

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CAIS ADITIVADAS COM POZOLANA E CIMENTO PORTLAND

QUÍM. IND. CRISLENE RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
OUTUBRO - 1992

QUÍM. IND. CRISLENE RODRIGUES DA SILVA

CAIS ADITIVADAS COM POZOLANA E CIMENTO PORTLAND

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA DOS MATERIAIS
NÃO METÁLICOS**

**PROFESSOR ORIENTADOR: PROF. DR. HEBER CARLOS
FERREIRA**

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

OUTUBRO - 1992



S586c Silva, Crislene Rodrigues da
Cais aditivadas com pozolana e cimento portland /
Crislene Rodrigues da Silva. - Campina Grande, 1992.
104 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

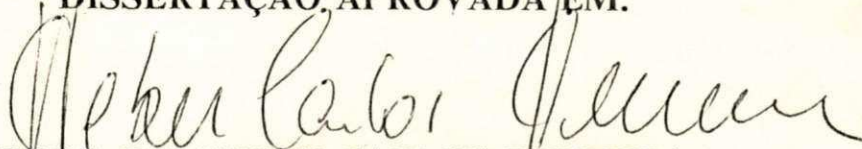
1. Pozolanas Calcarias 2. Cal Pozolanica 3. Pozolana 4.
Cimento 5. Dissertacao. I. Alsina, Odelsia Leonor Sanchez
de, Profa. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina
Grande (PB)

CDU 666.953(043)

CAIS ADITIVADAS COM POZOLANA E CIMENTO PORTLAND

QUÍM. IND. CRISLENE RODRIGUES DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM:




PROF. DR. HEBER CARLOS FERREIRA

Orientador



PROF. HERNANI SÁVIO SOBRAL

Componente da Banca



PROF. DR. RAMDAYAL SWARNAKAR

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

OUTUBRO - 1992

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Cristovão e Martina.

A todos os meus irmãos.

A Sérgio.

AGRADECIMENTOS

A DEUS por mais essa oportunidade de aprimoramento intelectual.

Ao Prof. Dr. HEBER CARLOS FERREIRA, orientador da tese, por me ter confiado este trabalho, pelos ensinamentos transmitidos, pela revisão do texto e dedicação demonstrada, fatos esses que contribuíram decisivamente para conclusão desta dissertação.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, na pessoa do Coordenador KEPLER BORGES FRANÇA, da Vice-Coordenadora ODÉLSIA L. SANCHEZ DE ALSINA e das secretárias MARIA JOSÉ BEZERRA CAVALCANTE e MARICÉ FERREIRA DA SILVA, pelo apoio concedido e encorajamento durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao laboratório de Análises Mineraias da UFPb - Campus II na pessoa do Coordenador ANTÔNIO TOMAZ DOS SANTOS por conceder a utilização dos equipamentos necessários para as análises químicas; e ao Engenheiro FRANCISCO ESTRELA pela realização das mesmas.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, na pessoa do coordenador Prof. RICARDO CABRAL pela concessão do laboratório de Fundição para utilização do forno na preparação das pozolanas.

Ao Departamento de Engenharia Química da UFPb-Campus II na pessoa do chefe deste Departamento Prof. MICHAEL FRANÇOIS FOSSY pela concessão do laboratório de Termoanálises e ao Prof. RAMDAYAL SWARNAKAR pela realização dos ensaios de ATG.

Aos Engenheiros SOLANGE MARIA ROCHA PATRÍCIO, JECONIAS DANTAS COSTA, GELMIRES DE ARAÚJO NEVES e

ROSEMARY RIBEIRO RAMOS, pela orientação dos ensaios realizados no laboratório de Solos I da UFPb-Campus II.

A todos os funcionários dos laboratórios de Solos I, Solos II, Solos III e Cerâmica, que de alguma forma colaboraram para a execução deste trabalho, em especial a FRANCISCO DE ASSIS SANTANA e GERALDO MARCELINO DE ARAÚJO.

À Professora MARIA CLÁUDIA SILVA pela companhia e incentivo, principalmente nos momentos difíceis e desanimadores.

Ao Professor JOSÉ BRAULIO OLIVEIRA ALVES pela leitura crítica da dissertação que muito contribuiu para enriquecê-la.

Ao Aluno KEVA MAKUNTUALA pela colaboração na parte experimental deste trabalho.

Ao Engenheiro NAGEL ALVES COSTA pela dedicação e paciência na digitação do texto.

À CAPES e à ATECEL pelo auxílio financeiro concedido.

Às Industrias, Dolomil Dolomita Minérios Ltda., CAULISA S/A, CIGRA e Supermix Concreto Ltda. pelo material concedido para a realização desta pesquisa.

A meu namorado SÉRGIO RICARDO ALVES DE MORAIS pelo apoio, compreensão e incentivo constantes.

Aos meus pais, CRISTOVÃO e MARTINA; e a todos os meus irmãos, a quem dedico esta tese, pelo apoio e incentivo necessários, sem os quais seria impossível até mesmo começar este trabalho.

SILVA, Crislene R.- Cais Aditivadas com Pozolana e Cimento Portland. Campina Grande, UFPb, 1992. 104p.

RESUMO

No Brasil, atualmente são empregados na construção civil, aglomerantes tradicionais como a cal hidratada e os cimentos Portland, produtos estes de elevado custo, devido ao preço da energia consumida para sua fabricação e transporte.

Aglomerantes intermediários, tais como, cais pozolânicas e cais hidráulicas são produzidas em escala desprezível. Por esta razão, o estudo de materiais que tenham um consumo global de energia mais baixos e que possam ser produzidos a partir de matérias-primas locais, é de grande importância para a redução do custo de edificações, que para um país com enorme déficit habitacional como o nosso, é essencial. Neste trabalho compara-se o desempenho dos aglomerantes tradicionais, com aglomerantes alternativos produzidos artificialmente a partir de misturas em diversas proporções de: cal/pozolana (750, 800, 850, 900, 950 °C); cal/cimento Portland pozolânico; cal/cimento Portland comum e cal/cimento Portland pozolânico/pozolana (800 °C), através de determinações de resistência à compressão simples em argamassas padronizadas pela ABNT. Os resultados mostram que os aglomerantes alternativos têm comportamento mecânico superior às cais hidratadas e próximos em algumas proporções à dos cimentos Portland, podendo ser utilizados em substituição a este em situações onde não sejam exigidas resistências mecânicas elevadas.

Palavras-chave: Cal pozolânica

Pozolana

Cimento

ABSTRACT

In Brazil, traditional agglomerates such as hydrated lime and Portland cements have been used nowadays these product are of high cost due to the price of energy used for their manufacture and transport.

Intermediary agglomerates such as pozolanic limes and hidraulic limes are made in contemptible scale. For this reason the study of materials that have a global consumption of low energy and that can be produced from local raw material is of big importance for the decrease of the construction cost and this is essential for country such as ours because of its enormous lack of habitation.

In this work the performance of traditional agglomerates is compared with the one of the alternative agglomerates product artificially from the mix of several percentages of lime/pozolana (750, 800, 850, 900 and 950 °C): lime/pozolanic Portland cement; lime/commom Portland cement and lime/pozolanic Portland cement/pozolana (800 °C). Through the determination of the resistance to the simple compression in mortar standardized by the ABNT. The results show that the alternative agglomerates have mechanical behaviour superior to the one of the hydrated limes and almost equal to in proportions to the ones of the Portland cements and that they can be used to substitute the Portland cements when high mechanical resistances must not be used.

Keywords: Pozolanic lime

Pozolana

Cement

ABREVIACES

- ATD - Análise térmica diferencial
- ATG - Análise termogravimétrica
- CPA750 - Cais pozolânicas artificiais obtidas a partir de misturas de cal com pozolana 750 °C
- CPA800 - Cais pozolânicas artificiais obtidas a partir de misturas de cal com pozolana 800 °C
- CPA850 - Cais pozolnicas artificiais obtidas a partir de misturas de cal com pozolana 850 °C
- CPA900 - Cais pozolnicas artificiais obtidas a partir de misturas de cal com pozolana 900 °C
- CPA950 - Cais pozolnicas artificiais obtidas a partir de misturas de cal com pozolana 950 °C
- RCS - Resistncia  compressão simples

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
-------------------------------	---

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1-Histórico dos Aglomerantes	3
2.2-Materiais Pozolânicos	8
2.3-Pozolanas de Argilas Calcinadas	17
2.4-Cal	23
2.5-Cimento Portland	28
2.5-Aglomerantes Alternativos	33

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1-Introdução	38
3.2-Materiais	38
3.2.1-Cais	38
3.2.2-Caulim	39
3.2.3-Pozolanas	39
3.2.4-Cimento Portland Pozolânico	40
3.2.5-Cimento Portland Comum	40
3.2.6-Areia	41
3.2.7-Água	41
3.3-Métodos	41
3.3.1-Ensaio de Caracterização	41
3.3.1.1-Análise Química	41
3.3.1.2-Índice de Hidraulicidade	41
3.3.1.3-Teor de Umidade	42

3.3.1.4-Determinação de Finura	42
3.3.1.5-Granulometria por Via Úmida	42
3.3.1.6-Massa Específica Real	42
3.3.1.7-Área Específica	43
3.3.1.8-Análise Térmica Diferencial-ATD	43
3.3.1.9-Análise Termogravimétrica-ATG	44
3.3.2-Ensaio Tecnológicos	44
3.3.2.1-Determinação da Pega	44
3.3.2.2-Resistência à Compressão Simples-RCS	45

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1-Ensaio de Caracterização	47
4.1.1-Análise Química	47
4.1.2-Índice de Hidraulicidade	48
4.1.3-Teor de Umidade	49
4.1.4-Determinação de Finura	49
4.1.5-Granulometria por Via Úmida	50
4.1.6-Massa Específica Real	52
4.1.7-Área Específica	53
4.1.8-Análise Térmica Diferencial-ATD	54
4.1.9-Análise Termogravimétrica-ATG	56
4.2-Ensaio Tecnológicos	57
4.2.1-Determinação da Pega	57
4.2.2-Resistência à Compressão Simples-RCS	58

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

5.1-Cais	63
5.2-Caulim	63

5.3-Pozolanas	64
5.4-Cimentos Portland	64
5.5-Cais Pozolânicas Artificiais-CPA	64
5.6-Misturas de Aglomerantes	64
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE I	75

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

TABELA 1	78
TABELA 2	78
TABELA 3a	79
TABELA 3b	79
TABELA 4	80
TABELA 5a	81
TABELA 5b	81
TABELA 6	82
TABELA 7a	82
TABELA 7b	83
TABELA 7c	83
TABELA 7d	84
TABELA 7e	84
TABELA 8	85
TABELA 9	86
TABELA 10	87
TABELA 11	88
TABELA 12	89
TABELA 13	90
FIGURA 1	91
FIGURA 2	92
FIGURA 3	93
FIGURA 4a	94
FIGURA 4b	95
FIGURA 4c	96
FIGURA 4d	97
FIGURA 4e	98
FIGURA 5	99
FIGURA 6	100

FIGURA 7	101
FIGURA 8	102
FIGURA 9	103
FIGURA 10	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O cimento Portland, é atualmente um dos insumos que tem uso mais difundido na construção civil. Sua excepcional qualidade tecnológica possibilita ao homem promover mudanças expressivas tanto na arquitetura das obras, como no seu próprio modo de vida, sendo o principal contribuinte para onerar o custo final de uma obra, devido ao grande consumo de combustível necessária à sua fabricação e transporte.

Entre os vários caminhos que se pode seguir, objetivando o barateamento da construção, encontra-se a pesquisa de materiais alternativos. Nos últimos anos tem crescido significativamente em todo mundo o número de pesquisadores voltados para estudos com estes materiais, seja buscando alterações no processo de fabricação, de modo a reduzir o consumo de combustível, como também reduzindo o consumo de materiais tradicionais.

Na indústria cimenteira, uma das alternativas para atenuar o problema é a utilização de pozolanas como "adições ativas", já que as mesmas quando finamente moídas reagem com o hidróxido de cálcio em condições ambientes e originam novos compostos hidratados, com propriedades cimentícias e insolúveis em água, com conseqüente economia de um produto mais nobre e energeticamente mais dispendioso que é o clínquer de cimento Portland.

