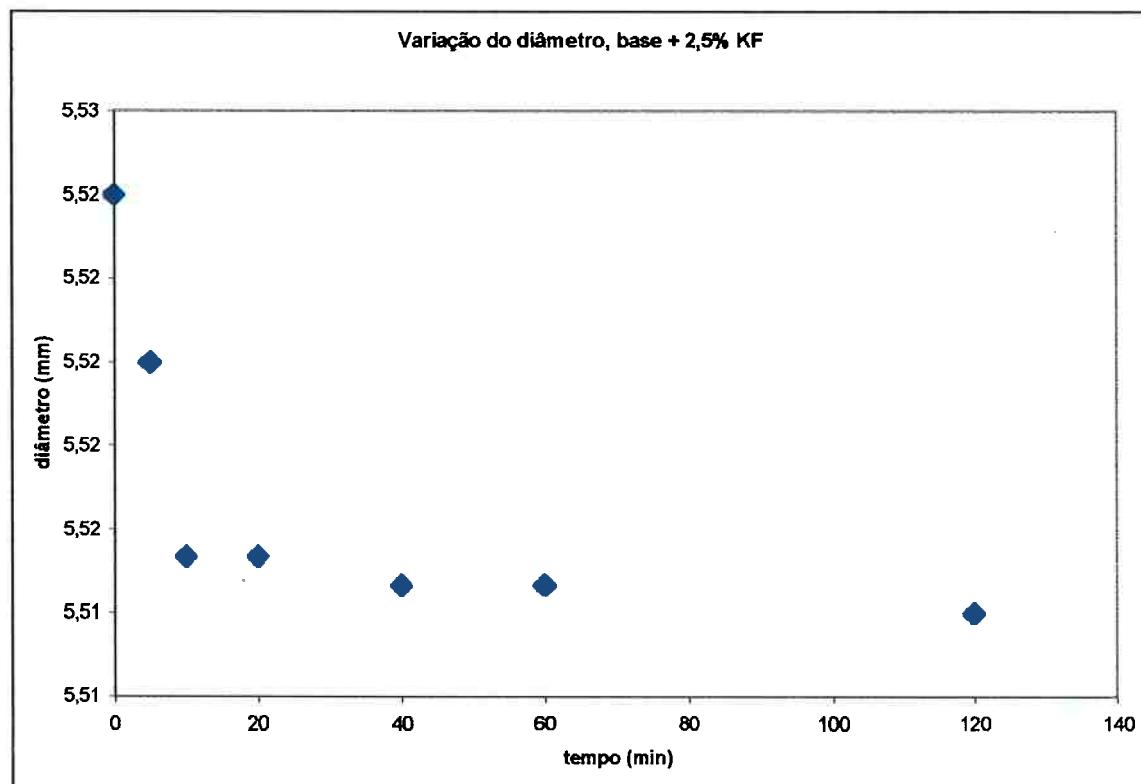


Figura 4.10– Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 2,5% KF

4.2.2.7 Ensaio 7 : Fluxo base + 5% KF

Na tabela 4.46 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.46 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 7

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,91	5,91	5,92	5,91	5,91	5,89	5,89
2	5,93	5,90	5,92	5,89	5,90	5,91	5,90
3	5,90	5,91	5,89	5,91	5,89	5,91	5,88
4	5,91	5,92	5,89	5,91	5,88	5,89	5,88
5	5,91	5,91	5,91	5,92	5,91	5,88	5,88
6	5,89	5,89	5,90	5,91	5,91	5,89	5,89
7	5,92	5,91	5,91	5,91	5,92	5,90	5,90
8	5,93	5,92	5,92	5,90	5,91	5,89	5,91
9	5,91	5,90	5,90	5,88	5,90	5,91	5,88
10	5,91	5,89	5,91	5,90	5,90	5,89	5,88
11	5,91	5,90	5,91	5,92	5,89	5,88	5,88
12	5,89	5,92	5,90	5,91	5,88	5,90	5,89
13	5,91	5,93	5,90	5,88	5,91	5,90	5,88
14	5,91	5,90	5,89	5,88	5,88	5,91	5,87
15	5,92	5,91	5,90	5,91	5,90	5,89	5,88
média	5,91	5,91	5,91	5,90	5,90	5,90	5,89

A figura 4.11 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

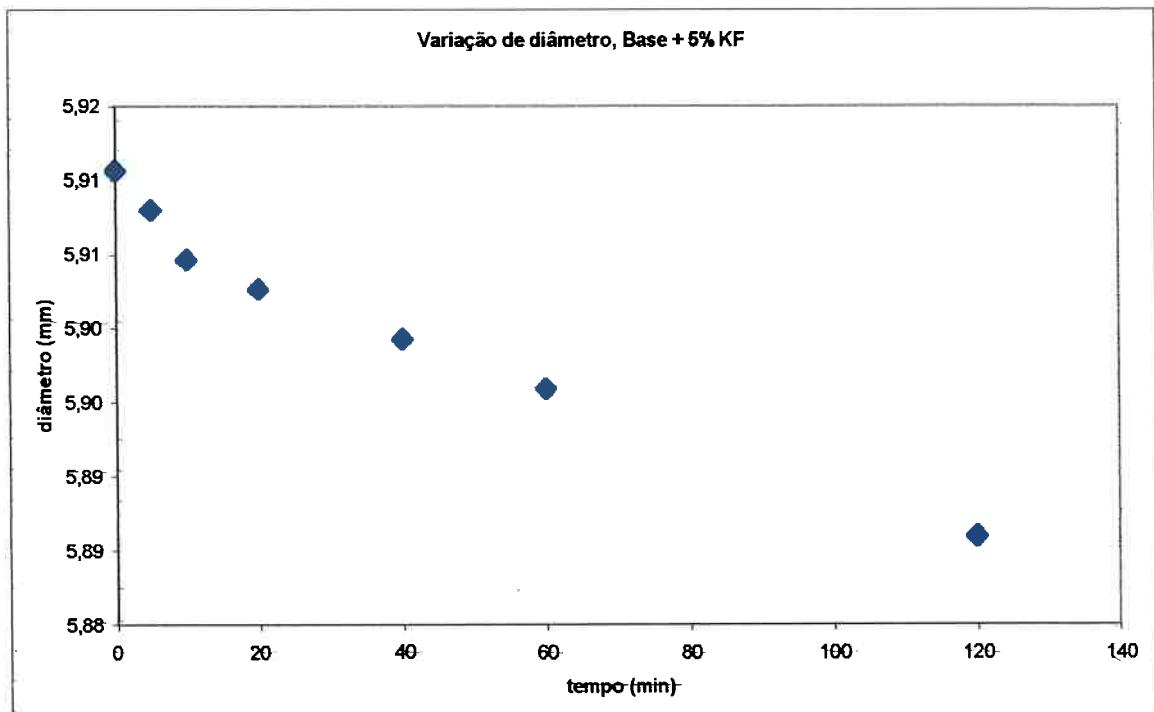


Figura 4.11 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 5% KF

4.2.2.8 Ensaio 8 : Fluxo base + 10% KF

Na tabela 4.47 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.47– Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 8

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,53	5,51	5,49	5,52	5,51	5,49	5,51
2	5,50	5,50	5,49	5,50	5,51	5,50	5,50
3	5,50	5,51	5,52	5,51	5,52	5,52	5,48
4	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,49
5	5,53	5,51	5,53	5,49	5,51	5,50	5,49
6	5,52	5,52	5,52	5,49	5,49	5,50	5,52
7	5,52	5,51	5,52	5,50	5,48	5,49	5,49
8	5,51	5,52	5,51	5,52	5,51	5,51	5,50
9	5,51	5,51	5,51	5,50	5,51	5,49	5,49
10	5,53	5,52	5,51	5,51	5,50	5,49	5,49
11	5,51	5,50	5,52	5,51	5,49	5,50	5,48
12	5,51	5,50	5,49	5,51	5,50	5,50	5,48
13	5,52	5,51	5,50	5,49	5,50	5,48	5,48
14	5,50	5,52	5,51	5,51	5,51	5,49	5,50
15	5,53	5,52	5,50	5,52	5,51	5,49	5,49
média	5,52	5,51	5,51	5,51	5,50	5,50	5,49

