

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VIABILIDADE DO USO DO PÓ ORIUNDO DO FORNO ELÉTRICO
(RESÍDUO SIDERÚRGICO) NA CONSTRUÇÃO CIVIL

MARIA TERESA GOMES BARBOSA

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.


Porto Alegre

Março de 1993

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO ORIENTADOR E PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.



Prof. Hélio Adão Greven
Orientador



Prof. Ademar Gilberto Groehs
Coordenador do Curso de
Pós-graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

- Prof. Hélio Adão Greven (orientador)
Dr.-Ing. pela Universitaet Hannover
- Prof. Antônio Eduardo Polisseni (co-orientador)
M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Prof. Antonio Cezar Faria Vilela
Dr.-Ing. pela RWTH - AACHEN / Alemanha
- Prof. Sérgio Roberto Maestrini
Ph.D. pela N.C.S.U. / USA

Ao Professor
Antonio Cezar Faria Vilela
com admiração e carinho

"Quem nada conhece, nada ama.
Quem nada pode fazer, nada compreende.
Quem nada compreende, nada vale.
Mas quem compreende também ama, observa, vê...
Quanto mais conhecimento houver inerente numa coisa,
tanto maior o amor...
Aquele que imagina que todos os frutos amadurecem
ao mesmo tempo, como as cerejas,
nada sabe a respeito das uvas."

(Paracelso)

AGRADECIMENTOS

Aos professores Hélio Adão Greven e Antônio Eduardo Polisseni pela orientação desta tese.

A Siderúrgica Mendes Júnior S.A., localizada na cidade de Juiz de Fora (MG), por todo o apoio técnico e financeiro, sem o qual seria difícil alcançar o meu objetivo.

A Fábrica de Cimento TUPI S.A. (Pedra do Sino - MG), que forneceu os laboratórios e os recursos materiais e humanos. Meus agradecimentos especiais aos laboratoristas Fernando, Raimundo e José Nilton e ao Engenheiro Neio L. Xavier, pelas orientações fornecidas.

A Universidade Federal de Juiz de Fora (MG) que através do convênio firmado com a Siderúrgica Mendes Júnior proporcionou todo o apoio técnico necessário a pesquisa.

A CONSTRAG - Construtora e Transportadora Gomes Ltda, localizada na cidade de Juiz de Fora (MG), pela boa vontade na fase final da pesquisa, auxiliando na moldagem dos blocos.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa fornecida durante o período de março de 1991 a fevereiro de 1993.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram com preciosas informações, especialmente a José L. Ribeiro (UFRGS), na área de estatística; Antônio C. F. Vilela (UFRGS), na área de metalurgia e José Renato Abramo (UFJF), na área de materiais de construção.

A toda a equipe do NORIE, especialmente aos colegas: Adriana Bondar, Angela de Moura Ferreira, Carmem M. Lange, Denise Antunes Silva, Francisco C. Morato Leite, Héctor R. Castellón, Maria Inês Moroni de Souza, Rejane M. Tubino Geyer e Ane Lise Costa Dalcul, com que compartilhei bons e maus momentos, ótimos amigos.

A boa vontade dos funcionários da biblioteca da UFRGS, especialmente a seção de periódicos e a Juliana pela correção das referências bibliográficas.

Aos eternos amigos gaúchos: Noemi Machado, Gládis e Arlindo Ponzoni, Jandira e João Restori, Célia e Olmiro Gonçalves, Leda Lacy Carpegiani, Nair dos Santos, Maria de Lurdes Oliveirae Jathniel de Freitas, Tânia e Maria da Glória Squeff, Mirian Grehi, Mara e Karine.

Aos amigos e parentes que direta ou indiretamente contribuía para tornar mais amenos os períodos de incerteza, especialmente meus irmãos: PEDRO, RAQUEL e MARIA CRISTINA e pais: PEDRO e LUZIA, que através do apoio emocional, financeiro e pela paciência do dia a dia partilham hoje comigo a satisfação da conclusão deste curso de pós-graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE QUADROS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	04
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	04
2.2. PÓ ORIUNDO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (RESÍDUO SIDERÚRGICO).....	08
2.2.1. Forno Elétrico a Arco.....	08
2.2.2. Pelotização.....	13
2.2.3. Caracterização do Resíduo.....	18
2.3. CIMENTO PORTLAND.....	19
2.3.1. Introdução.....	19
2.3.2. Composição Química do Cimento Portland.....	19
2.3.3. Cimento Portland com Escória.....	24
2.3.4. Ensaio Químicos.....	27
2.3.5. Ensaio Físicos.....	29
2.4. CAL HIDRATADA.....	35
2.5. AGLOMERANTES MISTOS.....	39
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1. MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA.....	41
3.1.1. Cimento.....	41
3.1.2. Resíduo do Forno Elétrico (ROFE).....	43
3.1.3. Cal hidratada.....	44
3.1.4. Água.....	46
3.1.5. Areia.....	46
3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.3. CRONOGRAMA DA MOLDAGEM.....	50
3.4. MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
3.4.1. Análise estatística básica.....	52

3.4.2. Comparação múltipla de médias.....	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS.....	55
4.1. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS REALIZADOS NA ETAPA INICIAL.....	55
4.1.1. Ensaio químicos.....	55
4.1.2. Ensaio físicos.....	66
4.1.2.1. Finura.....	66
4.1.2.2. Consistência normal.....	68
4.1.2.3. Resistência à compressão.....	71
4.2. RESULTADOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS REALIZADOS NA SEGUNDA ETAPA.....	76
4.2.1. Ensaio químicos.....	76
4.2.2. Ensaio físicos.....	80
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	85
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	88
ANEXO 1 - BLOCOS DE CONCRETO.....	91
ANEXO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA EXECUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO..	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - Ponto de coleta do pó (resíduo).....	09
FIGURA 2.2 - Descarga do resíduo no parque de depósito.....	09
FIGURA 2.3 - Parque de depósito do resíduo.....	10
FIGURA 2.4 - Lay-out esquemático do despoeiramento do FEA.....	11
FIGURA 2.5 - Fluxograma do processo de pelotização do minério de ferro.....	14
FIGURA 2.6 - Influência das forças capilares no mecanismo de ligação.....	15
FIGURA 2.7 - Influência da água na formação de pelotas cruas.....	16
FIGURA 2.8 - Comportamento mecânico dos compostos do cimento.....	22
FIGURA 2.9 - Detalhes do aparelho de Vicat, com sonda e agulha.....	31
FIGURA 2.10 - Agulha de Le Chatelier..	33

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 - Esquema do desenvolvimento dos ensaios..	49
---	----

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 - % CaO x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	57
FIGURA 4.2 - % Cal livre x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	58
FIGURA 4.3 - % MgO x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	59
FIGURA 4.4 - % SiO ₂ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	60
FIGURA 4.5 - % Al ₂ O ₃ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	61
FIGURA 4.6 - % Fe ₂ O ₃ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	61

FIGURA 4.7 - % SO ₃ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	62
FIGURA 4.8 - %Álcalis x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	63
FIGURA 4.9 - % P.F. x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	64
FIGURA 4.10 - % R.I. x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	64
FIGURA 4.11 - % Retida na peneira # 200 x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	67
FIGURA 4.12 - % Retida na peneira # 325 x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	67
FIGURA 4.13 - Superfície específica (m ² /kg) x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.....	68
FIGURA 4.14 - Tempo de pega (início e fim)-(h:m) x % Cal hidratada para as misturas compostas por 90% cimento + 10% ROFE.....	70
FIGURA 4.15 - Tempo de pega (início e fim)-(h:m) x % Cal hidratada para as misturas compostas por 60%cimento + 40% ROFE.....	71
FIGURA 4.16 - Resistência à compressão (MPa) x Idade de rompimento (dias).....	73
FIGURA 4.17 - % Compostos químicos x % Cal hidratada para as misturas estudadas na segunda etapa...	79
FIGURA 4.18 - Resistência à compressão (MPa) x Idade de rompimento para as misturas estudadas na segunda etapa.....	82

ANEXO

FIGURA A1 - Um dos tipos de máquina utilizada na moldagem dos blocos.....	92
---	----

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2

QUADRO 2.1 - Composição potencial de cimentos brasileiros e americanos.....	21
QUADRO 2.2 - Calor de hidratação dos constituintes do cimento.....	23
QUADRO 2.3 - Propriedades dos compostos do cimento...	24
QUADRO 2.4 - Calor de hidratação do cimento Portland e do cimento portland com escória.....	26
QUADRO 2.5 - Influência da quantidade de escória sobre o calor de hidratação.....	26
QUADRO 2.6 - Composição química do cimento Portland..	27
QUADRO 2.7 - Requisitos químicos e físicos para a cal hidratada.....	37
QUADRO 2.8 - Variação das propriedades de uma argamassa com a variação do teor relativo de cal.....	39

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.1 - Resultados das análises químicas e físicas do cimento CPII-E/32 - TUPI.....	42
QUADRO 3.2 - Composição potencial do clínquer do cimento CPII-E/32.....	42
QUADRO 3.3 - Composição química do ROFE (%).....	43
QUADRO 3.4 - Ensaio químicos do ROFE.	44
QUADRO 3.5 - Resultado dos ensaios físicos realizados no resíduo e no cimento.....	44
QUADRO 3.6 - Resultados das análises químicas e físicas da cal dolomítica GLOCAL.....	45
QUADRO 3.7 - Frações granulométricas.....	46
QUADRO 3.8 - Granulometria.....	46
QUADRO 3.9 - Composição das misturas de cimento, ROFE e cal estudadas inicialmente.....	47
QUADRO 3.10 - Percentagem ideal entre cimento, ROFE e cal.....	48

CAPÍTULO 4

QUADRO 4.1 - Resultado das composições químicas das misturas estudadas na primeira etapa.....	56
QUADRO 4.2 - Resultado dos ensaios de finura das misturas estudadas na primeira etapa.....	66
QUADRO 4.3 - Resultado dos ensaios de consistência normal da pasta (%H ₂ O), tempo de pega e expansibilidade volumétrica das misturas estudadas na primeira etapa.....	69
QUADRO 4.4 - Resultado do ensaio de resistência à compressão (MPa) e desvio relativo (%).....	72
QUADRO 4.5 - Valores de F para os fatores analisados.....	74
QUADRO 4.6 - Resultado das composições químicas das misturas estudadas na segunda etapa.....	76
QUADRO 4.7 - Resultado dos ensaios de finura das misturas estudadas na segunda etapa.....	80
QUADRO 4.8 - Resultado dos ensaios de consistência normal da pasta (%H ₂ O), tempo de pega e expansibilidade volumétrica das misturas estudadas na segunda etapa.....	80
QUADRO 4.9 - Resultado do ensaio de resistência à compressão (MPa) e desvio relativo (%) das misturas estudadas na segunda etapa.....	81
QUADRO 4.10- Valores de F para os fatores analisados.....	82

ANEXO

QUADRO A1 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (MPa) e absorção (%) dos blocos estudados.....	93
QUADRO A2 - Composição granulométrica dos agregados miúdos empregados na confecção dos blocos de concreto.....	96
QUADRO A3 - Massa específica, peso unitário e teor de material pulverulento dos agregados miúdos empregados na confecção dos blocos de concreto.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Alc - álcalis (óxido de sódio (Na_2O) + 0,658% (óxido de potássio (K_2O)))
- Al_2O_3 - óxido de alumínio ou alumina
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- BE - betonada
- C - Cimento Portland tipo: CII-E/32
- CaO - óxido de cálcio
- C.L. - cal livre
- C.H. - cal hidratada
- C.P. - corpo de prova
- CP/25 - cimento Portland com resistência mínima aos 28 dias de idade de 25 MPa
- CP/32 - cimento Portland com resistência mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa
- CII-E - cimento Portland composto com escória
- CII-E/32 - cimento Portland composto com escória e com resistência mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa
- C.V. - coeficiente de variação
- C_3A - ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) - aluminato tricálcio
- C_4AF - ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) - ferroaluminato tetracálcio
- C_2S - ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$) - silicato dicálcio
- C_3S - ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$) - silicato tricálcio
- D.R. - desvio relativo
- EXPANSIB - expansibilidade volumétrica

- Fcalculado - valor de F (calculado) onde F é a distribuição de Fischer
- Ftabelado - valor de F (tabelado) sendo F a distribuição de Fischer
- FEA - forno elétrico a arco
- Fe₂O₃ - óxido de ferro (hematita)
- GIPSITA - CaSO₄.2 H₂O - sulfato de cálcio di-hidratado
- IR - idade de rompimento
- ÍNDICE DE CONS - índice de consistência
- MgO - óxido de magnésio
- MIST.- mistura
- n. - número
- P.F. - perda ao fogo
- RC - resistência à compressão
- RCS - resistência à compressão simples
- RESIST. - resistência
- R.I. - resíduo insolúvel
- ROFE - Resíduo Oriundo do Forno Elétrico (resíduo = rejeito = pó)
- SiO₂ - óxido de silício ou sílica
- SMJ - Siderúrgica Mendes Júnior
- SO₃ - anidrido sulfúrico
- TC - teor (%) de cal
- TFP - tempo de fim de pega
- TIP - tempo de início de pega
- # - peneira
- Δ - variação percentual

RESUMO

O resíduo oriundo do forno elétrico (ROFE), procedente da Siderúrgica Mendes Júnior S.A., vem sendo depositado a céu aberto desde a implantação desta empresa na cidade de Juiz de Fora (MG). Acredita-se que as quantidades de rejeito armazenadas até o momento, em areal junto a empresa, seja de aproximadamente 80.000 toneladas. Além disto, há uma produção mensal, estimada em 600 toneladas, agravando esta situação.

Este trabalho procurou verificar a viabilidade técnica da adição do ROFE ao cimento Portland composto, tipo CPM-E/32, obtendo, assim, um "cimento alternativo" (não estrutural) para a construção civil. Além disto, estudou-se a influência da adição da cal hidratada a este novo cimento, nos teores de: 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (em peso). Dezessete diferentes misturas entre os três materiais (cimento / ROFE / cal) foram estudadas, encontrando-se como resultado final um teor ideal entre o cimento e o resíduo.

Os ensaios químicos e físicos realizados nas misturas foram os mesmos normatizados pela ABNT e pela ABCP para o cimento Portland, uma vez que não se obteve informações relevantes no levantamento bibliográfico realizado a respeito do reaproveitamento do ROFE na construção civil.

Os ensaios efetuados buscaram caracterizar as misturas no que se refere a: composição mineralógica, finura, tempo de pega, expansibilidade volumétrica e resistência à compressão (aos 3, 7 e 28 dias de idade).

ABSTRACT

The iron dust that results from the process of electric furnance has been open air deposited since the inauguration of the Mendes Junior Siderurgic in the town of Juiz de Fora (MG). It is estimated that the total amount of rejects deposited so far is approximately 80.000 ton. Moreover, iron dust continues to be produced at a rate of 600 ton a month, aggravating the problem.

This research work aims at investigating an alternative cement for the building industry, by mixing it to Portland cement. Also, the influence of the addition of hydrated lime on this alternative material was studied. On the whole, seventeen different combination of cement, iron dust and lime were tested. One particular combination of iron dust and cement was found to be optimum.

The chemical and physical tests carried out were the ones prescribed for Portland cement by Brazilian standards from ABNT and ABCP, since there was no references about the use of iron dust as a building material in the literature.

Such tests intended to characterize the mixtures in terms of mineralogical composition, fineness modulus, hardening time, volumetric expansion and compressive strength (at 3, 7 and 28 days).

1 . INTRODUÇÃO

Não faz muito tempo que o "lixo industrial" era visto pela direção das indústrias como um mal necessário, algo desagradável e inútil, inerente ao grande objetivo da empresa: a fabricação do produto.

Com as restrições, cada vez maiores, impostas pelas legislações ambientais, este lixo passou a ser focado não somente como inútil, mas também como uma permanente fonte de despesas, que só servia para onerar o custo de fabricação dos produtos.

Com o advento da "Era Ecológica" as leis ambientais ganharam força, a população começou a se conscientizar dos problemas trazidos pelo lixo industrial, os acidentes vieram à tona e as punições começaram a ser aplicadas. As grandes empresas contrataram técnicos especializados e, conseqüentemente, mais da metade dos resíduos industriais que eram considerados "lixo" transformaram-se em material reciclável ou matéria-prima para outras indústrias.

Dentro deste contexto a Siderúrgica Mendes Júnior S.A., localizada na cidade de Juiz de Fora (MG), conveniou-se à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora com o objetivo de estudar o aproveitamento de um dos seus rejeitos industriais na construção civil.

É importante esclarecer que esta empresa siderúrgica, a exemplo de outras, emprega fornos elétricos para a fabricação de aços. Estes fornos, como em todo o processo siderúrgico de fusão de metais, gera resíduos, exigindo sua remoção nos pontos de coleta.

As modernas técnicas usadas na siderurgia permitem aglomerar o pó oriundo do forno elétrico (resíduo), agregando um grande número de partículas, viabilizando o seu emprego nos fornos de redução, principalmente no alto-forno.

Entretanto, ainda não foi implantado na Siderúrgica Mendes Júnior um sistema capaz de reaproveitar os finos provenientes do forno elétrico. Sendo assim, este resíduo siderúrgico (pó oriundo do forno elétrico) que é altamente poluente, encontra-se disponível para pesquisas de materiais alternativos para a construção civil.

A produção mensal do pó oriundo do forno elétrico, nesta siderúrgica, é de 600 toneladas.⁽⁴⁷⁾ Acredita-se que a quantidade de rejeito armazenado até o momento, em areal junto a empresa, seja de 80.000 toneladas.

O resíduo (pó oriundo do forno elétrico), da forma como se apresenta, é um material sem propriedades aglutinantes à temperatura ambiente, pois o composto químico predominante é o óxido de ferro (Fe_2O_3), por isso torna-se necessário sua adição a um aglomerante.

A presente pesquisa procura verificar a viabilidade técnica da produção de um "cimento alternativo" a partir da adição do resíduo, procedente da Siderúrgica Mendes Júnior S.A., ao cimento Portland e ao aglomerante composto por cimento e cal hidratada.

Os objetivos deste estudo são:

1) minimizar o problema ambiental causado pela poluição proveniente do resíduo;

2) desenvolver um material alternativo para a construção civil, com capacidade aglomerante e características semelhantes às do cimento Portland, através da verificação da viabilidade técnica da adição do resíduo ao cimento e ao aglomerante composto por cimento e cal hidratada;

3) possibilitar a redução do custo do material de construção civil, viabilizando inclusive o seu emprego em construções populares.

Acredita-se que este "cimento alternativo" seja viável economicamente, pois resulta da adição do resíduo (cujo custo de produção é desconsiderado por tratar-se de um rejeito industrial) ao cimento Portland e ao aglomerante composto por cimento e cal hidratada.

Esta pesquisa objetivou verificar, como etapa inicial, a viabilidade técnica da adição deste rejeito industrial ao cimento Portland e ao aglomerante composto formado por cimento e cal hidratada e, sugerir possíveis aplicações para o "novo cimento". O prosseguimento de pesquisas nesta área deverá analisar os demais aspectos que sejam necessários para esgotar o assunto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Objetivando o barateamento dos materiais de construção civil, existem, em andamento, várias pesquisas de materiais alternativos aos utilizados tradicionalmente. CINCOTTO⁽³⁹⁾ relata "ser o consumo de combustível, quer na produção, quer no transporte, um parâmetro com considerável peso no preço do material de construção, depreende-se que a pesquisa de materiais alternativos visa a redução desse consumo energético."

A tal propósito, CINCOTTO & KAUPATEZ⁽⁴²⁾ mencionam que "o aproveitamento de resíduos industriais na construção civil desperta grande interesse, na medida em que pode contribuir para a redução do custo e tornar acessível a aquisição da casa própria pela população de baixa renda."

Na área restrita aos materiais de construção, há interesse na redução do consumo de cimento Portland e cal, produtos de elevado consumo energético na sua produção.

De acordo com CINCOTTO⁽³⁸⁾ são três as razões que motivaram o estudo do aproveitamento de resíduos industriais, a saber: em primeiro, uma preocupação com o esgotamento de reservas de matéria-prima, se não para um país na sua totalidade, pelo menos para regiões específicas. Segundo, a preocupação com a preservação do meio ambiente, afetada pelo crescente volume de resíduos sólidos descartados e, terceiro, em países carentes de matéria-prima, a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico reciclando rejeitos sólidos.

Conforme análise de SAUTEREY⁽⁷²⁾, a construção civil é o ramo da atividade tecnológica que, pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser a mais indicada para absorver os resíduos sólidos.

A literatura indica que nos últimos dez anos tem crescido significativamente o número de pesquisadores voltados para estudos de aproveitamento geral dos resíduos industriais e urbanos. Vale citar a criação dos seguintes comitês de entidades normalizados: (REF.BIBL.39,62,83)

- Comitê E-38, criado em 1974, pela ASTM - American Society for Testing and Materials.

- Comitê 37-DRC, criado em 1978, pela RILEM - Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux.

- Comitê de "Pesquisa em Materiais Residuais e Subprodutos para Construção de Rodovias", criado pela OECD - Organization for Economic Cooperation and Development, com sede em Paris.

Nacionalmente, existem estudos referentes à utilização de resíduos industriais potencialmente aglomerantes, tais como: escória de alto-forno^(40,55,68,74,75,78), cinza volante^(04,42,48,53,76), cinza de casca de arroz^(45,49,52,63) dentre outros.

Esta pesquisa busca estudar, especificamente, a viabilidade do emprego do pó oriundo do forno elétrico (resíduo siderúrgico) na construção civil. Este resíduo, da forma como se apresenta, é uma material sem propriedades aglomerantes, pois é composto essencialmente pelo óxido de ferro (Fe_2O_3). Para que este rejeito adquira essas propriedades, é necessário calciná-lo a uma temperatura de aproximadamente 1300 °C⁽⁵⁸⁾ o que acarretaria em custos elevados.

Cumprê ressaltar que no levantamento bibliográfico realizado, não se obteve informações relevantes a respeito do aproveitamento do pó oriundo do forno elétrico na construção civil. Isto se deve ao fato do desenvolvimento de técnicas siderúrgicas que aglomeram este resíduo, viabilizando o seu emprego nos fornos de redução (alto-forno).

Não obstante, a adição deste rejeito a um aglomerante, segundo ARREDONDO⁽⁰⁵⁾, como por exemplo, o cimento e/ou cal, permite empregar o material à temperatura ambiente.

Diante desta possibilidade, acredita-se que este resíduo siderúrgico, que é bem mais fino que o cimento (BLAINE

do resíduo é aproximadamente 80% maior que o BLAINE do cimento (vide capítulo 3)), possa propiciar a obtenção de um "cimento alternativo" através da adição deste rejeito ao cimento Portland e/ou cal hidratada.

Na tentativa de encontrar razões que justifiquem tal adição, GUEDERT et al⁽⁴⁹⁾ mencionam três: Tecnológica, Econômica e Ecológica.

1. TECNOLÓGICA: sob o aspecto físico, grãos de dimensões menores que os do cimento (superfície específica do cimento, em geral, próxima a 450 m²/kg (vide capítulo 3)), contribuem para uma melhor microestrutura das pastas e argamassas.

2. ECONÔMICA: o uso de adições reduz o custo do produto final sem necessidade de novos investimentos.

3. ECOLÓGICA: o problema de deposição de rejeitos industriais vem se agravando em todo o mundo. No caso específico do pó oriundo do forno elétrico, FONTES et al⁽⁴⁷⁾ mencionam que ele tem sido depositado a céu aberto ocupando grandes áreas. Com o crescimento de uma "consciência ecológica", os custos de descarte deste material tendem a aumentar.

No que se refere a pesquisa de materiais alternativos, CINCOTTO⁽³⁹⁾ esclarece que esta linha de trabalho se intensificou desde que a necessidade de reciclagem de resíduos sólidos, visando a proteção do meio ambiente, passou a ser insistentemente pregada por entidades ecológicas.

Procurando obter um material alternativo para a construção civil esta pesquisa determinou, inicialmente, valores considerados como limites máximo e mínimo para a adição do rejeito ao cimento Portland. Baseado no estudo das combinações iniciais, avaliou-se a proporção ideal técnica e economicamente, entre o resíduo e o cimento.

Diante das inúmeras propriedades da cal que demonstram que ela possui um emprego grande e diversificado na construção civil^(01,04,36,37,50,71,76), procurou-se avaliar a influência da adição deste aglomerante às misturas de cimento e resíduo.

Os traços, em peso, das misturas estudadas inicialmente foram determinados intuitivamente, confirmados em ensaios preliminares, os quais demonstraram, como sendo ideais, as seguintes misturas: 60% cimento + 40% resíduo (limite máximo para a adição) e 90% cimento + 10% resíduo (limite mínimo para a adição). Verificou-se, ainda, a influência da adição da cal hidratada nos teores de: 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (% em peso sobre a mistura composta por cimento e resíduo).

Devido a ausência de informações específicas na literatura nacional e internacional consultada, optou-se por adotar, no estudo de cada uma das misturas mencionadas acima, os ensaios normatizados para o cimento Portland. Deste modo, este trabalho baseou-se nas normas da ABNT e nos manuais da ABCP.

Os ensaios químicos e físicos realizados em cada uma das misturas, buscaram caracteriza-las no que se refere a:

- composição mineralógica;
- finura;
- tempo de pega;
- expansibilidade volumétrica;
- resistência à compressão (aos 3, 7 e 28 dias de idade).

Os itens a seguir expõem uma abordagem literária a respeito dos materiais empregados neste trabalho de pesquisa.

2.2. PÓ ORIUNDO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (RESÍDUO SIDERÚRGICO)

2.2.1. Forno Elétrico a Arco

O forno elétrico a arco (FEA) é um equipamento usado para a produção de aço, normalmente em usinas siderúrgicas semi-integradas. Entende-se por usinas siderúrgicas semi-integradas como sendo aquelas em que são realizadas as operações de fusão, refino e solidificação do aço, seguidas por uma ou mais operações de conformação mecânica, como por exemplo, laminação, trefilação e forjamento.