Apesar desta e de outras tentativas em diminuir o custo deste material, o cimento brasileiro ainda continua com preço alto (US\$ 150,00/t) em relação aos cimentos europeus (US\$ 100,00/t), que embalados a vácuo, chegam ao país através de importações feitas por grandes construtoras com o intuito de reduzir os preços no mercado nacional.

Já a fabricação de materiais alternativos como as cais pozolânicas, que podem ser obtidas por calcinação à temperatura em torno de 1000 °C, de

calcários contendo impurezas (argilas) ou por mistura de uma cal hidratada e pozolana, são de custo inferior aos cimentos Portland, uma vez que a cal hidratada e a pozolana custam aproximadamente US\$ 80,00/t e US\$ 98,00/t respectivamente; além de proporcionarem resistências mecânicas próximas às dos cimentos.

O presente estudo, tem por objetivo comparar através de ensaios de caracterização e tecnológicos, o desempenho de aglomerantes tradicionais com aglomerantes alternativos produzidos artificialmente por misturas em diversas proporções de: 1) cal hidratada e pozolana resultante do tratamento térmico de um caulim em temperaturas de 750, 800, 850, 900 e 950 °C, com obtenção de metacaulinita; 2) cal hidratada e cimento Portland pozolânico; 3) cal hidratada e cimento Portland comum e 4) cal hidratada, cimento Portland pozolânico e pozolana obtida a 800 °C.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1-Histórico dos Aglomerantes

Na história da civilização humana a descoberta de materiais de ação cimentante, foi posterior ao descobrimento do fogo e próximo ao descobrimento da cerâmica. Tal descoberta deve-se aos povos mediterrâneos, que passaram seus conhecimentos de egípcios a gregos e romanos, tendo sido ampliados e aperfeiçoados em sucessivas etapas, Calleja (1958).

Apesar de existir algumas discordâncias na literatura, quanto a descoberta do primeiro material cimentante utilizado por estes povos nas construções egípcias, até o período Grego-Romano, era derivado da calcinação do gesso e não de rochas calcárias, Bogue (1947) e Lea (1970). Em recentes estudos desenvolvidos em argamassas extraídas das fundações das pirâmides de Giza e do templo da Esfinge, é comprovada a utilização do gesso como ligante, e a ocorrência de carbonatos e quartzo são interpretadas como decorrentes da utilização de gessos impuros; além de que a opção pelo gesso justifica-se pela escassez de combustível da época, já que a temperatura de calcinação das rochas calcárias é bastante superior à das rochas gipsíticas, Ghorab et alli (1986).

Por razões geográficas e geológicas, os gregos e romanos foram os pioneiros na utilização da cal como aglomerante tendo a civilização grega difundido uma prática que supostamente se iniciou em Creta. Já na Itália o primeiro povo a empregar argamassas em suas construções foram os etruscos. Os romanos por sua vez, derivam seus conhecimentos muito provavelmente dos etruscos ou dos gregos, Davis (1934).

Os gregos e romanos conheciam certos materiais vulcânicos, que quando finamente moídos e misturados à cal extinta e areia, davam argamassas de maior

resistência mecânica e, distintamente exibiam a capacidade de endurecer e resistir sob ação da água.

Com essa finalidade os gregos utilizavam um tufo vulcânico encontrado na ilha de Thera (posteriormente denominada de Santorin), material este que ainda hoje goza de grande reputação no meio técnico, sendo conhecido normalmente como "Terra de Santorin". Da mesma forma, os romanos utilizaram um tufo vulcânico avermelhado, encontrado nas proximidades da Baía de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do Monte "Puzzioli", nas proximidades do Vesúvio, atribuí-se a esses materiais a designação de pozolanas, termo que atualmente foi estendido a todos os materiais naturais ou artificiais, que exibam igual comportamento.

Outras ocorrências de rochas vulcânicas com características similares foram encontrados, como é o caso dos tufos vulcânicos das margens do Reno, proveniente do pequeno vale de Brohlbach, conhecidos como "Trass", que provavelmente começaram a ser empregados naquela época e ainda hoje são utilizados como pozolanas naturais.

Segundo Vitruvius, em um dos raros estudos daquela época, quando não se dispunha de materiais vulcânicos, a adição de telhas ou cerâmicas moídas era utilizada com o mesmo propósito e produzia efeito similar, sendo estas, provavelmente, as primeiras pozolanas de argilas termicamente ativadas, Lea(1970).

Os romanos foram certamente mais técnicos e menos artistas que os gregos, o que resultou em grandes construções de alvenaria, como o Coliseu, o Panteão Romano, a Basílica de Constantino, Ponte de Gard e muitas outras obras que resistiram até hoje de forma admirável às intempéries. Estruturas contemporâneas a essas construídas com outros materiais ou sem adição de pozolanas simplesmente deixaram de existir ou se fragmentam quando submetidas a um pequeno esforço.

A idade média, como em tantos outros aspectos, não trouxe grande avanço aos materiais ou técnicas construtivas já conhecidas pelos romanos. Pelo contrário, registra-se um nítido declínio na qualidade das obras; como exemplo,

temos as construções normandas e saxônicas deste período, que mostram evidências de argamassas de cais mal queimadas e isentas de pozolanas, Calleja (1958).

Registra-se novamente um retorno às misturas de cal, pozolana natural ou materiais cerâmicos moídos e areia, durante os séculos XII a XIV, com isto foram retomados os cuidados com a queima da cal e com a preparação da argamassa, melhorando assim a qualidade do produto então elaborado, Zampieri (1989).

Já no século XVIII, a mistura de pozolana e cal extinta se apresentava como a única opção para as construções expostas à ação das águas.

John Smeaton, em publicação de 1791, observou, ao estudar as diferentes cais da Inglaterra e, principalmente a de Abertaw, no condado de Clamorghan, que essas continham 11% de argila, e que apresentavam a capacidade de endurecer embaixo da água (cais hidráulicas), mesmo sem a adição de pozolanas, o que não se observava para outras cais igualmente queimadas e preparadas, que rapidamente se deterioravam nas mesmas condições.

Todavia, apesar do sucesso dos experimentos de Smeaton o emprego da cal hidráulica mereceu pouca atenção e a antiga mistura de cal extinta e pozolana manteve sua supremacia por longo período.

Após várias tentativas de se descobrir qual elemento proporcionava tal hidraulicidade às cais, em 1813, Coletis Descotils, ao estudar os calcários para fabricação de cais hidráulicas, observou que quando estes eram atacados pelos ácidos deixavam resíduo de sílica insolúvel, enquanto as cais obtidas a partir dos mesmos praticamente não mostravam resíduo algum após o ataque ácido. Com base em seus experimentos, acertadamente postulava que durante a calcinação tinha havido uma combinação de sílica com a cal, sendo os compostos formados por essa reação os responsáveis pela hidraulicidade das cais, Coutinho (1958).

Já em 1818, Vicat, autor de diversos trabalhos experimentais, provou ser possível fabricar cal hidráulica a partir de uma mistura artificial de rocha calcária e argila, o que ia de encontro ao antigo conceito estabelecido por Smeaton que afirmava serem as rochas calcárias naturais relativamente impuras as únicas potencialmente adequadas à obtenção de materiais hidráulicos; da mesma forma,

comprovou de maneira absoluta que as propriedades hidráulicas da cal eram devidas exclusivamente à combinação da argila, Zampieri (1989).

Segundo Vicat, o processo de fabricação destas cais poderiam seguir duas metodologias diferentes. O primeiro processo, seria misturando inicialmente cal e argila que, após ser homogeneizada, era submetida a uma segunda queima, este processo era considerado na época como o melhor. O segundo processo, era misturando inicialmente a rocha calcária e a argila que, pulverizados e misturados, sofriam uma única queima, Bogue (1947). Apesar do segundo método proporcionar um produto de qualidade inferior, devido à má homogeneização dos materiais, tinha a vantagem de consumir menos energia, o que tornou-se ponto de partida para a atual manufatura do cimento.

Paralelamente aos avanços científicos, surgiram nessa época os primeiros cimentos hidráulicos comerciais. Em 1796, na Inglaterra Joseph Parker, introduzia o então denominado "cimento Romano", anteriormente conhecido como "cimento de Parker", que exceto por suas propriedades hidráulicas ou tonalidades marrons, pouco lembrava as argamassas romanas preparadas a partir de cal extinta e pozolana.

Segundo Gooding e Halstead (1952), a descrição do processo produtivo feita por Parker, diz que o "cimento Romano" era obtido a partir de certas rochas ou concreções argilosas, contendo veios de matéria carbonática e, por vezes, água em seu interior, estes nódulos eram divididos em pequenos fragmentos e então queimados com energia superior àquela utilizada na calcinação das cais, quase suficiente para vitrificá-los, após serem reduzidos a pó. O material obtido era a base do cimento de Parker, cuja melhor composição admitia cinco partes do pó e duas partes de água. Logo, podemos ver que Parker parece ter sido a primeira pessoa a visualizar a importância da queima mais enérgica para a qualidade do cimento produzido. Este material passou a ser um dos melhores cimentos da época e várias tentativas de imitá-lo foram feitas.

No século XIX, também na Inglaterra, Frost valendo-se dos conhecimentos estabelecidos por Vicat, fabricava um cimento com características hidráulicas a partir da mistura de duas partes de "chalk" (giz) e uma de argila, sendo

denominado de "cimento de Frost", Bogue (1947). Em 1822, Frost abandonava o antigo procedimento e patenteava um novo produto sob designação de "cimento Inglês", que era obtido através da queima de "calcários ou margas magnesianas ou não, os quais eram inteiramente ou praticamente isentos de qualquer mistura de alumina ou material argiloso, e contendo de 9 a 40% de material silicoso ou sílica e óxidos de ferro, encontrando-se a sílica em excesso e finamente moída", Gooding e Halstead (1952). Quanto à queima, Frost destacava uma temperatura de calcinação suficiente apenas para eliminação do gás carbônico, admitindo como bem queimados aqueles fragmentos que após serem hidratados não se desintegravam ou se fraturavam.

Dois anos depois, em 1824, Joseph Aspdin, um tijoleiro do condado de York, patenteava o "cimento Portland", e vários autores se referiam a ele, como "inventor do cimento Portland", apesar de que sua descrição não revelava nenhum constituinte ou procedimento original, particularmente quando comparado com a "cal artificial duplamente queimada" de Vicat, Bogue (1947).

Com relação ao processo produtivo descrito na patente por Aspdin, ressalta-se o fato de não constar a exata proporção de cal e argila utilizada no processo, muito embora ao empregar o termo "quantidades específicas" deixe transparecer que a dosagem não era feita de forma aleatória, e quanto à temperatura de queima era necessária tão somente até a total eliminação do gás carbônico. O produto que assim era obtido não passava de uma cal hidráulica, da qual só tinha em comum o nome, com o cimento Portland atual.

De acordo com o processo produtivo apresentado na patente, o cimento introduzido por Joseph Aspdin não deveria, a princípio, exibir diferenças marcantes com relação aos demais concorrentes da época. Todavia, aparentemente, o seu produto gozava de grande prestígio junto aos consumidores, o que se fez supor que a forma pela qual o cimento era produzido não se processava exatamente como estava descrito na patente, ou então teria sido o processo aperfeiçoado por seu filho William, e os conhecimentos propositalmente guardados, com o objetivo de manter a supremacia do produto. Entretanto, se alguma destas suposições ocorreu, a história não registrou.

Em 1845, Johnson, tentou elaborar um cimento de características semelhantes, e se referiu ao processo de William Aspdin como um mistério, que nem mesmo os funcionários sabiam o que era adicionado durante a fabricação, Gooding e Halstead (1952).

Em uma das suas tentativas, Johnson relata que por mero acidente parte do material do forno ficou exposto a uma temperatura mais elevada, o que cliquerizou, e para sua surpresa, o cimento produzido a partir dos nódulos parcialmente fundidos exibiu uma maior resistência àquela proporcionada pelo material submetido à queima mais branda, e adicionalmente, uma coloração acinzentada. Desta forma comprovou-se, finalmente a necessidade de uma queima mais enérgica. Johnson, dando continuidade a seus experimentos, possibilitou a otimização na temperatura de queima e a dosagem das matérias-primas, dando assim início ao processo de fabricação de um cimento hidráulico com características muito similares às do cimento Portland atualmente produzido.