A figura 4.12 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

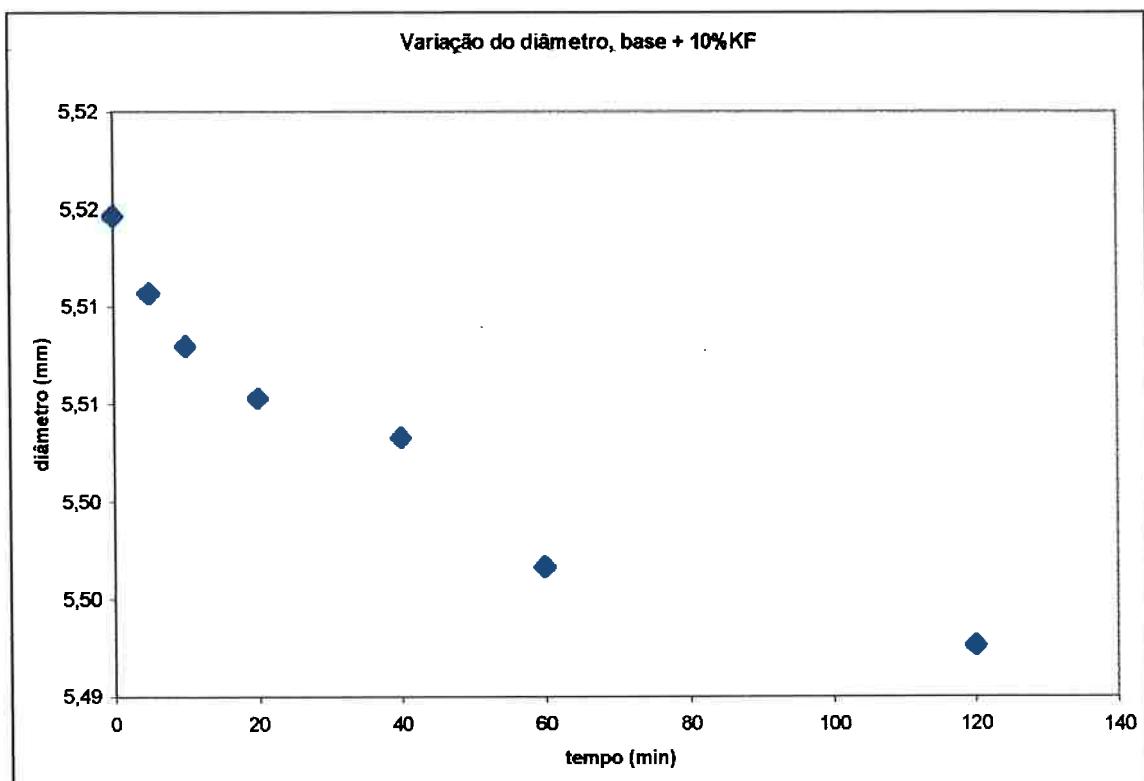


Figura 4.12 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 10% KF

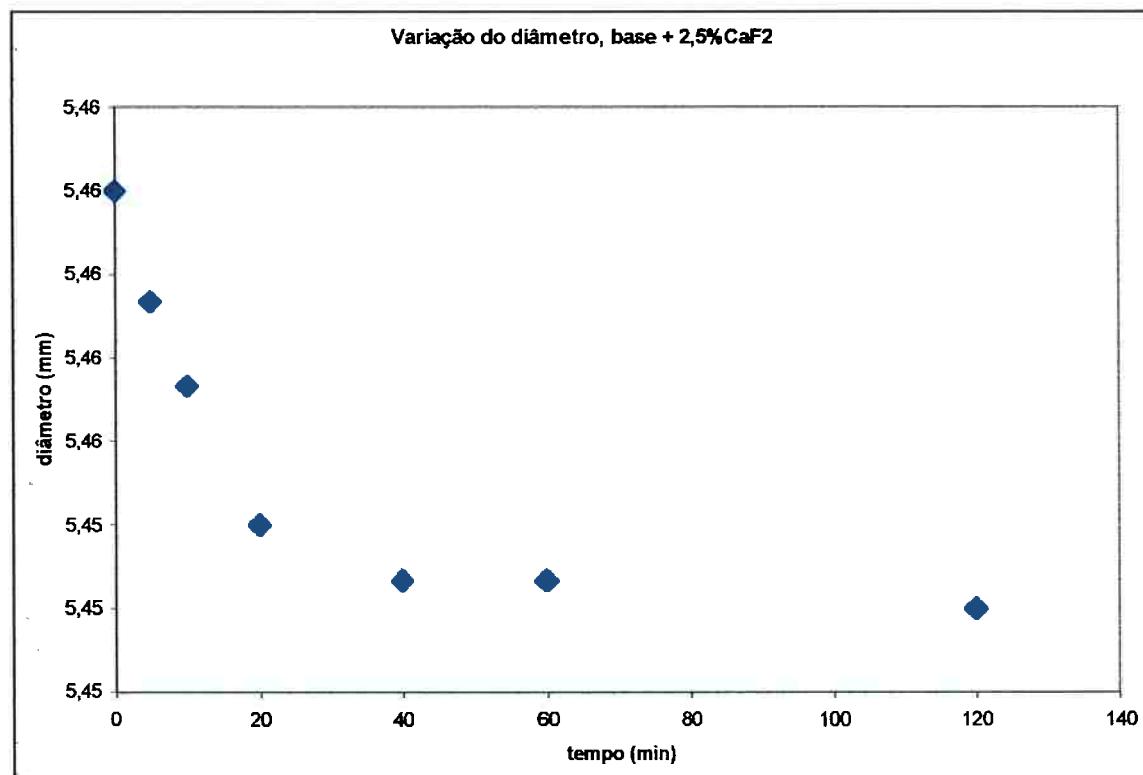
4.2.2.9 Ensaio 9 : Fluxo base + 2,5% CaF2

Na tabela 4.48 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.48– Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 9

Medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,47	5,46	5,47	5,46	5,46	5,45	5,46
2	5,47	5,47	5,46	5,45	5,44	5,44	5,44
3	5,46	5,46	5,45	5,46	5,47	5,47	5,46
4	5,45	5,45	5,45	5,46	5,47	5,43	5,47
5	5,47	5,45	5,46	5,45	5,45	5,46	5,44
6	5,46	5,46	5,46	5,44	5,46	5,44	5,46
7	5,45	5,45	5,47	5,45	5,44	5,46	5,44
8	5,45	5,47	5,44	5,46	5,44	5,46	5,46
9	5,46	5,45	5,46	5,45	5,45	5,45	5,45
10	5,47	5,47	5,48	5,46	5,46	5,45	5,43
11	5,46	5,46	5,45	5,46	5,45	5,46	5,45
12	5,46	5,45	5,45	5,45	5,44	5,47	5,47
13	5,47	5,46	5,46	5,45	5,45	5,45	5,45
14	5,46	5,46	5,45	5,47	5,45	5,45	5,45
15	5,47	5,47	5,45	5,44	5,46	5,45	5,45
média	5,46	5,46	5,46	5,45	5,45	5,45	5,45

A figura 4.13 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

Figura 4.13 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 2,5% CaF₂

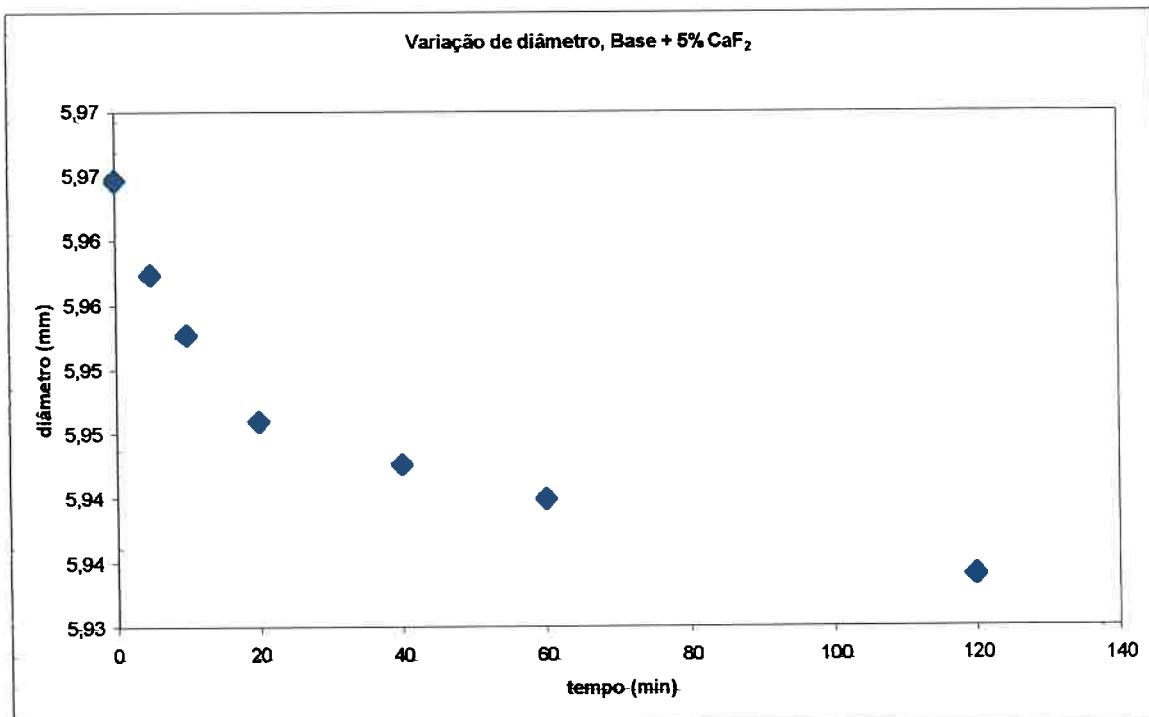
4.2.2.10 Ensaio 10 : Fluxo base + 5% CaF₂

Na tabela 4.49 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.49 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 10

Medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,96	5,96	5,95	5,95	5,93	5,95	5,95
2	5,98	5,95	5,96	5,95	5,95	5,96	5,93
3	5,97	5,94	5,93	5,95	5,95	5,94	5,94
4	5,96	5,97	5,95	5,95	5,95	5,93	5,93
5	5,96	5,97	5,97	5,94	5,94	5,93	5,92
6	5,95	5,95	5,96	5,95	5,95	5,93	5,93
7	5,95	5,96	5,95	5,94	5,95	5,94	5,94
8	5,98	5,94	5,96	5,93	5,93	5,95	5,95
9	5,96	5,95	5,93	5,94	5,93	5,95	5,95
10	5,97	5,97	5,95	5,95	5,94	5,93	5,92
11	5,95	5,96	5,97	5,95	5,94	5,93	5,93
12	5,96	5,97	5,95	5,96	5,96	5,94	5,94
13	5,97	5,94	5,96	5,94	5,94	5,94	5,93
14	5,98	5,96	5,94	5,95	5,95	5,95	5,92
15	5,97	5,97	5,96	5,94	5,93	5,93	5,93
média	5,97	5,96	5,95	5,95	5,94	5,94	5,93

A figura 4.14 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

Figura 4.14 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 5% CaF₂

4.2.2.11 Ensaio 11 : Fluxo base + 10% CaF2

Na tabela 4.50 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.50 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 11

Medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,53	5,51	5,53	5,50	5,50	5,51	5,51
2	5,52	5,52	5,49	5,52	5,49	5,51	5,51
3	5,52	5,51	5,49	5,50	5,52	5,49	5,49
4	5,52	5,52	5,52	5,51	5,51	5,50	5,50
5	5,51	5,52	5,52	5,50	5,52	5,51	5,49
6	5,51	5,52	5,51	5,51	5,50	5,51	5,51
7	5,52	5,50	5,52	5,50	5,52	5,51	5,50
8	5,52	5,51	5,51	5,50	5,50	5,52	5,52
9	5,52	5,50	5,51	5,51	5,49	5,50	5,50
10	5,52	5,51	5,51	5,53	5,51	5,49	5,51
11	5,51	5,53	5,52	5,48	5,51	5,49	5,51
12	5,53	5,51	5,52	5,51	5,51	5,52	5,50
13	5,51	5,52	5,52	5,50	5,51	5,51	5,49
14	5,52	5,51	5,49	5,51	5,50	5,50	5,50
15	5,51	5,51	5,51	5,52	5,50	5,51	5,50
média	5,52	5,51	5,51	5,51	5,51	5,51	5,50