O FEA tem fonte energética que independe do refino, e portanto pode partir com matérias-primas sólidas, fundi-la via energia elétrica e após a fusão da carga, executar as operações de refino. No entanto é comum que esse equipamento se destine principalmente a fusão de sucata de aço (incluindo ou não gusa sólido na carga), seguido de adições de elementos de liga (via ferro-liga); assim sendo o refino, nesses equipamentos, seria de pequena importância. (BRADASCHIA⁽³¹⁾)

No funcionamento deste tipo de forno elétrico há geração de resíduos particulados que, junto com os gases do processo, são coletados por um sistema de exaustão acoplado ao forno. O pó gerado é removido em determinados pontos de coleta do sistema de despoeiramento.

A Siderúrgica Mendes Júnior (SMJ), a exemplo de outras siderúrgicas, utiliza caçambas sob o silo de coleta para a retirada do pó gerado. Numa segunda etapa, e como solução a ser ainda implantada, a empresa prevê um sistema de pelotização para o rejeito. Este sistema será abordado no item 2.2.2.

O transporte destas caçambas é feito por meio de caminhões dentro do areal da usina até o parque de depósito ("bota fora"), contaminando o meio ambiente.

As figuras 2.1 a 2.3 ilustram o processo que envolve a retirada do pó pelas caçambas e a descarga do resíduo no parque de depósito.

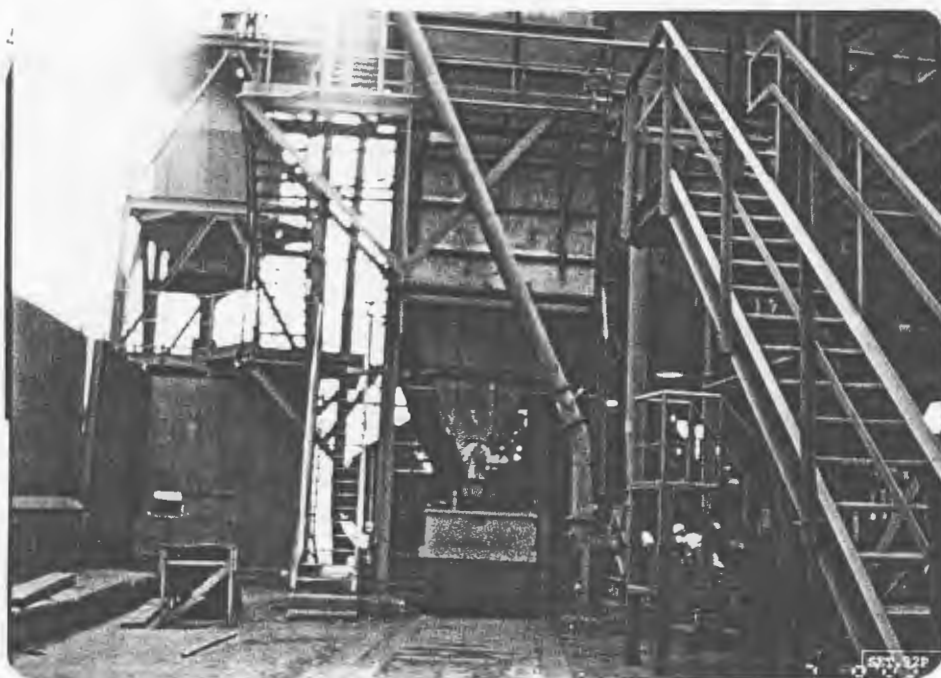


FIGURA 2.1- Ponto de Coleta do Pó (Resíduo)



FIGURA 2.2- Descarga do Resíduo no Parque de Depósito



FIGURA 2.3- Parque de Depósito do Resíduo

Na tentativa de solucionar a contaminação causada pelo pó oriundo do forno elétrico, FONTES et al⁽⁴⁷⁾ apresentaram um "Lay-out" esquemático do despoeiramento do FEA que apresenta como solução a implantação de um sistema de pelotização, ilustrado na figura 2.4 e descrito a seguir.

A captação dos gases gerados no forno durante a operação é feita através do duto fixo (ITEM 4). A depressão necessária para succionar os gases é produzida pelos exaustores (ITEM 24).

O trajeto percorrido pelos gases a partir do duto fixo é o seguinte:

- CURVA (ITEM 3) com canhão e bucha (ITEM 2). Esta bucha dá condições de controle da entrada de maior ou menor quantidade de ar para a queima de CO gerado no processo.

- CÂMARA DE COMBUSTÃO (ITEM 7 e 8) onde são queimados os gases combustíveis remanescentes da operação do FEA.

Sob a câmara de combustão encontra-se o primeiro equipamento de coleta do pó: caçamba removível (ITEM 10) onde são coletados 4,5 toneladas de pó por dia.

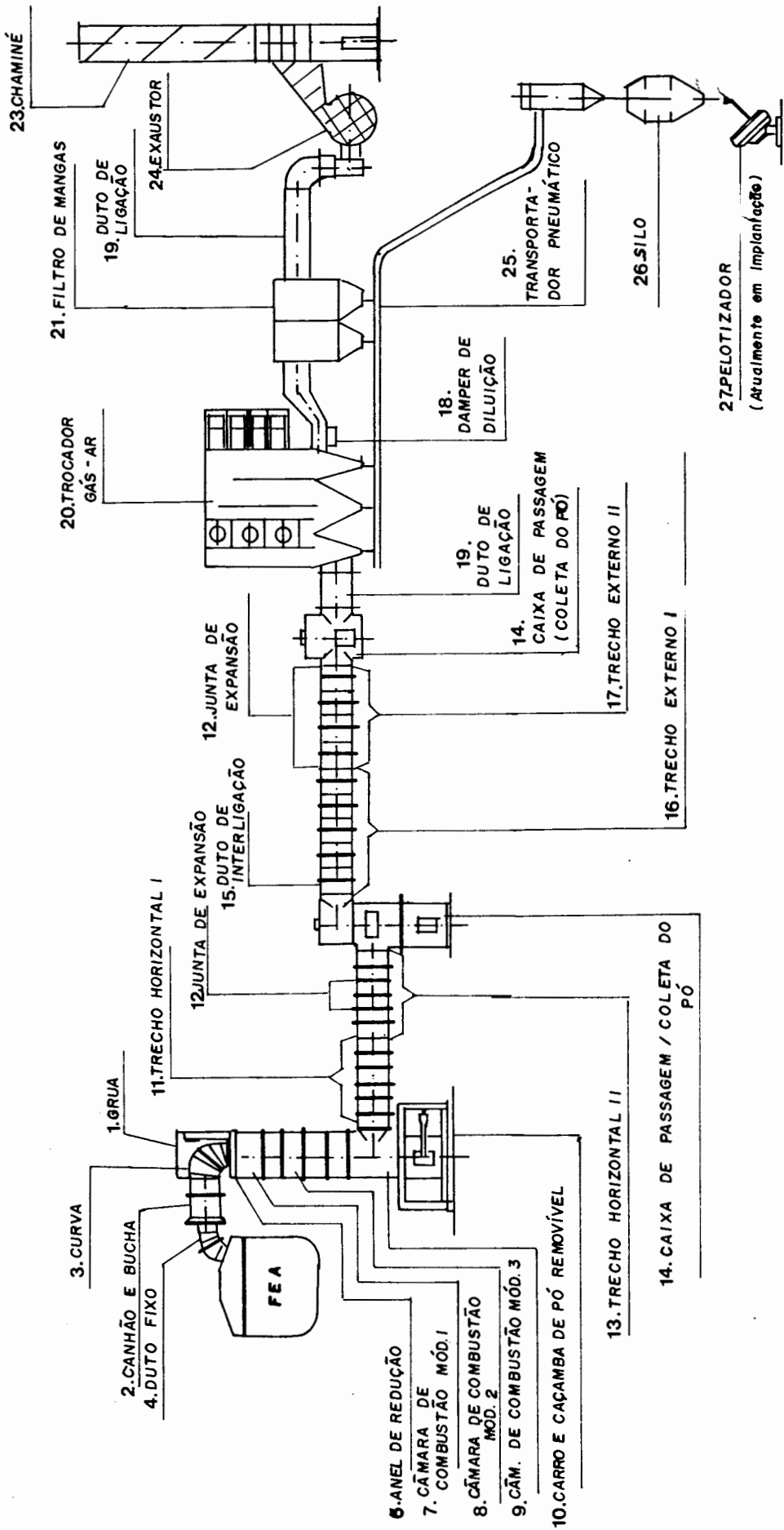


FIGURA 2.4- LAY-OUT Esquemático de Despeiramento do

FEA

- DUTOS REFRIGERADORES INTERNOS (ITEM 11 e 13)
- DUTOS DE LIGAÇÃO (ITEM 14 e 15) da área interna com a externa onde se encontra o segundo ponto de coleta do pó.
- DUTOS REFRIGERADORES EXTERNOS (ITEM 16 e 17)
- CAIXA DE PASSAGEM (ITEM 14) com mais um ponto de coleta do pó e DUTO DE LIGAÇÃO (ITEM 19)
- TROCADOR GÁS-AR (ITEM 20)
- DAMPER DE DILUIÇÃO (ITEM 18) que controla a temperatura de entrada do filtro de mangas pela admissão de ar frio.
- FILTRO DE MANGAS (ITEM 21) onde há filtragem dos gases de modo a liberá-los limpos para a atmosfera através da CHAMINÉ (ITEM 23).
- TRANSPORTADOR PNEUMÁTICO (ITEM 25): sistema que coleta o pó depositado nas tremonhas do trocador gás-ar e do filtro e descarrega no silo (ITEM 26).

São 5 pontos de descarga (3 no gás-ar e 2 no filtro) que recebem o pó.

FONTES et al⁽⁴⁷⁾ relatam que as características do pó variam ao longo do sistema, a começar pela granulometria, ficando as partículas mais pesadas depositadas no início do percurso dos gases, prevalecendo no trecho final as mais finas.

Na siderurgia, a geração de finos é um problema que acontece já na exploração do minério. Nesses casos, entretanto, existem técnicas que permitem aglomerar esses finos, seja por sinterização ou por pelotização. O objetivo é agregar um grande número de minúsculas partículas de minério, resultando um produto de características adequadas para utilização nos fornos de redução, principalmente no alto-forno.

BRADASCHIA⁽³¹⁾ menciona que a sinterização encarregou-se de uma parcela dos finos. Porém, mostrou-se imprópria à absorção dos ultrafinos, com tamanho abaixo de 0,149mm. Para aproveitá-los foi então idealizada a Pelotização.

2.2.2. Pelotização

A Pelotização tem papel importante na siderurgia, sendo um processo de aglomeração que converte a fração ultrafina em esferas (pelotas) de tamanhos na faixa de 8 a 18mm e com resistência suficiente para uso nos processos de redução (alto-forno). A resistência é obtida através de um tratamento de queima a temperaturas da ordem de 1300⁰C.⁽³¹⁾

As pelotas tem na sua composição mineralógica, predominantemente, o óxido de ferro, Fe₂O₃. De modo geral, os constituintes ferrosos são os principais do aglomerado e os não-ferrosos, os ligantes. ⁽⁷⁷⁾

De forma genérica, MENDONÇA et al⁽⁵⁷⁾ relata que o processo de pelotização apresenta três fases distintas:

- Preparação das matérias-primas
- Formação das pelotas cruas
- Processamento térmico.

A preparação das matérias-primas consiste em misturar o minério de ferro e eventuais adições com aditivos minerais, de modo a conferir-lhe as características para a produção das pelotas cruas. (Etapas (1)-ESTOCAGEM E RECUPERAÇÃO DE MINÉRIO, (2)-MOAGEM, (3)-ESPESSAMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO e (4)-FILTRAGEM, do fluxograma ilustrado na figura 2.5).

A formação de pelotas cruas, fase também denominada por pelotamento (ETAPA 5) é uma das mais importantes no processo de pelotização. Consiste na dosagem do aglomerante (geralmente a cal hidratada) mistura e produção das pelotas cruas.

Durante este estágio, diferentes fatores influenciam nos mecanismos de união das partículas do minério, tais como: teor de umidade do minério; forma, tamanho médio e distribuição granulométrica das partículas; tipo de equipamento empregado, considerando-se a forma de movimentação do material no seu

interior; molhabilidade; estrutura dos poros e características químicas do minério; natureza e quantidade de aglomerante dosado ao minério.⁽⁵⁷⁾

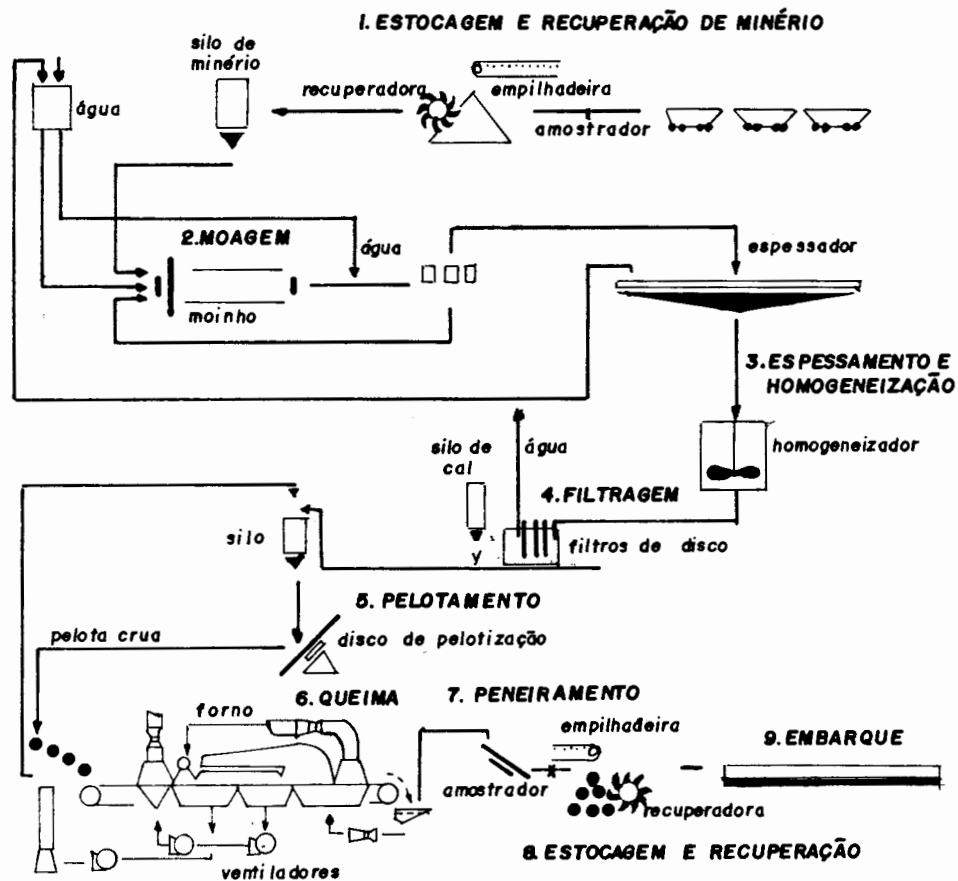


FIGURA 2.5- Fluxograma do Processo de Pelotização de Minério de Ferro⁽⁵⁷⁾

Para a formação das pelotas cruas duas fases são essenciais para o processamento: uma sólida (minério) e outra líquida (água).

As forças de interface têm um efeito coesivo envolvendo a fase líquida, o ar e as partículas minerais. Consistem de forças capilares desenvolvidas nas pontes líquidas côncavas existentes entre as partículas da superfície da pelota, conforme ilustra a figura 2.6.⁽⁸⁰⁾

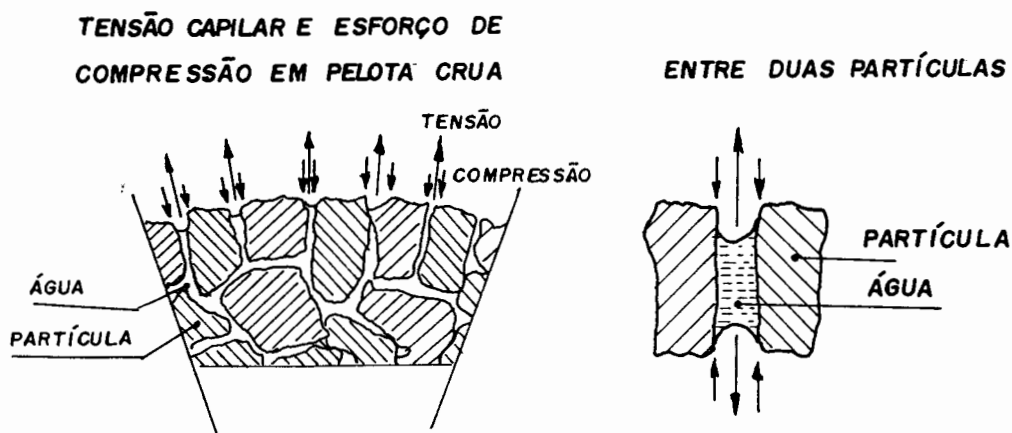


FIGURA 2.6- Influência das Forças Capilares no Mecanismo de Ligação⁽⁸⁰⁾

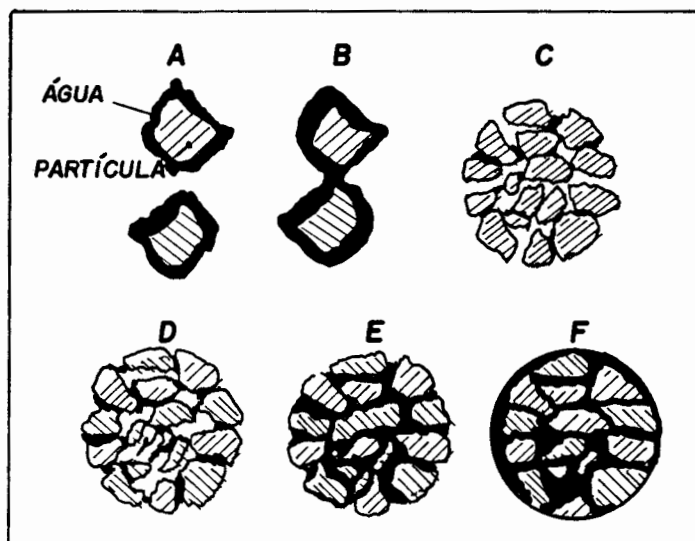
As forças resultantes da tensão superficial provocam reações de igual intensidade nas partículas minerais, conforme demonstram ILMONI & TIGERSCHIÖLD⁽⁸⁰⁾. As superfícies líquidas côncavas formam-se nos poros abertos e a reação capilar mantém as partículas minerais unidas.

Nessas condições, surge uma resistência da pelota crua a tensões mecânicas.

No disco de pelotização, a mistura de partículas minerais, água e aglomerante é submetida a rolamento contínuo e, por ação da capilaridade e do aglomerante, formam-se pequenos núcleos esféricos, os quais vão crescendo, até que atinjam a faixa de tamanho desejada na operação e sejam removidas do disco. Segundo MEYER⁽⁵⁸⁾ esse processo é similar ao crescimento de "bolas de neve". Na figura 2.7 têm-se o esquema básico desse fenômeno.

O aglomerante, de acordo com BRADASCHIA⁽³¹⁾, tem papel relevante no processo de pelotização, conferindo às pelotas cruas a resistência necessária para suportar ao tratamento térmico posterior, impossível de ser conseguido apenas com a ação isolada da água. As pelotas cruas formadas no disco são

transportadas ao forno para queima, sendo submetidas a quedas sucessivas, peneiramento e esforços mecânicos; daí a importância do aglomerante.



A - as partículas de minério são cobertas com a película de água

B - devido a tensão superficial da água as pontes líquidas são formadas

C - devido ao rolamento do disco, gotículas d'água contendo uma ou mais partículas minerais unem-se, formando o aglomerado inicial

D - as primeiras pontes líquidas são formadas e o aglomerado é adensado, com o suprimento de água e efeito do rolamento

E - nessa fase as forças capilares das pontes líquidas exercem grande ação. A situação considerada ótima é aquela em que todos os poros internos são preenchidos com água, sem contudo ocorrer um cobrimento total da pelota, o que reduziria drasticamente a resistência do aglomerado

F - situação indesejável, a pelota está totalmente coberta com a película d'água.

FIGURA 2.7 - Influência da água na Formação de Pelotas Cruas (58)

O último estágio do processo de pelotização consiste na queima das pelotas cruas e tratamento final do produto, conforme ilustrado nos estágios (6)-QUEIMA, (7)-PENEIRAMENTO e (8)-ESTOCAGEM E RECUPERAÇÃO, da figura 2.5.

O processamento térmico, segundo MENDONÇA et al⁽⁵⁷⁾, é feito no forno de grelha, permitindo, através do aumento de temperatura, conferir às pelotas cruas uma alta resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas para utilização nos fornos de redução das usinas siderúrgicas.

Nessas três fases, BRADASCHIA⁽³¹⁾ menciona que as pelotas cruas sofrem solicitações térmicas e mecânicas, devendo o aglomerante conferir-lhes as seguintes características:

a) RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO: a brusca evaporação da água contida nos poros cria pressões internas no sentido de promover trincas, ou mesmo desintegrar as pelotas.

b) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO: as camadas inferiores de pelotas cruas na grelha sofrem a ação do peso das camadas superiores, bem como das pressões dinâmicas e estáticas dos gases quentes, devendo, as pelotas, resistir a essas ações mecânicas.

As aplicações clássicas das pelotas de minério de ferro na siderurgia são:⁽³¹⁾

- Matéria-prima para o Alto-forno: onde se processa a redução das pelotas, obtendo o ferro-gusa no estado líquido. Esse ferro-gusa, normalmente, alimenta os conversores a oxigênio, produzindo o aço.

- Matéria-prima para Redução Direta: a redução das pelotas é conduzida de forma que não ocorra a fusão da carga. Assim, é obtido um produto altamente metalizado, no estado sólido, denominado de "ferro esponja". Esse material, de modo geral, compõe as cargas dos fornos elétricos, sendo utilizado também para a fabricação do aço.

A Siderúrgica Mendes Júnior, interessada no estudo do reaproveitamento do pó do forno elétrico na construção civil,

emprega o forno elétrico a arco, é considerada uma usina semi-integrada, na qual ainda não foi implantado um sistema de pelotização para o resíduo.

2.2.3. Caracterização do Resíduo

Dentre os dados fornecidos pela SMJ⁽⁴⁷⁾ a respeito do resíduo em questão (vide capítulo 3), destaca-se a sua composição mineralógica, onde é verificado como elemento químico predominante o óxido de ferro (Fe_2O_3) com teor aproximado de 64%. Sendo de suma importância a caracterização do resíduo, torna-se necessário que se realize ensaios químicos e físicos, complementares.

Através dos ensaios químicos determinou-se a Perda ao Fogo, o Resíduo Insolúvel e Óxido de Cálcio Livre, de acordo com as normas da ABNT^(09,10,21) e ABCP⁽⁶⁹⁾. Verificou-se, ainda, o pH do pó, o teor de umidade⁽³²⁾ da amostra a ser estudada e a finura do material por meio dos ensaios descritos pelas seguintes normas:

- NBR 9202⁽²²⁾ e NBR 11579⁽²⁵⁾ que prescrevem o método de ensaio para a determinação da finura com o emprego da peneira n.325 e n.200, respectivamente;

- NBR 6474⁽¹³⁾ e NBR 7224⁽²⁰⁾ que prescrevem o método de ensaio para a determinação da massa específica e da área específica do material, respectivamente.

Com intuito de facilitar a leitura deste trabalho, convencionou-se, a partir desta etapa de pesquisa, denominar o pó oriundo do forno elétrico, que significa o mesmo que resíduo ou rejeito, por: ROFE - Resíduo Oriundo do Forno Elétrico.

2.3. CIMENTO PORTLAND

2.3.1. Introdução

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção a serviço da engenharia, com um vastíssimo campo de aplicação que vem se expandindo dia a dia com a criação de novas aplicações e o aperfeiçoamento de técnicas consagradas.

Segundo NEVILLE⁽⁶¹⁾ o processo de fabricação do cimento Portland consiste, essencialmente, em moer a matéria-prima (calcário e argila), misturá-la e queimá-la num forno rotativo, a uma temperatura aproximada a 1500 °C, quando, então, o material sofre sinterização e funde parcialmente, formando o clínquer. O clínquer é resfriado e finamente moído, adiciona-se uma certa quantidade de gipsita (comumente chamada de gesso) para controlar o tempo de pega. O produto final é o cimento Portland.

Salienta-se que além do cimento Portland existem os cimentos Portland com adições de: escória de alto-forno, pozolana, filler e material carbonático; que são largamente empregados na construção civil.

2.3.2. Composição Química do Cimento Portland

Constatou-se que as matérias-primas usadas na fabricação do cimento Portland constituem-se, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. NEVILLE⁽⁶¹⁾ relata que estas substâncias reagem entre si no forno rotativo, dando origem a uma série de produtos mais complexos, e, com exceção de um pequeno resíduo de calcário não combinado (que não teve tempo suficiente para reagir) é alcançado o equilíbrio químico. No entanto, este equilíbrio não se mantém durante o resfriamento, e a velocidade de resfriamento irá afetar o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer resfriado. Não obstante, considera-se que os produtos

do cimento, depois de resfriados, reproduzem o equilíbrio existente à temperatura de clínquerização. Essa suposição, de fato, é feita no cálculo da composição dos compostos dos cimentos comerciais. A composição "potencial" (são compostos químicos que se encontram aglomerados no clínquer provenientes das reações dos diversos elementos que constituem a matéria-prima) é calculada a partir das quantidades obtidas de óxidos presentes no clínquer, como se tivesse ocorrido a cristalização completa dos produtos do equilíbrio.