2.2-Materiais Pozolânicos

Consideram-se geralmente como pozolanas os materiais que, carentes de propriedades cimentantes e de atividade hidráulica por si só, contém constituintes que se combinam com a cal a temperaturas ordinárias e em presença de água dando lugar a compostos permanentemente insolúveis e estáveis que se comportam como aglomerantes hidráulicos. Neste sentido, as pozolanas dão propriedades cimentantes a um aglomerante não hidráulico como é a cal.

O termo pozolana, inicialmente usado para designar uma cinza vulcânica de Pozzuoli, próximo de Nápoles, estendeu-se a outros materiais naturais ou artificiais, com as mesmas características. Não se consideram pozolanas aqueles materiais inertes que, em condições excepcionais de finura ou de reação (tratamento hidrotérmico com vapor de água a pressões e temperaturas elevadas), podem dar lugar a compostos hidraulicamente ativos. Desse modo, o quartzo por

exemplo, quando finamente moído e misturado com cal, forma silicatos cálcicos hidratados por tratamento em autoclave, Calleja (1958).

-Classificação dos Materiais Pozolânicos

São considerados materiais pozolânicos, aqueles que atendem a dois requisitos básicos, que são:

- a) reagir quimicamente com o Ca(OH)_2 , em condições normais de pressão e temperatura;
- b) formar compostos de boa resistência e cimentantes.

Uma vez que vários materiais satisfazem essas condições, tem sido necessário agrupá-los segundo critérios que possibilitem uma avaliação prévia de seus desempenhos e características químicas e mineralógicas. Logo, os materiais pozolânicos, são classificados em dois grandes grupos, naturais e artificiais.

As pozolanas naturais- são aquelas formadas por algum processo da natureza (origem vulcânica ou de origem sedimentar), e que precisam apenas de uma moagem para o seu uso.

As pozolanas artificiais- são aquelas obtidas por um tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

Como exemplo de pozolanas naturais temos:

- a) tufo e cinzas vulcânicas- são talvez as primeiras que se tem notícia;
- b) rochas contendo minerais de opala- em geral são encontrados em forma de xistos contendo outras formas de sílica que não a amorfa, necessitando, portanto, de uma calcinação para sua ativação completa; e

c) terras diatomáceas- é a pozolana mais ativa na reação com cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de micro-organismos.

As pozolanas artificiais podem ser subdivididas em:

a) argilas calcinadas- materiais provenientes da calcinação de determinadas argilas que, quando tratadas a temperaturas entre 500 e 900 °C, adquirem a propriedade de reagirem com o Ca(OH)_2 ;

b) cinzas volantes- são resíduos finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizados e granulados; e

c) outros materiais- são considerados ainda como pozolanas artificiais outros materiais não tradicionais, tais como escórias siderúrgicas ácidas, microssílicas, rejeito sílico-aluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral.

Estas classificações de materiais pozolânicos estão de acordo com os critérios impostos pela norma brasileira NBR 5736 (1986). Já a norma americana ASTM C 618 (1985), que de forma semelhante regularmenta o uso de materiais pozolânicos naquele país, classifica esses materiais em três classes:

Classe N- abrange pozolanas naturais submetidas ou não a processo de calcinação;

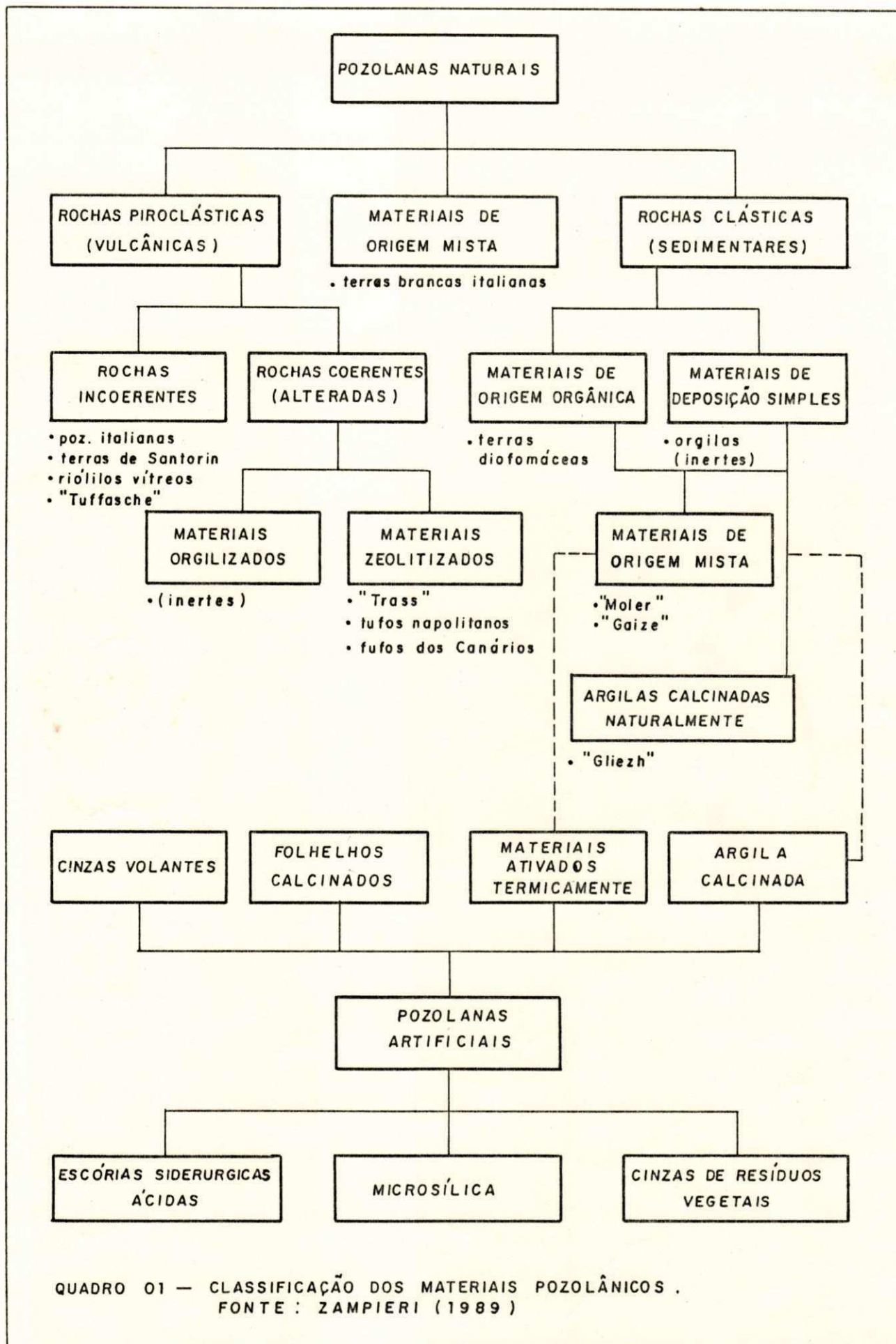
Classe F- cinzas volantes produzidas normalmente através da queima de carvão antracíticos ou betuminosos; e

Classe C- cinzas volantes produzidas usualmente a partir de carvões ligníticos ou sub-betuminosos.

A classificação dos materiais pozolânicos não é simples, pois o termo pozolana engloba materiais de naturezas e origens distintas, mas que, entretanto, apresentam comportamento semelhante quando são misturados com água e cal.

Em 1949, Mielenz et alli, dividiram os materiais pozolânicos em dois grupos: pozolanas naturais e sub-produtos industriais (pozolanas artificiais). Pozolanas naturais são materiais que apresentam atividade pozolânica no estado natural ou podem ser facilmente transformados em pozolanas, incluindo-se nessa categoria cinzas e tufo vulcânicos, argilas, folhelhos e diatomitos; sub-produtos industriais incluem cinzas volantes e cinzas de folhelhos betuminosos, cinzas de coque e tijolos ou telhas moídos, sendo que o componente com atividade pozolânica desses materiais é o argilomineral.

↪ Mais recentemente Massazza (1976), fez uma das mais completas e detalhadas classificações dos materiais pozolânicos. Além de ordenar esses materiais de forma bastante lógica, a classificação de Massazza, tem o grande mérito de enquadrar, dentro de cada subdivisão proposta, alguns dos mais famosos materiais pozolânicos de que se tem referência na literatura técnica especializada. Zampieri (1989), apresentou, em essência, a proposição original de Massazza, acrescida de alguns novos materiais, que só recentemente tiveram comprovada sua atividade pozolânica; materiais esses como a microssílica, as cinzas de resíduos vegetais e as escórias siderúrgicas ácidas (vide Quadro 1).



QUADRO 01 — CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS POZOLÂNICOS .
 FONTE : ZAMPIERI (1989)

-Atividade Pozolânica

A expressão atividade pozolânica define aqueles fenômenos que, à temperatura ambiente transformam misturas de cal, pozolana e água em compostos de poder aglomerante. No passado acreditava-se que a atividade pozolânica era devida a uma atividade zeolítica, pois muitos pesquisadores tinham encontrado materiais zeolíticos em pozolanas, materiais esses conhecidos por serem capazes de absorver cal no contato com soluções, através de um mecanismo de troca de bases. A maioria das pozolanas contém fases não cristalizadas em maior ou menor proporção; em muitos casos, essas fases são verdadeiros vidros, mas quando se trata de argilas calcinadas, diatomitos e "cherts" opalinos, os constituintes não possuem uma estrutura vítrea e sim uma estrutura amorfa. Desse modo, considera-se, como fator determinante da atividade pozolânica, a instabilidade termodinâmica dos constituintes pozolânicos vítreos ou amorfos, Kihara e Shukuzawa (1982).

Logo, quanto maiores forem o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade, mais intensamente se manifestará a reação pozolânica. Além das características mineralógicas do material, a cinética da reação pozolânica depende também de sua finura (área de reação) e da temperatura e concentração dos reagentes.

-Vantagens do Uso de Pozolanas

A aplicação da pozolana remonta a séculos anteriores à era cristã, mas só a partir do século XIX, teve seu uso mais difundido, devido a invenção do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824, embora as investigações que possibilitaram a fabricação do cimento remontassem a Vicat em 1818.

Até 1982, o emprego de pozolanas para a fabricação de cimentos Portland pozolânicos no Brasil, era restrito somente ao uso de pozolanas artificiais como cinzas volantes e argilas calcinadas. Atualmente a utilização de resíduos industriais potencialmente aglomerantes, como a escória de alto-forno, já é consagrada, Silva et alli (1991).

Outros resíduos industriais e agrícolas que têm atividade pozolânica estão sendo estudados, e se tem obtido resultados satisfatórios, principalmente com cinza de casca de arroz adicionada ao cimento Portland comum, Cincotto (1984).

Com as exigências técnicas cada vez maiores impostas a certos tipos de construções, verificou-se que o emprego de pozolanas permitia um melhor desempenho do concreto. Algumas das vantagens advindas da utilização de materiais pozolânicos serão comentados a seguir, Castro Sobrinho (1970):

a) Reação álcali-agregado - certos tipos de agregados quando reagem com os álcalis liberados durante a hidratação do cimento provocam expansões no concreto endurecido, causando trincas e fraturas. Com a adição de pozolanas, a intensidade da reação álcalis-agregado pode diminuir, devido a reação dos compostos da pozolana com os álcalis do cimento, impedindo que esses reajam com a sílica "ativa" dos agregados.

b) Resistência química ao ataque de águas agressivas - águas como, a água do mar, as águas sulfatadas, as soluções alcalinas, as águas puras e as águas saturadas de anidrido carbônico, contêm compostos capazes de atacar e decompor os ligantes hidráulicos, mas, com a aplicação de pozolanas tem-se observado uma maior resistência a estes ataques.

c) Permeabilidade do concreto - as pozolanas agem positivamente tornando os concretos mais impermeáveis, isto devido a alta finura da pozolana que age como material de enchimento (filler) dos poros da pasta de cimento.

d) Resistência mecânica - os concretos contendo pozolana diminuem a resistência até a idade de 28 dias e, às idades mais avançadas é de se esperar que concretos com pozolana tenham resistência mais altas que concretos equivalentes sem pozolana. Uma limitação da pozolana é o seu uso em obras onde se necessita de altas resistências do concreto nas primeiras idades.

e) Calor de hidratação - embora misturas de concreto com pozolanas e sem pozolanas desprendam a mesma quantidade de calor, a distribuição de calor é mais uniforme em concretos com pozolana, contribuindo, em pequena parcela, para evitar o trincamento de estruturas maciças.

f) Trabalhabilidade da mistura fresca - as pozolanas quando usadas como substituição parcial do cimento, aumentam a plasticidade do concreto fresco e diminuem a exudação de água (bleeding) e a segregação.