A figura 4.15 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

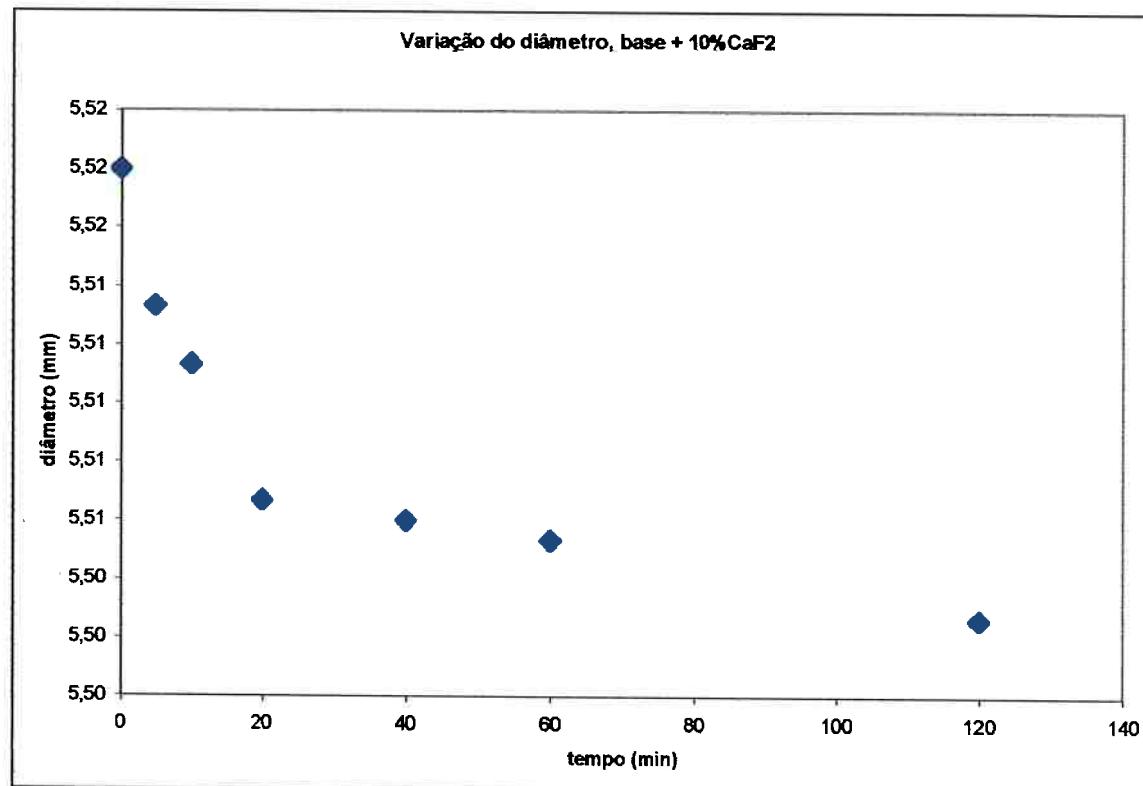


Figura 4.15 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 10% CaF₂

4.2.2.12 Ensaio 12 : Fluxo base + 5% NaF Saturada com Alumina

Na tabela 4.51 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.51 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 12

Medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,92	5,93	5,93	5,91	5,92	5,92	5,95
2	5,94	5,92	5,93	5,93	5,91	5,92	5,92
3	5,93	5,92	5,91	5,91	5,92	5,93	5,92
4	5,93	5,93	5,92	5,93	5,92	5,92	5,92
5	5,91	5,93	5,93	5,93	5,92	5,93	5,91
6	5,93	5,92	5,93	5,92	5,93	5,91	5,92
7	5,93	5,92	5,93	5,92	5,92	5,92	5,93
8	5,92	5,91	5,93	5,93	5,94	5,93	5,93
9	5,94	5,93	5,91	5,94	5,93	5,93	5,92
10	5,95	5,93	5,92	5,93	5,93	5,93	5,91
11	5,91	5,93	5,92	5,92	5,92	5,92	5,92
12	5,93	5,92	5,94	5,91	5,92	5,91	5,92
13	5,92	5,94	5,94	5,93	5,92	5,92	5,92
14	5,93	5,94	5,93	5,92	5,92	5,93	5,92
15	5,93	5,93	5,92	5,93	5,92	5,92	5,91
média	5,93	5,93	5,93	5,92	5,92	5,92	5,92

A figura 4.16 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

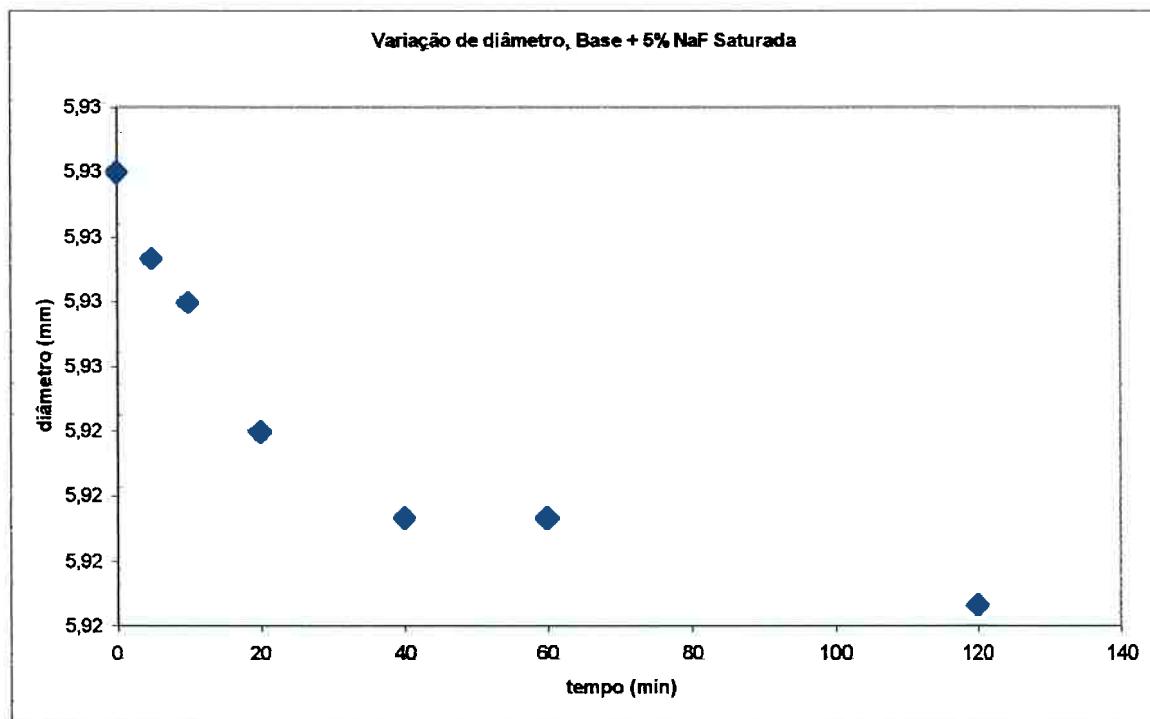


Figura 4.16 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 5% NaF, saturada com alumina

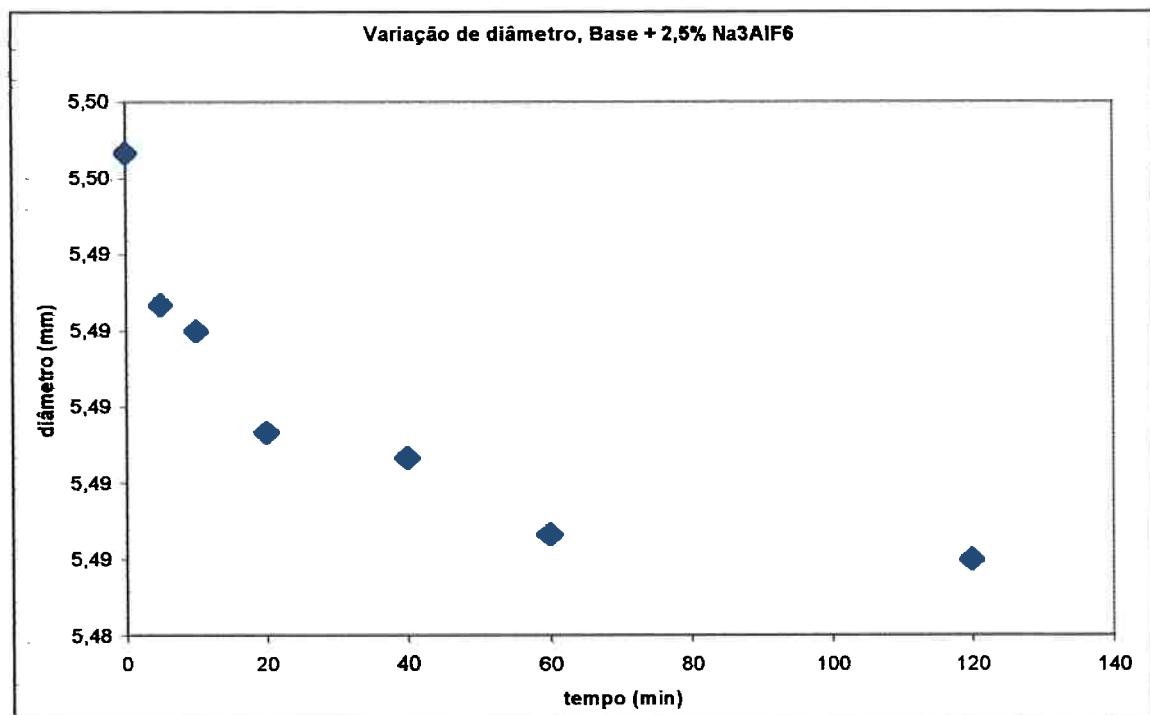
4.2.2.13 Ensaio 13 : Fluxo base + 2,5% Na₃AlF₆

Na tabela 4.52 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.52 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 13

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,50	5,49	5,49	5,48	5,49	5,49	5,48
2	5,50	5,50	5,49	5,49	5,48	5,50	5,50
3	5,51	5,49	5,49	5,49	5,48	5,48	5,50
4	5,49	5,50	5,49	5,49	5,50	5,48	5,49
5	5,49	5,50	5,50	5,49	5,50	5,50	5,49
6	5,50	5,49	5,48	5,50	5,49	5,48	5,48
7	5,50	5,48	5,49	5,49	5,48	5,48	5,47
8	5,50	5,50	5,49	5,49	5,50	5,49	5,48
9	5,49	5,49	5,48	5,48	5,49	5,49	5,49
10	5,49	5,49	5,49	5,48	5,50	5,48	5,48
11	5,50	5,49	5,51	5,50	5,49	5,48	5,50
12	5,50	5,49	5,50	5,49	5,48	5,48	5,49
13	5,49	5,50	5,49	5,50	5,48	5,48	5,48
14	5,49	5,49	5,49	5,48	5,49	5,49	5,47
15	5,50	5,49	5,50	5,49	5,48	5,50	5,49
média	5,50	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49

A figura 4.17 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

Figura 4.17 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 2,5% Na_3AlF_6

4.2.2.14 Ensaio 14 : Fluxo base + 5% Na_3AlF_6

Na tabela 4.53 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.53 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 14