Os quatro compostos considerados como os principais do cimento são: silicato tricálcio (C_3S), silicato dicálcio (C_2S), aluminato tricálcio (C_3A) e ferroaluminato tetracálcio (C_4AF).

Segundo PETRUCCI⁽⁶⁴⁾ o óxido de cálcio se combina, inicialmente com o óxido de ferro e a alumina para dar o C_4AF , até esgotar-se o óxido de ferro. A alumina restante forma com o óxido de cálcio o C_3A . A sílica combina-se com o CaO resultando o C_2S e o restante do CaO age sobre o C_2S dando o C_3S . Se houver óxido de cálcio em excesso, haverá cal livre. Cada um destes quatro compostos principais contribui de maneira diferente nas propriedades do cimento.

Através do método de BOUGUE, citado por TORRES⁽⁸¹⁾, partindo-se da composição química do cimento pode-se calcular a composição potencial, utilizando-se fórmulas de fácil aplicação. Hoje essas fórmulas, com pequenas modificações, são apresentadas pela ASTM C150⁽⁰²⁾ da seguinte forma:

$$* \text{ Quando } \frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3} \geq 0,64$$

$$\text{Silicato Tricálcio : } \% C_3S = (4,071 \times \%CaO) - (7,600 \times \%SiO_2) - (6,718 \times \%Al_2O_3) - (1,430 \times \%Fe_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3)$$

$$\text{Silicato Dicálcio : } \% C_2S = (2,867 \times \%SiO_2) - (0,7544 \times \%C_3S)$$

$$\text{Aluminato Tricálcio : } \% C_3A = (2,650 \times \%Al_2O_3) - (1,692 \times \%Fe_2O_3)$$

$$\text{Ferroaluminato Tetracálcio : } \% C_4AF = (3,043 \times \%Fe_2O_3)$$

$$* \text{ Caso } \frac{\% \text{ Al}_2\text{O}_3}{\% \text{ Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$$

$$\% \text{ C}_3\text{S} = (4,071 \times \% \text{ Cao}) - (7,600 \times \% \text{ SiO}_2) - (4,479 \times \% \text{ Al}_2\text{O}_3) - (2,859 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{ SO}_3)$$

$$\% \text{ C}_4\text{AF} = (2,100 \times \% \text{ Al}_2\text{O}_3) + (1,702 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3)$$

Neste caso, não há formação de aluminato tricálcio e a porcentagem do silicato dicálcio (C_2S) obtém-se como no caso anterior.

Em trabalho realizado pelo NATIONAL BUREAU OF STANDARD (EUA)⁽³⁰⁾ com quase 200 amostras de cimento norte-americanos, foram encontrados os seguintes valores, descritos no quadro 2.1, para a composição potencial calculada pela fórmula de BOUGUE. No mesmo quadro encontram-se os resultados obtidos em 1977 de centenas de ensaios realizados nos laboratórios da ABCP, em cimentos brasileiros (BASÍLIO⁽²⁹⁾)

COMPOSIÇÃO POTENCIAL	BRASIL (%)	EUA(%)
C_3S	18 a 66	20 a 70
C_2S	11 a 53	5 a 50
C_3A	2 a 20	1 a 15
C_4AF	4 a 14	1 a 17

QUADRO 2.1 - Composição Potencial de Cimentos Brasileiros e Americanos

Cabe salientar que a composição potencial é calculada para cimentos Portland sem outras adições além da gipsita. Por conseguinte, obtém-se uma estimativa dos silicatos e aluminatos que se formaram durante a produção do clínquer e cujas proporções relativas podem ser correlacionadas com várias propriedades dos cimentos, por exemplo, resistência à compressão, calor de hidratação, etc.^(05,82)

Do ponto de vista da resistência, COUTINHO⁽⁴⁴⁾ relata que os dois silicatos de cálcio são os fundamentais, o C_3S nas primeiras idades e o C_2S em idades maiores, conforme se vê na figura 2.8.

O C_3A e o C_4AF não desempenham um papel muito importante na resistência mecânica. Ambos são mineralizados e tornam possível o cozimento dos cimentos. (CÁNOVAS⁽⁴⁶⁾)

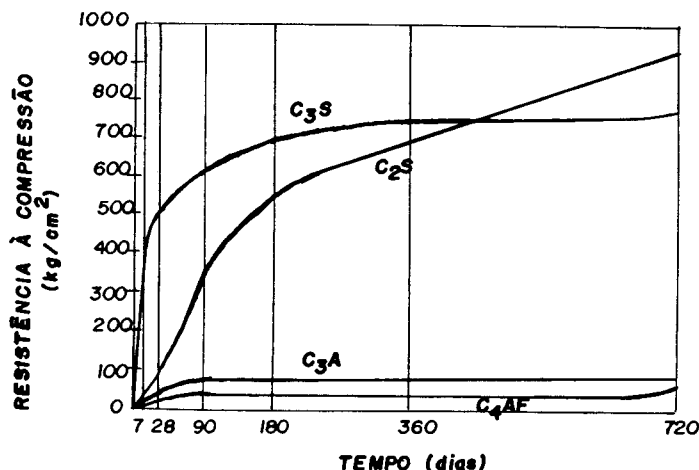


FIGURA 2.8- Comportamento Mecânico dos Compostos do Cimento

a) Silicato Tricálcio (C_3S):

Apesar de a hidratação do silicato tricálcio prolongar-se ao longo dos anos, conforme se verifica na figura 2.8, ele apresenta elevado grau de hidratação nas primeiras idades. (KEIL⁽⁵⁴⁾)

A quantidade de calor desprendida durante a hidratação é elevada, como se pode identificar no quadro 2.2. Ao ser hidratado, o C_3S libera também grande quantidade de portlandita (hidróxido de cálcio- $Ca(OH)_2$). Esse hidróxido de cálcio, na presença de sulfatos e umidade, também poderá reagir com outros compostos do cimento dando origem a compostos expansivos (etringita). (VAIDERGORIN⁽⁸²⁾)

b) Silicato Dicálcio (C_2S):

A contribuição do C_2S para a resistência mecânica do cimento também é grande, mas seu desenvolvimento se dá de forma

mais lenta. O calor liberado é bem menor que no caso do C_3S , principalmente nas primeiras idades. A quantidade de portlandita liberada na hidratação do C_2S é 1/3 daquela liberada na hidratação do C_3S .⁽⁵⁶⁾

COMPOSTO	CALOR DE HIDRATAÇÃO (cal/g) a 21 °C	
	Após 3 dias	Após 6,5 anos
C_3S	58 ± 8	117 ± 7
C_2S	12 ± 5	53 ± 5
C_3A	212 ± 28	328 ± 25
C_4AF	69 ± 27	111 ± 24

QUADRO 2.2- Calor de Hidratação dos Constituintes do Cimento (COLLEPARDI⁽⁴³⁾)

c) Aluminato Tricálcio (C_3A)

É o composto que mais rapidamente se hidrata e que libera a maior quantidade de calor, principalmente nas primeiras idades, como indica a figura 2.8 e o quadro 2.2. Sua contribuição para a resistência mecânica do cimento é pequena.

A velocidade de reação do C_3A é controlada através da gipsita adicionada ao cimento durante a moagem do clínquer.⁽⁵⁶⁾

d) Ferroaluminato Tetracálcio (C_4AF):

Praticamente não contribui para a resistência mecânica, possui calor de hidratação inferior ao C_3A .

VANDERGORIN⁽⁸²⁾ menciona que o somatório dos teores de C_3S e C_2S , em geral está ao redor de 70% para o cimento tipo CP/32; e para o cimento tipo CP/25 essa soma é cerca de 60%; esses valores são interdependentes, ou seja, quanto maior o teor de C_3S , menor o de C_2S e vice-versa. O C_3A e o C_4AF são interdependentes e seu somatório em geral é da ordem de 18 a 20%.

O quadro 2.3 apresenta as propriedades dos compostos do cimento. (KEIL⁽⁵⁴⁾)

COMPOSTO	PROPRIEDADES
C ₃ S	endurecimento rápido, alto calor de hidratação
C ₂ S	endurecimento lento, baixo calor de hidratação
C ₃ A	em quantidades altas: endurecimento rápido, alto calor de hidratação, tendência a fissuração
C ₄ AF	endurecimento lento
Cal Livre	em pequenas quantidades: não prejudicial em grandes quantidades: expansão

QUADRO 2.3- Propriedades dos Compostos do Cimento

2.3.3. Cimento Portland Composto com Escória

A escória granulada de alto-forno é um subproduto da fabricação do ferro-gusa. Seus principais componentes são (% em peso):

- óxido de cálcio (30%-50%);
- sílica (25%-40%);
- alumina (10%-20%);
- óxido de magnésio (1%-10%).

SCANDIUZZI⁽⁷³⁾ esclarece que a escória sai do forno a uma temperatura entre 1400 a 1500⁰C. Se houver resfriamento lento, como por exemplo ao ar, os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, não sendo, portanto, usada na indústria cimenteira e sim como agregado leve. Se o resfriamento for rápido, pela imersão ou aspersão de água ou vapor, a escória se vitrifica e seus componentes não perdem as características hidráulicas. Este produto não cristalizado (leve e poroso), é moído a finura adequada e usado como adição ao cimento Portland, formando o cimento Portland composto com escória (CPII-E).

CÁNOVAS⁽⁴⁶⁾ relata que as escórias siderúrgicas aptas para a fabricação do cimento composto devem possuir

propriedades hidráulicas latentes e potenciais, isto é, quando moídas e misturadas com a água devem ser capazes de dar pega e endurecer por si só, dado que no seu estado anidro contém compostos análogos ao clínquer do cimento Portland, os quais, por mecanismos de hidratação também análogos, dão lugar a compostos hidratados aglutinantes.

As escórias de alto-forno, de acordo com SCANDIUZZI⁽⁷³⁾, devido a sua composição química, podem ter caráter tanto ácido quanto básico. A escória, para a indústria cimenteira, deve ser de alto-forno, básica e granulada. CALLEJA⁽³⁴⁾ esclarece que as escórias de outros processos siderúrgicos ou outras metalurgias não ferrosas, por razões de composição e/ou instabilidade, não são utilizadas; contudo, pesquisas têm sido feitas no sentido de permitir o seu emprego em casos específicos.

Segundo a definição da norma NBR 11578⁽²⁴⁾, cimento Portland composto com escória é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante esta operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (gipsita) e escórias granuladas de alto-forno. A composição do cimento deve estar compreendida entre os seguintes limites (em massa):

- Clínquer + Sulfato de Cálcio: 94%-56%
- Escória Granulada de Alto-forno: 6%-34%
- Material Carbonático: 0%-10%

A designação é dada pela sigla CP II-E e suas classes de resistência (25, 32 e 40 em MPa), representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Os cimentos com adições de escória possuem um menor calor de hidratação ("cimentos frios"), que é despreendido em um tempo maior, diminuindo o risco de retração térmica e fissuração. Salienta-se, ainda, que o calor de hidratação varia linearmente com a quantidade de escória granulada, conforme ilustrado nos quadros 2.4 e 2.5.⁽⁷⁹⁾

A resistência mecânica dos cimentos com adições de escória é baixa nas primeiras idades, pois seu endurecimento é lento. Por isso, requerem uma cura mais cuidadosa, sobretudo em

tempo frio e baixas temperaturas. Supõe-se que haja, geralmente, uma relação entre o calor de hidratação e a resistência, segundo a qual um cimento com baixo calor de hidratação necessariamente dará um pobre rendimento a baixas temperaturas.⁽³⁵⁾

CIMENTO	CALOR DESPRENDIDO(cal/g)		
	1 DIA	2 DIAS	3 DIAS
PORTLAND NORMAL	23-42	42-65	47-75
PORTLAND C/ESCÓRIA	18-28	30-50	33-67

QUADRO 2.4- Calor de Hidratação do Cimento Portland e Cimento Portland com Escória⁽⁷⁹⁾

QUANT. DE ESCÓRIA (%)	0	30	50	70	85
IDADE	CALOR DE HIDRATAÇÃO (cal/g)				
12 horas	27	16	11,5	8	6
1 dia	62	40	30	23	18
3 dias	79	60	48	40,5	30
7 dias	90	--	62	49	36,5

QUADRO 2.5- Influência da Quantidade de Escória (%) sobre o calor de Hidratação⁽⁷⁹⁾

É importante esclarecer que estes cimentos resistem melhor ao ataque das águas agressivas e outros agentes químicos agressivos, tanto mais quanto maior for a quantidade de escória. A escória atua como redutor e diluente dos constituintes vulneráveis e nocivos ao clínquer. A penetração de íons cloretos na pasta de cimento com escória parece ser mais lenta. A difusão dos cloretos na massa é retardada pela formação do cloroaluminato de cálcio, pouco solúvel, reduzindo, desta forma, a concentração dos cloretos livres.⁽⁵⁶⁾

2.3.4. Ensaio Químicos

Os ensaios químicos normalmente realizados no cimento são os descritos pelas normas da ABNT: NBR 5740⁽⁰⁷⁾, NBR 5742⁽⁰⁸⁾, NBR 5743⁽⁰⁹⁾, NBR 5744⁽¹⁰⁾, NBR 5745⁽¹¹⁾, NBR 5747⁽¹²⁾, NBR 7227⁽²¹⁾, e no manual de procedimentos para análise química do cimento Portland da ABCP⁽⁶⁹⁾. Tais normas prescrevem o método de ensaio para definição de sua composição, determinando o teor de seus principais componentes: óxido de cálcio, sílica, alumina, óxido de ferro, óxido de magnésio, anidrido sulfúrico, álcalis (óxido de sódio e óxido de potássio), cal livre, perda ao fogo e resíduo insolúvel.

O quadro 2.6 permite visualizar as variações da composição química dos cimentos brasileiros, segundo PETRUCCI⁽⁶⁴⁾ e BASÍLIO⁽²⁹⁾.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PETRUCCI (%)	BASÍLIO (%)
CaO	60,0 a 67,0	58,9 a 66,8
SiO ₂	20,0 a 23,0	19,0 a 24,2
Al ₂ O ₃	4,5 a 7,0	3,9 a 7,3
Fe ₂ O ₃	2,0 a 3,5	1,8 a 5,0
MgO	0,8 a 6,0	0,5 a 6,3
SO ₃	1,0 a 2,3	0,9 a 3,0

QUADRO 2.6- Composição Química do Cimento Portland

O óxido de cálcio é o componente principal do cimento. As propriedades mecânicas do cimento Portland aumentam com o teor deste óxido, desde que se encontre totalmente combinado; caso contrário, poderá comprometer a estabilidade volumétrica de argamassas e concretos.⁽⁴⁴⁾

A sílica (SiO₂) encontra-se combinada com outros componentes e provém sobretudo das argilas usadas como matéria-prima. Também da argila provém a alumina (Al₂O₃). O composto formado pelo óxido de alumínio e óxido de cálcio acelera a pega e reduz sua resistência a sulfatos. A alumina deve aparecer em

pequena quantidade (4 a 7%), sendo, entretanto, indispensável sua presença, pois serve como fundente. (PINHEIRO⁽⁶⁶⁾)

O óxido de ferro, desde que em porcentagem não muito elevada (2 a 4%) é útil pelo seu papel de fundente, sendo mais enérgico que a alumina. Acredita-se que teores relativamente altos de alumina e óxido de ferro possam facilitar a produção comercial de um cimento com porcentagem de cal suficientemente alta para converter toda a sílica em silicato tricálcio sem que resulte cal livre em quantidade inconveniente. (TORRES⁽⁸¹⁾)

A magnésia (MgO) provém do carbonato de magnésio presente no calcário. Em quantidades superiores a certos limites (máximo, aproximadamente, 6,5%) esse óxido atua como expensor. (TORRES⁽⁸¹⁾)

O anidrido sulfúrico tem sua origem no sulfato de cálcio adicionado ao cimento para regular sua pega, retardando-a. Se a proporção de gipsita for ideal (máximo de 4%), o cimento terá boas qualidades de estabilidade e durabilidade. A quantidade de gesso (gipsita) a ser empregada deverá ser tanto maior quanto maior for a quantidade de aluminato tricálcio (C₃A), pois sua missão é precisamente fixar o aluminato na forma de sulfoaluminato, que embora seja expansivo, nesse caso não exerce ação prejudicial, pois seu efeito se produz durante a pega do cimento, ou seja, quando este ainda se encontra em estado plástico; um excesso de SO₂ no cimento pode dar lugar a cimentos expansivos e baixar sua resistência. (CÁNOVAS⁽⁴⁶⁾)

Os álcalis (K₂O e Na₂O) são encontrados com freqüência no cimento Portland. A porcentagem de óxido de sódio e óxido de potássio não deve ser superior a 0,6%, calculado pela fórmula: $0,658\% K_2O + Na_2O < 0,6\%$, pois podem aumentar a retração hidráulica. (CÁNOVAS⁽⁴⁶⁾)

A Cal Livre é um componente freqüente do cimento Portland, sendo sua presença o resultado de um efeito de fabricação atribuível a causas diversas. A hidratação da cal livre é uma reação expansiva. Deduz-se que os cimentos ricos em cal livre não são estáveis nem duráveis. (COUTINHO⁽⁴⁴⁾)

A Perda ao Fogo exprime os constituintes acidentalmente presentes no cimento e eliminados pela calcinação a 1000⁰C. SCANDIUZZI⁽⁷³⁾ esclarece que ela representa, normalmente, a água higroscópica, a de cristalização, a de hidratação e o anidrido carbônico. A água pode advir, em pequena escala da umidade do ar absorvida durante o processo de fabricação, estocagem e manuseio do produto. O alto teor de perda ao fogo pode ser, também, indício de uma estocagem prolongada em condições desfavoráveis ou aditivção do produto.

O Resíduo Insolúvel representa, no cimento, um material inerte, sem propriedades hidráulicas. Normalmente é decorrente da argila que não reagiu com o óxido de cálcio durante a clinquerização para formar os minerais. CÂNOVAS⁽⁴⁶⁾ relata que o resíduo insolúvel pode incluir, também, impurezas provenientes do gesso adicionado ao clínquer ou, ainda, adições que adulteraram o produto.

2.3.5. Ensaio Físicos

No que se refere aos ensaios físicos, o manual de ensaios para o cimento da ABCP⁽³³⁾ bem como, as normas da ABNT mencionadas nos parágrafos a seguir, caracterizam o cimento segundo as exigências feita à ele.

A finura tem um papel importante ligado aos fenômenos de pega e endurecimento do cimento, visto que, em partículas de diâmetro suficientemente pequeno as reações químicas ocorrem mais rapidamente entre o cimento e a água e ainda, permite um contato íntimo entre os compostos da argamassa e dos concretos, já que o material mais fino envolve melhor a superfície dos grãos de areia ou outro material inerte. ⁽⁷³⁾

Segundo a Norma, existem dois ensaios para a determinação da finura: peneiramento (resíduo na peneira n⁰ 200

(0,075mm)) e área da superfície específica.

O ensaio de peneiramento consiste simplesmente na separação da amostra em duas porções, tendo uma delas todas as partículas maiores que uma certa dimensão (conforme a malha da peneira usada) e a outra porção, as menores. O ensaio é especificado pela norma brasileira NBR 11579⁽²⁵⁾.

Do ponto de vista prático, a adoção da peneira 0,075mm reside no fato que as partículas maiores do que 0,60mm não contribuem significativamente para a resistência aos 28 dias.⁽⁷⁹⁾

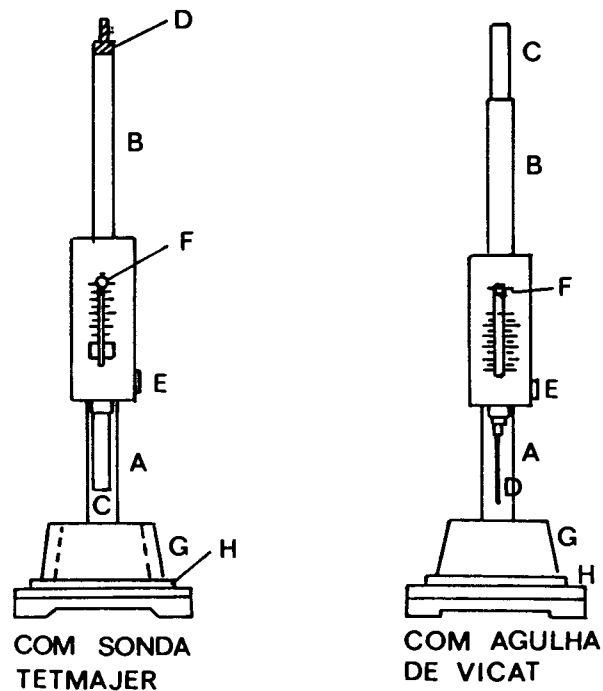
A superfície específica é definida como sendo a relação entre a área superficial das partículas e a sua massa. O procedimento para o ensaio é descrito pela norma NBR 7224⁽²⁰⁾, sendo a técnica da permeabilidade ao ar. Todavia é essencial que se conheça previamente a massa específica do cimento(NBR 6474⁽¹³⁾), determinada pelo deslocamento de um líquido (no qual o cimento não se dissolve) no frasco volumétrico de Le Chatelier.

A pasta de cimento com índice de consistência normal⁽²⁶⁾, nada mais é que a mistura padronizada entre cimento e água que apresenta propriedade reológica constante. É utilizada para verificação de duas importantes características do cimento Portland: tempo de pega⁽²⁷⁾ e instabilidade de volume devido à cal livre⁽²⁸⁾.

Para que a execução dos ensaios seja uniforme para todos os cimentos, é necessário que as pastas apresentem as mesmas características. Como se trata de pastas, igualando-se as viscosidades, têm-se todos os ensaios nas mesmas condições.⁽³³⁾

Essa viscosidade padrão é denominada de consistência normal, e é determinada pela sonda de Tetmajer no aparelho de VICAT, ilustrado na figura 2.9.

Cabe salientar que esta consistência é função de diversos parâmetros como, quantidade de água, finura do material, composição mineralógica, tipos e teores de adições.



- A - armação
- B - haste com massa de $300 \pm 0,5$ g
- C - sonda de Tetmajer
- D - agulha de Vicat
- E - trama de fixação
- F - indicador da escala
- G - anel cônico - ϕ interno: superior = 70 ± 1 mm
inferior = 80 ± 1 mm
- H - placa base de vidro

FIGURA 2.9- Detalhes do Aparelho de VICAT, com sonda e agulha

A partir do instante em que a água entra em contato com o cimento para executar a mistura destinada a determinar a consistência normal da pasta, ocorrem reações químicas cujo fundamento é um gradativo enrijecimento da massa com o decorrer do tempo. Existem dois pontos bastante característicos onde

ocorrem mudanças bruscas na reologia da pasta. No primeiro, dá-se o aumento brusco da viscosidade, e geralmente não ocorre antes de uma hora após a adição da água. A este intervalo de tempo convencionou-se chamar de tempo de início de pega. No segundo ponto, ocorre a passagem da pasta do estado plástico para o sólido e é chamado de tempo de fim de pega.

O ensaio de pega é feito substituindo a sonda de Tetmajer (pressão na sonda = $0,382 \text{ kgf/cm}^2$) pela agulha de Vicat (pressão da agulha = 30 kgf/cm^2) (figura 2.9), a qual possibilita uma maior pressão sobre a pasta de cimento.

O tempo de início de pega é definido pelo tempo decorrido desde o momento da adição da água ao cimento até o instante em que a agulha estaciona a 1mm do fundo do molde. O tempo de fim de pega é o intervalo de tempo entre o momento em que a agulha deixa apenas uma leve impressão na superfície da pasta e aquele em que a água foi adicionada ao cimento para o início do amassamento. Ambos são expressos em horas e minutos.

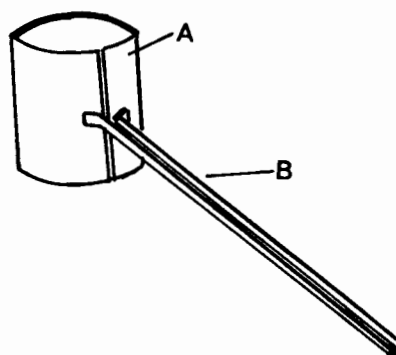
A reação química entre o cimento e a água produz, inicialmente, um enrijecimento da pasta (estágio plástico) e a seguir um endurecimento (estágio sólido). Estas reações provocam ligeiras mudanças no volume da pasta de cimento, ou seja, a soma do volume absoluto do cimento com o volume da água adicionada quando misturados inicialmente não é rigorosamente a mesma que o volume que a pasta apresenta após um certo tempo de hidratação.⁽⁷³⁾

Contudo, além da redução de volume, pode existir simultaneamente um aumento considerável do volume da pasta ao longo do tempo, devido às reações químicas de alguns compostos com a água de amassamento. Este aumento de volume não apenas anula a contração, mas pode dar origem a um volume final maior que o volume inicial, com conseqüente indução de tensões internas, podendo gerar fissuras superficiais e até um desagregamento da massa da pasta.⁽³³⁾

As substâncias que podem provocar estas indesejáveis instabilidades de volume são: a cal livre (óxido de cálcio não combinado), o sulfato de cálcio di-hidratado em dosagens altas e o óxido de magnésio em forma cristalizada (periclásio) que, ao reagir com a água, formam compostos hidratados que ocupam um volume que pode ser várias vezes maior que o das mesmas substâncias em forma anidra. Tal aumento tende a expandir o resto da massa.⁽³³⁾

Esta expansibilidade é medida mediante o ensaio da pasta de consistência normal no aparelho denominado agulha de Le Chatelier, ilustrada na figura 2.10, em duas modalidades: água fria e/ou água em ebulição.

O ensaio à frio destina-se a determinar se há um excesso de gipsita ou anidrita e o ensaio à quente indica se há quantidades ou estruturas de cal livre que possam provocar instabilidade de volumes acentuadas, se bem que, o ensaio a frio também pode revelar parcialmente esta condição.⁽⁷³⁾



A - Cilindro de latão diâmetro = 30 mm

altura = 30 mm

B - Haste de latão comprimento = 150 mm

FIGURA 2.10- Agulha de Le Chatelier

A principal função do cimento é a de dar resistência, por esta razão, ele deve ser capaz de endurecer e atingir uma resistência mínima.