Com todas estas vantagens, somadas ao fato de que os materiais pozolânicos são energeticamente mais baratos do que o clínquer de cimento Portland, proporcionando com seu uso uma redução no custo de fabricação do cimento, além das vantagens tecnológicas e econômicas, o uso destes materiais tem implicações ecológicas, com o aproveitamento de resíduos industriais poluidores, que é o caso das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termelétricas e da microssilica decorrente das indústrias de ferro-silício e silício metálico, Zampieri (1989).

-Critérios de Avaliação da Atividade Pozolânica

É bastante difícil imaginar um único método que, com caráter geral, permita levar a cabo uma estimativa do valor pozolânico, em condições comparáveis, em todos os casos e para os diversos tipos de pozolanas. Em primeiro lugar, porque a pozolanidade pode ser devido a diferentes causas ou em todo caso, ser mais

decisivamente influenciada por umas ou outras destas causas, às vezes muito diferentes entre si. Em segundo lugar, porque são diversas as formas em que pode manifestar-se o fenômeno pozolânico e, em consequência são também muito variadas as finalidades e aplicações que se deseja obter da ação pozolânica. Em terceiro lugar, porque às vezes é de interesse impor algumas condições difíceis aos métodos, e isto é quase impossível, mas quando se consegue, não existe uma correlação aceitável entre o método e a realidade prática, Lea (1938).

Como vimos, torna-se mesmo difícil determinar o valor pozolânico de um material mas mesmo assim alguns métodos de investigação têm-se revelado particularmente adequados, como: o método baseado na combinação da cal com pozolana; método de Fratine; método fundamentado na caracterização mineralógica; método fundamentado na medição da resistência mecânica de corpos de prova e outros de uso talvez mais difundido, Zampieri (1989).

-Pozolanas no Brasil

As indústrias cimenteiras no Brasil, encontram-se atualmente disponíveis em aproximadamente quinze unidades produtoras de cimentos Portland pozolânico; estas indústrias empregam diferentes pozolanas em função da disponibilidade regional.

Com a exploração de jazidas de carvão mineral no sul do país, instalou-se usinas termelétricas movidas a carvão mineral nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, as quais colocaram à disposição das indústrias cimenteiras das região, grandes quantidades de cinzas volantes, uma vez que este material requer pouco ou nenhum retrabalhamento. A sua utilização se generalizou no sul do país atingindo fábricas até no Estado de São Paulo.

Estima-se que a produção de cinzas volantes no Brasil, em 1977, foi de 500.000t, e que apenas 40% foi utilizada para a fabricação de cimento Portland pozolânico, Priszkulnic (1977).

As cinzas volantes constituem atualmente o principal tipo de pozolana empregada no país, respondendo por mais de 90% dos materiais pozolânicos adicionados ao cimento mas, infelizmente, não podem ser consumidas em outras regiões pois, os custos de transportes inviabilizam o emprego deste subproduto, Kihara e Shukuzawa (1982).

Na região Sudeste, a escória de alto forno é a opção mais interessante para a adição ao cimento nesses estados; isto é devido ao fato de que cinco das maiores usinas siderúrgicas a carvão mineral se localizam nesta região. Com exceção de São Paulo que produz o cimento Portland pozolânico, os demais estados da região (Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo) produzem somente o cimento Portland comum e de alto forno.

As sete unidades produtoras de cimento pozolânico das regiões Sul e Sudeste (São Paulo) do Brasil foram responsáveis por 53% da produção brasileira de cimento e 10% da produção nacional de cimento em 1987, Zampieri (1989). Ainda segundo este autor, na região Nordeste, dentre as oito unidades existentes, não se registra a produção de cimentos Portland de alto-forno, e os cimentos pozolânicos voltam a assumir grande participação no mercado, representando 47% da produção regional e 8,9% da produção nacional em 1987. Nessa região, as pozolanas naturais são exploradas nos Estados do Pará, Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco; já a utilização de argilas termicamente ativadas são restritas aos Estados de Pernambuco e Paraíba, constituindo assim as únicas opções possíveis.

2.3-Pozolanas de Argilas Calcinadas

A indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo, graças à facilidade de fabricação e abundância de matéria-prima, a argila. No período neolítico o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com argila; mais tarde verificou que podia abandonar o vime e utilizar apenas a argila. Posteriormente constatou o que calor endurecia esse material, e surgiu assim a cerâmica propriamente dita,

e que nessa fase da humanidade foi largamente utilizada para os mais diversos fins.

Os romanos empregaram cerâmica e telhas moídas no preparo de argamassas em substituição às pozolanas naturais, quando estas não eram disponíveis, logo a utilização de pozolanas obtidas a partir de argilas calcinadas, data da "invenção" do cimento Portland tendo os egípcios e hindus, denominado, essas argamassas preparadas com cal e argilas cozidas, de "homra" e "surkhi", respectivamente.

Com a implantação definitiva da moderna manufatura do cimento Portland, as pozolanas voltaram a ser utilizadas como materiais de construção, só que junto com o clínquer do Portland, constituindo assim o cimento pozolânico, Zampieri (1989).

Estes cimentos só tiveram papel de destaque a partir de 1923, na Italia, quando começaram a ser comercializados os cimentos elaborados com pozolanas naturais de origem vulcânica, Papadakis e Venuat (1968). Apesar de que em 1909 e 1915, na Inglaterra e França respectivamente, já era conhecido e utilizado um cimento composto por uma mistura de argila calcinada e cimento Portland, Lea (1970).

-Definição e Classificação dos Materiais Argilosos

Argila é o material natural terroso de granulação fina, constituído essencialmente por argilominerais; uma argila pode ter um ou mais argilominerais. O termo argila, é usado ainda, para designar a fração granulométrica de um sedimento inferior a 2 μm . Os argilominerais são silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, comumente com alguma percentagem de álcalis e de alcalinos-terrosos, e junto com esses elementos básicos vem a sílica, alumina, mica, ferro, cálcio, magnésio, matéria orgânica, etc, cuja estrutura e composição molecular permite classificá-los em diversos grupos.

Apresenta-se a seguir a classificação simplificada de Grim, para os argilominerais, Souza Santos (1975). Embora sendo uma classificação bastante genérica, implica, em muito maior subdivisão posterior, e é ainda bastante extensa:

I-Amorfos - grupo dos alofanos

II-Cristalinos

a) Tipos de duas camadas (1:1)

1-equidimensional: caulinita

2-alongada: haloisita

b) Tipos de três camadas (2:1)

1-com retículo cristalino expansivo:

a1-equidimensional: montmorilonita e vermiculita

b1-alongada: saponita e montronita

2-com retículo cristalino não expansivo: illita

c) camadas mista regulares: clorita

d) tipos estruturais em cadeia: paligorsquita e sepiolita

As argilas são formadas por processos de alteração de silicatos de alumínio que são os constituintes essenciais das rochas da crosta terrestre. As argilas podem ocorrer: a) na superfície das rochas, como resultado da decomposição superficial das mesmas; b) nos veios e trincas das rochas; c) nas camadas sedimentares, onde foram depositadas por ventos e chuvas.

As argilas são chamadas residuais quando o depósito é no próprio local onde houve a decomposição da rocha matriz; de sedimentares quando o depósito fica longe do local onde estava a rocha matriz.

-Recomendações Gerais para a Ativação e Qualificação dos Materiais Argilosos

Os depósitos de argila para a fabricação de pozolanas, além das condições técnicas e econômicas de lavra, devem apresentar características químicas, mineralógicas e calcinação adequadas, Kihara e Shukuzawa (1982).

As argilas calcinadas são mais comumente usadas que as pozolanas naturais, por causa da facilidade de obter-se matéria-prima adequada para sua fabricação; em contraposição com as jazidas de pozolanas naturais, as argilas próprias à fabricação de pozolana são bem mais uniformes.

A composição química de argilas utilizadas para a pozolanas, apresentam geralmente valores de SiO_2 entre 50 e 65% e Al_2O_3 entre 17 e 38%, Lea (1938). Como podemos ver, a matéria prima deve ser altamente argilosa, e a atividade pozolânica deve aumentar com o conteúdo de argila.

As argilas que mais se prestam como matéria prima para a fabricação de pozolanas são as caulinitas e montmoriloníticas, embora paligorsquitas, mais raramente, possam também ser utilizadas.

As propriedades pozolânicas são induzidas a cerca de 500 °C, sendo que a temperatura de calcinação ótima está na faixa de 700 a 850 °C. O superaquecimento das argilas a temperaturas de 920 a 1000 °C provoca uma recristalização com formação de compostos estáveis, diminuindo quase que totalmente a atividade química. Como podemos ver, o controle da temperatura tem papel importantíssimo na fabricação de pozolanas.

A atividade pozolânica de argilas caulínicas e montmoriloníticas desenvolve-se principalmente entre 550 e 1000 °C; já as ilitas e argilominerais de camadas mistas com vermiculita, desenvolvem atividade pozolânica em 900 e 950 °C, Mielenz et alli (1949).

Segundo a Indian Standards Institution (1969), são recomendadas faixas de temperatura mais estreitas, com a ressalva de que as temperaturas ótimas de calcinação podem variar de argila para argila. Logo, para argilas montmoriloníticas, a temperatura ideal estaria entre 600 e 800 °C; já para as

caulinitas essa temperatura ideal estaria entre 700 e 800 °C e para as ilitas entre 900 a 1000 °C.

Souza e Santos (1975), explica que a atividade pozolânica nas argilas cauliniticas é devida à formação de metacaulinita entre 500 e 800 °C, compostos estes de elevado grau de desordem cristalina e portanto elevada área específica e grande atividade química. Já no caso das montmorilonitas esta atividade é decorrente de alterações na estrutura e não da destruição do retículo cristalino.

-Utilização de Pozolanas de Argilas Calcinadas no Brasil

Em termos de recursos minerais, o Brasil, apresenta abundância de argilas com depósitos distribuídos em todo território nacional.

A atenção de pesquisadores voltados para as pozolanas de argilas calcinadas, tem crescido bastante nos últimos anos, e valiosas contribuições vem sendo registradas desde 1963. Não podemos deixar de citar nomes como Gitahy (1963), Souza Santos (1966 e 1975), Castro Sobrinho (1970), Andriolo (1975), Scanduzzi e Andriolo (1981 e 1986), Saad et alli (1983a e 1983b), Zampieri (1989) e bem recentemente Kihara e Zampieri (1992) que através de pesquisas contribuíram para a história da utilização desses materiais no nosso país. Também de grande importância foram as contribuições dadas pelas as fábricas brasileiras de cimentos e pela Associação Brasileira de Cimento Portland, Ruas (1977). Gitahy (1963), durante a construção da barragem de Jupia, no rio Paraná, em ensaios de laboratório utilizando argilas cauliniticas com matéria orgânica e montmorilonita, para fabricação de pozolana, indicaram que a calcinação entre 650 e 850 °C proporcionava reatividade pozolânica apreciável. Já em 1977, Ruas, trabalhando em laboratório com argila caulinitica em laboratório com argila caulinitica do município de Volta Redonda, Rio de Janeiro, contendo quartzo e outros materiais secundários como a gipsita, óxido de ferro e feldspato, obteve os melhores valores de resistência, quando a

calcinação era efetuada a 750 °C. Entretanto em escala industrial a temperatura de 750 °C era insuficiente para calcinar toda a argila, pois apenas parte da caulinita transformava-se em metacaulinita, sendo então necessário calcinar a argila em torno de 900 °C.

Em 1975, foi iniciada a produção de cimento pozolânico com argilas calcinadas. O cimento Itaú de Corumbá, Mato Grosso, iniciou sua produção em 1975 e a desativou em 1979. A Cia. Paraibana de Cimento Portland (CIMEPAR), neste mesmo período iniciou sua produção por apenas um ano.

A cimento Tupi S/A., em 1976, fabricou cimentos pozolânicos com a adição de argilas calcinadas em Volta Redonda, Rio de Janeiro; no ano seguinte a produção foi interrompida devido à coloração rosada, que não foi bem aceita pelos consumidores, que a interpretavam como indicação de qualidade inferior do cimento.