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,52	5,52	5,51	5,52	5,51	5,49	5,52
2	5,53	5,53	5,52	5,50	5,51	5,52	5,51
3	5,53	5,51	5,53	5,52	5,51	5,51	5,51
4	5,52	5,51	5,51	5,52	5,51	5,52	5,52
5	5,52	5,53	5,53	5,51	5,51	5,50	5,50
6	5,53	5,52	5,51	5,51	5,51	5,50	5,49
7	5,51	5,51	5,50	5,52	5,52	5,54	5,51
8	5,52	5,51	5,51	5,53	5,50	5,50	5,51
9	5,53	5,52	5,53	5,51	5,51	5,52	5,53
10	5,51	5,53	5,50	5,52	5,53	5,51	5,51
11	5,52	5,51	5,52	5,51	5,50	5,50	5,50
12	5,52	5,52	5,53	5,53	5,51	5,51	5,51
13	5,51	5,52	5,50	5,51	5,51	5,50	5,51
14	5,53	5,51	5,51	5,50	5,49	5,51	5,49
15	5,51	5,52	5,52	5,51	5,52	5,51	5,50
média	5,52	5,52	5,52	5,52	5,51	5,51	5,51

A figura 4.18 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

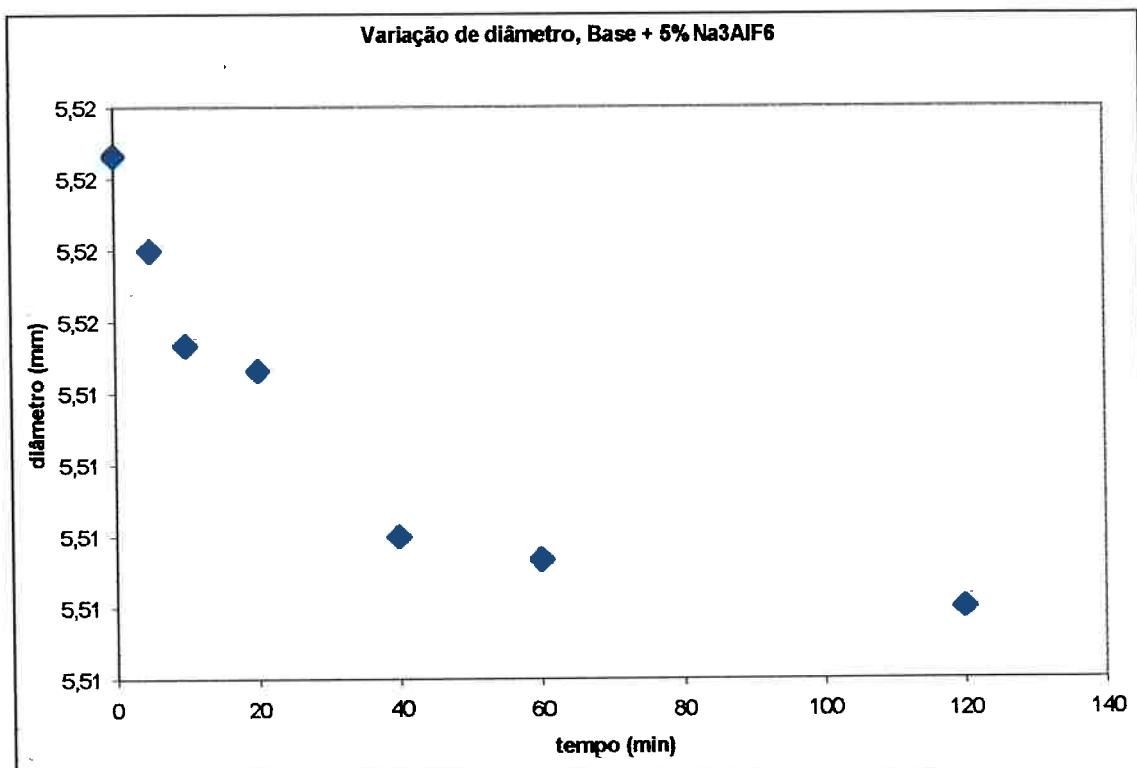


Figura 4.18 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 5% Na_3AlF_6

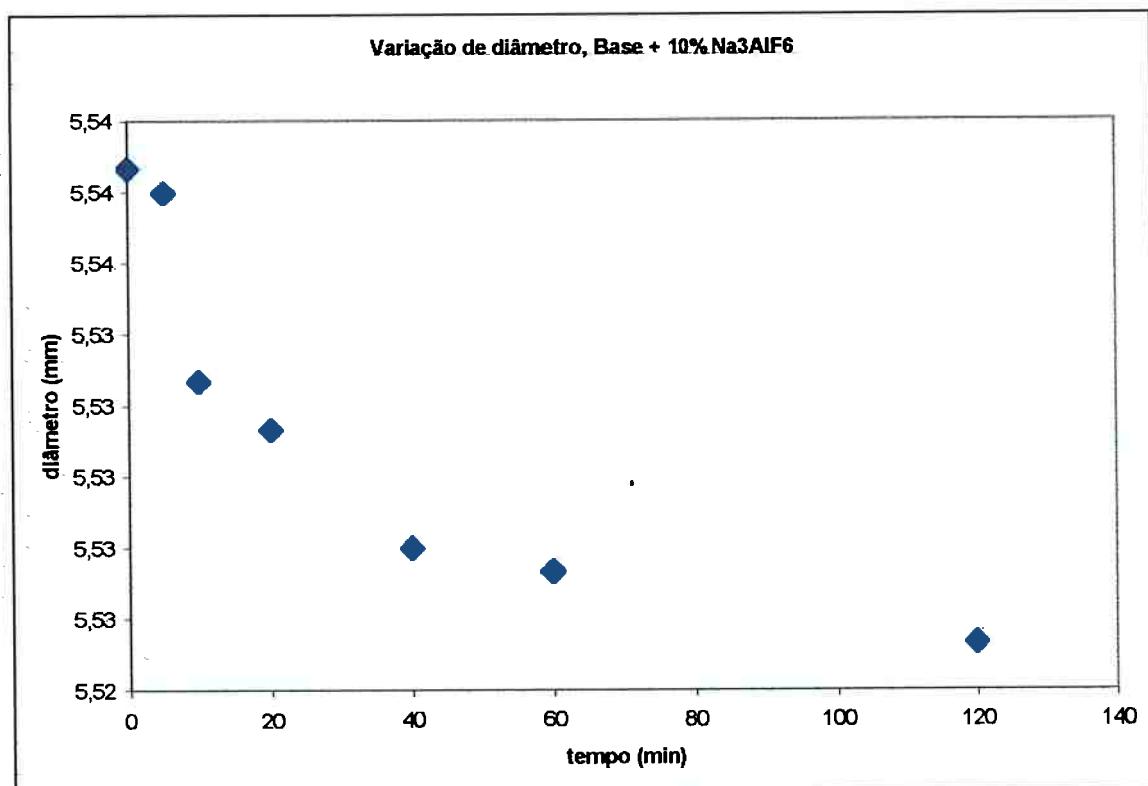
4.2.2.15 Ensaio 15 : Fluxo base + 10% Na_3AlF_6

Na tabela 4.54 abaixo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas de diâmetro para os diferentes tempos utilizados:

Tabela 4.54 – Diâmetros (mm) em função do tempo (min) ; ensaio 15

medida	0	5	10	20	40	60	120
1	5,54	5,53	5,53	5,52	5,53	5,52	5,53
2	5,54	5,53	5,54	5,54	5,52	5,54	5,51
3	5,53	5,55	5,52	5,52	5,53	5,52	5,53
4	5,53	5,53	5,52	5,53	5,52	5,54	5,53
5	5,53	5,55	5,54	5,53	5,54	5,52	5,54
6	5,54	5,53	5,55	5,52	5,52	5,53	5,51
7	5,55	5,55	5,55	5,53	5,52	5,53	5,52
8	5,54	5,54	5,53	5,55	5,53	5,51	5,52
9	5,53	5,55	5,53	5,52	5,53	5,52	5,52
10	5,55	5,53	5,52	5,55	5,53	5,52	5,54
11	5,53	5,54	5,52	5,53	5,54	5,53	5,52
12	5,54	5,55	5,53	5,52	5,53	5,53	5,54
13	5,55	5,53	5,55	5,54	5,52	5,53	5,52
14	5,54	5,53	5,53	5,53	5,54	5,54	5,52
15	5,54	5,53	5,53	5,54	5,52	5,53	5,53
média	5,54	5,54	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53

A figura 4.19 apresenta a variação do diâmetro em função do tempo:

Figura 4.19 – Variação do diâmetro em função do tempo para Fluxo base + 10% Na₃AlF₆

5 Análise de Resultados e Discussão

Neste capítulo tem-se como objetivo dar tratamento aos dados anteriormente apresentados, trazendo discussões a respeito dos resultados obtidos e comparação com literatura.

5.1 **Medidas de Viscosidade**

Neste tópico tem-se como objetivo a comparação dos valores obtidos experimentalmente com dados de literatura para que seja possível determinar o coeficiente de correção do equipamento utilizado, pois sabe-se que este método de medida de viscosidade não fornece valores absolutos.

Também é objetivo o cálculo das viscosidades dos fluxos salinos com fluoretos, já utilizando-se a constante característica do equipamento aqui a ser calculada.

5.1.1 **Dados Gerais**

$$g = 987 \text{ cm.s}^{-2} \quad \text{Aceleração da gravidade}$$

$$\rho_e = 1,7 \text{ g.cm}^{-3} \quad \text{Densidade da esfera}$$

$$D = 2 \text{ cm} \quad \text{Diâmetro interno do tubo}$$

$$v_e = S/t \text{ cm/s} \quad \text{, onde } S : \text{espaço percorrido, cm} ; S = 17,2 \text{ cm (para ensaios preliminares)} \quad S = 14,3 \text{ cm (para ensaios sistemáticos)}$$

As densidades dos líquidos foram calculadas a partir das equações fornecidas por Smithels⁽¹⁴⁾, nas tabelas 9.1 e 9.2⁽¹⁴⁾. Para a densidade de mistura não listadas, usou-se regras de propriedades intensivas independentes.

5.1.2 Ensaio de Calibração

Etapa 1: Base a 750°C:

Nesta etapa, conforme visto anteriormente, nenhum resultado satisfatório foi obtido, devido às condições de temperatura, conforme já discutido anteriormente.

Etapa 2: Base a 800°C:

Segundo Smithels⁽¹⁴⁾, a densidade da mistura NaCl + KCl é dada pela equação:

$$\rho_l = a - 10^{-3} * b * t = 1,522 \text{ g.cm}^{-3}$$

onde: a = 1,976 ; b = 0,568 ; para a mistura equimolar de NaCl + KCl.