A resistência mecânica dos cimentos é determinada por meio de corpos de prova cilíndricos moldados com argamassa, dosada e proporcionada sob certas condições padrões, ensaiada a várias idades, por compressão axial simples.

A norma NBR 7215⁽¹⁹⁾ especifica o ensaio de resistência à compressão da argamassa e, determina que a areia utilizada para a confecção da argamassa padrão deva ser a normal brasileira (NBR 7214⁽¹⁸⁾), proveniente do rio Tieté e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. A resistência é verificada, normalmente, aos 3, 7 e 28 dias de idade. Os corpos de prova, 24 horas após o instante em que a água entra em contato com o cimento, são desmoldados e submersos em um tanque d'água, saturado com cal, até a data do ensaio. A norma determina que são necessários uma série de 4 corpos de prova para cada idade (usa-se a média destes) e o desvio relativo máximo entre eles não deve exceder a 6%.

Finalmente, as condições ambientais para execução de todos os ensaios físicos, segundo a norma, são as seguintes: temperatura ambiente na faixa de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 50%.

2.4. CAL HIDRATADA

A cal é um aglomerante obtido pela calcinação dos calcários (CaCO_3) ou dolomitos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) através de uma reação química de decomposição térmica. Esta decomposição dá origem a cal virgem, que por sua vez, ao ser hidratada forma a cal hidratada.

Segundo GUIMARÃES⁽⁵⁰⁾ a cal virgem é obtida quando o calcário ou dolomito é aquecido à temperatura de dissociação dos carbonatos e nela mantido por um certo tempo, em ambiente onde a remoção do dióxido de carbono seja possível, surgindo então o óxido de cálcio (CaO) ou óxido de magnésio (MgO). Podem ocorrer fenômenos de crepitação, causada pela presença de umidade ou matéria orgânica, que pode levar à desintegração da rocha calcária ou dolomítica em aquecimento, impedindo a calcinação pela obstrução da passagem de gases. A velocidade da fase de aquecimento e a escolha da temperatura de dissociação também afetam sensivelmente a qualidade da cal obtida. Além desses fatores, a qualidade e o tipo de combustível, a percentagem e a composição dos minerais que acompanham os carbonatos, os vários modelos de fornos, obrigam ao uso de uma técnica específica pela indústria, na busca de qualidade.

Para comparação de resultados alcançados com a utilização de vários tipos de cales deve-se conhecer, a priori, algumas variáveis:

a) tipo de rocha que a produziu quanto a sua cristalinidade, umidade, qualidade, teor de impurezas, frequência de diáclase e granulometria utilizada.

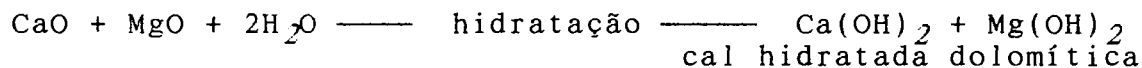
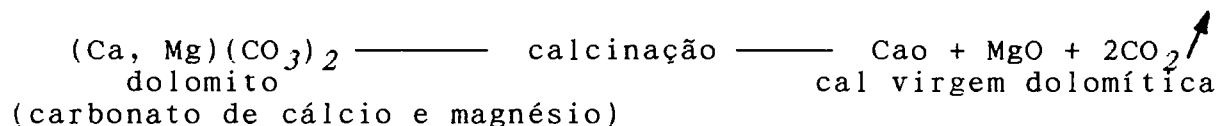
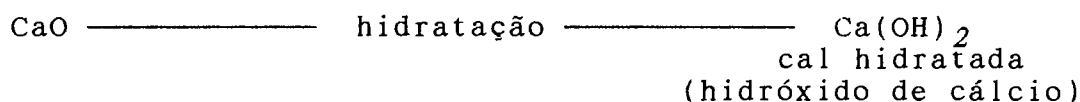
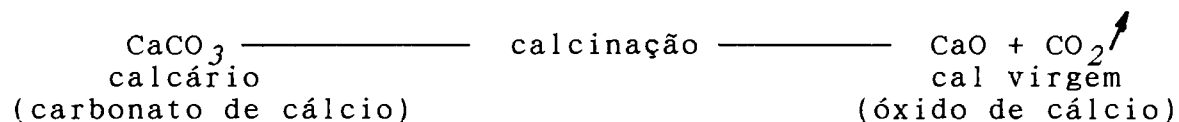
b) tipo de calcinação utilizada, com a sua razão de aquecimento, temperatura, duração, tiragem e qualidade do combustível.

c) características da cal resultante, índice de porosidade, densidade, contração em relação à rocha original, área superficial e tamanho dos cristais, coloração e densidade aparente.

A cal hidratada é definida como o pó obtido pelo tratamento da cal virgem pela água, em quantidade suficiente

para satisfazer a sua afinidade química nas condições de hidratação. Assim como a cal virgem, ela pode ser do tipo cálcica ou dolomítica, sendo que esta pode apresentar-se como cal mono-hidratada dolomítica (quando hidratada a pressões normais) e cal di-hidratada dolomítica, quando o processo ocorre a pressões mais elevadas. (ANDRADE⁽⁰⁴⁾)

As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada são as seguintes: ⁽³⁷⁾



A hidratação é um processo contínuo, com velocidade que depende das condições de calcinação da matéria-prima. CINCOTTO⁽³⁷⁾ esclarece que, comparativamente, é sempre mais lenta para o óxido de magnésio. Quando esta reação não é completa durante a extinção em fábrica, pode continuar após o ensacamento. O inconveniente é o aumento de volume que acompanha a reação de hidratação que é 100% para o CaO e 110% para o MgO. A hidratação retardada é responsável pelo rasgamento do saco quando a cal é armazenada por tempo prolongado.

Como aglomerante, AGOPYAN⁽⁰¹⁾ relata que a cal possui propriedades peculiares que a tornam imprescindível na construção civil. Dentre elas destaca-se a plasticidade conferida às pastas e argamassas permitindo, assim, maiores

deformações sem fissuração; a cal retêm mais água de amassamento resultando numa melhor aderência.

De acordo com as normas, as principais determinações a serem realizadas numa cal para verificação de sua qualidade são a composição química e a finura.

O quadro 2.7 apresenta os limites estabelecidos para estes requisitos pela norma NBR 7175⁽¹⁵⁾, que estabelece parâmetros para o uso da cal hidratada em argamassas.

A quantidade de óxidos representa o grau de pureza da cal e, os teores de anidrido carbônico e resíduo insolúvel, ao contrário, demonstram o nível de impurezas que a cal deve conter.

PROPRIEDADES	NORMAS	DETERMINAÇÕES	REQUISITOS
QUÍMICAS	NBR 7175	Anidrido Carbônico CO ₂ (%) Fábrica Depósito ÓXIDOS TOTAIS (CaO + MgO) na base de não voláteis	≤5 ≤7 ≥88
FÍSICAS	NBR 7175	Finura-Peneiramento (%)retido,acumulado n.30 n.200	≤0,5 ≤15

QUADRO 2.7 - Requisitos Químicos e Físicos para a Cal Hidratada

Quanto as propriedades físicas, busca-se conhecer a finura da cal, a Norma Brasileira atém-se apenas ao peneiramento, detectando partículas grandes (maiores de 0,075mm), que são indícios de hidratação incompleta e impurezas minerais.⁽²³⁾ A norma ASTM C821⁽⁰³⁾ utiliza a superfície específica Blaine para a determinação da finura. GUNTHER⁽⁵¹⁾, no entanto, afirma que este processo está cheio de imperfeições quando se trata de medir a finura da cal, por ser um material muito fino.

O tamanho das partículas é uma característica importante, uma vez que, quanto menores as dimensões, maiores serão suas superfícies específicas aumentando, portanto, as

áreas de ataque no momento das reações, ou seja, mais partículas poderão combinar-se entre si.⁽⁴⁸⁾

2.5. AGLOMERANTES MISTOS

Segundo TORRES⁽⁸¹⁾ dá-se o nome de aglomerante misto à mistura de dois aglomerantes simples, por exemplo, cimento e cal. O principal objetivo é produzir uma argamassa mais plástica e fácil de trabalhar.

Estudos recentes comprovam a importância das cales na melhora de todas as propriedades das argamassas. Conforme relato de CINCOTTO et al⁽⁴¹⁾ a cal confere às argamassas trabalhabilidade e retenção de água. Argamassas não plásticas e não trabalháveis não preenchem todos os vazios e podem fissurar quando endurecidas, devido à retenção hidráulica ou movimentações térmicas dos componentes. Por isso, argamassas mistas (cimento e cal), mesmo com pequenas quantidades de cal, tem efeito positivo, melhorando as propriedades físicas das argamassas e aumentando a capacidade de absorver deformações.

No quadro 2.8 está descrito qualitativamente a variação das propriedades de uma argamassa com a variação do teor relativo de cal, mantendo-se constante a proporção entre aglomerante e o agregado inerte. (SABBATINI ⁽⁷¹⁾)

PROPRIEDADES	VARIAÇÃO DA PROPRIEDADE COM O AUMENTO TEOR RELATIVO DA CAL NO AGLOMERANTE
Resist. à Compressão	decrece
Resist. à Tração	decrece
Resist. Iniciais	decrece
Resist. Altas Temperat	decrece
Durabilidade	decrece
Retração na Secagem	crece
Capacidade de Aderência	crece até um máximo e decrece
Retenção de Água	crece
Plasticidade	crece
Trabalhabilidade	crece
Resiliência	crece
Módulo de Deformação	decrece

QUADRO 2.8 - Variação nas Propriedades de uma Argamassa com a Variação do teor Relativo de Cal⁽⁷¹⁾

Analisando o quadro 2.8 verificou-se que as seis primeiras propriedades pioram com o aumento do teor da cal. A capacidade de aderência apresenta um comportamento variável. As

cinco últimas propriedades melhoram com o aumento do teor de cal.

Segundo SABBATINI⁽⁷¹⁾ há uma interdependência entre as propriedades de maneira que ao se melhorar algumas delas certamente outras estarão prejudicadas. Sendo assim, concluiu-se que a escolha do teor de cal, adicionada as argamassas de cimento e areia, é feita baseado em uma análise do conjunto de propriedades necessárias para o fim a que se destinam.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA

3.1.1. Cimento

Foi empregado o cimento Portland Composto (com escória), tipo CP II-E, com resistência mínima aos 28 dias de idade de 32MPa, da marca TUPI. Optou-se pelo uso deste aglomerante por ser o mais comumente encontrado no comércio da cidade de Juiz de Fora (MG). Sendo assim, a adição do ROFE ao cimento torna-se acessível aos usuários interessados.

As análises químicas e as físicas foram realizadas nos laboratórios da fábrica de CIMENTO TUPI S.A. - Pedra do Sino (MG), utilizando as normas da ABNT, ABCP, descritas em 2.3.4 e 2.3.5, os resultados encontram-se no quadro 3.1.

É importante esclarecer que o teor médio de escória granulada de alto-forno incorporada ao cimento em questão é de 20%(em peso), sendo que a mesma provém da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), já a quantidade de clínquer + sulfatos de cálcio é de aproximadamente 80%(em peso).

Todos os resultados encontrados atendem as exigências da norma⁽²⁴⁾ no que se refere ao Cimento Portland Composto com escória, classe de resistência 32.

No intuito de um maior esclarecimento a respeito do cimento utilizado na pesquisa, no que pertine à análise química, calculou-se a composição potencial do clínquer conforme ilustrado no quadro 3.2.

DETERMINAÇÕES	RESULTADOS	REQUISITOS
QUÍMICAS:		
-Perda ao Fogo	3,48%	≤ 6,5%
-Dióxido de Silício Total (SiO ₂)	23,05%	
-Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	5,57%	
-Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	3,48%	
-Óxido de Cálcio (CaO)	56,65%	
-Óxido de Magnésio (MgO)	1,54%	≤ 6,5%
-Trióxido de Enxofre (SO ₃)	2,90%	≤ 4,0%
-Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,24%	
-Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,94%	
-Equivalente Alcalino em (Na ₂ O)	0,86%	
-Óxido de Cálcio Livre	0,60%	
-Resíduo Insolúvel	2,11%	≤ 2,5%
FÍSICAS:		
FINURA: Resíduo na Peneira 0,075mm	0,8%	≤ 12,0%
Superfície Específica (Blaine)	456m ² /Kg	≥ 260m ² /Kg
EXPANSIBILIDADE: à quente	0,0 mm	≤ 5,0 mm
TEMPO DE PEGA: Início	3h 55min	≥ 1h
Fim	6h 30min	≤ 10h
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO: 3 dias	26,4 MPa	≥ 10 MPa
7 dias	34,9 MPa	≥ 20 MPa
28 dias	44,1 MPa	≥ 32 MPa

QUADRO 3.1- Resultados da Análises Químicas e Físicas do Cimento CP II-E/32 - TUPI (ensaios realizados nos laboratórios da fábrica de cimento TUPI)

COMPOSIÇÃO POTENCIAL DO CLÍNQUER(%)	
C ₃ S	59,8
C ₂ S	15,0
C ₃ A	6,5
C ₄ AF	12,8

QUADRO 3.2- Composição Potencial do Clínquer do Cimento CP II-E/32.

Conforme se depreende, o somatório dos teores de C₃S e C₂S é 74,8% e do C₃A e C₄AF é 19,3%; valores estão dentro dos limites estabelecidos para o cimento tipo CP-32⁽⁸²⁾, que são: >70% e <20%, respectivamente.

3.1.2. Resíduo do Forno Elétrico (ROFE)

O quadro 3.3 apresenta as análises química do ROFE, recolhido em pontos diversos do forno elétrico a arco.

ITEM	DUTO* NR.3	DUTO* NR.4	TREMONHA* FILTRO	SILO DO* CICLOP.	CAÇAMBA* CAM.COMB.
Al ₂ O ₃	1,40	1,50		4,57	1,50
C			0,13		
CaO	2,90	3,40	3,34	8,04	3,40
Cr ₂ O ₃	0,44	0,23			
CuO	0,20	1,00	0,27		
Fe magnético	SIM	SIM			
Fe ₂ O ₃	57,90	64,90	60,60	64,51	65,00
FeO			2,12	3,09	
íons cloreto			SIM		
K ₂ O	2,50	1,16	SIM		1,20
MgO	0,76	0,70	1,50	1,31	1,00
MnO	2,10	2,10	1,74	2,30	2,00
Na ₂ O	0,97	0,64			
OUTROS				6,02	
P ₂ O ₅	0,13	0,20	0,65		0,20
PbO			2,26		
S			0,50	0,33	0,39
SiO ₂	8,20	6,40	3,63	2,24	6,00
Zn			12,70	6,40	8,00
ZnO ₂	11,80	4,60			

(*) veja figura 2.4

QUADRO 3.3- Composição Química do ROFE (%) (47)

Nesta pesquisa utilizou-se o ROFE proveniente do silo do ciclopulse (item 26 da figura 2.4), cuja a composição química, em %, se encontra no quadro 3.3.

No intuito de se obter informações adicionais referentes a análise química do ROFE, procurou-se determinar através dos ensaios de Perda ao Fogo, Resíduo Insolúvel e Óxido de Calcio Livre, sua contribuição a composição do mesmo. Os resultados encontram-se no quadro 3.4.

Determinou-se o pH da amostra do ROFE, obtendo-se um valor igual a 6,69. Este valor é característico de um material ácido; porém, quando o ROFE é adicionado ao cimento (pH=13,0- básico), este, por si só, é capaz de anular a acidez decorrente do ROFE (pH da mistura=11,8).

ANÁLISE QUÍMICA	%
Perda ao Fogo	3,59
Resíduo Insolúvel	12,16
Óxido de Cálcio Livre	NADA

QUADRO 3.4- Ensaios Químicos do ROFE

Verificou-se, ainda, o teor de umidade do ROFE, pelo método da estufa⁽³²⁾, resultando em um valor de 0,1%. Presume-se, portanto, que o material poderá ser usado da forma com é encontrado, não havendo necessidade de secá-lo em estufa.

No que se refere aos ensaios físicos realizados para determinar a finura, constatou-se que o ROFE é, aproximadamente 80% mais fino que o cimento utilizado na pesquisa e sua densidade é 45% maior, conforme ilustra o quadro 3.5.

MATERIAL	PENEIRA		BLAINE cm ² /g	DENS. g/l
	#200	#325		
RESÍDUO	3,8	6,5	832	4,44
CPII-E/32	0,7	5,3	456	3,06

QUADRO 3.5- Resultados dos Ensaios Físicos Realizados no Resíduo e no Cimento.

Salienta-se que tantos os ensaios químicos quanto os físicos realizados no ROFE foram efetuados nos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora (MG) e da fábrica de cimento TUPI S.A. (Pedra do Sino - MG).

3.1.3. Cal hidratada

Foi utilizada a cal hidratada dolomítica, marca Glocal adquirida no comércio especializado de Juiz de Fora. As análises químicas e físicas foram realizadas nos laboratórios da fábrica de Cimento TUPI S.A., utilizando as normas da ABNT^(15,23).

Os resultados das análises químicas e físicas encontram-se no quadro 3.6.

Comparando-se os resultados obtidos aos requisitos referentes às normas apresentadas no capítulo 2, verifica-se que:

DETERMINAÇÕES	RESULTADOS	REQUISITOS
QUÍMICAS:		
-Óxido de Cálcio CaO (%)	41,78	
-Óxido de Magnésio MgO(%)	42,12	
-Soma dos Óxidos (base não volátil)	92,77	≥ 88
-Perda ao Fogo	9,57	
-Resíduo Insolúvel	3,21	
FÍSICAS:		
-FINURA: peneiramento # n. 30	0	≤ 0,5
(% retido-acumulado) n.200	17,8	≤ 15

QUADRO 3.6- Resultados das Análises Química e Física da Cal Dolomítica Glocal.

A soma dos óxidos (92,77%), foi superior ao valor mínimo requerido pela norma. Deve-se considerar que as especificações referem-se as cais utilizadas na preparação das argamassas. A CIENTEC, em uma pesquisa sobre estabilização de solos para a pavimentação⁽⁴⁸⁾ definiu um teor mínimo de 65% para a soma dos óxidos. AGOPYAN⁽⁰¹⁾ relata que as cales brasileiras costumam apresentar características muito variadas e grande parte delas possuem teor de óxidos bem inferior àquele exigido pela norma.

Quanto à finura, observa-se que a cal utilizada enquadra-se aos valores da norma⁽¹⁵⁾ no que se refere ao material retido na peneira n.30, ficando, porém, ligeiramente acima do limite máximo da peneira n.200.

Testes realizados pela CIENTEC⁽⁴⁸⁾ demonstraram que a fração grosseira, retida na peneira n.200, é constituída principalmente por fragmentos da rocha original que não entraram em combustão e quartzo, e depende tanto do tipo de rocha que lhe deu origem quanto do processo de beneficiamento.

3.1.4. Água

Em todos os ensaios químicos utilizou-se água destilada, de acordo as normas (vide item 2.3.4), e nos ensaios físicos, que consistem no preparo da pasta de consistência normal e da argamassa destinada a aferição da resistência à compressão, utilizou-se água potável.

3.1.5. Areia

A areia utilizada foi a normal para ensaio de cimento Portland (NBR 7214⁽¹⁸⁾), proveniente do Rio Tieté, fornecida em sacos de 25Kg pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

A areia normal se divide em quatro frações granulométricas (quadro 3.7), sendo que a mistura de partes iguais, em peso, das frações, deve satisfazer as condições especificadas no quadro 3.8.

MATERIAL RETIDO NAS PENEIRAS DE ABERTURA NOMINAL DE	DENOMINAÇÃO
2,4mm a 1,2mm	GROSSA
1,2mm a 0,6mm	MÉDIA GROSSA
0,6mm a 0,3mm	MÉDIA FINA
0,3mm a 0,15mm	FINA

QUADRO 3.7- Frações Granulométricas

PENEIRAS DA ABNT No.	Abertura Nominal(mm)	PORCENTAGEM RETIDA Acumulada, em massa
8	2,4	0
10	2,0	5 ± 5
16	1,2	25 ± 5
30	0,6	50 ± 5
50	0,3	75 ± 5
100	0,15	97 ± 3

QUADRO 3.8- Granulometria

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como mencionado, no capítulo 2, não há estudos referentes ao reaproveitamento do ROFE na construção civil.

Procurando obter um material alternativo para a construção civil, esta pesquisa determinou, inicialmente, dois teores de cimento e ROFE bem diferenciados (90% - 10% e 60% - 40%), na tentativa de identificar os limites superior e inferior das misturas.

Diante das inúmeras propriedades que a cal hidratada apresenta (vide item 2.4), procurou-se avaliar a influência de sua adição às misturas compostas por cimento e ROFE. Os teores de cal foram escalonados a intervalos menores, na suposição de que mesmo pequenas variações na quantidade seriam identificados com facilidade nos resultados dos testes. As proporções escolhidas intuitivamente e estudadas estão indicadas no quadro 3.9.

No. MISTURAS	CIMENTO (%)*	ROFE (%)*	CAL (%)*
01	90	10	0
02	90	10	1
03	90	10	5
04	90	10	10
05	90	10	15
06	90	10	20
07	90	10	25
08	60	40	0
09	60	40	1
10	60	40	5
11	60	40	10
12	60	40	15
13	60	40	20
14	60	40	25

(*) porcentagem em peso, determinadas intuitivamente

QUADRO 3.9- Composição das Misturas de Cimento, ROFE e Cal Estudadas Inicialmente

Com base no estudo das quatorze combinações iniciais, avaliou-se a proporção ideal do ponto de vista técnico e econômico, entre o ROFE e o cimento.

Na tentativa de se obter um "cimento alternativo" e na falta de indicações mais específicas na literatura, optou-se no estudo das misturas realizar os mesmos ensaios normatizados para o cimento Portland (vide item 2.3.4 e 2.4.5). Toda a pesquisa foi baseada nas normas da ABNT e nos manuais da ABCP.

Numa primeira etapa, foram realizadas as análises químicas e físicas das quatorze misturas ilustradas no quadro 3.9. Nos ensaios químicos procurou-se verificar a porcentagem de cada componente químico existente nas misturas, tais como óxido de alumínio, óxido de ferro, óxido de cálcio, e outros. Dentre os ensaios físicos destacam-se a finura, a expansibilidade volumétrica e o tempo de pega. Nos ensaios de resistência à compressão, utilizou-se a areia exigida pela norma; os corpos de prova foram curados em câmara úmida, submersos em água saturada com cal⁽¹⁹⁾ e a idade de rompimento para aferição da resistência foi aos 3, 7 e 28 dias de idade.

De posse dos resultados dos ensaios realizados nas quatorze misturas estudadas inicialmente (vide quadro 3.9), buscou-se, numa segunda etapa, obter uma porcentagem ideal entre cimento/ROFE(/cal). Realizaram-se os mesmos ensaios da etapa anterior porém, procurou-se otimizar a proporção entre os componentes. O quadro 3.10 ilustra as proporções estudadas neste estágio.

No MISTURA	CIMENTO (%)*	ROFE (%)*	CAL (%)*
15	75	25	0
16	75	25	20
17	75	25	25

(*)porcentagem em peso

QUADRO 3.10- Porcentagem Ideal entre Cimento, ROFE e Cal

A figura 3.1 apresenta um esquema simplificado do desenvolvimento do trabalho.

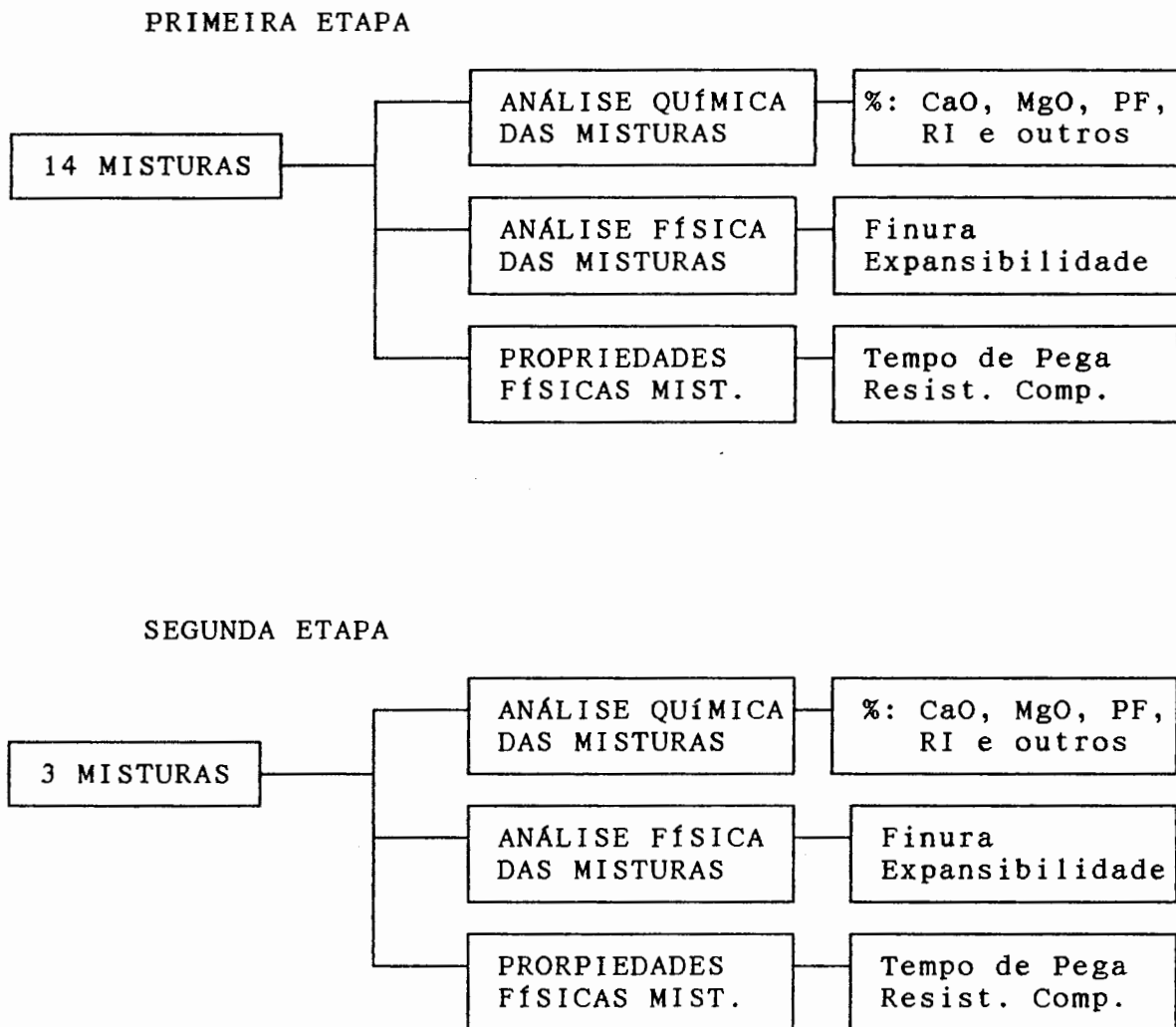


FIGURA 3.1- Esquema do Desenvolvimento dos Ensaio

3.3. CRONOGRAMA DA MOLDAGEM

Todos os ensaios, descritos no item 3.2, foram realizados nos laboratórios da fábrica de Cimento TUPI-Pedra do Sino (MG), o qual atende todos os requisitos das normas da ABNT, seja em termos de equipamento como de temperatura ambiente e umidade relativa do ar (temperatura ambiente de 22 ± 1 °C e umidade relativa do ar de 70% ($\geq 50\%$ -exigência da norma)).