Em 1978, no Paraná, a Cia. de Cimento Itambé iniciou sua produção de cimento Portland pozolânico, utilizando uma mistura de argila calcinada e de rejeito carbopiritoso, cimento este bem aceito pelo mercado, e que ainda hoje é comercializado no sul do país. Em 1985, esta empresa optou por empregar cinzas volantes em substituição à antiga mistura, motivada pelos custos de produção da argila calcinada.

Em 1981, na Paraíba, a CIMEPAR retorna à sua produção desse cimento. No ano seguinte a Cia. de cimento Portland Poty, em Pernambuco, também iniciava a fabricação de cimentos pozolânicos com argilas calcinadas. Somente em 1986, a Cia. de cimento Atol, em Alagoas, passou a fabricar cimento pozolânicos com a utilização de argilas calcinadas provenientes da CIMEPAR.

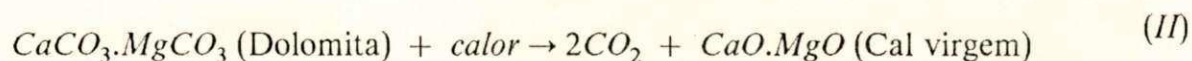
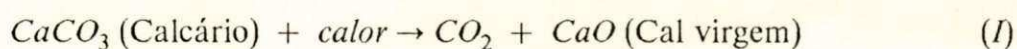
Nos dias atuais, apenas três indústrias cimenteiras produzem estes cimentos; estas unidades restringem-se à região Nordeste, e são: a cimento Poty, de Pernambuco, a CIMEPAR, da Paraíba e a cimento Atol, de Alagoas. A produção dessas fábricas em 1987, representam 24,2% dos cimentos pozolânicos nacionais e de 4,5% da produção total de cimentos Portland, com consumo avaliado de argila calcinada de 268.428t, Zampieri (1989).

2.4-Cal

O termo cal, é derivado do latim cale. Nome genérico incluindo tipo químicos e físicos do reagente químico aglomerante, resultante da calcinação de rochas carbonatadas e de depósitos de resíduos de esqueletos de animais, constituídos predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio, hidratados ou não, Guimarães (1989).

-Reações Químicas

Da calcinação do calcário natural, o carbonato de cálcio, submetido à temperatura de aproximadamente 900 °C, decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) - a chamada cal viva ou virgem - e eliminação de gás carbônico (CO₂); de maneira semelhante ocorre com o carbonato de magnésio a uma temperatura ligeiramente inferior, processos que são representados nas seguintes equações químicas:

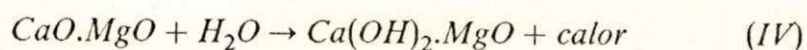
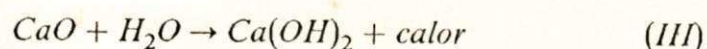


A cal viva não é o aglomerante utilizado na construção; ela se apresenta, usualmente em formas de grãos de vários tamanhos, dependendo do processo de fabricação utilizado; em nosso meio é comum grãos de grandes dimensões (10, 15 ou 20 cm, em média), e são chamadas pedras de cal viva.

O óxido deve ser hidratado, transformando-se em hidróxido, que é o constituinte básico do aglomerante cal.

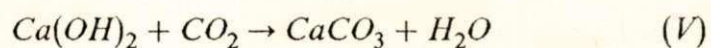
Este processo de hidratação é também chamado de extinção, daí a denominação de cal extinta ou hidratada. sendo a primeira processada no local

do emprego do material (obra) e a segunda na indústria. As reações químicas da extinção da cal viva são as seguintes:



Estas reações são fortemente exotérmicas com calor liberado da ordem de 272 cal/g e 211 cal/g, respectivamente, para a cal virgem cálcica e dolomítica. Pode ser considerada como uma reação reversível, uma vez que a desidratação, realizada por aquecimento, regenera a cal virgem, volatilizando a água, Cincotto (1977).

A cal extinta é utilizada em mistura com água e areia, em proporções apropriadas, na elaboração de argamassas. Estas têm consistência mais ou menos plástica, que endurecem por recombinação do hidróxido de cálcio com o gás carbônico presente no ar, reconstituindo o carbonato original. Esse endurecimento se processa com lentidão e ocorre, evidentemente, de fora para dentro, exigindo uma certa porosidade que permita a evaporação da água em excesso, e a penetração do gás carbônico do ar atmosférico. Este mecanismo de endurecimento que depende do ar atmosférico explica o nome dado a esse aglomerante - cal aérea - que se opõe ao nome de outra variedade - cal hidráulica - da qual se tratará mais adiante, que endurece principalmente por adição da água. As reações de carbonatação são as seguintes:



Essas reações ocorrem à temperatura ambiente e exigem a presença de água, a qual dissolvendo a cal e o CO_2 funciona como catalizador.

-Classificações

A cal virgem conforme o elemento predominante, pode ser classificada em: cal virgem cálcica, resultante de calcários com óxido de cálcio entre 90 e 100% do óxido total presente; cal virgem dolomítica, resultante de dolomitos, com óxido de cálcio entre 58 e 65% do óxido total presente; cal virgem magnesiana, resultante dos tipos de rocha intermediários, com óxidos de cálcio entre 65 e 90% do óxido total presente.

Conforme a cal virgem que lhe dá origem, a cal hidratada tem composições diferentes e, conseqüentemente nomes diferentes, isto é: cal hidratada cálcica, aquela derivada da cal virgem cálcica; cal hidratada magnesiana, aquela derivada da de cal virgem magnesiana e cal hidratada dolomítica, aquela derivada de cal virgem dolomítica, Guimarães (1990).

Outro critério de classificação é com relação ao rendimento da pasta; a cal apresenta duas variedades: cal gorda e cal magra. Chama-se rendimento ao volume de pasta que se obtém pela extinção da cal com água. Se o rendimento em pasta for maior do que 1.82, a cal será denominada gorda, e se for inferior a esse valor, magra. Esse rendimento limite corresponde ao rendimento de 1,82 m³ de pasta para uma tonelada de cal viva (550 kg de cal viva para 1 m³ de pasta), Bauer (1985).

A norma brasileira NBR-7175 (1981), exige que a percentagem do CaO e MgO juntos sejam iguais ou superior a 88% do total, sendo então 12% o resíduo máximo de extinção. Completam as especificações, propriedades físicas tais como finura, plasticidade e retenção de água. Estas propriedades além da trabalhabilidade e da capacidade de incorporação da areia, que não constam nas especificações, determinam a facilidade e a eficiência com a qual a argamassa pode ser aplicada.

-Uso da Cal nas Argamassas

A cal encontra-se intimamente ligada à palavra argamassa, desde a história da civilização, pois como narram os seus mais importantes capítulos, desde os antigos povos da Babilônia, de Ninive, do Egito, da Grécia e de Roma, as argamassas com cal, têm servido ao homem por todos os séculos, de maneira eficiente e fácil.

Apenas, por um período da história a cal foi deixada de lado; isto ocorreu com a melhora considerável na qualidade do cimento Portland, e o crescimento populacional que na época pressionou o ritmo das construções, logo os construtores dos países desenvolvidos passaram a exigir argamassas de pega mais rápida e resistência maior; com isto o cimento substituiu a cal nas argamassas em uso.

Mas, logo na primeira década, deste século, quando os americanos começaram a estudar as causas dos defeitos e do envelhecimento apresentadas pelas construções feitas geralmente com argamassas ricas em cimentos Portland, começou a ruir o conceito empírico, até então adotado, que atribuía a esse tipo de argamassa qualidade superior àquela com grande proporção de cal.

-Principais Propriedades das Argamassas

Como é de conhecimento, as argamassas de assentamento têm como função, unir solidariamente os componentes da alvenaria, distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede e absorver as deformações naturais a que a parede estiver sujeita e conferir-lhe estanqueidade, Cincotto et alli (1985).

Para atender sua função, consideram-se como propriedades essenciais da argamassa a trabalhabilidade, a retenção de água, a capacidade de absorver deformações, durabilidade. A resistência à compressão não é uma propriedade essencial, pois como sabemos a argamassa está inserida numa estrutura, por exemplo, de tijolo e argamassa, logo não há como discutir a resistência da argamassa sem questionar a do conjunto (tijolo-argamassa), mas é útil na análise comparativa de diferentes argamassas.

-A Indústria da Cal no Brasil

Atualmente, a indústria da cal assume um papel de grande importância no desenvolvimento das nações, não só pela multiplicidade de seus usos, como também pelo volume de matéria-prima mineral utilizada e valores sociais envolvidos.

No Brasil, a indústria da cal iniciou suas atividades na cidade de Salvador da Bahia, em 1549, quando as primeiras caieiras para fabricação de cal virgem a partir de conchas marinhas, para as argamassas de revestimento e pinturas, foram implantadas pelo fidalgo português Tomé de Souza. Os portugueses propagaram pelo interior do país a arte de fabricar cal ; com o objetivo de proteger das chuvas tropicais, as paredes de barro de suas moradias.

A fabricação da cal no país, até a década de 30, foi voltada, quase que exclusivamente, para as obras de construção civil, e mais secundariamente para as indústrias de açúcar, tratamento de água e de couro. Já, na década de 50, com o grande surto da construção civil, o crescimento e aparecimento de indústrias como as do açúcar, celulose e siderúrgicas, levaram a indústria brasileira de cal para um estágio de rápido desenvolvimento tecnológico e produtivo.

As primeiras indústrias de cal localizaram-se nas regiões de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte mas, com a descentralização da industrialização, instalações importantes de fabricação do produto começaram a despontar nas regiões da Bahia, do Ceará, do Paraná, do Rio Grande do Sul, de Pernambuco, do Mato Grosso do Sul, do Espírito Santo e da Paraíba, graças à disposição geográfica e da qualidade das reservas brasileiras de calcários/dolomitos, Guimarães (1990).

Segundo esse autor, para avaliar a atual dimensão do universo da cal no nosso país, nos diversos aspectos de consumo, da produção e da comercialização, as estimativas existentes são deficientes, devido principalmente à grande extensão do território brasileiro, à pulverização dos centros de produção e de consumo e à pequena dimensão de muitos dos estabelecimentos. Entretanto, através da produção das 30 maiores empresas do setor, estimou-se para 1990, uma produção de 6 milhões de toneladas de cal por ano.

O Brasil, como produtor e consumidor de cal virgem, ainda situa-se no patamar dos países em desenvolvimento, com modestos valores representativos, contrastes chocantes e omissões no painel que envolvem os usos e as técnicas empregadas nas calcinações.

2.5-Cimento Portland

-Generalidades

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica, Petrucci (1979).

O cimento Portland resulta da moagem de um produto denominado clínquer, que é obtido pela calcinação até a fusão incipiente (aproximadamente 1450 °C) de uma mistura adequada de cálcario e argila, de tal maneira que toda cal se combine com os compostos argilosos, sem que, após a calcinação resulte cal livre em quantidade prejudicial. Após a queima, pode ser adicionado pequena quantidade de sulfato de cálcio, de modo a que o teor de SO₃ não ultrapasse 4,0%, a fim de regularizar o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto.

Uma outra definição, é dada pela norma NBR-5732 (1988), que diz ser o cimento Portland constituído de uma mistura de clínquer mais uma certa quantidade de gipsita (comumente chamada de gesso) para controlar o tempo de pega e eventualmente outras adições em teores até de 10%, que podem ser pó calcário, escória de alto-forno ou pozolana. O clínquer Portland, constituinte principal deste cimento, é obtido através da calcinação entre 1300 a 1500 °C de uma mistura de calcário e argilas.

Como podemos ver, a cal, a sílica, a alumina e o óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem cerca de 95% do total na análise de óxidos. A magnésia que parece permanecer livre durante a calcinação, está presente na proporção de 2 a 3%, limitada pelas especificações que são de no máximo 6,5%, NBR-5736 (1986).

-Queima e Resfriamento

Na preparação do cru ou farinha, além da dosagem das matérias primas, grande atenção deve ser dedicada à moagem e à homogeneização, uma vez que tanto a granulometria quanto a homogeneização são fatores de grande importância para o desenvolvimento das reações de clínquerização e qualidade do produto.

Após os constituintes anteriormente relacionados, serem moídos e homogeneizados, a mistura é submetida à ação do calor no forno produtor de cimento, até a temperatura de fusão incipiente que resulta na obtenção do clínquer. Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação de:

-Silicato tricálcico ($3.CaO.SiO_2 = C_3S$);

-Silicato dicálcico ($2.CaO.SiO_2 = C_2S$);

-Aluminato tricálcico ($3.CaO.Al_2O_3 = C_3A$);

-Ferroaluminato tetracálcico ($4.CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = C_4AF_3$).