Assim sendo, temos:

$$\rho_l = 1,976 - 10^{-3} * 0,568 * t = 1,522 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para essas condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade estão apresentados na tabela 5.1 abaixo:

Tabela 5.1 - Cálculo da viscosidade do NaCl+KCl equimolar a 800°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)
F	0,206	1,522	5,36	0,12764010
G	0,205	1,522	11,05	0,26081525
I	0,206	1,522	5,10	0,12144860
Média				0,16996798

Etapa 3: Base a 850°C:

Para esta etapa, a densidade do NaCl+KCl equimolar tem valor dado por⁽¹⁴⁾:

$$\rho_l = 1,976 - 10^{-3} * 0,568 * t = 1,493 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade estão apresentados na tabela 5.2

Tabela 5.2 - Cálculo da viscosidade do NaCl+KCl equimolar a 850°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)
K	0,203	1,493	4,57	0,12321760
L	0,210	1,493	3,83	0,10984456
M	0,204	1,493	6,27	0,17057548
O	0,257	1,493	2,98	0,12302944
P	0,249	1,493	2,67	0,10416429
Q	0,241	1,493	3,82	0,14054261
R	0,229	1,493	2,84	0,07923126
S	0,253	1,493	3,69	0,12315168
Média				0,12171961

5.1.3 Dados de Literatura

Os dados a seguir apresentados foram extraídos da referência [14], e servirão de parâmetro comparativo para avaliação dos resultados obtidos e para um primeiro cálculo do coeficiente de correção do equipamento.

$$\text{KCl: } \eta_{800} = 1,094 \text{ centipoise}$$

$$\eta_{900} = 0,841 \text{ centipoise}$$

$$\eta_{1000} = 0,673 \text{ centipoise}$$

$$\text{NaCl+KCl: } \eta_{800} = 1,17 \text{ centipoise}$$

$$\eta_{900} = 0,90 \text{ centipoise}$$

5.1.4 Cálculo do Coeficiente de Correção

A partir da seqüência de dados obtidos experimentalmente para a mistura equimolar de NaCl/KCl, e de valores desta viscosidade encontrados na

referência [14], pode-se calcular K, a constante característica do equipamento. Os dados disponíveis⁽¹⁴⁾ são para 800°C e 850°C. As temperaturas de ensaio das misturas com adição de fluoretos são 760 °C e 810 °C. Portanto efetuou-se extrapolação dos dados de literatura para os valores desejados. De acordo com Zhang & Ma⁽¹⁵⁾, a viscosidade varia exponencialmente com a temperatura:

$$\eta = A \exp(E/RT)$$

A partir desta correção, tem-se os valores a serem utilizados:

$$\eta_{760} = 0,0133 \text{ Poise}$$

$$\eta_{810} = 0,0117 \text{ Poise}$$

A partir dos valores experimentais para cada uma das medidas de viscosidade a 800°C, utilizando-se o valor teórico para 800 °C calculou-se um valor de K (coeficiente de correção do equipamento). Estes valores são apresentado na tabela 5.3:

Tabela 5.3 : Cálculo de K

Viscosidade Experimental	K
0,10244254	0,114210366
0,09132425	0,128114931
0,1022861	0,114385044
0,08660171	0,135101258
0,11684647	0,100131395
0,07923126	0,147668988
0,12315168	0,095004794

Dos valores da tabela, temos a média e o erro padrão de K:

$$K = 0,119$$

$$E = 0,007$$

5.1.5. Ensaios Sistemáticos

5.1.5.1 Ensaio 1 - Base + 5% NaF

Etapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,563 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.4 abaixo:

Tabela 5.4 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
A	0,255	1,563	4,57	0,12313801	0,01465342
B	0,240	1,563	3,83	0,09256485	0,01101522
E	0,211	1,563	2,67	0,05112038	0,00608333
G	0,246	1,563	3,82	0,09651139	0,01148486
Média				0,09083366	0,01295237

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾:

$$\rho_l = 1,543 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.5

Tabela 5.5 - Cálculo da viscosidade a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,249	1,543	3,40	0,10060414	0,01197189
I	0,213	1,543	4,49	0,10022051	0,01192624
J	0,215	1,543	3,70	0,08400111	0,00999613
K	0,214	1,543	4,95	0,11143235	0,01326045
M	0,214	1,543	6,13	0,13799602	0,01642153
Média				0,08673000	0,00905129

5.1.5.2 Ensaio 2 - Base +10% NaF

Etapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,597 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.6 abaixo:

Tabela 5.6 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
A	0,224	1,597	4,54	0,07283841	0,00866777
E	0,239	1,597	4,44	0,08007273	0,00952866
G	0,212	1,597	4,36	0,06330232	0,00753298
Média				0,04779169	0,00857256

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾:

$$\rho_l = 1,569 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.7

Tabela 5.7 - Cálculo da viscosidade a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
I	0,217	1,569	3,56	0,06858104	0,00816114
J	0,218	1,569	3,60	0,06993247	0,00832196
K	0,207	1,569	3,15	0,05569493	0,00662770
L	0,253	1,569	3,63	0,07666931	0,00912365
Média				0,06771944	0,00852376

5.1.5.3 Ensaio 3 - Base +20% NaFEtapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,650 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.8 abaixo:

Tabela 5.8 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
A	0,220	1,650	3,92	0,02954963	0,00351641
B	0,232	1,650	4,00	0,03319203	0,00394985
D	0,213	1,650	3,86	0,02743898	0,00326524
F	0,216	1,650	4,00	0,02916570	0,00347072
G	0,217	1,650	3,63	0,02219049	0,00264067
Média				0,02830737	0,00441428

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾:

$$\rho_l = 1,622 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.9

Tabela 5.9 - Cálculo da viscosidade a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm ⁻³)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,220	1,622	3,56	0,04186398	0,00498181
J	0,232	1,622	3,03	0,03922303	0,00466754
K	0,213	1,622	2,64	0,02927582	0,00348382
Média				0,03678761	0,00348265

5.1.5.4 Ensaio 4 - Base + 5% KF

Etapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,566 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.10 abaixo:

Tabela 5.10 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
A	0,249	1,566	5,15	0,13006166	0,01547734
C	0,219	1,566	4,75	0,09517169	0,01132543
E	0,252	1,566	4,78	0,12333582	0,01467696
G	0,223	1,566	4,62	0,09565268	0,01138267
Média				0,11105546	0,01321560

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾ :

$$\rho_l = 1,587 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.11

Tabela 5.11 - Cálculo da viscosidade do a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,215	1,537	4,46	0,10512502	0,01250988
I	0,236	1,537	4,90	0,13670088	0,01626741
J	0,216	1,537	4,40	0,10458818	0,01244599
L	0,211	1,537	4,32	0,09840873	0,01171064
Média				0,11120570	0,09874387

5.1.5.5 Ensaio 5 - Base + 10% KFEtapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,587 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.12 abaixo:

Tabela 5.12 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
C	0,216	1,587	3,27	0,05388508	0,00641232
E	0,215	1,587	5,96	0,09738865	0,01158925
F	0,244	1,587	4,34	0,08912461	0,01060583
Média				0,08013278	0,00984236

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾ :

$$\rho_l = 1,559 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.13

Tabela 5.13 - Cálculo da viscosidade do a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	ρ_{liq} (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,256	1,559	2,99	0,08349985	0,00993648
J	0,224	1,559	3,73	0,08192101	0,00974860
Média				0,08271043	0,00889456

5.1.5.6 Ensaio 6 - Base + 20% KF

Etapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,630 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.14 abaixo:

Tabela 5.14 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
E	0,221	1,630	4,95	0,05267058	0,00626780

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾ :

$$\rho_l = 1,601 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.15

Tabela 5.15 - Cálculo da viscosidade do a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,259	1,601	2,22	0,04444534	0,00528900
J	0,218	1,601	2,35	0,03449913	0,00410540
L	0,222	1,601	2,36	0,03580663	0,00426099
M	0,199	1,601	2,06	0,02561585	0,00304829
Média				0,03535562	0,00419832

5.1.5.7 Ensaio 7 - Base + 5% CaF₂

Etapa 1: 760°C:

A densidade da mistura a esta temperatura foi calculada com os dados da referência [14] e vale:

$$\rho_l = 1,606 \text{ g.cm}^{-3}$$

Para as condições desta etapa, os resultados dos cálculos da viscosidade já corrigida pelo valor K estão apresentados na tabela 5.16 abaixo:

Tabela 5.16 - Cálculo da viscosidade a 760°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
A	0,201	1,606	4,42	0,05314823	0,00632464
C	0,214	1,606	4,19	0,05647397	0,00672040
E	0,209	1,606	4,33	0,05590529	0,00665273
Média				0,05863510	0,00657248

Etapa 2: 810°C:

Para esta etapa, a densidade da mistura vale⁽¹⁴⁾ :

$$\rho_l = 1,578 \text{ g.cm}^{-3}$$

Os valores calculados da viscosidade corrigida estão apresentados na tabela 5.17

Tabela 5.17 - Cálculo da viscosidade do a 810°C

Esfera	Diâmetro (cm)	pliq (g.cm-3)	tempo (s)	η (Poise)	η corrigido (Poise)
H	0,211	1,578	3,23	0,05507121	0,00655347
I	0,207	1,578	3,75	0,06174829	0,00734805
J	0,212	1,578	3,79	0,06517709	0,00775607
K	0,211	1,578	3,52	0,06001568	0,00714187
L	0,205	1,578	3,13	0,05063547	0,00602562
M	0,214	1,578	3,17	0,05545306	0,00659891
Média				0,05924218	0,00621953

Os resultados obtidos para medidas de viscosidade com adições de NaF e KF estão apresentados nas tabelas 5.18 e 5.19 abaixo

Tabela 5.18 - viscosidades reais em função da concentração de fluoreto para 760 °C :

760°C			
% de fluoreto	NaF	KF	CaF₂
0	0,01330	0,01330	0,01330
5	0,01295	0,01320	0,00657
10	0,00857	0,00984	-
20	0,00441	0,00627	-

Tabela 5.19 - viscosidades reais em função da concentração de fluoreto para 810 °C :

810°C			
% de fluoreto	NaF	KF	CaF₂
0	0,01170	0,01170	0,01170
5	0,00905	0,00987	0,00622
10	0,00852	0,00889	-
20	0,00348	0,00420	-

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam as curvas da viscosidade do fluxo em função da adição de fluoretos para as respectivas temperaturas.