Nos métodos apresentados pelas normas da ABNT e da ABCP para a realização dos ensaios físicos, em alguns casos são descritos dois procedimentos: um manual e um mecânico, o que torna importante caracterizar os procedimentos adotados:

1) na determinação da finura, por peneiramento, utilizou-se um peneirador aerodinâmico;

2) na confecção da pasta de consistência normal, a qual é utilizada para determinar o tempo de pega e a expansibilidade volumétrica, empregou-se um misturador mecânico;

3) na confecção da argamassa destinada a moldagem dos corpos de prova para aferição da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade, utilizou-se um misturador mecânico;

4) nos demais ensaios é apresentado, pela norma, somente um procedimento para a execução do ensaio, o qual foi seguido.

O cronograma de moldagem não foi considerado como um fator importante na avaliação dos resultados, pois os fatores que são considerados como sendo não controláveis, (como por exemplo a temperatura ambiente) não exerceram influência significativa, pois atendem as exigências da norma. Contudo, deve-se considerar a influência do fator mão-de-obra na confecção dos corpos de prova para aferição da resistência à compressão. Para tanto, a norma brasileira determina que o desvio relativo máximo, entre os quatro corpos de prova rompidos na mesma idade, não deve exceder a 6%, o que torna, a princípio, secundária a influência do fator mão-de-obra.

Ressalta-se ainda que, mesmo não havendo influência significativa dos fatores não controláveis, optou-se por aleatorizar as misturas ensaiadas. Desta forma, num único dia, três diferentes misturas eram sorteadas e ensaiadas, diminuindo assim os erros experimentais decorrentes do fator mão-de-obra. Este procedimento foi adotado durante todo o transcorrer deste trabalho.

3.4. MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa não puderam ser comparados a trabalhos idênticos realizados no país e no exterior, devido a inexistência de bibliografias referentes à adição do ROFE ao cimento Portland.

Desta forma, buscando adaptar-se à realidade nacional quanto à matéria-prima disponível e ainda quanto aos produtos existentes no mercado, procurou-se comparar, quando possível, os resultados obtidos do "cimento alternativo" ao cimento utilizado na pesquisa (CPII-E/32) e às normas a ele referentes.

Cabe salientar que os dados experimentais obtidos na pesquisa, referentes a resistência à compressão foram submetidos a análises estatísticas, com a finalidade de se verificar a influência dos fatores: teor de cal (TC), idade de rompimento (IR) e betonada (BE), visto que de cada betonada era possível moldar 2 corpos de prova para cada idade, sendo assim, foram necessárias duas betonadas para a moldagem dos 4 corpos de prova destinados a aferição da resistência à compressão em cada idade de rompimento (aos 3, 7 e 28 dias de idade). Os dados obtidos nos demais ensaios não necessitaram de tal avaliação devido a simplicidade dos resultados; para estes casos, realizou-se uma análise preliminar a respeito dos resultados encontrados procurando, assim, justificar o comportamento do cimento alternativo (formado por cimento Portland/ ROFE/ cal hidratada em diferentes porcentagens (vide item 3.2)).

3.4.1. Análise Estatística Básica

A análise estatística realizada nos resultados obtidos sobre a resistência à compressão foi feita por meio do programa computacional ANOVMEAN⁽⁶⁰⁾, disponível no CPGEC da UFRGS, que usa a técnica da análise de variância ANOVA⁽⁵⁹⁾, fazendo uma avaliação dos efeitos dos fatores pré-determinados (neste trabalho avaliou-se TC, IR, BE) sobre a variabilidade observada em uma resposta aleatória e fornece uma análise gráfica da influência de cada fator.

O modelo matemático que descreve esses fatores, utilizado na análise dos resultados da pesquisa em questão é apresentado a seguir:

$$X_{ijkl} = \mu + TC_i + IR_j + BE_k + (TC \cdot IR)_{ij} + (TC \cdot BE)_{ik} + (IR \cdot BE)_{jk} + (TC \cdot IR \cdot BE)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

onde:

X_{ijkl} é uma variável aleatória para $i=1, \dots, a$ níveis do fator TC, $j=1, \dots, b$ níveis do fator IR, $k=1, \dots, c$ níveis do fator BE, $l=1, \dots, n$ repetições aleatórias do experimento.

μ é a média geral do experimento

TC_i , IR_j , BE_k é o efeito dos fatores TC, IR e BE respectivamente (para esta pesquisa correspondem: TC = % CAL, IR = IDADE DE ROMPIMENTO, BE = BETONADA (1ou2))

$(TC \cdot IR)_{ij}$, $(TC \cdot BE)_{ik}$, $(IR \cdot BE)_{jk}$, $(TC \cdot IR \cdot BE)_{ijk}$ é o efeito de uma possível interação dos fatores TC e IR; TC e BE; IR e BE; TC, IR e BE.

ϵ_{ijkl} é o efeito residual, o erro aleatório

Os níveis dos fatores TC e IR foram considerados fixos e do fator BE aleatório, pois eram necessários duas betonadas para a moldagem dos 4 corpos de prova rompidos em cada idade. O nível de significância empregado em todos os casos foi $\alpha = 0.05$.

3.4.2. Comparação Múltipla de Médias

Através da análise de variância, ANOVA, é possível a avaliação dos efeitos de fatores pré-determinados sobre a variabilidade observada nos resultados de um determinado experimento.

Este método foi utilizado para verificar a significância do efeito do tempo (idade de rompimento), o teor de cal e da betonada.

Constatada a existência de variação significativa entre os grupos testados, ou seja, havendo efeito do fator avaliado sobre os resultados obtidos, observou-se a

necessidade, algumas vezes, da realização de uma comparação múltipla de médias através do método DUNCAN. Esta análise permite determinar quais as médias que diferem significativamente das outras.

4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS

4.1. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS REALIZADOS NA ETAPA INICIAL

Buscando obter um material alternativo para a construção civil, esta etapa inicial procurou estudar a viabilidade da adição do ROFE ao cimento Portland (tipo CPII-E/32). As misturas estudadas, como mencionado no capítulo 3, foram: 90% de cimento + 10% de ROFE e 60% de cimento + 40% de ROFE sob a influência da cal nos teores de 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (em peso).

4.1.1. Ensaio Químicos

As misturas estudadas e os resultados encontram-se no quadro 4.1.

Através de uma análise do quadro 4.1, verificou-se que o ROFE não é um material quimicamente inerte, como se supunha. Nota-se, devido as variações nos teores dos componentes químicos presentes nas quatorze misturas estudadas, que ocorrem reações químicas entre os componentes (cimento / ROFE / cal hidratada).

Salienta-se que a " Δ %" ilustrado no quadro 4.1 é referente a variação percentual, de cada componente identificado no "cimento alternativo" (cimento + ROFE) caso não tivesse ocorrido reação química entre os materiais comparado com os valores obtidos nos ensaios (apresentados no quadro 4.1).

Verificou-se que o ROFE reage tanto com o cimento quanto com a cal hidratada, como se pode identificar no quadro 4.1. Esta reação provoca uma redução no teor de óxido de cálcio no cimento alternativo, quando comparado ao cimento utilizado

na pesquisa (CPII-E/32). Nos parágrafos a seguir procurou-se esclarecer as reações ocorridas entre os materiais empregados na pesquisa.

MIST(%)		DETERMINAÇÕES(%)									
C + ROFE	CH	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	ÁLC.	C.L.	P.F.	R.I.
90 +	0	52,80	19,80	6,50	9,21	2,69	1,40	0,31	0,21	3,44	2,58
	1	53,06	19,26	6,39	9,10	2,65	1,72	0,30	0,32	3,51	2,36
	5	53,30	18,77	6,08	8,90	2,64	2,04	0,29	1,35	3,69	2,46
	10	53,34	17,74	5,64	8,75	2,50	3,24	0,28	1,47	3,82	2,69
	15	53,37	17,34	5,32	7,55	2,39	3,96	0,27	2,02	4,03	3,09
	20	53,44	16,81	4,98	7,26	2,29	4,06	0,26	2,26	4,69	3,26
	25	53,87	16,51	4,80	6,86	2,20	4,28	0,25	2,35	4,87	3,48
Δ (%)		+ 1,9	- 5,5	+ 19	- 3,8	+ 3	- 8	+ 37	- 61	- 1	- 17
60 +	0	42,14	10,44	9,90	26,19	1,90	0,52	0,34	0,08	3,91	3,55
	1	42,19	10,26	9,63	26,10	1,78	0,88	0,32	0,21	4,08	3,15
	5	42,36	10,03	8,40	25,89	1,71	1,46	0,31	0,93	4,28	3,36
	10	42,45	9,86	8,24	25,16	1,63	1,97	0,30	1,38	4,41	3,67
	15	42,80	9,34	8,07	24,37	1,56	2,37	0,29	1,78	4,66	4,11
	20	42,96	9,03	7,87	24,04	1,53	2,79	0,28	1,98	4,75	4,28
	25	43,13	8,88	7,47	23,79	1,46	3,09	0,27	2,88	4,97	4,57
Δ (%)		- 13	- 29	- 91	- 6,3	+ 9	- 64	-126	- 78	+ 11	- 42
CPII-E (/32)		56,65	23,05	5,57	3,48	2,90	1,54	0,25	0,60	3,48	2,11

(*) porcentagem em peso

QUADRO 4.1- Resultado das Composições Químicas das Misturas Estudadas na Primeira Etapa

Analisando o quadro 4.1 e as figuras referentes a ele (figuras 4.1 a 4.10), verificou-se que:

CaO: (óxido de cálcio) está diretamente relacionado com a resistência mecânica do cimento, ou seja, as propriedades mecânicas do cimento aumentam com o teor deste óxido, deduz-se que a redução deste óxido poderá comprometer as propriedades mecânicas do cimento.⁽⁴⁴⁾

No que se refere ao cimento alternativo, nota-se um decréscimo no teor de CaO que é mais pronunciado nas misturas que contém um maior teor de ROFE (40%) (vide quadro 4.1). Verifica-se, portanto, que o Fe_2O_3 (componente predominante do ROFE) reage com este óxido. Além disso, observou-se que à medida em que cresce o teor de cal hidratada adicionada as misturas (de 0% a 25%), ocorre um pequeno acréscimo no teor de CaO do cimento alternativo, aproximadamente 2,30%, conforme ilustra a figura 4.1.

Conclui-se que o ROFE reage quimicamente com o CaO tanto do cimento (CPII-E/32) quanto da cal hidratada. Salienta-se que a redução do teor de CaO no cimento alternativo comprometerá as propriedades mecânicas do novo cimento.

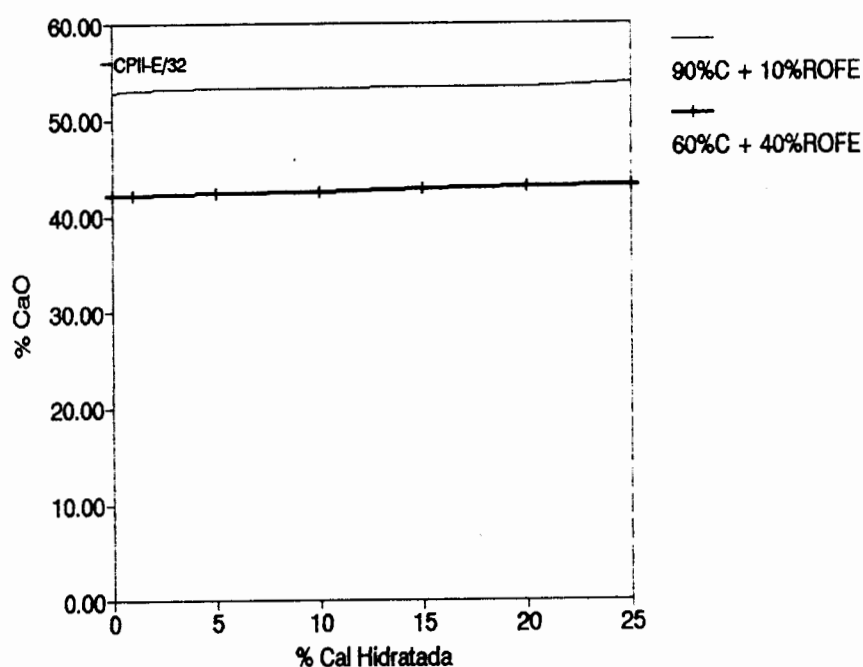


FIGURA 4.1- % CaO x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

C.L.: (cal livre) cabe salientar que o CaO deve estar totalmente combinado, pois poderá comprometer a estabilidade volumétrica das argamassas e concretos. Contudo, a cal livre é um componente freqüente do cimento Portland devido a um efeito de fabricação.⁽⁴⁴⁾ Ressalta-se que os cimentos utilizados não

são ricos em C.L., no caso específico do CII-E/32, este componente está presente no teor aproximado a 0,60% (vide item 3.1).

Analisando o quadro 4.1 e a figura 4.2, observou-se que ocorre um decréscimo considerável no teor de cal livre nas misturas que não contém a adição da cal hidratada, quando comparado ao cimento utilizado na pesquisa (CII-E/32). Entretanto, à medida em que aumenta a quantidade de cal hidratada nas misturas, o teor de C.L. também aumenta. Tal fato não deverá prejudicar a estabilidade do cimento alternativo, visto que a cal adicionada às misturas (cimento + ROFE) não apresentou, nas análises efetuadas (vide item 3.1.3), teores elevados deste óxido capaz de produzir a instabilidade volumétrica.

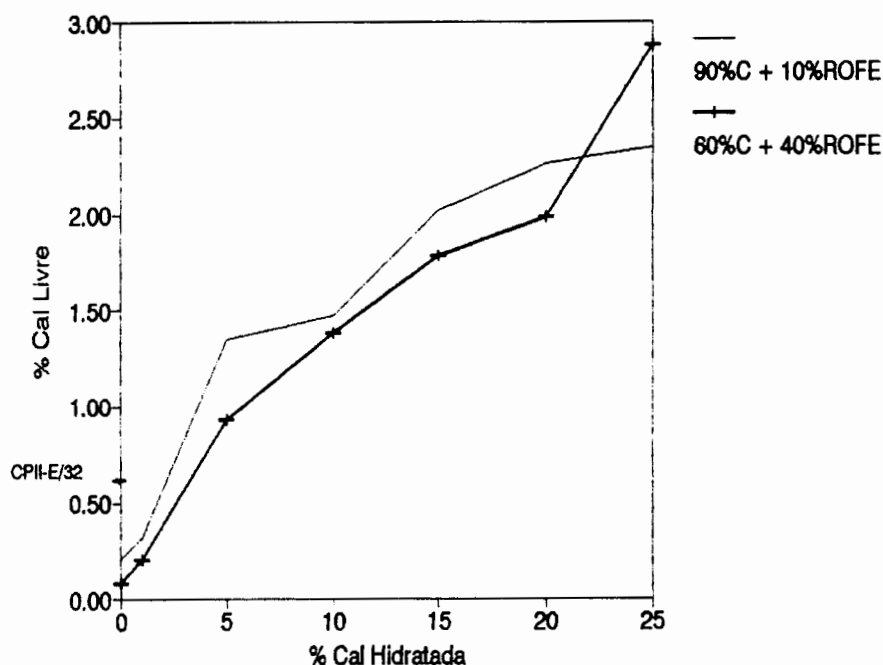


FIGURA 4.2- % de Cal Livre (C.L.) x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

MgO: (óxido de magnésio) como mencionado no capítulo 3, a cal hidratada utilizada no trabalho é dolomítica, composta essencialmente por óxido de cálcio e óxido de magnésio. Logo, o teor de óxido de magnésio aumenta à medida em que há uma maior

quantidade de cal hidratada adicionada às misturas, conforme o quadro 4.1 e a figura 4.3.

Este óxido na forma cristalina é expansivo, porém, como no caso da C.L., ele não terá tal ação prejudicial, já que o acréscimo do MgO é causado pela adição da cal hidratada às misturas. Salienta-se que a cal empregada nesta pesquisa não apresentou, nas análises efetuadas (vide item 3.1.3), teores elevados, deste óxido, capaz de provocar a instabilidade volumétrica.

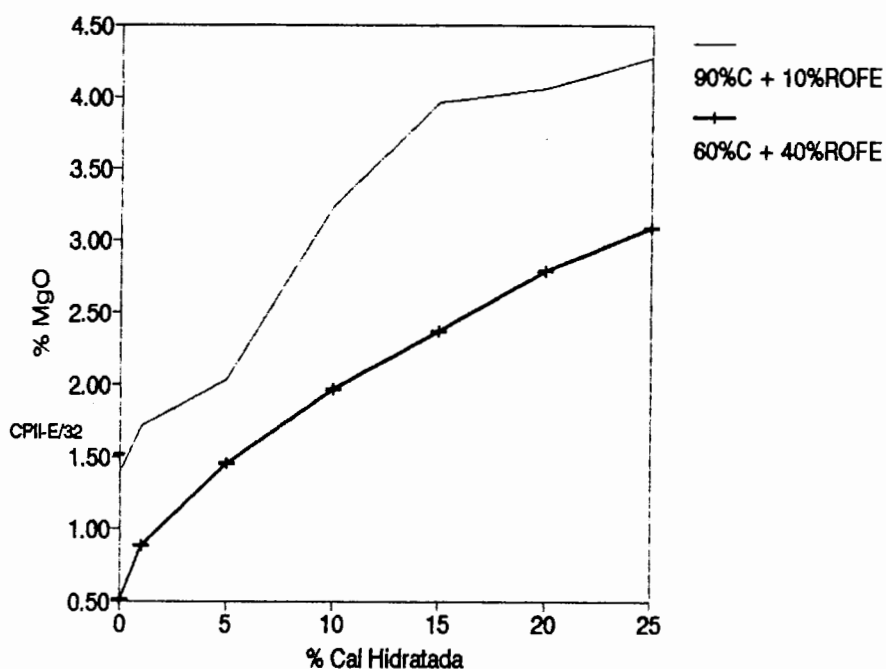


FIGURA 4.3- % MgO x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

SiO_2 : nota-se um decréscimo no teor de óxido de silício, quando comparado ao cimento CII-E/32, à medida em que aumenta a quantidade do ROFE e da cal hidratada adicionados ao cimento, conforme ilustra o quadro 4.1 e a figura 4.4.

Acredita-se que a redução no teor do óxido de silício irá comprometer as propriedades mecânicas do cimento alternativo, visto que este óxido reage com o óxido de cálcio

formando os compostos responsáveis pela resistência mecânica do cimento: C_3S e C_2S (vide item 2.3.2).

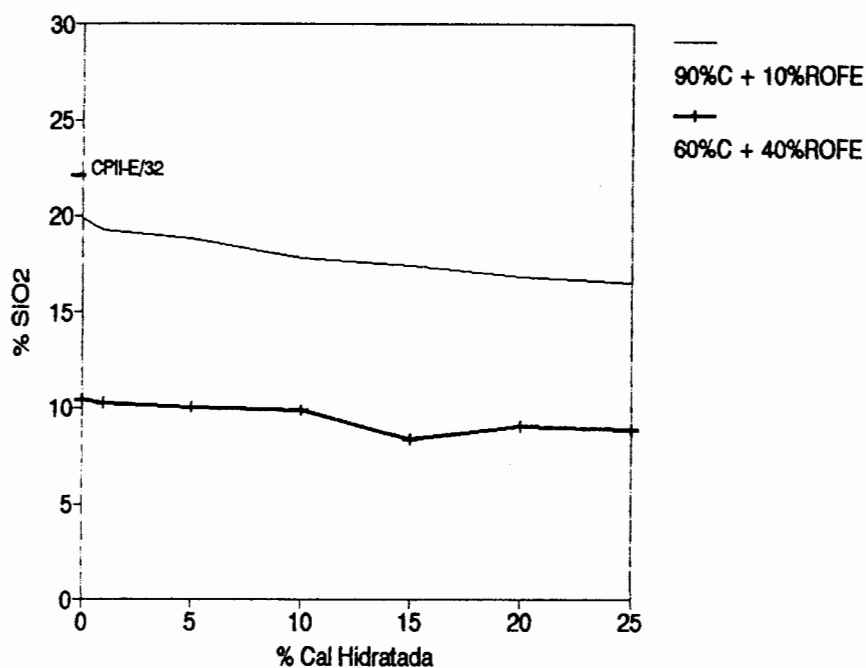


FIGURA 4.4- % SiO₂ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

Al_2O_3 - Fe_2O_3 : o óxido de alumínio e o óxido de ferro crescem com maiores teores do ROFE, e possuem um comportamento inverso quando se eleva à quantidade de cal hidratada adicionada às misturas. Conforme se verifica no quadro 4.1, há um decréscimo de aproximadamente 24% para o Al_2O_3 e de 10% para o Fe_2O_3 quando a cal hidratada adicionada as misturas varia do teor de 0% ao teor de 25%. Estes óxidos reagem com o CaO existente no cimento reduzindo assim, a cal livre do "cimento alternativo" (vide figura 4.5 e 4.6).