Como constituintes secundários, ocorrem ainda comumente cristais de CaO e MgO. Os cristais de CaO livre podem ser encontrados no clínquer por deficiências no processo de fabricação ou em decorrência de uma supersaturação em cal. Os cristais de MgO, por sua vez, são usualmente caracterizados nos clínqueres obtidos a partir de calcário dolomítico, quando a participação do magnésio excede 1,5% da constituição química do clínquer, Zampieri (1989).

Como podemos observar, os constituintes principais do clínquer Portland podem ser agrupados simplesmente em dois grupos. O primeiro grupo representado pelos silicatos cálcicos (C_3S e C_2S), responsáveis pela quase totalidade do clínquer, sendo o principal responsável pela evolução das resistências mecânicas, a médias e longas idades. O segundo grupo, constituído pelos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos. Embora estes componentes comparados com os silicatos, apresentem em pastas, evoluções de resistências mecânicas pouco expressivas, as suas presenças são indispensáveis, sendo o aluminato tricálcico (C_3A) de grande importância na definição do tempo de pega e nas resistências iniciais dos cimentos.

Logo, podemos verificar que, as propriedades finais do cimento são, entretanto, relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos.

Após a queima, que dura de três horas e meia a quatro horas, a etapa seguinte constitui-se no processo de resfriamento, que se inicia logo após a passagem pela zona de máxima temperatura do forno e vai completar nos resfriadores industriais. Esta etapa tem grande importância para a definição da reatividade e estabilidade do clínquer, Shukuzawa (1986).

-Hidratação e Endurecimento

O fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, conseqüentemente, entretanto, a um processo químico de hidratação.

Quando se adiciona água ao cimento Portland ele se hidrata e forma pasta, esta endurece com o tempo e adquire grande resistência.

Não está ainda bem definido o processo de hidratação e solidificação do cimento. Sabe-se apenas que, talvez devido à sua finura, cada partícula de cimento forma uma pasta de gel, que endurece quando a água se retira. Essa retirada se processa por capilaridade, desde a superfície até o interior da pasta. Ao mesmo tempo que endurece, a pasta passa da estrutura coloidal para a cristalina. Esses cristais se interligam, dando resistência à argamassa.

Estudos realizados por Collepari (in IPT, 1983) e Jawed et alli (1983), foram de grande importância, no sentido de melhor compreender-se o processo de hidratação do cimento. Estes autores fizeram análise em separado do comportamento exibido pelas diversas fases que compõem o clínquer Portland.

A partir dos estudos de Jawed et alli (1983), sobre o fenômeno da hidratação verificou-se que os diversos componentes hidratavam em tempos diferentes. E que o C_3A se hidratava mais rapidamente, sendo seguido pelo C_3S . A grande reatividade do C_3A (manifestada por sua rápida taxa de hidratação) torna esse composto particularmente importante na definição do tempo de pega e para a resistência inicial dos cimentos.

A hidratação é acompanhada de despreendimento de calor, tanto mais intenso quanto maior o volume de argamassa e quanto menor o tempo de endurecimento. O calor de hidratação varia com os componentes. O C_3A é o que gera mais calor, seguindo-lhe o C_3S . Como o C_3S é o elemento predominante dos cimentos de pega rápida, isso explica o seu alto calor de hidratação.

Com relação ao endurecimento, sabemos que é o período de fenômenos físicos de secagem e entrelaçamento dos cristais (colagem). Se o endurecimento for muito rápido, dará cristais menores e portanto, de menor resistência. Mas se for muito lento impedirá o pleno uso da resistência do cimento. O endurecimento é

muito rápido no início, e vai se tornando cada vez mais lento. A partir dos 28 dias a variação se torna desprezível, embora continue. Por isso, se adota esse prazo como base de comparação e cálculo, Verçozza (1975).

-Modificações Recentes na Classificação do Cimento Portland

Em 1991, o cimento Portland brasileiro sofreu importantes modificações em sua normalização; com isso, passamos a classificá-lo da seguinte forma:

1) Cimento Portland Comum (EB-1/NBR 5732)

- CPI (Cimento Portland Comum)
- CPI-S (Cimento Portland Comum com adição, contendo 1 a 5% de material Carbonático).

2) Cimento Portland Composto (EB-2138/NBR 11578)

- CII-E (Cimento Portland com Escória, com 6 a 34% de escória granulada).
- CII-Z (Cimento Portland com Pozolana, com 6 a 14% de material pozolânico).
- CII-F (Cimento Portland com Fíler, com 6 a 10% de material carbonático).

3) Cimento Portland Pozolânico (EB-758/NBR 5736)

- CIV (Cimento Portland Pozolânico, com 15 a 50% de material pozolânico).

4) Cimento Portland de Alto-Forno (EB 208/NBR 5735)

- CIII (Cimento Portland de Alto-Forno, com 35 a 70% de escória granulada).

5) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (EB-2/NBR 5733)

- CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, com 0 a 5% de material carbonático).

2.6-Aglomerantes Alternativos

Considerando a quase inexistência de aglomerantes intermediários entre a cal hidratada e o cimento Portland, surgiu no Brasil a idéia de se desenvolver algo equivalente, que pudesse vir a ser utilizado em vantagem na construção, já que a utilização do cimento Portland ocorre hoje de forma indiscriminada, e atualmente é um dos elementos que mais contribuem para onerar o custo final da obra, isto devido ao alto valor energético, necessário à fabricação do clínquer Portland, constituinte básico dos cimentos.

Produtos como a cal hidráulica - resultante da calcinação de calcários argilosos - e a cal pozolânica - resultante da mistura de cal e pozolana -, quase não são encontrados no mercado brasileiro. Na Paraíba, as indústrias Dolomil Dolomita Minérios Ltda e Cia Industrial Gramame (CIGRA), fabricam cais pozolânicos a partir de calcários impuros (argila) que denominam respectivamente de Calcimento e Cimencal, Silva et alli (1992).

Thober et alli (1984), desenvolveu um aglomerante alternativo, que denominou de cal hidráulica pozolânica; este, resultante de um processo de calcinação de um calcário impuro com carvão em reator de leito fluidizado. Neste trabalho pôde ser observado que a resistência à compressão dos corpos de prova melhorava com o aumento de temperatura e com adição da fração volante.

Silva e Ferreira (1992), a partir de estudos realizados com cais pozolânicos artificiais, compostas por misturas de uma cal hidratada fracamente hidráulica e pozolanas obtidas por ativação térmica de um caulim em diversas temperaturas, pôde concluir que as pozolanas ativadas a 800 °C, davam cais pozolânicos de resistência mecânica superiores, comparados com as demais, e que essas resistências também aumentavam com o percentual de pozolana.

No Brasil as conceituações de cais hidráulicas e cais pozolânicas divergem de autor para autor, o que dificulta o entendimento sobre o que realmente se deva compreender como sendo cais hidráulicas e cais pozolânicas. Veremos a seguir um pouco sobre cada um desses aglomerantes.

-Definições

-Cal Hidráulica

Segundo Torres (1941) é o produto resultante do cozimento de calcários, mais ou menos argilosos, a uma temperatura inferior à do início de fusão e da subsequente pulverização por extinção, esta podendo ou não ser seguida de moagem. Segundo Leprevost (1953) é o produto obtido por calcinação de pedras naturais, em temperatura inferior à do início de fusão e que posteriormente não sejam adicionadas de qualquer outras substâncias. Segundo Gonzales (1978) cais hidráulicas possuem propriedades hidráulicas, isto porque o calcário empregado como matéria prima tinha certa quantidade de impurezas (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) que reagem com os CaO que se forma no forno, produzindo aluminatos e silicatos de cálcio análogos aos que se observam no cimento Portland. Segundo Petrucci (1979) para fabricar um cal hidráulica, emprega-se uma rocha calcária argilosa que além do carbonato de cálcio e de um pouco de carbonato de magnésio a matéria prima usada deverá conter quantidade apreciável de material argiloso, em cuja composição figuram sílica, alumina e óxido de ferro; o cozimento deverá ser feito a uma temperatura inferior à de fusão, isto é a cerca de $900\text{ }^\circ\text{C}$. Segundo Silva (1985) a cal hidráulica é obtida da rocha calcária argilosa contendo ainda carbonato de magnésio, sílica, alumina e óxido de ferro, e a calcinação é feita a mais ou menos $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Como se pode ver da exposição acima, as opiniões divergem quanto à temperatura de calcinação, que para alguns autores se encontra próxima a 1200 °C, enquanto para outros em torno de 900 °C, o que torna difícil chegarmos a um consenso.

O que porém pode ser considerado como provável é que como cais hidráulicas propriamente ditas, só podem ser consideradas os produtos resultantes da calcinação a temperatura inferior à de início de fusão de uma rocha calcária que contém como impurezas SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 podendo ainda conter ou não MgO , de modo que o óxido de cálcio formado reaja com as impurezas formando silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio que lhes confere uma hidráulicidade entre 0,1 e 0,5; estes produtos apagam-se com água resultando em um material pulverulento com pega hidráulica, Silva et alli (1992).

Nessa família de aglomerantes, define-se um fator que qualifica o seu comportamento, do ponto de vista do processo de endurecimento; o índice de hidráulicidade, que é a relação entre as proporções dos constituintes argilosos e dos constituintes alcalinos.

Segundo Calvet (1936), chama-se índice de hidráulicidade (i) o quociente que se obtém dividindo a soma das porcentagens das substâncias hidráulizantes, quer dizer, de sílica, alumina e óxido de ferro, pelo peso dos alcalinos terrosos que contém o produto. Teremos, pois:

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}$$

Na prática as quantidades de K_2O e Na_2O , são tão pequenas que podem ser desprezadas e só se tem em conta as porcentagens dos óxidos de cálcio e magnésio, e a fórmula acima toma o seguinte aspecto:

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

A este quociente denominou Vicat de índice de hidráulicidade

De maneira geral, podemos dividir os aglomerantes hidráulicos em cal hidráulicas e cimentos; onde ambos podem ser naturais ou artificiais. Os naturais são obtidos pela queima direta de calcários argilosos; os artificiais são obtidos pela queima de misturas de argila e calcário.

A classificação mais exata e completa para esses aglomerantes, é a que se atém ao índice de hidráulidade e que foi inicialmente estabelecida por Vicat, e atualmente está levemente alterada por Durand Claye mas permanece quase a mesma, Verçosa (1975). (vide Quadro 2)

CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE DE HIDRAULICIDADE	TEMPO DE PRESA NA ÁGUA
CAL AÉREA	0 — 0,1	não fazem
CAL FRACAMENTE HIDRÁULICA	0,1 — 0,16	30 — 16 dias
CAL MEDIAMENTE HIDRÁULICA	0,16 — 0,31	16 — 10 dias
CAL PROPRIAMENTE HIDRÁULICA	0,31 — 0,42	9 — 5 dias
CAL EMINENTEMENTE HIDRÁULICA	0,42 — 0,50	4 — 2 dias
CIMENTO DE PEGA LENTA	0,50 — 0,65	24 — 6 horas
CIMENTO DE PEGA RÁPIDA	0,65 — 1,20	menos de 6 horas
CIMENTO MAGROS	1,20 — 3,00	só com cal
POZOLANAS	mais de 3	só com cal

QUADRO 2 — CLASSIFICAÇÃO DE AGLOMERANTES QUANTO AO ÍNDICE DE HIDRAULICIDADE E TEMPO DE PEGA — FONTE: VERÇOZA (1975)

Como podemos ver quase toda cal pode ser considerada como hidráulica, pois geralmente há alguma argila no minério.

-Cal Pozolânica

As cairs pozolânicas apesar de já terem sido descobertas e utilizadas há bastante tempo pelos romanos, que misturando uma cinza encontrada nas proximidades do Vesúvio com cal hidratada, obtinham um aglomerante hidráulico. É um aglomerante em desuso, apenas citado na literatura.