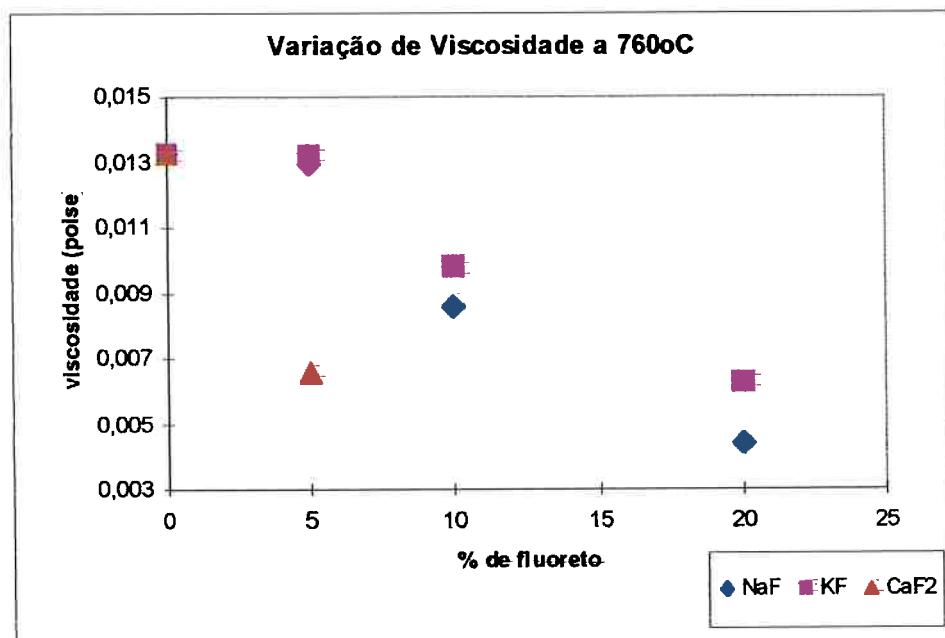


Figura 5.1 - curva de variação da viscosidade a 760° C

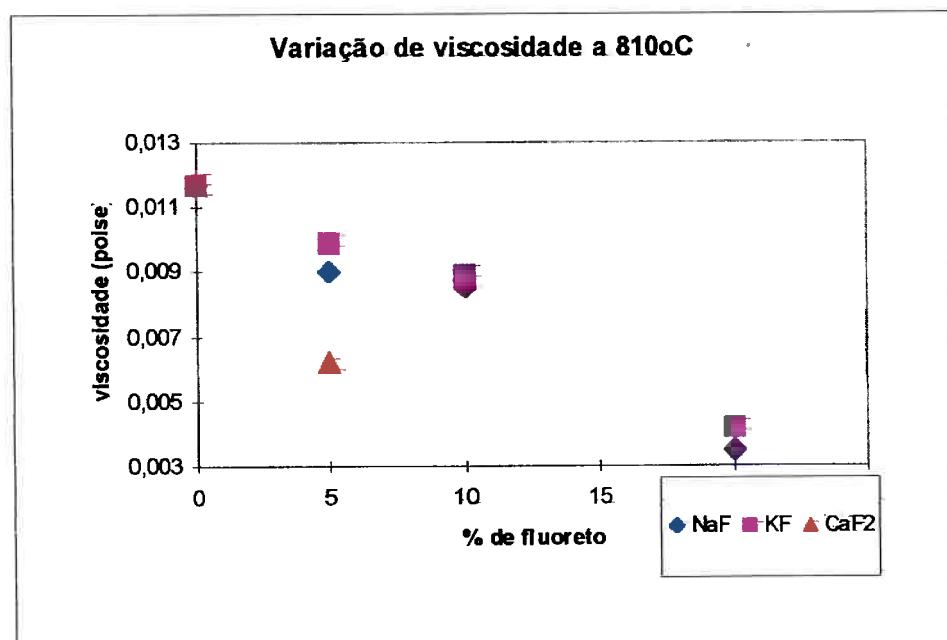


Figura 5.2 - curva de variação da viscosidade a 810° C

Estes resultados mostram que adições de KF, NaF e CaF₂ diminuem efetivamente a viscosidade da mistura equimolar NaCl/KCl. Sendo o CaF₂ o mais efetivo, seguido pelo NaF e pelo KF.

Conforme mencionado anteriormente, adições de CaF₂ acima de 5% causam um aumento da temperatura do fluxo acima das temperaturas usuais de reciclagem.

As adições de fluoretos aos fluxos salinos causam um aumento no rendimento do processo de refusão. Segundo Delgado e Tenório⁽²¹⁾ adições de 2,5% de fluoretos de cálcio, sódio e potássio causam um incremento de 5% no rendimento. Na revisão de Tenório⁽²²⁾, nota-se que há grande destaque na literatura para o estudo da tensão interfacial, tendo Ye & Sahai⁽¹⁶⁾ demonstrado que este parâmetro efetivamente não afeta o rendimento.

Assim, esta diminuição da viscosidade explica, em parte, o acréscimo de rendimento causado pela adição de NaF, KF ou CaF₂, uma vez que o coalescimento das gotículas de alumínio depende não somente da remoção da camada de óxido superficial, mas também da movimentação descendente das gotas de alumínio no fluxo.

5.2 . Dissolução de Alumina

Como os cilindros de alumina possuíam diâmetros diferentes, para comparar-se os diferentes ensaios, foi calculado um parâmetro para avaliar o avanço do ataque. Este parâmetro P foi calculado dividindo-se os valores de Redução de volume, pela Área inicial, conforme mostra a equação abaixo:

$$P = (D_i^2 - D_f^2) / 4 * D_i$$

Onde:

Di : Diâmetro inicial do cilindro (mm)

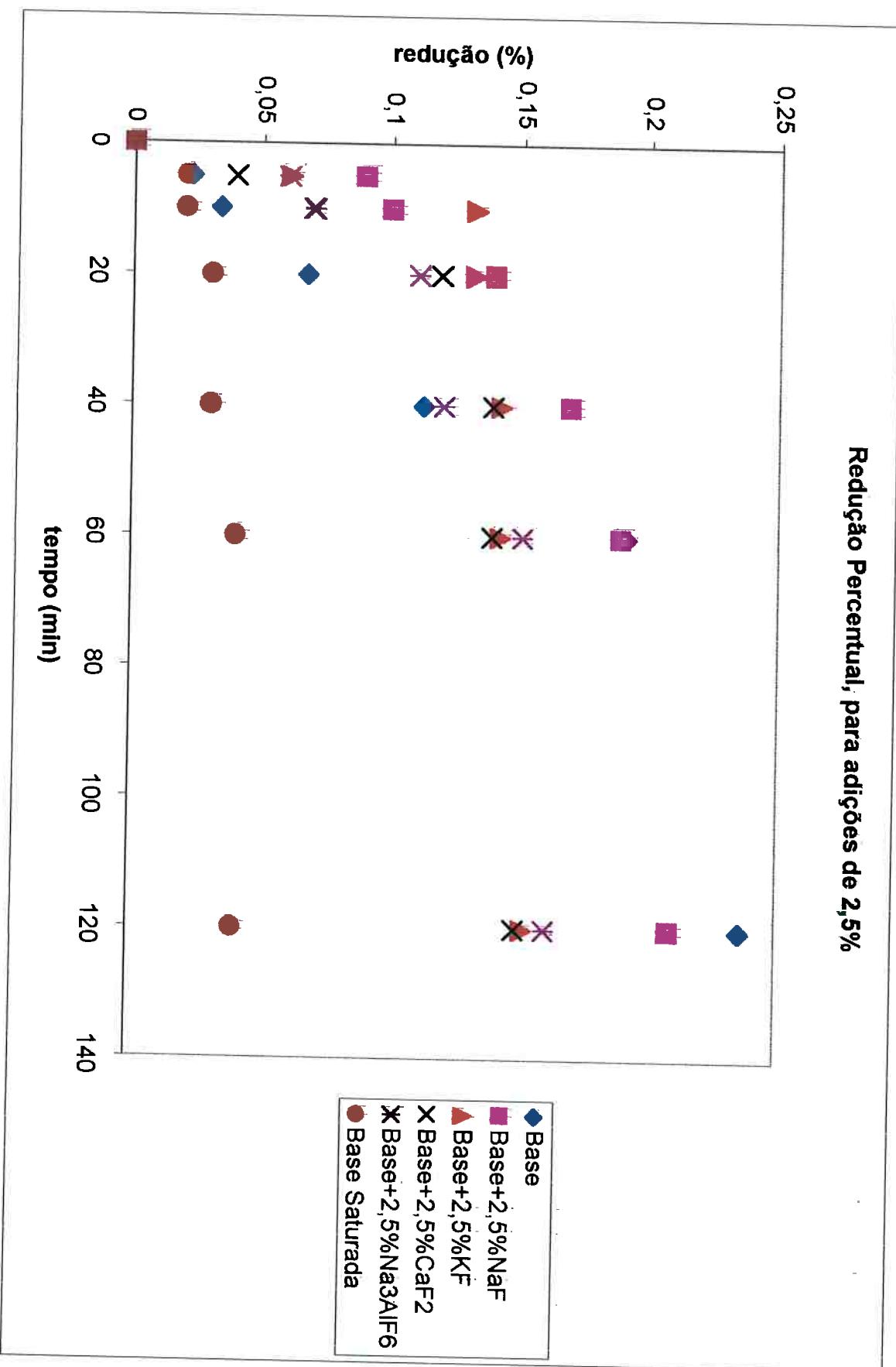
Df : Diâmetro final do cilindro (mm)

A tabela 5.20 mostra os valores de P para as adições de 2,5% de fluoretos e base saturada em Al_2O_3 .