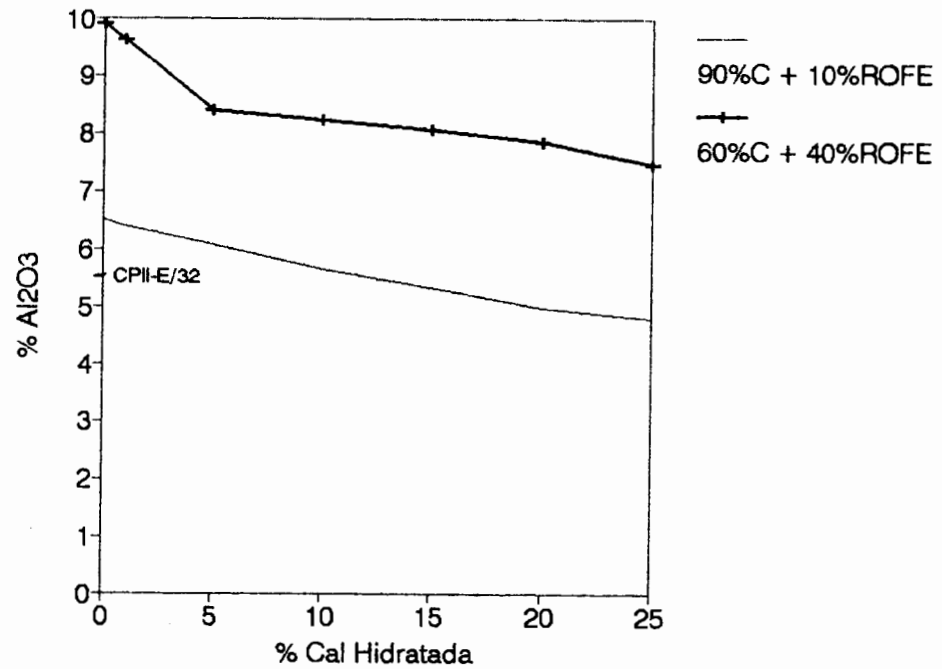


FIGURA 4.5- % Al₂O₃ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

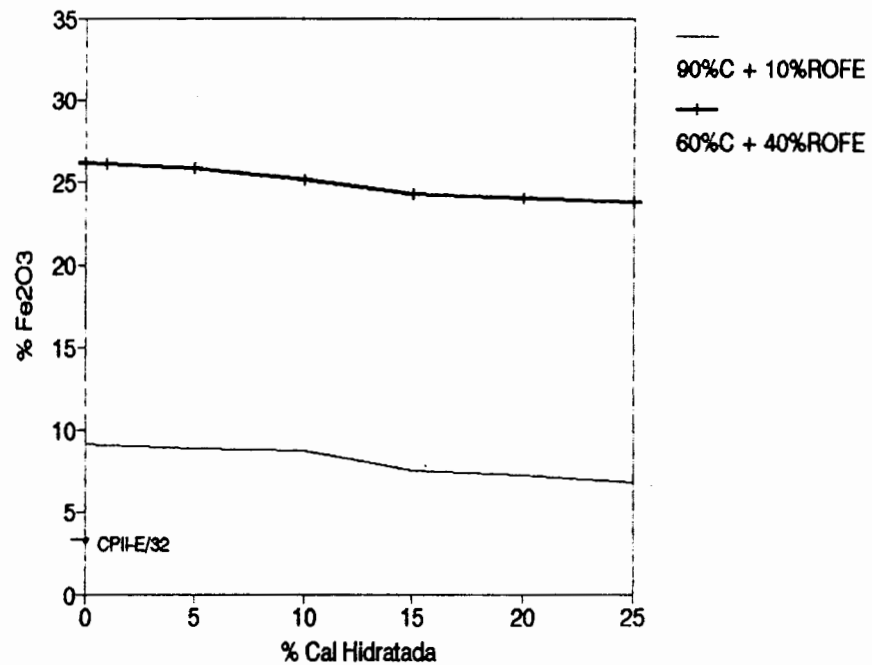


FIGURA 4.6- % Fe₂O₃ x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa

SO_3 : verificou-se a redução do anidrido sulfúrico tanto em teores mais elevados do ROFE quanto em quantidades maiores de cal, conforme ilustra o quadro 4.1 e a figura 4.7. Este componente químico provém da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comumente chamada de gesso, adicionada ao cimento Portland para retardar a sua pega. Em teores superiores a 4%, este óxido poderá comprometer a estabilidade volumétrica das pastas e argamassas de cimento

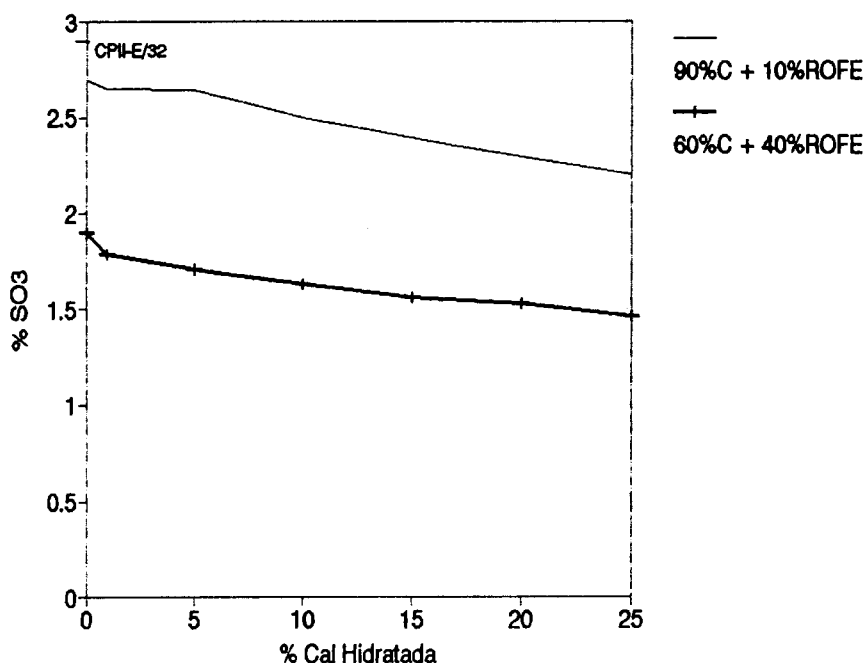


FIGURA 4.7- % SO_3 x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

Com base nas análises efetuadas até o momento, nota-se que o ROFE reage com o cimento e a cal, "combinando" com todos os componentes químicos existentes.

ALCALIS: os álcalis são encontrados em teores de 0,25% a 0,34% (vide quadro 4.1 e figura 4.8), agem como aceleradores de pega. Em teores elevados (a quantidade máxima permitida nos

cimentos Portland é de 0,60 %)⁽⁴⁶⁾ podem aumentar a retração hidráulica.

Conclui-se, portanto, que o cimento alternativo não sofrerá a retração hidráulica proveniente do excesso destes óxidos, visto que não excede limite máximo permitido aos cimentos.

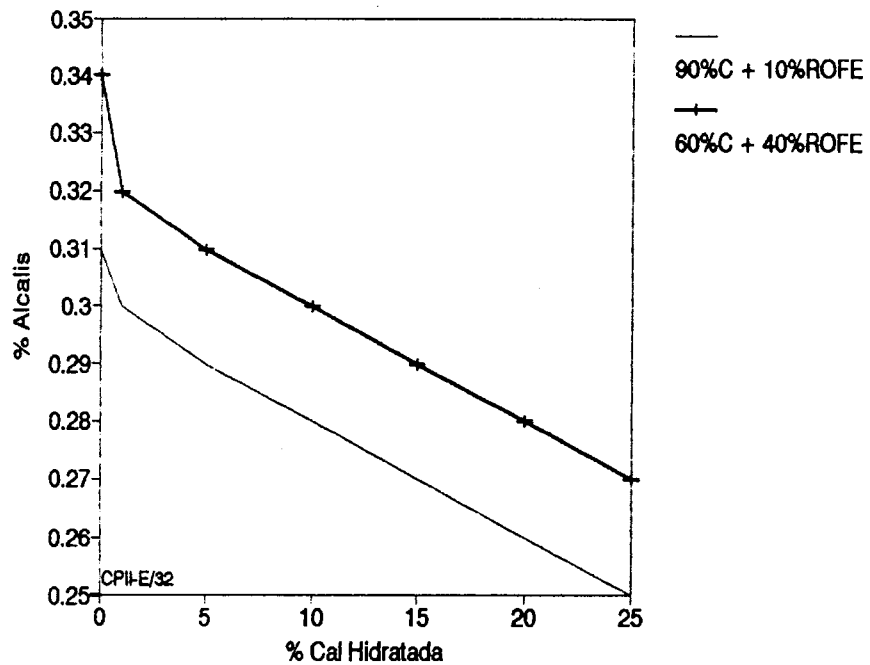


FIGURA 4.8- % Álcalis x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

P.F.: a perda ao fogo exprime os constituintes presentes no cimento e eliminados pela calcinação a 1000 °C. Representa a água higroscópica, a de hidratação e o anidrido carbônico. Um alto teor de P.F. ($\geq 6,5\%$) pode ser indício de impurezas presentes no produto.

R.I.: o resíduo insolúvel representa, no cimento, um material inerte, sem propriedades hidráulicas. O R.I. inclui também adições que adulteram o produto.

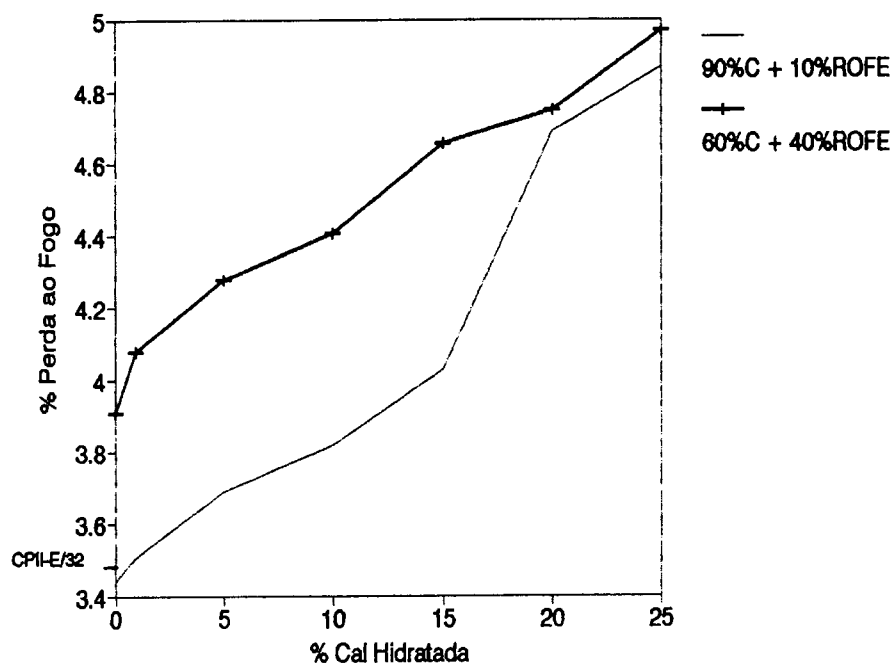


FIGURA 4.9 - % P.F. x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa

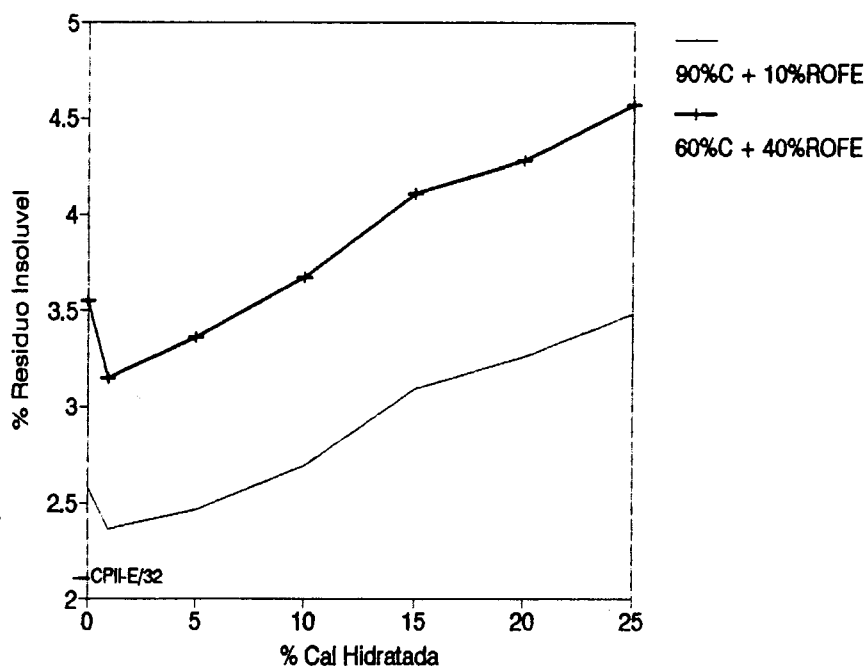


FIGURA 4.10- % R.I. x % Cal hidratada para as misturas estudadas na primeira etapa.

Analisando o quadro 4.1 e as figuras 4.9 e 4.10, verifica-se o aumento do teor da P.F. e do R.I., tanto com maiores teores do ROFE quanto de cal. Isto é justificado através das impurezas contidas nos materiais empregados na pesquisa e, principalmente pela adições efetuadas ao cimento Portland, pois elas o adulteraram.

Examinando a figura 4.10 nota-se que ocorre uma inflexão nas misturas que contém 1% de adição de cal hidratada. Acredita-se que tal fato seja decorrente das reações químicas que acontecem entre os materiais empregados na pesquisa.

4.1.2. Ensaio Físicos

4.1.2.1. Finura

A finura, para efeito de especificação, pode ser determinada somente por peneiramento através de malhas de certas dimensões. Entretanto, este tipo de determinação não abrange a larga faixa de valores de finura dos cimentos atuais. Desta forma, a finura pode ser obtida, também, pela determinação da área da superfície específica (BLAINE), como mencionado no item 2.3.5. Os resultados dos ensaios de finura por peneiramento e permeabilidade ao ar (BLAINE) estão ilustrados no quadro 4.2 e figuras 4.11 a 4.13.

MISTURAS (%)		FINURA			
C+ROFE	CH	#200 (%)	#325 (%)	BLAINE (m ² /Kg)	DENS.
90+10	0	1,3	6,9	461	3,20
	1	1,7	7,1	464	3,19
	5	2,0	7,5	510	3,15
	10	2,6	8,9	534	3,10
	15	3,5	9,4	542	3,05
	20	3,8	10,1	561	3,00
	25	4,4	10,8	563	2,95
60+40	0	2,5	7,9	583	3,30
	1	2,6	8,2	591	3,29
	5	3,7	8,8	603	3,24
	10	4,5	10,1	647	3,19
	15	5,0	11,6	688	3,14
	20	5,5	11,7	698	3,09
	25	5,9	12,3	704	3,05

QUADRO 4.2- Resultado dos ensaios de finura das misturas estudadas na primeira etapa

Analisando o quadro 4.2 e as figuras referentes à ele (figuras 4.11 a 4.13), verificou-se que:

- à medida em que se eleva a quantidade de cal hidratada adicionada as misturas de cimento e ROFE, ocorre um aumento no teor de material retido nas peneiras n.325 e n.200.

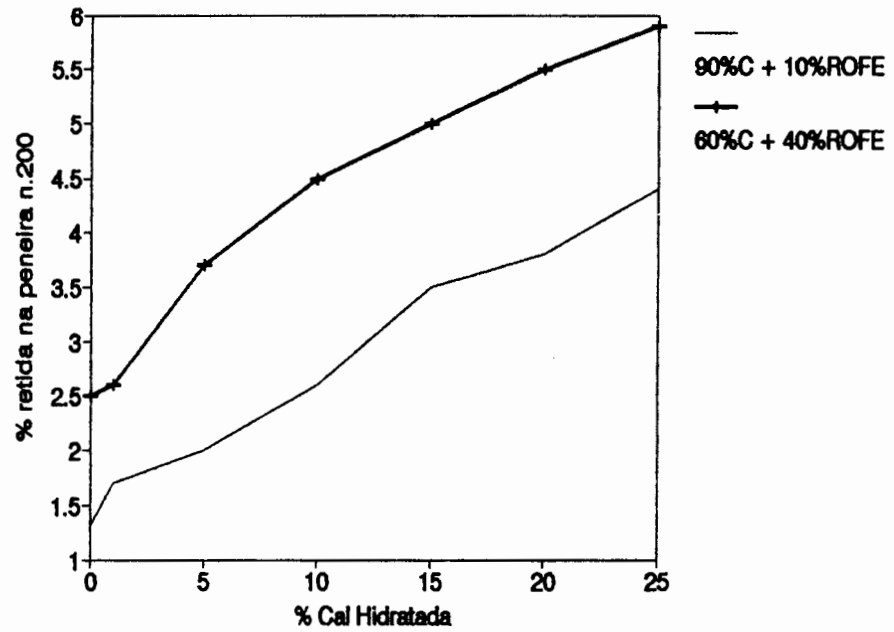


FIGURA 4.11- #200 x % Cal hidratada das misturas estudadas na primeira etapa

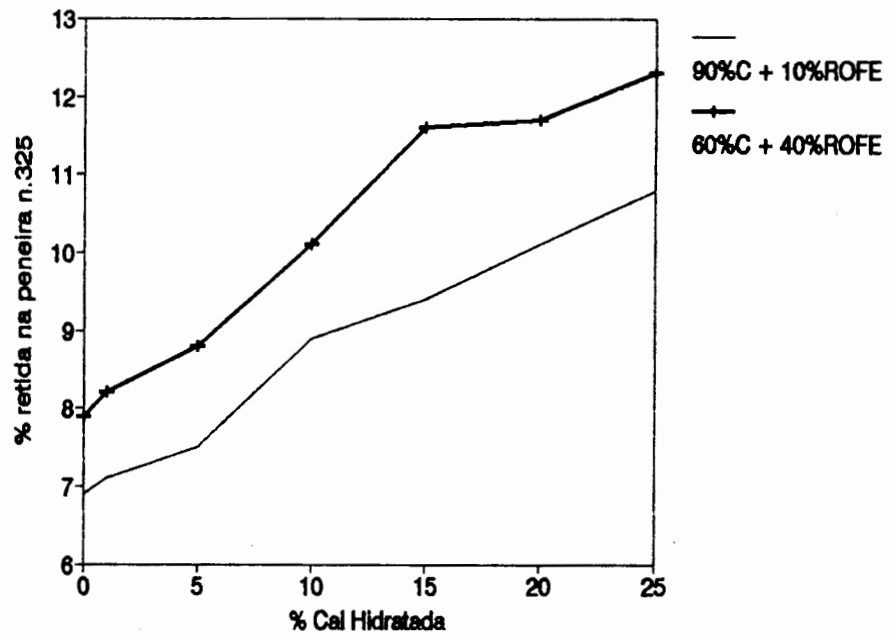


FIGURA 4.12- #325 x % Cal hidratada das Misturas estudadas na primeira etapa

O aumento do teor de material retido nas peneiras pode ser atribuído as impurezas minerais contidas na cal hidratada;

- devido o ROFE ser muito mais fino que o cimento (BLAINE do ROFE aproximadamente 80% maior que o BLAINE do cimento - vide item 3.2) e como a cal possui uma finura superior a ambos, as misturas apresentam-se com maior finura à medida em que se aumenta o teor do ROFE e da cal. Este acréscimo resultará em uma melhoria na trabalhabilidade das argamassas.

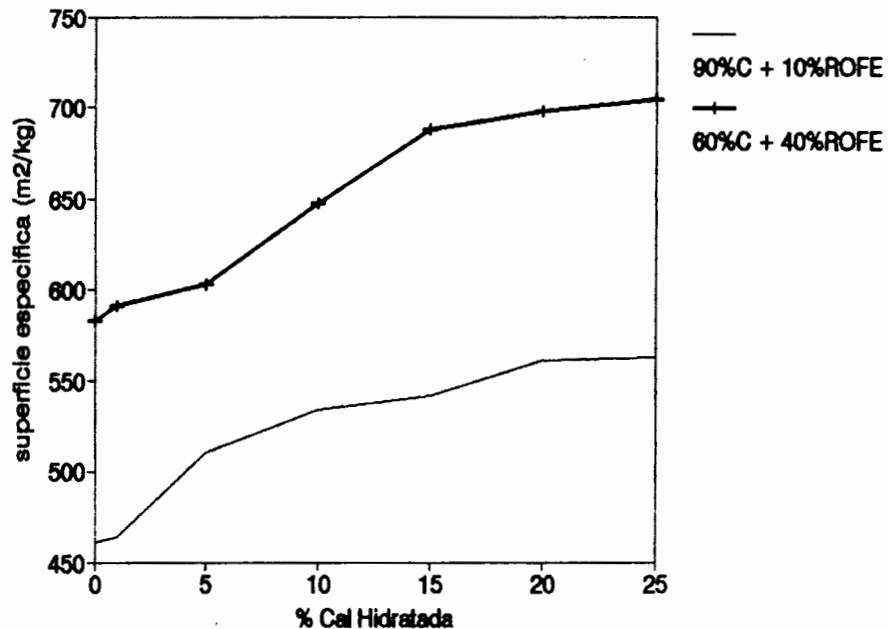


FIGURA 4.13- Superfície Específica (m²/kg) x % Cal hidratada das misturas estudadas na primeira etapa.

4.1.2.2. Consistência Normal

A consistência normal da pasta é traduzida pelo teor de água (expresso em porcentagem em peso de H₂O em relação ao cimento) em uma pasta compactada num molde e submetida a uma

certa penetração de um êmbolo padronizado. Este teor de água é usado para a preparação da pasta de cimento para determinar duas importantes características do cimento: tempo de pega (início e fim) obtido pela agulha de Vicat e a instabilidade volumétrica (a frio e a quente) utilizando-se a agulha de Le Chatelier. O quadro 4.3 ilustra os resultados obtidos nos ensaios.

MIST. (%)		ÍNDICE DE CONS (%H ₂ O)	TEMPO DE PEGA (h:m)		EXPANSIB. (mm)	
C+ROFE	CH		INICIAL	FINAL	FRIO	QUENTE
90+10	0	24,8	04:35	09:25	0,0	0,2
	1	25,0	04:15	11:40	0,0	0,0
	5	26,0	04:05	-15:45	0,0	0,0
	10	26,7	03:50	-13:45	0,1	0,1
	15	27,6	03:15	10:00	0,2	0,5
	20	28,6	03:15	08:25	0,2	0,5
	25	30,4	02:55	07:45	0,1	0,3
60+40	0	20,0	03:00	20:05	0,0	0,0
	1	21,3	03:00	22:05	0,0	0,0
	5	22,0	03:00	-27:30	0,0	0,0
	10	23,2	03:10	-27:00	0,0	0,0
	15	24,6	02:40	20:20	0,3	0,5
	20	26,0	02:35	20:10	0,2	0,5
	25	27,0	02:25	19:50	0,2	0,4
CPII-E/32		27,3	03:55	06:30	0,0	0,0

QUADRO 4.3- Resultados dos Ensaios de Consistência Normal da Pasta(%H₂O), Tempo de Pega e Expansibilidade das misturas estudadas na primeira etapa.

Como mencionado, "Pega" é o termo usado para descrever o enrijecimento da pasta. Como em outras propriedades, o tempo de pega é afetado pelas características físico-químicas do cimento, pelas condições climáticas e pela qualidade e temperatura da água de amassamento.

Analisando os resultados obtidos (quadro 4.3 e figuras 4.14 e 4.15) nota-se um decréscimo no TIP, principalmente em teores mais elevados de cal hidratada. Verifica-se que a adição do ROFE e da cal hidratada ao cimento tipo CPII-E/32 aceleram

No que se refere ao tempo de fim de pega nota-se um acréscimo considerável, principalmente nas misturas que contém os teores de 5% e 10% de cal hidratada. Acredita-se que o ROFE seja o responsável por este aumento no TFP, pois sendo bem mais fino que o cimento, envolve os grãos do cimento, dificultando, assim o término das reações de hidratação. Há de se considerar, inclusive, o endurecimento lento da cal hidratada.

Além disso, em teores mais elevados de cal (20% e 25%), o TFP diminui. Este comportamento é justificado pelas dimensões das partículas, pois quanto menores elas são, no momento das reações, um número maior delas podem combinar-se.

Contudo faz-se necessário um estudo minucioso a respeito das reações químicas que ocorrem no "cimento alternativo", o que poderia elucidar de forma mais concreta tal comportamento.

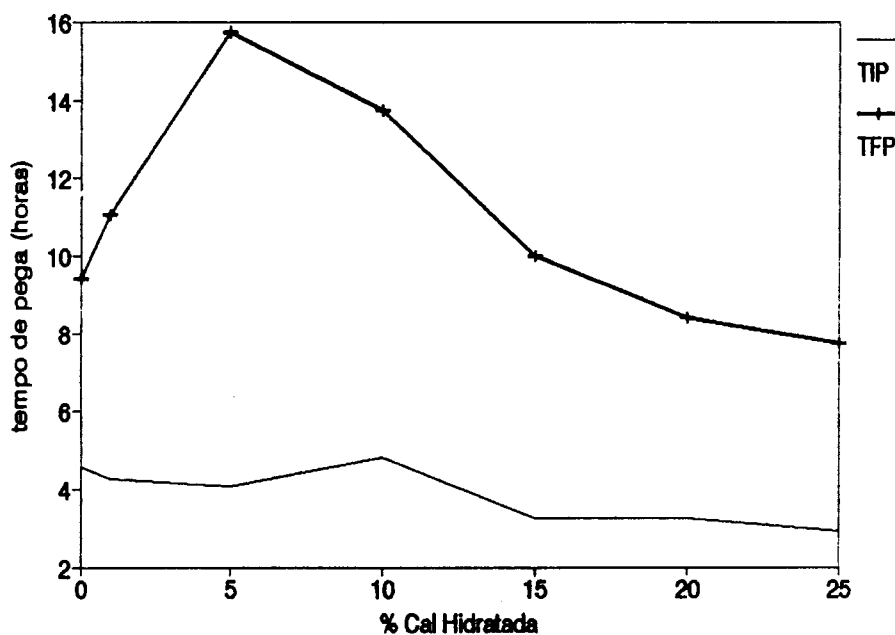


FIGURA 4.14- Tempo de Pega (início e fim)-(h:m) x % Cal hidratada das misturas compostas por 90% Cimento + 10% de ROFE.

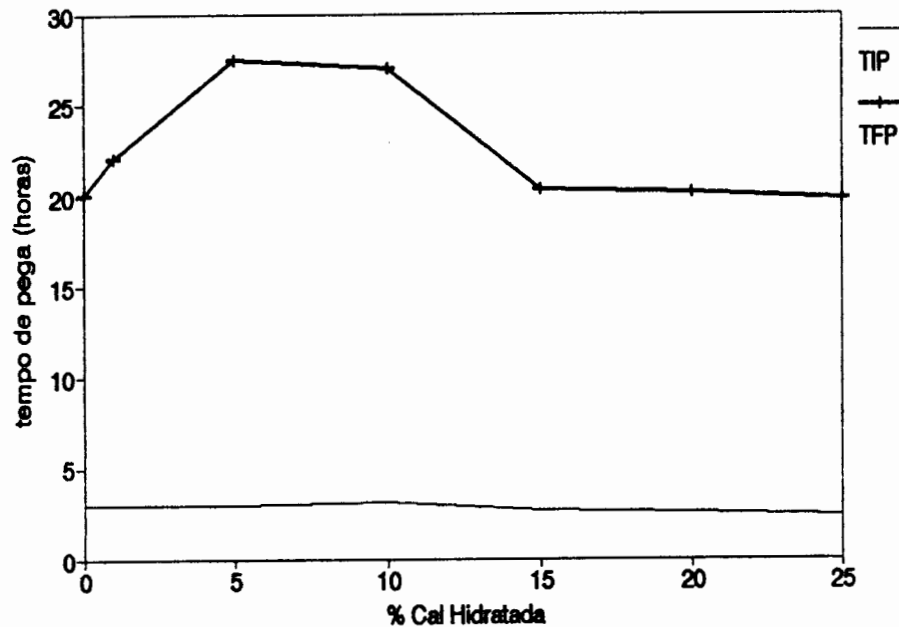


FIGURA 4.15- Tempo de Pega (início e fim)- (h:m) x % Cal hidratada das misturas compostas por 60% Cimento + 40% de ROFE.

No que se refere à expansibilidade do material tanto à frio quanto à quente (vide quadro 4.3), denota-se que os componentes (cal livre, sulfato de cálcio e óxido de magnésio na forma cristalizada) capazes de prejudicar a estabilidade de volume do cimento, não causaram nenhum efeito. Há de se considerar inclusive que a adição da cal hidratada as misturas (cimento + ROFE) não provoca expansão, pois através da análise química realizada na cal hidratada (utilizada no trabalho), verifica-se que ela não possui teores altos dos elementos capazes de produzir esta ação prejudicial nas pastas.