Segundo Petrucci (1979) denomina-se cal pozolânica uma mistura composta por um aglomerante simples (cal) com certo produto que recebe o nome de hidraulite (pozolana); esta mistura é efetuada após o cozimento do aglomerante simples, melhorando assim o valor hidráulico do produto pela formação de um silicato de cálcio insolúvel. Segundo Bauer (1985) no material atualmente conhecido por cal pozolânica, a cal hidratada entra em proporção variável de 25 a 45%, e é um aglomerante em desuso. Segundo Guimarães (1989), cal hidráulica pozolânica é uma cal hidratada resultante da calcinação em fornos de leito fluidizado, de calcários impuros (ricos ou não em MgO) e carvão mineral com alto teor de cinzas, o que lhe dá características hidráulicas. Silva et alli (1992), consideram cairs pozolânicas como sendo as obtidas a temperaturas na faixa de 900 a 1000 °C de calcários certo com teor de impurezas (argilas) ou também como sendo uma mistura composta de uma cal hidratada com pozolana.

Segundo Vorobiev (1967), essas cairs contêm apenas 10 a 30% de cal e 70 a 90% de adição; e o endurecimento desta cal é resultado de uma reação entre a cal e a sílica ativa da adição. Essas cairs têm bons preços, e a resistência à compressão em argamassas de 1:3 em idades de 28 dias, variam de 2,5 a 15,0 MPa. Silva e Ferreira (1992), encontram valores entre 3,6 a 4,8 MPa, em composições de apenas 14,5 e 21,0% de pozolana obtida a 800°C.

Como podemos observar, o nível de informações sobre este aglomerante, é ainda insuficiente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Introdução

Neste capítulo iremos tratar do detalhamento relativo aos materiais e métodos utilizados no decorrer desta pesquisa. Os métodos de ensaios constantes de normas da ABNT, são apenas citados, enquanto que os métodos não constantes desta normalização serão descritos.

3.2- Materiais

3.2.1- Cais

Foram utilizadas 4 amostras de cais pozolânicas industriais conhecidas comercialmente por: Cimencal, cal hidratada I, cal hidratada II e Calcimento.

Cimencal- fabricada pela Companhia Industrial Gramame- CIGRA, localizada na BR-101, Sul, Km 13, Alhandra-Pb. A cal chegou ao laboratório acondicionada em saco de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e colocada em sacos plásticos que foram lacrados em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades da mesma.

Cal hidratada I e II - fabricadas pela Dolomil Dolomita minérios Ltda., localizada na Av. Senador Argemiro de Figueiredo, s/n, no distrito industrial do município de Campina Grande-Pb. As cais chegaram ao laboratório

acondicionadas em saco plástico, tendo sido retiradas da embalagem original e colocadas em sacos plásticos que foram lacrados em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades das mesmas.

Calcimento - fabricada pela Dolomil Dolomita Minérios Ltda., localizada na Av. Senador Argemiro de Figueiredo, s/n, no Distrito Industrial do Município de Campina Grande-Pb. A cal chegou ao laboratório acondicionada em saco de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e colocada em sacos plásticos que foram lacrados em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades das mesmas.

3.2.2- Caulim

Foi utilizada uma amostra de caulim comercial, fornecida pela Caulisa S/A, situada no Distrito Industrial do Município de Campina Grande-Pb. O caulim chegou no laboratório acondicionada em saco de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirado da embalagem original e colocada em sacos plásticos que foram lacrados em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades do mesmo. O caulim beneficiado provém da província Pegmatítica da Borborema, mais precisamente do Município de Junco-Pb. Trata-se de caulim primário caulínico muito puro, Ferreira (1973).

3.2.3- Pozolanas

Foram obtidas artificialmente por tratamento térmico do caulim descrito anteriormente. O tratamento térmico foi efetuado num forno da marca Químis, modelo 318-24 e potência de 3500W, em temperaturas de 750, 800, 850, 900 e 950 °C de forma a se obter metacaulinita que é uma pozolana padrão. As amostras foram aquecidas de forma aleatória, permanecendo por um período de

2 horas na temperatura máxima, após 24 horas foram retiradas do forno e acondicionadas em saco plástico, lacrado e devidamente etiquetado.

3.2.4- Cimento Portland Pozolânico*

Foi utilizada uma amostra de cimento Portland pozolânico de 32 POZ, conhecido comercialmente como cimento Zebú, existente no comércio local em Campina Grande-Pb. O cimento chegou ao laboratório em saco de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirado da embalagem original e colocado em saco plástico que foi lacrado em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades do mesmo.

3.2.5- Cimento Portland Comum *

Foi utilizada uma amostra de cimento Portland comum de 32 POZ, conhecido comercialmente como cimento Poty, existente no comércio local em Campina Grande-Pb. O cimento chegou ao laboratório em saco de papel "kraft", 3 camadas, tendo sido retirado da embalagem original e colocado em saco plástico que foi lacrado em seguida, a fim de evitar qualquer alteração nas propriedades do mesmo.

* Estes cimentos foram caracterizados segundo especificações anteriores as atualmente em vigência e são denominados respectivamente de CP IV e CP I.

3.2.6- Areia

Foi utilizada areia normal preparada segundo norma NBR-7214 (1982), obtida a partir da areia correntemente utilizada em construção civil, proveniente do Rio Paraíba, cedida pela Super Mix Concreto Ltda., situada no distrito industrial de Campina Grande-Pb. A areia chegou ao laboratório em sacos de rafia.

3.2.7- Água

Foi utilizada água potável fornecida pela CAGEPA para o sistema de abastecimento de Campina Grande-Pb.

3.3- Métodos

3.3.1- Ensaios de Caracterização

3.3.1.1- Análise Química

As cais, o caulim e os cimentos foram submetidos a análise química. Estas análises foram realizadas segundo o método de análise nº 88 do ministério do Interior - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - DRN / Divisão de Geologia / SAN.

3.3.1.2- Índice de Hidraulicidade

Os índices de hidraulicidades foram calculados através da composição química dos materiais pela seguinte fórmula, Verçosa (1975):

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + \%MgO} \quad (3.1)$$

Para a confecção dos aglomerantes foram fixados os índices de hidraulicidades desejados, e com conhecimento das composições químicas dos materiais envolvidos, foi possível calcular a proporção com que cada um dos materiais irá participar na mistura (vide Apêndice I).

3.3.1.3- Teor de Umidade

As cais, o caulim e os cimentos foram submetidos ao ensaio de teor de umidade segundo norma NBR-64 (1957).

3.3.1.4- Determinação de Finura

Todos os materiais foram submetidos ao ensaio de determinação de finura em peneira ABNT de nº 200 e de nº 325 segundo norma NBR-7215 (1982).

3.3.1.5- Granulometria por Via Úmida

As cais, o caulim e as pozolanas foram submetidas ao ensaio de granulometria por via úmida com uso das peneiras ABNT nº 50; 100; 200 e 325, segundo norma NBR-7181 (1974).

3.3.1.6- Massa Específica Real

As amostras foram secas a 110 °C até massa constante, e guardadas em vidros hermeticamente fechados até o momento do ensaio. As determinações de massa específica real das amostras foram feitas segundo a norma NBR-6474 (1984). O método consiste em determinar o volume que a massa conhecida da amostra ocupa dentro do picnômetro com capacidade de 50 ml.

3.3.1.7- Área Específica

As amostras foram secas a 110 °C até massa constante, e posteriormente passadas em peneira ABNT nº 200, acondicionadas em vidros hermeticamente fechados, até o momento do ensaio. As áreas específicas expressas em m²/g foram determinadas pelo método do permeâmetro de Blaine segundo norma NBR-7224 (1984). O método consiste em fazer passar uma quantidade de ar através de uma camada preparada da amostra. O número e tamanho dos poros da camada são em função do tamanho das partículas e determinam a velocidade com que atravessa a camada.

3.3.1.8- Análise Térmica Diferencial - ATD

A análise térmica diferencial (ATD) é uma técnica termoanalítica na qual é registrada a temperatura de uma amostra em estudo, comparativamente à temperatura de um material termicamente inerte. A temperatura registrada é função da amostra, do material inerte ou da temperatura do forno durante o aquecimento ou resfriamento, a uma velocidade uniforme, Webb e Kruger (1972).

As amostras foram passadas em peneira ABNT nº 200 e acondicionadas em vidros hermeticamente fechados a fim de evitar a carbonação e umidificação. E finalmente, foram submetidas à análise térmica diferencial, sendo utilizado um

1000 Deltathem III, com velocidade de aquecimento de 10°C/min até o limite de 1000°C; o registrador gráfico operou com a sensibilidade de 2mV e velocidade de registro de 120mm/h.

3.3.1.9- Análise Termogravimétrica - ATG

As amostras foram passadas em peneiras ABNT nº 200 e acondicionadas em vidros hermeticamente fechados a fim de evitar a carbonatação e umidificação. E finalmente, foram submetidas à análise termogravimétrica, sendo usado o equipamento termoanalisador TA 2000C da Mettler, utilizando aproximadamente 30 mg de amostra, com velocidade de aquecimento de 10°C/min, em uma faixa de temperatura de 30 a 900°C em ar atmosférico. A técnica termoanalítica da termogravimetria (ATG) é aquela cuja a variação na massa da amostra é registrada em função da temperatura, Giolito (1974).

Para determinação do intervalo de temperatura em que ocorreram as reações de decomposição e em que percentagens, foi necessário utilizarmos reagentes puros p.a. na determinação das curvas de ATG do hidróxido e carbonato de cálcio. Para o hidróxido de magnésio, não foi possível conseguir um reagente puro p.a., e os cálculos de percentagens foram feitos com base na estequiometria da reação de decomposição do mesmo.

3.3.2- Ensaio Tecnológicos

3.3.2.1-Determinação de Pega

As cais, os cimentos e as misturas de aglomerantes II, foram submetidas a determinação de início e fim de pega segundo norma NBR-7215 (1982).

3.3.2.2- Resistência à Compressão Simples - RCS

3.3.2.2.1- Confeção das Argamassas

Foi utilizado um traço em "peso" 1:3 com fator água cimento de 0,48. Os aglomerantes usados foram: as 4 cals pozolânicas industriais puras; misturas da cal hidratada I com cada uma das 5 pozolanas (750, 800, 850, 900, 950 °C); misturas da cal hidratada I com o cimento Portland pozolânico (Aglomerante I); misturas da cal hidratada II com a pozolana 800 °C (Aglomerante II); misturas da cal hidratada II com cimento Portland comum (Aglomerante III); misturas da cal hidratada II com cimento Portland pozolânico (25%) e pozolana 800 °C (75%) (Aglomerante IV); misturas da cal hidratada II com cimento Portland pozolânico (50%) e pozolana 800 °C (50%) (Aglomerante V) e misturas da cal hidratada II com cimento Portland pozolânico (75%) e pozolana 800 °C (25%) (Aglomerante VI). Os percentuais destas misturas foram determinados a partir da prefixação dos índices de hidraulicidades (vide Apêndice I).

3.3.2.2.2- Cura e Ensaio de Resistência à Compressão Simples

As amostras foram curadas em câmara úmida por um período de 7 dias, 28 dias e 60 dias a uma temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para cada mistura foram preparadas quinze corpos de prova, sendo cinco para cada tempo de cura. Após o período de cura, foi mensurado o comportamento dos corpos de prova através do ensaio de resistência à compressão simples, utilizando-se uma prensa manual de marca Bender de anel dinamométrico com velocidade de deslocamento de 0,1 cm/min, os resultados foram obtidos em kg/cm^2 e convertidos para MPa com aproximação de décimos. Os resultados referem-se à média aritmética de cinco

determinações, não diferindo mais de 10% dos valores isolados. Aqueles valores, que se afastaram mais de 10% da média, foram abandonados, sendo nova média determinada para os restantes dos valores; se não fosse possível nova média, o ensaio seria repetido.

Os ensaios das argamassas foram realizados segundo norma NBR-7215 (1982).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização das amostras, bem como os resultados dos ensaios tecnológicos dos aglomerantes em estudo.

4.1- Ensaio de Caracterização

4.1.1- Análise Química

Os resultados das análises químicas estão apresentadas na Tabela 1, e serão discutidos separadamente, para melhor entendimento.

Cimencal - trata-se de uma cal hidratada cálcica, com teor de MgO de 6,99%, mais alto que as demais e teor de sílica de 5,82%.

Cal hidratada I - trata-se de uma cal hidratada cálcica, com teor de MgO de 2,00%, e teor de sílica de 4,06%.

Cal hidratada II - trata-se de uma cal hidratada cálcica, com teor de MgO de 1,93%, e teor de sílica de 7,60%.

Calcimento - trata-se de uma cal hidratada cálcica, com teor de MgO de 2,00%, e teor de sílica de 9,36%.