Tabela 5.20 : Valores de redução de volume sobre área inicial para a comparação de resultados, 2,5%

Tempo (min)	Base	Base+2,5% NaF	Base+2,5% KF	Base+2,5% CaF_2	Base+2,5% Na_3AlF_6	Base Saturada
0	0	0	0	0	0	0
5	0,0226	0,0896	0,0610	0,0398	0,0604	0,0202
10	0,0338	0,0996	0,1321	0,0696	0,0705	0,0202
20	0,0677	0,1393	0,1321	0,1192	0,1107	0,0304
40	0,1127	0,1692	0,1423	0,1391	0,1208	0,0304
60	0,1916	0,1890	0,1423	0,1391	0,1509	0,0405
120	0,2366	0,2089	0,1524	0,1490	0,1610	0,0405

A partir destes dados obteve-se a figura 5.3:



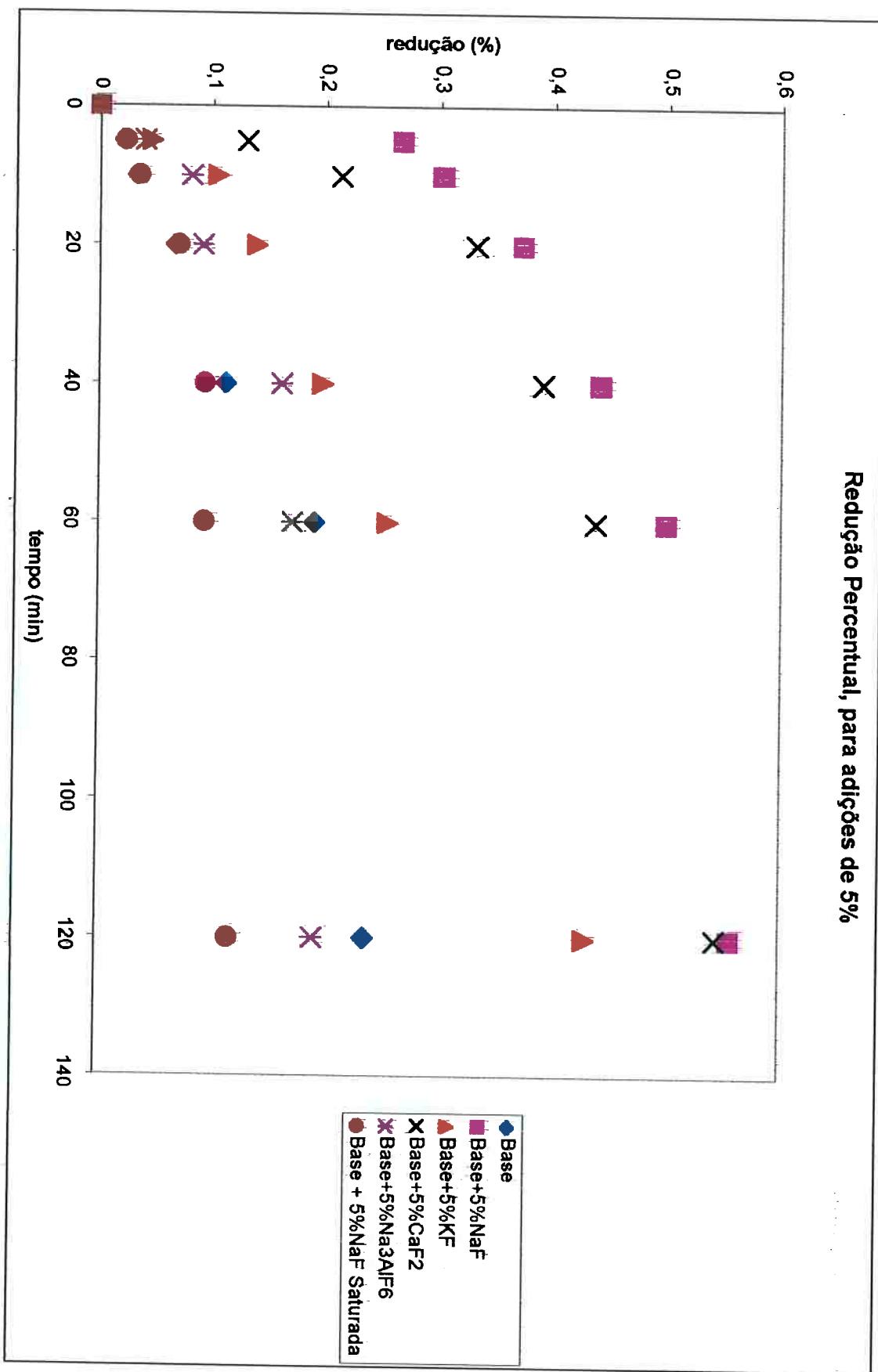
A tabela 5.21 mostra os valores de P para as adições de 5% de fluoretos e base com 5% de NaF saturada em Al_2O_3 .

Tabela 5.21 : Valores de redução de volume sobre área inicial para a comparação de resultados, 5%

Tempo (min)	Base	Base+5% NaF	Base+5% KF	Base+5% CaF₂	Base+5% Na₃AlF₆	Base + 5%NaF Saturada
0	0	0	0	0	0	0
5	0,0226	0,2670	0,0466	0,1304	0,0406	0,0234
10	0,0338	0,3018	0,1048	0,2132	0,0812	0,0351
20	0,0677	0,3713	0,1396	0,3315	0,0914	0,0703
40	0,1127	0,4408	0,1978	0,3906	0,1624	0,0937
60	0,1916	0,4986	0,2559	0,4379	0,1725	0,0937
120	0,2366	0,5565	0,4300	0,5441	0,1928	0,1171

A partir destes dados obteve-se a figura 5.4:

Redução Percentual, para adições de 5%



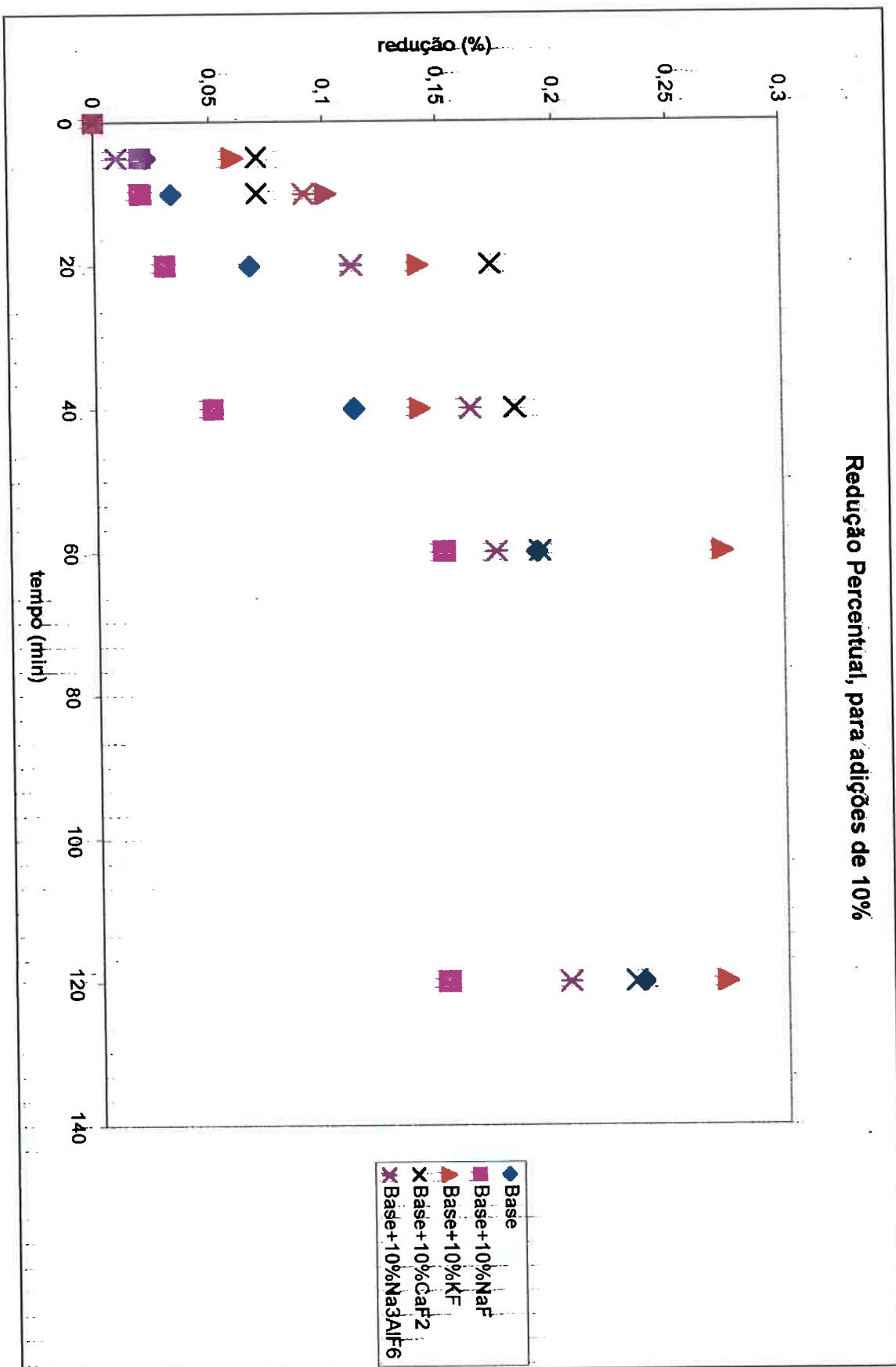
A tabela 5.22 mostra o valores de P para as adições de 10% de fluoretos .

Tabela 5.22 : Valores de redução de volume sobre área inicial para a comparação de resultados, 10%

Tempo (min)	Base	Base+10% NaF	Base+10% KF	Base+10% CaF₂	Base+10% Na₃AlF₆
0	0	0	0	0	0
5	0,0226	0,0202	0,0608	0,0710	0,0102
10	0,0338	0,0202	0,1013	0,0710	0,0920
20	0,0677	0,0302	0,1418	0,1724	0,1124
40	0,1127	0,0504	0,1418	0,1825	0,1635
60	0,1916	0,1511	0,2733	0,1926	0,1737
120	0,2366	0,1511	0,2733	0,2331	0,2043

A partir destes dados obteve-se a figura 5.5:

Redução Percentual, para adições de 10%



Analizando-se as figuras, observa-se que a adição de fluoretos aumenta consideravelmente a dissolução de alumina pelo fluxo salino, sendo o mais eficiente dos fluoretos estudados, nas composições estudadas, o NaF, seguido pelo CaF₂, e pelo KF. A fluxo base sem adições apresenta-se pobre na dissolução de alumina, conforme esperado. Também confirmou-se que o mecanismo pelo qual se diminuição de diâmetro, mostrando-se que, para um fluxo saturado de alumina, mesmo tendo a adição mais efetiva (NaF), não ocorre praticamente nenhuma dissolução.

O trabalho de Ye & Sahai⁽¹⁶⁾ deixa claro que os fluoretos aumentam a capacidade do fluxo de atacar e remover a camada de óxido superficial, principalmente quando há presença de magnésio na liga. O magnésio aumenta a taxa de oxidação do alumínio, o que implica no aumento da espessura da camada oxidada. O magnésio modifica também a composição da camada oxidada.

6 Conclusões

6.1 *Medidas de Viscosidade*

Os resultados obtidos mostram que adições de KF, NaF e CaF₂ diminuem efetivamente a viscosidade da mistura equimolar NaCl/KCl.

Esta diminuição da viscosidade explica, em parte, o acréscimo de rendimento causado pela adição de NaF, KF ou CaF₂, uma vez que o coalescimento das gotículas de alumínio depende não somente da remoção da camada de óxido superficial, mas também da movimentação descendente das gotas de alumínio no fluxo.

6.2 *Dissolução de Óxidos de Alumínio*

Os resultados obtidos confirmam que as adições de fluoretos melhoram a dissolução dos óxidos pelo fluxo salino. A fluxo base sem adições apresenta-se pobre na dissolução de alumina, conforme esperado. Também confirmou-se que o mecanismo pelo qual se diminuição de diâmetro, mostrando-se que, para um fluxo saturado de alumina, mesmo tendo a adição mais efetiva (NaF), não ocorre praticamente nenhuma dissolução.