4.1.2.3. Resistência à compressão

A resistência mecânica dos cimentos é determinada por meio de corpos de prova cilíndricos moldados com argamassa,

dosada e proporcionada sob certas condições padrões, ensaiada a várias idades, por compressão axial simples.(19)

A resistência à compressão do cimento é normalmente tomada como a propriedade mais importante na determinação de sua qualidade.

Foram testadas as quatorze misturas. Os resultados, média de quatro valores com seus respectivos desvio relativo, encontram-se no quadro 4.4.

Analisando os resultados do quadro 4.4 e a figura 4.16, verificou-se que:

- o crescimento da resistência ocorre com o aumento da idade de cura dos corpos de prova; este aumento é mais pronunciada nas primeiras idades.

- as misturas que contém um menor teor de cal apresentaram valores da resistência à compressão maiores.

No que se refere aos desvios relativos, nota-se um comportamento inconstante, variando desde 0,36% a 5,03%; entretanto, todos ficaram abaixo do requisito estabelecido pela norma(19), que é de 6%.

MISTURA(%)		TEMPO (dias)					
C+ROFE	CH	03		07		28	
		RC	DR	RC	DR	RC	DR
90+10	0	27,9	1,79	31,8	5,03	38,1	3,67
	1	24,7	2,02	32,6	0,61	37,7	3,44
	5	25,1	1,59	28,6	5,59	38,0	1,31
	10	26,0	1,53	31,0	2,25	35,5	2,82
	15	21,3	1,87	27,3	4,39	34,9	2,00
	20	21,9	1,36	27,2	0,36	32,3	3,40
	25	20,0	1,00	24,7	1,21	32,6	3,07

QUADRO 4.4- Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão (MPa) e Desvio Relativo (%)

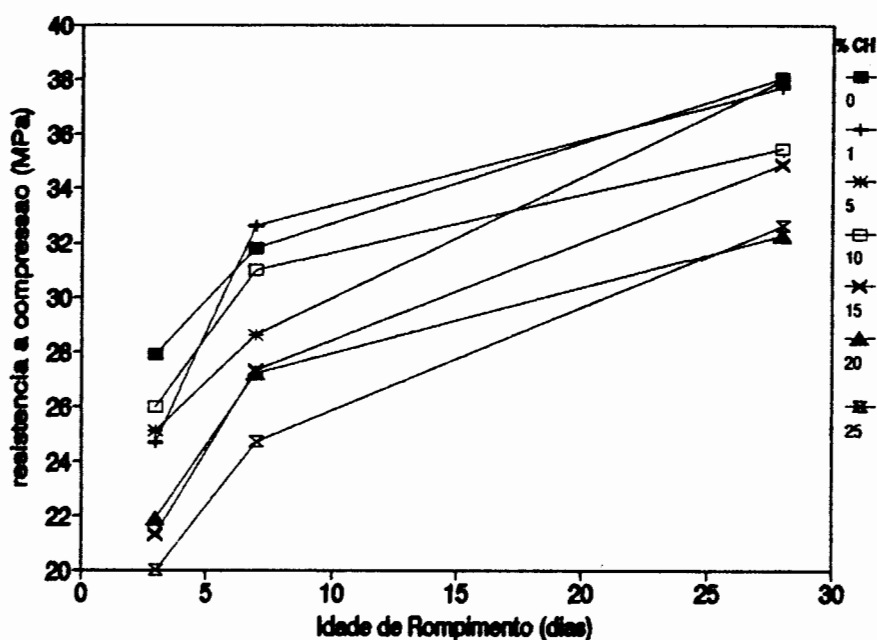


FIGURA 4.16- Resistência à Compressão (MPa) x Idade de Rompimento (dias)

Salienta-se que os corpos de prova moldados, para a averiguar a resistência à compressão das amostras compostas por: 60% de cimento + 40% de ROFE sob a influência da adição da cal nos teores de: 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, não foram desformadas, visto que a argamassa não "endureceu" no prazo de 24 horas (conforme especificação da norma ⁽¹⁹⁾), conseqüentemente, a resistência à compressão é considerada como sendo igual a zero. Baseado nas análises efetuadas verificou-se que estas misturas possuem um elevado TFP (vide quadro 4.3 e figura 4.15), o que justifica este fato.

Na tentativa de se encontrar razões que esclareçam o baixo valor da resistência à compressão das misturas compostas por 60% de cimento + 40% de ROFE, verificou-se, nas análises efetuadas até o momento, um decréscimo no teor de óxido de cálcio de aproximadamente 25% (vide quadro 4.1); estando este componente diretamente ligado às propriedades mecânicas do cimento, pois ao combinar-se com o óxido de silício forma os

compostos (C_3S e C_2S) responsáveis pela resistência mecânica do cimento, é de se esperar esta redução na resistência do cimento alternativo.

Os dados obtidos, referentes a resistência à compressão das misturas compostas por 90% de cimento + 10% de ROFE nos diferentes teores de cal, foram submetidos a análise estatística básica pelo programa computacional ANOVMEAN procurando, assim, verificar a influência da variação no teor de cal e idade de rompimento na resistência à compressão das misturas estudadas. Além disto, cabe lembrar que de cada betonada realizada, destinada a confecção dos C.P., era possível moldar somente 2 C.P. para cada idade de ensaio, logo, eram necessárias duas betonadas para completar a série dos quatro C.P. para obter o valor médio da resistência em cada idade. Por isso, optou-se por dividir os resultados encontrados segundo a betonada de origem, diminuindo, assim, o erro experimental.

Os valores de F, a um nível de significância $\alpha=0.05$, encontrados para testar a hipótese da não existência de efeito destes fatores, bem como suas respectivas interações, encontram-se no quadro 4.5.

Como F calculado foi maior que F tabelado (quadro 4.5) para os termos dos fatores % Cal, Idade de Rompimento e a interação deles, concluiu-se que existe um efeito significativo destes fatores.

F	TC	IR	BE	TC.IR	TC.BE	IR.BE	TC.IR.BE
calculado	225,91	2785,08	1,36	15,66	2,24	0,62	1,83
tabelado	2,33	3,22	4,07	1,99	2,33	3,22	1,99

QUADRO 4.5- Valores de F para os Fatores Analisados

Pode-se afirmar então que o período de cura (idade de rompimento) e o teor de cal adicionado às misturas têm influência na resistência à compressão, levando as seguintes conclusões:

a) à medida em que aumenta o tempo de cura (idade de rompimento) dos corpos de prova a resistência à compressão cresce.

b) quanto maior o teor de cal adicionado a mistura de cimento e ROFE, menor a resistência à compressão do "cimento alternativo" aos 28 dias.

c) o comportamento das misturas frente à resistência à compressão é um pouco instável (vide figura 4.16), mas isto provavelmente deveu-se à variabilidade experimental. Por problemas de tempo e disponibilidade de equipamentos, os corpos de prova não puderam ser moldados todos no mesmo dia. Desta forma, introduziu-se, inevitavelmente, alguma variabilidade (erro) nos resultados.

4.2. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS REALIZADOS NA SEGUNDA ETAPA

Nos dados examinados no item 4.1, verificou-se que não foi possível obter os valores referentes à resistência à compressão das misturas compostas por 60% de cimento + 40% de ROFE sob a influência da adição da cal hidratada nos teores de: 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Optou-se, então, por determinar novas misturas para dar continuidade ao estudo.

Através dos ensaios já descritos (capítulos 2 e 3), encontrou-se uma proporção considerada como sendo ideal entre o cimento e ROFE de: 75% e 25%, respectivamente. Baseado nas análises realizadas no item 4.1, optou-se pelo estudo desta mistura com a inclusão de 0%, 20% e 25% de cal, visto que as misturas que contém um maior teor de cal apresentaram uma redução no seu TIP e TFP.

4.2.1. Ensaio Químicos

Por meio de uma análise do quadro 4.6 e da figura 4.17 verificou-se, como era de se esperar, que as misturas apresentaram um comportamento idêntico das determinações estudadas na primeira etapa, ou seja:

MIST(%)		DETERMINAÇÕES (%)									
C + ROFE	CH	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	ÁLC.	C.L.	P.F.	R.I.
75	0	48,24	16,24	8,02	16,35	2,23	0,79	0,30	0,13	3,37	3,15
+	20	49,48	13,05	6,47	13,70	1,86	3,60	0,27	2,02	4,68	3,85
25	25	49,69	12,38	6,13	13,39	1,80	3,96	0,25	2,19	4,88	4,02
CPII-E (/32)		56,65	23,05	5,57	3,48	2,90	1,54	0,25	0,60	3,48	2,11

(*) porcentagem em peso

QUADRO 4.6- Resultado das Composições Químicas das misturas estudadas na segunda etapa

CaO: ocorre um decréscimo no teor do óxido de cálcio no cimento alternativo, quando comparado ao CII-E/32. Porém, há um pequeno acréscimo com a adição da cal hidratada.

Estando as propriedades mecânicas do cimento diretamente relacionadas com o teor do óxido de cálcio, conclui-se que resistência à compressão do cimento alternativo será afetada pela redução do CaO.

SiO₂: há um decréscimo no teor do óxido de silício que é mais pronunciado com o aumento do teor de cal adicionado a mistura. Acredita-se que esta redução irá diminuir a formação dos compostos responsáveis pela resistência mecânica do cimento: o C₃S e o C₂S (vide item 2.3.2). Logo, o cimento alternativo possuirá menores resistências, quando comparado ao cimento tipo CII-E/32.

Al₂O₃ - Fe₂O₃: estes óxidos crescem seus teores com a adição do ROFE ao CII-E/32 e, diminuem com a inclusão da cal na mistura. Tanto o óxido de alumínio quanto o óxido de ferro reage com a cal existente no cimento reduzindo o teor de C.L. do cimento alternativo.

SO₃: o anidrido sulfúrico reduz tanto com a adição do ROFE quanto da cal. Este componente químico provém da gipsita adicionada ao cimento Portland para retardar a sua pega. Em teores superiores a 4%, este óxido poderá comprometer a estabilidade volumétrica das pastas e argamassas de cimento.

MgO: como mencionado no capítulo 3, a cal utilizada na pesquisa é do tipo dolomítica (composta por CaO e MgO). Logo, o teor do óxido de magnésio cresce à medida em que aumenta o teor de cal na mistura. Este óxido na forma cristalina é expansivo, porém o cimento alternativo não terá a ação prejudicial causada por este óxido, pois a cal hidratada empregada nesta pesquisa

não apresentou teores elevados deste óxido capaz de provocar a expansibilidade.

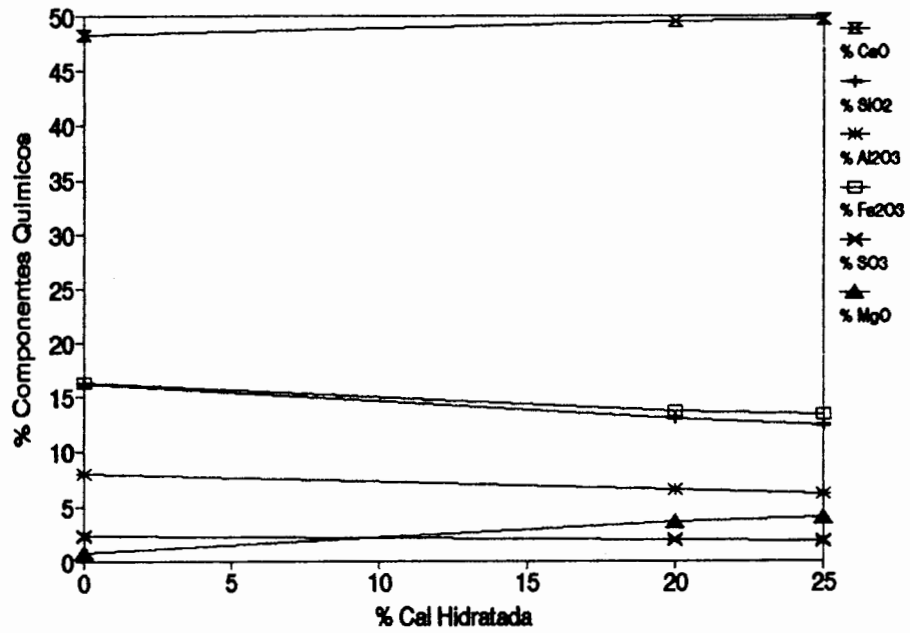
ÁLCALIS: em teores altos, os álcalis, são prejudiciais pois aumentam a retração hidráulica. Para este caso não causarão tal efeito, visto que o cimento alternativo não excede o teor máximo (0,60%) permitido aos cimentos.

C.L.: a cal livre é um componente freqüente do cimento Portland devido a um efeito de fabricação. Ressalta-se que os cimentos utilizados não são ricos em C.L., no caso específico do C_{PII-E/32}, este componente está presente no teor de aproximadamente 0,60%.

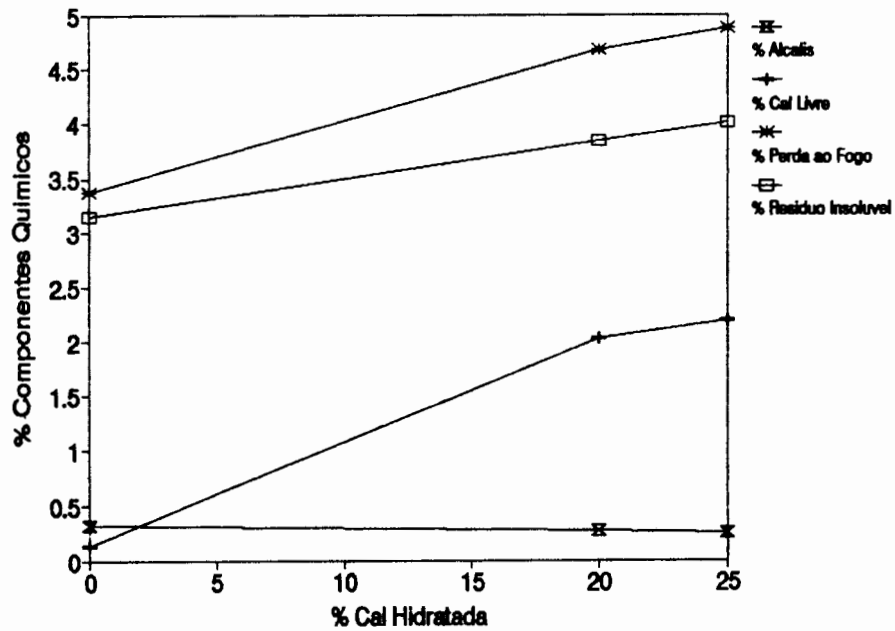
Observa-se que ocorre um decréscimo no teor de cal livre na mistura que não contém a adição da cal hidratada (quando comparado ao cimento utilizado na pesquisa (C_{PII-E/32})). Contudo, à medida em que se aumenta a quantidade de cal adicionada na mistura, verifica-se que o teor de C.L. aumenta. Tal fato não irá prejudicar a estabilidade do cimento alternativo, pois a cal empregada na pesquisa não apresentou, nas análises efetuadas (vide item 3.1.3), teores elevados deste óxido, capaz de provocar a instabilidade volumétrica.

P.F. - R.I.: a perda ao fogo exprime os constituintes presentes no cimento e eliminados pela calcinação a 1000 °C, enquanto que o resíduo insolúvel representa o material inerte, sem propriedades hidráulicas. Ambos dão indícios das adições que adulteram o cimento.

Através das análises efetuadas verificou-se que tanto a P.F. quanto o R.I. aumentam, visto que as adições efetuadas ao cimento C_{PII-E} o adulteraram.



(a) componentes: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, MgO



(b) componentes: álcalis, C.L., P.F., R.I.

FIGURA 4.17- % Componentes Químicos x % Cal hidratada das misturas estudadas na segunda etapa.

4.2.2. Ensaio Físicos

Os resultados referentes aos ensaios físicos realizados nas três novas misturas estudadas nesta segunda etapa, encontram-se nos quadros 4.7, 4.8 e 4.9.

MISTURAS (%) *		FINURA			
C+ROFE	CH	#200 (%)	#325 (%)	BLAINE (m ² /kg)	DENS.
75	0	2,0	6,9	503	3,13
+	20	5,0	11,7	648	3,05
25	25	7,0	13,7	656	3,00

QUADRO 4.7- Resultados do Ensaio de Finura das misturas estudadas na segunda etapa

MIST (%) *		ÍNDICE DE CONS. (H ₂ O)	TEMPO DE PEGA (h:m)		EXPANSIB. (mm)	
C+ROFE	CH		TIP	TFP	FRIO	QUENTE
75+25	0	22,8	01:15	09:50	0,0	0,0
	20	27,3	01:40	15:30	0,0	0,5
	25	28,6	01:25	13:15	0,0	0,0
CPII-E/32		27,3	03:55	06:30	0,0	0,0

QUADRO 4.8- Resultado dos Ensaio de Consistência Normal da Pasta, Tempo de Pega e Expansibilidade das misturas estudadas na segunda etapa.

Analisando os resultados do quadro 4.7 verificou-se o mesmo comportamento descrito no item 4.1.2, ou seja:

- à medida em que se eleva a quantidade de cal adicionada a mistura ocorre um aumento no teor do material retido nas peneiras n.325 e n.200 que é atribuído as impurezas minerais contidas na cal empregada;

- finura aumenta com a inclusão do ROFE e da cal, já que o ROFE é mais fino que o cimento e a cal é mais fina que ambos.

Verificou-se, conforme demonstra o quadro 4.8, um decréscimo no TIP (as adições efetuadas ao CPII-E/32 aceleram as reações químicas de enrijecimento da pasta) e um acréscimo no TFP (pois sendo o ROFE mais fino que o cimento, ele envolve os grãos do cimento, dificultando o término das reações de hidratação). Para uma análise mais detalhada a respeito deste comportamento, faz-se necessário, como mencionado, um estudo aprofundado acerca do comportamento químico destas misturas, o que fica indicado para trabalhos futuros.

Como verificado no item 4.1.2, não foi detectada a presença de nenhum elemento químico capaz de comprometer a expansibilidade do material (vide quadro 4.8).

No que se refere à resistência à compressão nota-se, através da análise do quadro 4.9 e figura 4.18, que os valores são satisfatórios. Entretanto, na mistura onde a cal não está presente, verifica-se que a resistência à compressão nas primeiras idades é muito baixa (1,3 MPa), porém aos 28 dias ela é de 34,9 MPa. A adição da cal nos teores de 20% e 25%, em peso, favorece a resistência à compressão nas primeiras idades.

MIST(%)		TEMPO (dias)					
C +ROFE	CH	03		07		28	
		RC	DR	RC	DR	RC	DR
75	0	1,3	5,76	24,9	4,42	34,9	3,15
+	20	17,9	2,65	24,9	1,20	30,3	3,96
25	25	15,7	2,38	22,7	0,88	27,9	0,36

QUADRO 4.9- Resultado do Ensaio de Resistência à Compressão (MPa) e Desvio Relativo(%) das misturas estudadas na segunda etapa

Verificou-se que o desvio relativo variou na faixa de 0,30% a 5,80%, atendendo, assim, o requisito da norma, que é no máximo 6%.

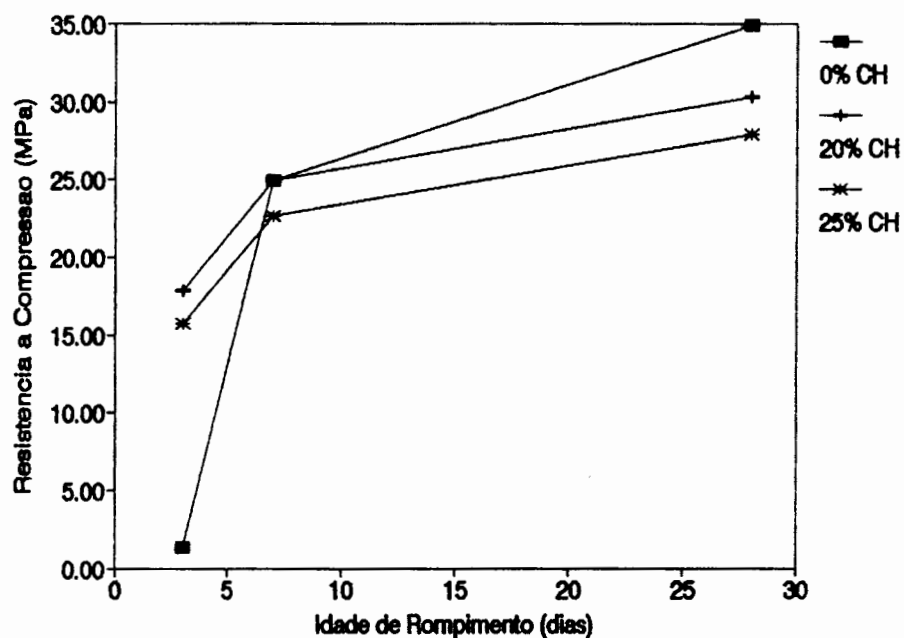


FIGURA 4.18- Resistência à Compressão x Idade de Rompimento (dias)

Os dados foram submetidos, também, a análise estatística básica pelo programa computacional ANOVMEAN para verificar a influência do teor de cal, idade de rompimento e betonada nas misturas (como no caso anterior, item 4.1.2, eram necessárias duas betonadas para a moldagem dos 4 C.P. para aferição da resistência à compressão em uma determinada idade).

Os valores de F a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, encontrados para testar a hipótese da não existência do efeito destes fatores, bem como suas respectivas interações, encontram-se no quadro 4.10.

F	TC	IR	BE	TC.IR	TC.BE	IR.BE	TC.IR.BE
calculado	151,05	3578,50	0,14	514,83	1,14	2,02	1,01
tabelado	3,55	3,55	4,41	2,93	3,55	3,55	2,93

QUADRO 4.10- Valores de F para os Fatores Analisados

Como no caso anterior (item 4.1.2), o F calculado é maior que o tabelado para os fatores: % cal, idade de rompimento e a interação deles. Logo, há um efeito significativo destes fatores.

Pode-se afirmar então que o período de cura e o teor de cal adicionado à mistura têm influência na resistência à compressão. Verifica-se, portanto, que:

a) à medida em que aumenta o tempo de cura dos corpos de prova, sua resistência cresce.

b) quanto maior o teor de cal, menor a resistência do C.P. aos 28 dias.

Conclui-se, com base nos estudos até então realizados, que é viável a adição do ROFE ao cimento Portland (CPII-E/32). O traço 1:3 (ROFE : cimento), apresentou-se até o momento, como sendo o mais indicado, visto que há um maior consumo de ROFE (resíduo industrial com custo desprezado) e um menor consumo de cimento Portland (produto de elevado custo).

Cabe lembrar que a cal hidratada foi adicionada nas misturas de cimento + ROFE com a finalidade de se estudar a sua influência no cimento alternativo. Concluiu-se, através dos estudos realizados, que quando ela for utilizada deve ser empregada em quantidades maiores que 20%, em peso, pois favorece a pega. Caso seja empregada em teores menores que 20% há de se considerar o aumento no TFP.

A tal propósito, sugere-se o uso deste "cimento alternativo" em argamassas, blocos de concreto (vide anexo 1), peças pré-moldadas para pavimentação⁽³⁹⁾, dentre outros.

Para tanto, torna-se indispensável um estudo mais aprofundado acerca de cada emprego dado ao novo cimento. Pode-se citar, por exemplo, como estudos necessários ao seu emprego em argamassas: resistência à compressão, trabalhabilidade,

aderência, retenção de água e durabilidade.(ROMAN⁽⁷⁰⁾), ficando aqui como sugestão para trabalhos futuros.

5 . CONCLUSÕES

No decorrer do trabalho observou-se:

5.1. A análise química realizada nos dezessete traços das misturas estudadas, demonstraram que o ROFE não é um material quimicamente inerte, como de presumia. Verificou-se que ocorrem reações químicas entre os materiais (cimento / ROFE / cal hidratada), as quais não apresentaram nenhum efeito prejudicial capaz de inviabilizar a adição do ROFE ao cimento, que ficou comprovado através das análises físicas.

5.2. No que se refere aos ensaios físicos realizados nas amostras, verificou-se que o ROFE é mais fino que o cimento e a cal hidratada, por sua vez, possui finura superior a ambos.

À medida em que cresce o teor de cal hidratada adicionada as misturas de cimento + ROFE, verificou-se o aumento da quantidade de material retido nas peneiras n.325 e n.200.

5.3. A adição do ROFE e da cal hidratada ao cimento aceleram as reações químicas iniciais para o enrijecimento da pasta, logo, o TIP diminui, favorecendo o emprego deste "cimento alternativo" em peças pré-moldadas.

Entretanto, o TFP sofre um acréscimo considerável, principalmente com teores mais elevados de ROFE.

Cabe salientar que o aumento do teor de cal hidratada nas misturas compostas por cimento e ROFE favorecem tanto o TIP quanto o TFP. As misturas que contém uma maior quantidade de cal (20% e 25%) apresentaram uma redução de aproximadamente 30 minutos no TIP e de 8 horas no TFP (quando comparadas com as misturas que possuem o maior tempo de pega que são a compostas por 1% e 5% de cal hidratada).

5.4. Constatou-se que os componentes (cal livre, gipsita, óxido de magnésio na forma cristalina) capazes de comprometer a estabilidade volumétrica das pastas e argamassas de cimento, estão presentes em pequenas quantidades no "cimento alternativo", sendo assim não causaram nenhuma alteração nesta característica física.

5.5. A resistência à compressão (aos 3, 7 e 28 dias de idade) apresentou-se com resultados excelentes. Verificou-se que dos resultados obtidos aos 28 dias de idade, o valor mínimo encontrado foi de 27,9 MPa (para a mistura composta por: 75% de cimento + 25% de ROFE + 25% de cal hidratada) e o valor máximo encontrado foi de 38,1 MPa (para a mistura composta por: 90% de cimento + 10% de ROFE + 0% de cal hidratada).

Salienta-se que as misturas formadas por 60% de cimento + 40% de ROFE sob a influência da adição de cal nos teores de: 0%, 1%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (em peso) tiveram resistência à compressão igual a "ZERO".

Dos dados examinados sobre a resistência à compressão verificou-se que tanto o período de cura (idade de rompimento dos corpos de prova) quanto o teor de cal hidratada adicionado às misturas produziram um efeito significativo na resistência do cimento alternativo.

5.6. Concluiu-se que o traço 1:3 (ROFE : cimento, tipo CII-E/32), em peso, é o mais indicado, pois através do estudo realizado constatou-se que neste traço houve um maior consumo de ROFE (resíduo industrial com custo desconsiderado) e menor consumo de cimento Portland (produto de elevado custo).

Analisando os resultados obtidos verificou-se que este traço (1:3) apresenta, nas primeiras idades uma resistência à compressão baixa (RC = 1,3 MPa), porém em idades maiores, 28 dias, a resistência é igual a 34,9 MPa.

5.7. Procurando exemplificar uma das possíveis aplicações para este "cimento alternativo", onde foi sugerido o seu emprego em blocos de concreto e argamassas. Confeccionou-se blocos de concreto, devido a simplicidade dos ensaios, os quais apresentaram um excelente desempenho quanto a resistência à compressão e absorção.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1. Nos ensaios químicos realizados nas misturas compostas por cimento Portland / ROFE / (/ cal hidratada) verificou-se que o ROFE não é um material quimicamente inerte, como se presumia. Ocorreram reações químicas entre os materiais as quais não apresentaram nenhum efeito prejudicial capaz de inviabilizar a adição do ROFE ao cimento tipo CPM-E/32, o que ficou comprovado através das análises físicas. Contudo, tornou-se indispensável um estudo mais aprofundado a respeito das reações químicas que ocorrem entre os materiais empregados. Sendo assim, sugere-se ensaios adicionais que poderão esclarecer estas reações e, conseqüentemente, o comportamento geral do "cimento alternativo", dentre eles destacam-se:

- 6.1.1. Microscópio eletrônico;
- 6.1.2. Espectrometria de absorção de infravermelho
- 6.1.3. Difração de raio-x
- 6.1.4. Absorção atômica

6.2. Verificou-se nos ensaios físicos destinados a aferição do tempo de pega que o TFP sofreu um acréscimo de aproximadamente 21 horas (situação mais desfavorável) quando comparado ao TFP do cimento CPM-E/32.

Procurou-se estudar o comportamento das misturas frente ao uso de aditivos químicos aceleradores de pega. Estes produtos não exerceram nenhuma influência nas reações de hidratação do "cimento alternativo". Sendo assim, sugere-se avaliações sobre o comportamento ineficiente dos aditivos químicos, bem como estudos mais aprofundados buscando-se acelerar as reações de hidratação das misturas compostas por

cimento / ROFE (/ cal hidratada), o que possibilitaria maiores teores de adições do ROFE ao cimento Portland.

6.3. Constatou-se a viabilidade da adição do ROFE ao cimento CPM-E/32. Estudos da adição deste resíduo ao cimento Portland simples (cimento sem adições) resultará num "cimento alternativo" com maiores consumos do ROFE (resíduo siderúrgico com custo desconsiderado) e menores consumos de cimento (produto de elevado custo).

6.4. Nesta pesquisa encontrou-se o traço 1:3 (ROFE : cimento CPM-E/32) como sendo o mais indicado, pois foi o que apresentou um maior consumo de ROFE (resíduo industrial com custo desconsiderado) e menor consumo de cimento (produto de elevado custo).

Nas misturas estudadas, verificou-se que além da redução no valor da resistência à compressão do "cimento alternativo" houve um decréscimo no TIP, favorecendo o emprego deste "cimento" em argamassas, blocos de concreto, peças pré-moldadas para pavimentação. Para tanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado acerca de cada emprego dado ao novo cimento. Sendo assim, sugere-se que os ensaios adicionais realizados para cada tipo de aplicação deste novo cimento sejam:

6.4.1. ARGAMASSAS: estudo do traço mais econômico e que cumpra, satisfatoriamente, os requisitos de: resistência à compressão, trabalhabilidade, aderência, retenção de água e durabilidade.

6.4.2. BLOCOS DE CONCRETO: estudo do traço mais econômico que cumpra os requisitos da norma referentes a: resistência à compressão simples, absorção e teor de umidade.

6.4.3. PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA A PAVIMENTAÇÃO: idem ao item 6.4.2, porém torna-se necessário ensaios referentes a lixiviação e abrasão das peças.

Nos itens 6.4.2 e 6.4.3 é fundamental o estudo do tipo de cura mais apropriado para as peças pré-moldadas. Sendo assim, sugere-se avaliar qual a influência do tipo de cura (ao ar, em câmara úmida, lona plástica preta, lona plástica laranja, dentre outros) na qualidade do material.

6.5. Estudos da viabilidade do emprego deste "cimento alternativo" em obras estruturais.

ANEXO 1 - BLOCOS DE CONCRETO

Na tentativa de ilustrar uma das possíveis aplicações deste novo material e diante da simplicidade dos ensaios, optou-se pela fabricação de blocos de concreto, uma vez que, a norma NBR 7173⁽¹⁴⁾ especifica como ensaio básico somente a verificação da resistência à compressão e, como ensaios opcionais, a absorção e o teor de umidade. Sendo assim, estudou-se somente um traço para a fabricação dos blocos e um tipo de cura; sugere-se um estudo mais detalhado procurando, desta forma, encontrar o traço mais econômico e o tipo de cura mais adequado a este novo produto.

Há de se considerar, portanto, a simplicidade deste estudo inicial referente ao uso deste "novo cimento" na confecção dos blocos.

Procurando encontrar razões que justifiquem o seu emprego em blocos de concreto pré-moldados, PIANCA⁽⁶⁵⁾ menciona que este tipo de material de construção tem tido grande difusão nesses últimos anos, graças à perfeição a que atingiu a indústria do cimento, ao profundo estudo dos componentes do concreto e ao desenvolvimento da técnica de fabricação e assentamento.

Para a fabricação dos blocos, o concreto é preparado pelos meios convencionais, devendo a massa ser úmida e ter consistência para que o bloco não se deforme depois de moldado. A moldagem é feita em máquinas especiais, movidas a motor, conforme ilustra a figura 4.19.

Neste trabalho, confeccionaram-se blocos com dimensões de 10cm x 20cm x 40 cm e o traço utilizado foi 1:1,6:1,6 (cimento alternativo : areia : pó-de-pedra). Os dados referentes à caracterização destes materiais empregados na pesquisa encontram-se no anexo 2.

De acordo com PIOROTTI⁽⁶⁷⁾ pode-se usar a areia junto com o pó-de-pedra, porque, devido ao fato dele possuir um certo número de partículas ultrafinas, confere certa coesão à argamassa, fazendo com que as peças pré-moldadas não percam a forma.

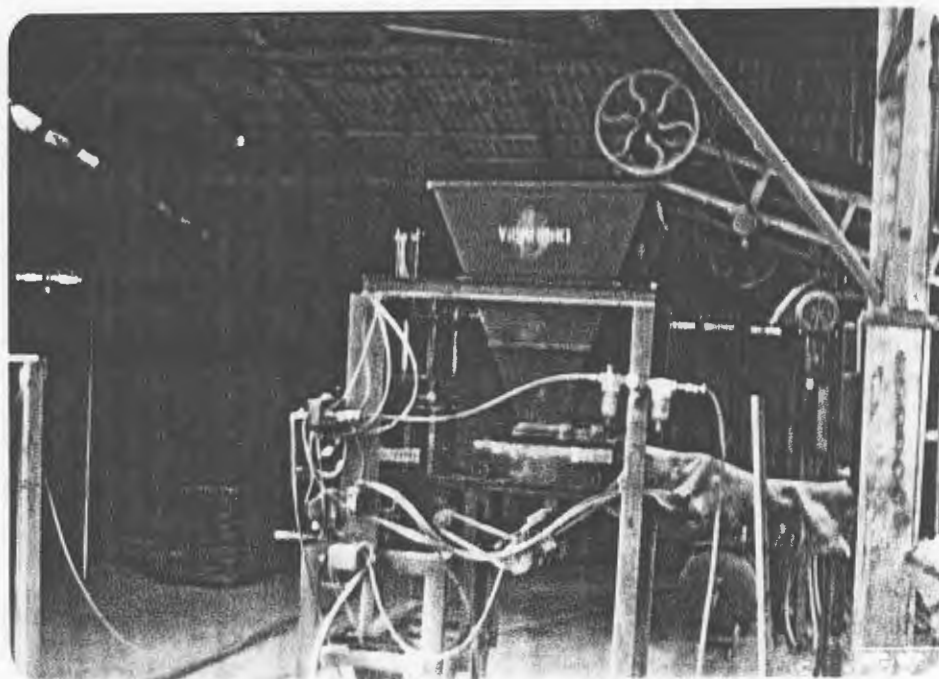


FIGURA A1 - Um dos Tipos de Máquina Utilizada na Moldagem dos Blocos

Contudo, há de se considerar para o traço estudado neste trabalho, o consumo elevado de cimento para se obter a mesma resistência dos traços onde se utilizam também os agregados graúdos (brita).

Os blocos, após a moldagem na máquina, foram colocados sobre estrados de madeira, envoltos em lona plástica preta e deixados em ambiente coberto durante 5 dias. Com isto procurou-se evitar a saída da água, propiciando um ambiente quente e úmido, favorável ao desenvolvimento das reações entre os componentes. Processo este, barato e de fácil realização.

Depois da cura inicial, foram depositados sob um telheiro, ao abrigo das intempéries. PIANCA⁽⁶⁵⁾ recomenda que os blocos devem permanecer ali no prazo mínimo de 10 dias.

Após 10 dias os blocos foram ensaiados quanto a resistência à compressão simples e absorção, de acordo com a norma NBR 7184⁽¹⁶⁾.

Na aferição da resistência à compressão simples, a carga é aplicada no C.P. na direção do esforço que o bloco deverá suportar durante o seu emprego.

As dimensões das faces de trabalho, para a aferição da RCS, são medidas com aproximação de 0,5mm, sem descontos de furos e reentrâncias. O comando da máquina de ensaio é regulado de forma que a carga se eleve progressivamente.

No que se refere ao ensaio de absorção, este se processou da seguinte forma: logo após os corpos de prova serem recebidos pelo laboratório, foram pesados e submersos num tanque com água durante 24 horas. Depois de retirados foram colocados por aproximadamente 30 minutos na câmara úmida para retirada do excesso de água; foram, então, pesados novamente e então, calculou-se o valor da absorção, conforme a norma.⁽¹⁶⁾

O traço utilizado e os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e absorção, média de 5 valores com seu respectivo coeficiente de variação, encontram-se no quadro A1.

TRAÇO DO BLOCO 1:1,6:1,6 - 101(H ₂ O)	RCS	ABSORÇÃO
BLOCO N.1	2,53	4,7
BLOCO N.2	2,53	4,6
BLOCO N.3	2,55	4,5
BLOCO N.4	2,51	4,8
BLOCO N.5	2,48	4,8
MÉDIA	2,52	4,68
C.V. (%)	2,65	13,03

QUADRO A1- Resultado do Ensaio Resistência à Compressão Simples(em MPa) e Absorção (em %) dos Blocos Estudados.

Ressalta-se que os ensaios foram feitos 15 dias após a moldagem.

Cabe salientar que o C.V. indica a porcentagem de variação dos dados de uma amostra. Para que uma amostra seja aceitável o valor do C.V. não deve exceder a 25%.⁽⁵⁹⁾ Conforme verificou-se no quadro A1 o valor C.V. para a resistência à compressão dos blocos é de 2,65% e para a absorção é de 13,03%, logo a amostra é aceitável.

A NBR 7173⁽¹⁴⁾ determina como valores limites os indicados abaixo:

- Resistência à Compressão (valores mínimos):

MÉDIA - 2,5 MPa

INDIVIDUAL - 2,0 MPa

- Absorção (valores máximos):

MÉDIA - 10%

INDIVIDUAL - 15%

Analisando os resultados apresentados no quadro A1 verificou-se que eles atendem os requisitos da norma⁽¹⁴⁾ no que se refere a resistência à compressão simples e absorção. Conclui-se que é viável o uso do "cimento alternativo" na confecção de blocos de concreto. Entretanto, faz-se necessário um estudo mais profundo para determinar o traço mais econômico e o tipo de cura mais adequado.

ANEXO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA EXECUÇÃO DO BLOCO DE CONCRETO

1. CIMENTO:

O cimento utilizado foi o "cimento alternativo" composto por: 75% de cimento (tipo CPII-E/32, marca TUPI) e 25% de ROFE, % em peso.

2. AREIA:

No preparo da argamassa para a confecção do bloco foi empregada uma areia regular retirada do rio do Peixe (MG). No quadro A2 e A3 encontram-se os valores obtidos a respeito da composição granulométrica e massa específica, peso unitário e teor de material pulverulento da areia utilizada.

3. PÓ-DE-PEDRA:

O pó-de-pedra utilizado é proveniente da pedreira Itatiaia (MG). A caracterização deste agregado miúdo, bem como os requisistos da norma brasileira (NBR 7211⁽¹⁷⁾) encontram-se nos quadros A2 e A3.

4. ÁGUA:

Utilizou-se água potável.

PENEIRA ABERTURA (mm)	TOTAL ACUMULADO		
	AREIA	PÓ-DE-PEDRA	REQUISITO (17)
4,8	0,64	2,84	0 - 3
2,4	7,30	15,50	13 - 29
1,2	26,46	28,03	23 - 49
0,6	48,77	38,55	42 - 68
0,3	81,41	56,83	73 - 83
0,15	89,48	74,60	88 - 93
< 0,15	100	100	100
0 máx. MOD.FINURA	4,8mm 2,54	4,8mm 2,16	< 4,8mm --

QUADRO A2 - Composição granulométrica dos agregados miúdos empregados na confecção dos blocos de concreto

MATERIAL	MASSA ESPEC.	PESO UNIT.	TEOR MAT.PULV.
AREIA	2,59	1,24	1,33
PÓ-DE-PEDRA	2,76	1,22	44,67

QUADRO A3 - Massa específica, peso unitário e teor de material pulverulento (%) dos agregados miúdos empregados na confecção dos blocos de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGOPYAN, V.. A cal na Engenharia Civil. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 1985, São Paulo. O uso da cal na Engenharia Civil. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985. p.27-36.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for Portland cement: C150. Philadelphia, Pa., 1989. 5p.
3. ———. Standard specification for lime for use with pozzolans: C821. Philadelphia, Pa., 1984. 2p.
4. ANDRADE, A.C.. Tijolos de cinza volante e cal: estudo do desempenho quanto a resistência, absorção, durabilidade e aderência. Porto Alegre, 1991. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
5. ARREDONDO y VERDÚ, Francisco. Curso de aperfeiçoamento de materiais de construção. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 1963. 232p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - especificação: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
7. ———. Análise química de cimento Portland - disposições gerais: NBR 5740. Rio de Janeiro, 1976. 5p.
8. ———. Análise química de cimento Portland - processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio: NBR 5742. Rio de Janeiro, 1976. 7p.
9. ———. Cimento Portland - determinação da perda ao fogo: NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989. 2p.
10. ———. Cimento Portland - determinação do resíduo insolúvel: NBR 5744. Rio de Janeiro, 1989. 2p.

11. ———. Cimento Portland - determinação do anidrido sulfúrico: NBR 5745. Rio de Janeiro, 1989. 2p.
12. ———. Cimento Portland - determinação de óxido de sódio e potássio por fotometria de chama: NBR 5747. Rio de Janeiro, 1989. 3p.
13. ———. Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.4p.
14. ———. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural - especificação: NBR 7173. Rio de Janeiro, 1982. 6p.
15. ———. Cal hidratada para argamassas - especificação: NBR 7175. Rio de Janeiro, 1986. 4p.
16. ———. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural - método de ensaio: NBR 7184. Rio de Janeiro, 1982. 4p.
17. ———. Agregados para concreto: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1982. 2p.
18. ———. Areia normal para ensaio de cimento: NBR 7214. Rio de Janeiro, 1979. 7p.
19. ———. Cimento Portland - determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1991. 7p.
20. ———. Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da área específica: NBR 7224. Rio de Janeiro, 1984. 10p.
21. ———. Cimento Portland - determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol: NBR 7227. Rio de Janeiro, 1989. 4p.
22. ———. Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (n.325): NBR 9202. Rio de Janeiro, 1985. 3p.
23. ———. Cal hidratada para argamassas - determinação da finura - método de ensaio: NBR 9289. Rio de Janeiro, 1985. 2p.

24. ———. Cimento Portland composto: NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
25. ———. Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira 0,075mm (n.200): NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991. 3p.
26. ———. Cimento Portland - determinação da água da pasta de consistência normal: NBR 11580. Rio de Janeiro, 1991. 3p.
27. ———. Cimento Portland - determinação dos tempos de carga: NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991. 3p.
28. ———. Cimento Portland - determinação da expansibilidade de Le Chatelier: NBR 11582. Rio de Janeiro, 1991. 3p.
29. BASÍLIO, F. A. Cimento Portland. São Paulo: ABCP, 1983. 39p.
30. BLAINE, R. L. Interrelations between cement and concrete properties. Washington: National Bureau of Standards, 1965.
31. BRADASCHIA, C. Siderurgia para não-siderurgistas. São Paulo: ABM, v.1, 593p.
32. BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Análise granulométrica de solos por peneiramento: DPT M80-64. Rio de Janeiro, 1972. 4p.
33. BUCHER, H.R.E. et al. Manual de ensaios de cimento - EC1/M1. São Paulo: ABCP, 1991. 70p.
34. CALLEJA, J. Adiciones y cementos con adiciones. Materiales de Construcción, Madrid, n.190/191, p 25-52, 1983.
35. ———. Escorias y cementos siderúrgicos. Materiales de Construcción, Madrid, n.186, p-11-38, 1982.
36. CINCOTTO, M. A. Conceitos básicos sobre a tecnologia da cal. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 5., 1985, São Paulo. O uso da cal na Engenharia Civil. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985. p.15-26.

37. ———. Patologia das argamassas de revestimento - análise e recomendações. 2 ed., São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 13p.
38. ———. Utilização de subprodutos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1989, Florianópolis. Anais... Florianópolis: Centro Tecnológico da UFSC, 1989. p.171-181.
39. ———. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Tecnologia das edificações*. São Paulo: Pini, 1988. p 71-74.
40. CINCOTTO, M. A., JOHN, V. M. Cimento alternativo à base de escória de alto-forno. *A Construção Região Sul*, São Paulo, Pini, n. 259, p.23-26, maio,1990.
41. CINCOTTO, M. A., MARQUES, J. C., HELENE, P. R. L. Propriedades das argamassas de cimento, cal, areia. In: SEMINÁRIO SOBRE ARGAMASSAS, 1985, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 1985.
42. CINCOTTO, M. A., KAUPATEZ, R. M. Z. Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Tecnologia das Edificações*. São Paulo: Pini, 1988. p 23-26.
43. COLLEPARDI, M. *Scienza e Tecnologia del calcestruzzo*. Milano: Ulrico Hoepli, 1980.
44. COUTINHO, A. S. *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC, 1973, v.1. 610p.
45. FARIAS, J.S.A., GREVEN, H.A., RECENA, F.A.P.. Cimento para alvenaria utilizando cinza de casca de arroz. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., 1991, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil-UFRGS, 1991, 5v., v.4, p.243-254.

46. FERNANDEZ CÁNOVAS, M. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522p.
47. FONTES, J.R. et al. Relatório das atividades da comissão de estudos sobre o pó gerado no despoeiramento do forno elétrico da aciaria. Siderúrgica Mendes Júnior, 1992. 10p.
48. FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (CIENTEC). **Projeto de Pesquisa Cicasol: pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal**. Relatório final. Porto Alegre, 1984. 295p.
49. GUEDERT, L. O., DAMO, N. B., PRUDÊNCIO, L. R.. Utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico para a obtenção de aglomerantes alternativos. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1989, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Centro Tecnológico da UFSC, 1989. p 152-170.
50. GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de solos - nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens**. São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1971.
51. GUNTHER, A. A calcinação do calcáreo e a qualidade da cal resultante. Tradução do original em alemão, publicado no Toindustre-Zeitung und Keramische Rusndschau, v.77, n.9/10, mai, 1953.
52. ISAIA, G. C. Dosagem de concreto com casca de arroz para produtos pré-moldados. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 24., 1987, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 1987. 6v. v.1. p.205-218.
53. ISAIA, G. C. Influencia do cimento no desempenho de concreto de alta resistencia com cinzas volantes. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS E ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., 1991, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil-UFRGS, 1991, 5v. v.4, p: 95-106.

54. KEIL, Fritz. **Cemento: fabricacion, propiedades e aplicaciones.** Barcelona: Editores Técnicos Associados, 1973. 483p.
55. LIMA, M. F. Fruto permitido-Usiminas diversifica e lança tijolo de escória de alto-forno. **A Construção Região Sul**, São paulo: Pini, n.282, p.24, abr., 1992.
56. LEA, F. **The chemistry of cement and concrete.** 3 ed. London: Edward Arnold, 1970.
57. MENDONÇA, C. F. et al. Aglomerantes para pelotização de minério de ferro. In: SEMINÁRIO REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1983. p.129-150.
58. MEYER, Kurt. **Pelletizing of iron ores.** Berlim: Springer, 1980. 302p.
59. NANNI, L. F. **Análise estatística de dados com o uso de técnicas computacionais.** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1986. 177p. (Caderno Técnico, 30)
60. NANNI, L. F. **Programas computacionais para o processamento estatístico de dados.** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1983. 108p. (Caderno Técnico, 40)
61. NEVILLE, A.D. **Propriedades do concreto.** Tradução por Salvador E. Giammusco. Tradução de: **Properties of concrete.** São Paulo: Pini, 1982. 738p.
62. ORMSBY, W. C. Use of waste materials and by-products in road construction. In: COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'UTILISATION DES SOUS-PRODUITS ET DÉCHETS DANS LE GENIE CIVIL, 1978, Paris. Paris: Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves de l'Ecole Nationale des Pontes et Chaussees, 1978, 3 v. v.1, p 37-42.
63. PEREIRA, A. **Fibras saudáveis - arquiteto gaúcho usa casca de arroz em tijolos e painéis.** **A Construção Região Sul**, Pini, São Paulo, n.279, p 14-15, jan. 1992..

64. PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 8 ed. Porto Alegre: Globo, 1981. 307p.
65. PIANCA, João B. **Manual do construtor**. 14. ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 169p.
66. PINHEIRO, A.C. **Tecnologia do concreto Portland**. Parte I. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia da UFRJ, 1987. 153p.
67. PIOROTTI, José L. **Pavimentação intertravada**. Rio de Janeiro: Montana, 1986. 64p.
68. RIBEIRO, C. C, PERDIGÃO, T.S., PINTO, J. D.S. Estudo do aproveitamento de escória de alto-forno como agregado miúdo na produção de argamassa e concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10., 1990, Gramado, RS. **Anais...** Porto Alegre: SERGS, 1990. 3v. v.2, p 811-834.
69. RODRIGUES, P. et al. **Manual de procedimentos: análises químicas de cimentos e matérias primas**. São Paulo: ABCP, 1991. 146p.
70. ROMAN, H. R. Argamassa de assentamento para alvenarias. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1991, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Centro Tecnológico da UFSC, 1991. p.111-116.
71. SABBATINI, F. H. O uso da cal em argamassas de assentamento. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 5., 1985, São Paulo. **O uso da cal na Engenharia Civil**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985. p37-46.
72. SAUTEREY, R. Allocution d'ouverture. In: COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'UTILISATION DES SOUS-PRODUITS ET DÉCHETS DANS LE GENIE CIVIL, 1978, Paris. Paris: Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves de l'Ecole Nationale des Pontes et Chaussées, 1980, 3v. v.3, p 1-9.
73. SCANDIUZZI, L., ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: Pini, 1986. 553p.

74. SILVA, E., FLORINDO, M. C., ALMEIDA, C. Estudo e avaliação comparativa do poder aglomerante da escória de alto-forno granulada. *A Construção Região Sul*, São Paulo: Pini, n.270, p.29-30, abr., 1991.
75. ————. ————. *A Construção Região Sul*. São Paulo: Pini, n. 271, p.29-32. mai, 1991.
76. SILVA, M.A.M. Efeito da estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando a sua utilização em construção civil e pavimentação. Porto Alegre, 1982. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
77. SOUZA, R. P. Pelotização. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. *Aglomerado de minério de ferro*. São Paulo (197-)
78. TANGO, C.E., VAIDERGORIN, E.L., JOHN, V.M. Estudos do IPT sobre cimento alternativo de escória de alto-forno. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25., 1991, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil/Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil-UFRGS, 1991.
79. TAYLOR, H. F. W. *The chemistry of cement*. London: Academic Press, v.2, 1964. 442p.
80. TIGERSCHIÖLD, M., ILMONI, P. Fundamental factors influencing the strength of green and burned pellets made from fine magnetite-ore concentrates. *Proc. Blast Furnance, coke Oven Raw Material, session on One and Agglomeration 9*. 1950. p.18-45.
81. TORRES, Ary. *Constituição química do cimento Portland*. São Paulo:(s.n.),1941. 135p.
82. VAIDERGORIN, E. I. L. Características dos cimentos Portland: uma abordagem química. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Tecnologia das Edificações*. São Paulo: Pini, 1988. p. 19-22.

83. VANGNH, R.D. ASTM Committe E-38 on Resource Recovery. In: BORTZ, S.A., HIGBIE, K.B. **Materials recycling: an overview of the sixth mineral utilization Symposium.** Washington, Bureau of Mines, 1980. p.130-131 (BM-Information, Circular, 8826)