Referências Bibliográficas

- [1] SAFATLE, Amália; *O Negócio é Reciclar*, Carta Capital, 19 de Agosto de 1998, p 19-23
- [2] ANUÁRIO ESTATÍSTICO 1994. São Paulo, Associação Brasileira do Alumínio - ABAL, 1994. p 58-89
- [3] AGENDA ABAL 489, 13 de Outubro de 1998, p 1
- [4] FRETI, S.; BORNAND, J.D.; BUXMANN, K. *Metallurgy of dross formation on Al melts*. Light Metals 1982, AIME, p.1003-16.
- [5] CREPEAU, P.N.; FENYES, M.L.; JEANNERET, J.L. *Solid fluxing practices for aluminum melting*. MODERN CASTING, July, p. 28-30, 1992.
- [6] VAN LIDEN, J.H.L.; STEWART JR., D.L. *Molten salt flux composition effects in aluminum scrap remelting*. Light Metals 1988, AIME, p.391-98.
- [7] UNGER, T.W.; BECKMANN, M. *Salt slag processing for recycling*. Light Metals 1992, The Minerals, Metals & Materials Society, 1991, p.1159-62.
- [8] JOHNSTON, T.J. & PETERSON, R.D. *The Role of Magnesium in Fluxing UBC*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECYCLE AND

SECONDARY RECOVERY OF METALS and FALL EXTRACTIVE AND
PROCESS METALLURGY MEETING, Fort Lauderdale, 1985. **Proceedings.**
AIME p. 417-428.

[9] BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., *Transport Phenomena*, John Wiley, 1966, p. 652-656

[10] VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE, *Schlackenatlas, Slag Atlas*. Düsseldorf, Verlag Stahleisen M.B.h., 1981, p 187-191

[11] LAY, L., *Corrosion Resistance of Technical Ceramics*, Crown, London, 1983, p 56, 108-109

[12] BACON, L. R., *Measurement of Absolute Viscosity by the Falling Sphere Method*, J. Franklin Institute 221 (1936), p 251-253

[13] LEVIN, E.M.; ROBBINS, C.R. & McMURDIE, H.F. *Phase Diagrams for Ceramists*, The American Society for Ceramists, USA, 1985 vol. II p 409

[14] SMITHILLS, C. J. , *Smithells' Metals Reference Book*, 6th ed., Butterworth & Co., 1983, p 9-1 a 9-18 e p 9-51 a 9-52

[15] ZHANG, M & MA, F, *Viscosity and Structure of Molten Halide Glasses Based on Chlorides, Bromides and Iodides*, Journal of Non-Cristaline Solids 112 (1989) p 106-110

- [16] YE, J.; SAHAI, Y. *Role of molten salt flux in melting of used beverage container (UBC) scrap.* In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM RECYCLING OF METALS AND ENGINEERED MATERIALS, 3., 1995. *Proceedings.* Warrendale, TMS, 1995. p. 639-50.
- [17] RICHARDSON, F. D., *Physical Chemistry of Melts in Metallurgy*, London, Academic Press, 1974. P. 363-425
- [18] TENÓRIO, J. A. S. , *Aspectos Fundamentais e Tecnológicos do Processo de Reciclagem das Latas de Alumínio*, 1996, tese de livre docência, p 32-86
- [19] GEIGER, G. H.; POIRIER, D. R., *Transport Phenomena in Materials Processing*, Masachusets, TMS, 1994, p. 453-550
- [20] DELGADO, F. & TENÓRIO, J. A. S., *Light Metals 1997*, The Minerals, Metals & Materials Society, 1996, p 1105-1108

Apêndice I – Tabelas de Medidas de Diâmetro das Esferas

Ensaio 1

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% NaF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.1 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.1 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,55	2,40	2,15	2,05	2,05	2,05	2,40
	2,60	2,35	2,20	2,20	2,10	2,00	2,50
	2,55	2,45	2,10	2,00	2,15	2,10	2,45
	2,50	2,40	2,25	1,95	2,05	2,00	2,55
	2,55	2,40	2,20	2,15	2,20	2,10	2,40
média	2,55	2,40	2,18	2,07	2,11	2,05	2,46

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.2 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.2 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,40	2,10	2,10	2,00	1,90	2,00	1,95
	2,50	2,10	2,15	2,15	2,00	2,10	2,10
	2,60	2,15	2,10	2,20	1,95	2,20	2,05
	2,50	2,10	2,20	2,20	2,00	2,20	2,10
	2,45	2,20	2,20	2,15	2,00	2,20	2,10
média	2,49	2,13	2,15	2,14	1,97	2,14	2,06

Ensaio 2

Neste ensaio utilizou-se Base + 10% NaF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.3 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.3 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,15	2,10	1,70	2,10	2,45	2,05	2,05
	2,25	2,05	2,00	2,20	2,30	2,15	2,10
	2,25	2,15	2,10	2,05	2,30	2,20	2,10
	2,25	2,10	2,10	2,20	2,45	2,05	2,20
	2,30	2,10	2,10	2,20	2,45	2,15	2,15
média	2,24	2,10	2,00	2,15	2,39	2,12	2,12

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.4 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.4 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,25	2,10	2,05	2,00	2,45	2,00	2,05
	2,15	2,15	2,35	2,00	2,60	2,10	2,00
	2,15	2,20	2,25	2,05	2,45	2,15	2,10
	2,20	2,20	2,10	2,20	2,50	2,20	2,00
	2,20	2,20	2,15	2,10	2,65	2,10	2,00
média	2,19	2,17	2,18	2,07	2,53	2,11	2,03

Ensaio 3

Neste ensaio utilizou-se Base + 20% NaF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.5 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.5 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,10	2,20	2,25	2,25	2,10	2,30	2,00
	2,20	2,35	2,20	2,10	2,00	2,10	2,10
	2,30	2,30	2,30	2,10	2,00	2,20	2,20
	2,20	2,35	2,50	1,95	2,00	2,05	2,20
	2,20	2,40	2,40	2,25	2,00	2,15	2,35
média	2,20	2,32	2,33	2,13	2,02	2,16	2,17

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.6 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.6 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,00	2,05	2,40	2,00	2,10	2,05	2,00
	2,10	2,15	2,50	2,20	2,00	2,10	2,10
	2,10	2,20	2,55	2,30	2,10	2,20	2,15
	2,20	2,20	2,40	2,25	2,00	2,10	2,00
	2,25	2,15	2,50	2,20	2,00	2,10	2,35
média	2,13	2,15	2,47	2,19	2,04	2,11	2,12

Ensaio 4

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% KF .

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.7 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.7 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,50	2,15	2,05	2,00	2,40	2,05	2,20
	2,45	2,20	2,10	2,00	2,50	2,00	2,20
	2,40	2,20	2,30	2,00	2,50	2,20	2,20
	2,60	2,30	2,20	2,15	2,70	2,15	2,25
	2,50	2,20	2,30	2,00	2,50	2,10	2,30
média	2,49	2,21	2,19	2,03	2,52	2,10	2,23

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.8 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.8 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,15	2,20	2,15	2,10	2,05	2,00	2,20
	2,10	2,40	2,15	2,10	2,10	2,10	2,20
	2,10	2,30	2,20	2,20	2,15	2,10	2,05
	2,20	2,40	2,10	2,10	2,10	1,90	2,20
	2,20	2,50	2,20	2,20	2,15	1,95	2,10
média	2,15	2,36	2,16	2,14	2,11	2,01	2,15

Ensaio 5

Neste ensaio utilizou-se Base + 10% KF.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.9 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.9 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,20	2,00	2,40	2,00	2,10	2,30	2,00
	2,25	2,00	2,20	2,10	2,25	2,50	2,10
	2,20	2,10	2,10	2,10	2,15	2,40	2,15
	2,35	2,10	2,00	2,10	2,10	2,50	2,20
	2,20	1,95	2,10	2,15	2,15	2,50	2,10
média	2,24	2,03	2,16	2,09	2,15	2,44	2,11

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.10 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.10 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,50	2,40	2,25	2,20	2,20	2,20	2,20
	2,55	2,20	2,15	2,10	2,20	2,00	2,10
	2,55	2,15	2,30	2,15	2,10	2,10	2,10
	2,60	2,25	2,15	2,15	2,25	2,10	2,10
	2,60	2,25	2,35	2,10	2,25	2,15	2,10
média	2,56	2,25	2,24	2,14	2,20	2,11	2,12

Ensaio 6

Neste ensaio utilizou-se Base + 20% KF .

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.11 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.11 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,25	2,05	2,25	2,20	2,20	2,30	2,00
	2,20	2,05	2,05	2,05	2,20	2,30	2,15
	2,35	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,10
	2,00	2,10	2,35	2,10	2,15	2,20	2,10
	2,20	2,05	2,35	2,10	2,30	2,15	2,00
média	2,20	2,05	2,20	2,09	2,21	2,23	2,07

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.12 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.12 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,50	2,00	2,20	2,00	2,10	1,60	1,90
	2,70	2,10	2,15	2,05	2,40	2,10	2,10
	2,70	2,10	2,10	2,30	2,10	2,05	2,10
	2,45	2,05	2,20	2,20	2,20	2,10	2,10
	2,60	2,10	2,25	2,15	2,30	2,10	1,95
média	2,59	2,07	2,18	2,14	2,22	1,99	2,03

Ensaio 7

Neste ensaio utilizou-se Base + 5% CaF₂.

Etapa 1: Temperatura 760 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.13 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.13 - medidas das esferas usadas na etapa 1 (mm)

esfera	A	B	C	D	E	F	G
	2,05	2,05	2,10	2,05	2,10	2,05	1,90
	2,05	2,05	2,10	2,05	2,05	2,05	2,05
	1,85	2,10	2,15	2,15	2,10	2,15	2,15
	2,20	2,05	2,15	2,20	2,10	2,20	2,05
	1,90	2,10	2,20	2,10	2,10	2,10	2,10
média	2,01	2,07	2,14	2,11	2,09	2,11	2,05

Etapa 2: Temperatura 810 °C

Nesta etapa, apresentamos na tabela AI.14 a relação das esferas a serem utilizadas, com seus respectivos diâmetros.

Tabela AI.14 - medidas das esferas usadas na etapa 2 (mm)

esfera	H	I	J	K	L	M	N
	2,10	1,85	2,05	2,05	2,10	2,20	2,20
	2,05	2,10	2,10	2,05	2,05	2,05	1,90
	2,20	2,15	2,15	2,15	2,10	2,15	1,85
	2,20	2,15	2,10	2,20	2,10	2,20	2,05
	2,00	2,10	2,20	2,10	1,90	2,10	2,05
média	2,11	2,07	2,12	2,11	2,05	2,14	2,01