Como podemos observar, as cais em estudo são todas cálcicas ou cais hidratadas baixo magnésio, Guimarães (1989).

Com relação aos requisitos da NBR-7175 (1981), podemos observar que as cais utilizadas não satisfazem algumas das especificações como: o teor de óxidos totais ($\text{CaO} + \text{MgO}$) na base de materiais não voláteis que é de no mínimo 88%, e as mesmas apresentam valores entre 74,9% (Calcimento) e 87,4% (Cal hidratada I); e o teor de anidrido carbônico- CO_2 que é de no máximo 7% (no depósito da obra) e 5% (na fábrica); as mesmas apresentam valores entre 11,5% (Cal hidratada I) e 27,3% (Calcimento), sendo este teor calculado a partir do percentual de CaCO_3 determinado na análise termogravimétrica, utilizando-se a equação $\% \text{CO}_2 \times 2,27 = \% \text{CaCO}_3$, Cincotto (1990). O alto teor de CO_2 corresponde a uma fração carbonatada, presente na cal, o que reduz sua capacidade aglomerante.

Caulim - este caulim caulínico apresenta teor de SiO_2 de 46,33% e teor de Al_2O_3 de 38,98%, que se aproximam bastante dos especificados por Souza Santos (1975), que são de 46,5% para SiO_2 e 39,5% para Al_2O_3 sub 3.

Cimento Portland pozolânico - este cimento apresenta teor de CaO de 50,15%, teor de MgO de 3,01% e perda ao fogo de 2,54%, que satisfazem as especificações estabelecidas pela norma NBR-5736 (1988), que são de no máximo 6,5% para MgO e 4,5% para perda ao fogo.

Cimento Portland comum - este cimento apresenta teor de CaO de 62,37%, teor de MgO de 1,99% e perda ao fogo de 3,00%, que satisfazem as especificações estabelecidas pela norma NBR-5732, (1986), que são de no máximo 6,5% para MgO e 3,0% para perda ao fogo.

4.1.2- Índice de Hidraulicidade

A Tabela 5a apresenta os índices de hidraulicidade das cais e dos cimentos Portland pozolânico e comum.

Como podemos observar a Calcimento (0,21) apresenta a maior hidraulicidade entre as cais, sendo a Cimencal (0,12) a que apresenta o menor valor. Estas cais apresentam índice de hidraulicidade situado nas faixas de 0,1 a 0,16 e de 0,16 a 0,31 e são denominados fracamente e medianamente hidráulicas respectivamente, devendo-se destacar entretanto que a Calcimento é medianamente hidráulica.

Já os cimentos Portland apresentam hidraulicidade de 0,44 para o comum e 0,80 para o pozolânico.

4.1.3- Teor de Umidade

A Tabela 2 apresenta os valores de umidade obtidos para as cais e cimentos Portland pozolânico e comum.

Para cais os valores variam de 0,81% (cal hidratada I) a 1,76% (Cimencal); segundo Vorobiev (1967), a umidade da cal hidratada bruta não deve ultrapassar 5%. Logo, podemos observar que estes materiais tiveram uma secagem adequada.

O caulim apresenta umidade de 0,60%, valor este próximo aos encontrados por Souza (1966) para caulins secundários do recôncavo da Bahia, que foram de 0,50 a 0,56% de umidade.

Os cimentos Portland apresentam umidade de 0,17% para o pozolânico e 2,12% para o comum.

4.1.4- Determinação de Finura

As cais apresentam índice de finura de 89,6% (cal hidratada I) a 98,5% (Cimencal) em peneira ABNT nº 325, já em peneira ABNT nº 200, os valores variam de 23,7% (Cimencal) e 28,4% (cal hidratada I e II).

O caulim apresenta índice de finura de 100,0% em peneira ABNT nº 325, e 11,6% em peneira ABNT nº 200. Para pozolanas os valores em peneira ABNT nº 325, variam de 85,0% (pozolana 750 °C) a 98,0% (pozolana a 950 °C), já em peneira ABNT nº 200 os valores ficaram entre 16,0% (pozolana 750 °C) e 20,0% (pozolana 950 °C). Podemos observar que à medida que se elevou a temperatura de calcinação das pozolanas, as mesmas sofreram aumento no índice de finura em ambas as peneiras.

Para o cimento Portland pozolânico e o cimento Portland comum o índice de finura em peneira ABNT nº 325 é de 99,3% e 98,4% respectivamente; já para peneira ABNT nº 200 os valores são de 7,3% e 8,6% respectivamente; estes últimos valores satisfazem as especificações da NBR-5732, (1988), que são de no máximo 12% para peneira ABNT nº 200, de cimentos de classe 32 POZ.

4.1.5- Granulometria por Via Úmida

As Tabelas 3a e 3b, apresentam os resultados obtidos da análise granulométrica por via úmida das cais, caulim e pozolanas.

Cal hidratada I - observa-se que o material praticamente não apresentou resíduo nas peneiras ABNT nº 50 e 100. Na peneira ABNT nº 200 cerca de 14% ficou retido; já na peneira ABNT nº 325 ficou retido cerca de 19%, passando o complemento que é de 81%.

Cal hidratada II - observa-se que o material praticamente não apresentou resíduo nas peneiras ABNT nº 50 e 100. Na peneira ABNT nº 200 cerca de 21% ficou

retido; já na peneira ABNT nº 325 ficou retido cerca de 47%, passando o complemento que é de 53%.

Calcimento - observa-se que o material praticamente não apresentou resíduo nas peneiras ABNT nº 50 e 100. Na peneira ABNT nº 200 cerca de 16% ficou retido; já na peneira ABNT nº 325 ficou retido cerca de 18%, passando o complemento que é de 82%.

Cimencal - observa-se que o material praticamente não apresentou resíduo na peneira ABNT nº 50. Na peneira ABNT nº 100 cerca de 2% ficou retido, na peneira ABNT nº 200 cerca de 12% ficou retido; já na peneira ABNT nº 325 ficou retido cerca de 35%, passando o complemento que é 65%.

Podemos observar que apenas a cal hidratada II (20%) foge às especificações da NBR-7175 (1981), que é de no máximo 15% de resíduo em peneira ABNT nº 200.

Caulim - observa-se que o material praticamente não apresentou resíduo nas peneiras ABNT nº 50 e 100. Na peneira ABNT nº 200 cerca de 1% ficou retido; já na peneira ABNT nº 325 ficou retido cerca de 3%, passando o complemento que é de 97%.

Pozolana 750°C - observa-se que o material apresentou resíduos de aproximadamente 7%, 11%, 15% e 18%, nas peneiras ABNT nº 50, 100, 200 e 325 respectivamente, passando o complemento da peneira ABNT nº 325 que é de 82%.

Pozolana 800°C - observa-se que o material apresentou resíduos de aproximadamente 6%, 10%, 16% e 27%, nas peneiras ABNT nº 50, 100, 200 e 325 respectivamente, passando o complemento da peneira ABNT nº 325 que é de 73%.

Pozolana 850°C - observa-se que o material apresentou resíduos de aproximadamente 7%, 13%, 19% e 38%, nas peneiras ABNT nº 50, 100, 200 e 325 respectivamente, passando o complemento da peneira ABNT nº 325 que é de 62%.

Pozolana 900°C - observa-se que o material apresentou resíduos de aproximadamente 7%, 12%, 17% e 39%, nas peneiras ABNT nº 50, 100, 200 e 325 respectivamente, passando o complemento da peneira ABNT nº 325 que é de 61%.

Pozolana 950°C - observa-se que o material apresentou resíduos de aproximadamente 14%, 21%, 28% e 46%, nas peneiras ABNT nº 50, 100, 200 e 325 respectivamente, passando o complemento da peneira ABNT nº 325 que é de 54%.

Podemos observar que as pozolanas 750 e 800°C são as que apresentam granulometria mais fina. Segundo especificações da ASTM C618 (1985), o valor máximo permitido para resíduo em peneira de mesh 325 é de 34%; logo, apenas as pozolanas 750 e 800°C atendem a estas especificações.

4.1.6- Massa Específica Real

A Tabela 2, apresenta os valores obtidos de massa específica real, para as cais, pozolanas e cimentos Portland.

Os resultados obtidos para as cais variam de 2,01 g/cm³ (Cimencal) a 2,28 g/cm³ (Calcimento), as outras duas cais apresentam valores bem próximos (2,07 e 2,09 g/cm³), estes valores aproximam-se bastante dos obtidos por Cincotto et alli (1985), para cais utilizadas em argamassa de cimento, cal e areia.

O caulim apresenta massa específica real de $2,65 \text{ g/cm}^3$, bastante próximo aos estudados por Kiyohara et alli (1974), que apresentaram valores de 2,60 a $2,62 \text{ g/cm}^3$.

Para as pozolanas os resultados variam de $2,40 \text{ g/cm}^3$ (pozolana 850 e 900°C) a $2,72 \text{ g/cm}^3$ (pozolana 750°C), as pozolanas 800 e 950°C apresentam valores de 2,43 e $2,41 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Valores de 2,51 a $2,73 \text{ g/cm}^3$ para pozolanas com diferentes conteúdos de argilominerais foram apresentados por Zampieri (1989).

Os cimentos Portland, apresentam massa específica real de $2,94 \text{ g/cm}^3$ (pozolânico) e de $2,72 \text{ g/cm}^3$ (comum). Silva et alli (1991), estudou o poder aglomerante da escória de alto-forno granulada em comparação ao cimento Portland comum, e obteve valor de $2,91 \text{ g/cm}^3$ para a mesma, o que aproxima-se bastante do encontrado para o cimento Portland pozolânico.

4.1.7- Área Específica

A Tabela 2, apresenta os valores de área específica obtidos para as cais, caulim, pozolanas e cimentos Portland.

Os resultados obtidos para as cais variam de $0,64 \text{ m}^2/\text{g}$ (Calcimento) a $1,46 \text{ m}^2/\text{g}$ (Cimencal); a cal hidratada I e a cal hidratada II, apresentam respectivamente $0,73$ e $0,90 \text{ m}^2/\text{g}$

A cimencal apesar de possuir o menor índice de hidraulicidade (0,12), é provavelmente a mais reativa das cais.

O caulim apresenta área específica de $1,25 \text{ m}^2/\text{g}$, bem abaixo do valor encontrado por Rodrigues e Ferreira (1992), que é de $2,4 \text{ m}^2/\text{g}$, para caulins de mesma procedência.

Para pozolanas os resultados variam de $1,07 \text{ m}^2/\text{g}$ (pozolana 950°C) a $1,39 \text{ m}^2/\text{g}$ (pozolana 800°C); as pozolanas 750, 800 e 850°C apresentam resultados de superfície específica ($1,37$; $1,39$ e $1,30 \text{ m}^2/\text{g}$ respectivamente)

maiores que as pozolanas 900 e 950°C (1,25 e 1,07 m²/g), o que já era previsto por Souza Santos (1975).

Os cimentos Portland, apresentam valores de 0,28 m²/g (comum) e 0,46 m²/g (pozolânico); as especificações aceitam valores de no mínimo 0,26 m²/g.

4.1.8- Análise Térmica Diferencial - ATD

Os resultados obtidos pela análise térmica diferencial (ATD) estão contidos na Figura 1; será feita a análise de cada uma das curvas de modo a melhor evidenciá-las.

Curva ATD 1

Calcimento - nessa curva pode-se observar a presença de um pequeno pico endotérmico a 90°C, característico da perda de umidade; grande pico endotérmico a 525°C, característico da perda de hidroxilas do Ca(OH)₂; grande pico endotérmico a 895°C, característico da decomposição de CaCO₃.

Curva ATD 2

Cal hidratada I - nessa curva pode-se observar a presença de um grande pico endotérmico a 543°C, característico da perda de hidroxilas do Ca(OH)₂; grande pico endotérmico a 875°C, característico da decomposição de CaCO₃.

Curva ATD 3

Cal hidratada II - nessa curva pode-se observar a presença de um grande pico endotérmico a 527°C, característico da perda de hidroxilas do Ca(OH)₂; grande pico endotérmico a 897°C, característico da decomposição de CaCO₃.

Curva ATD 4

Cimencal - nessa curva pode-se observar a presença de um pequeno pico endotérmico a 95°C, característico da perda de umidade; pequena banda endotérmica com máximo em 375°C, característico da perda de hidroxilas do $Mg(OH)_2$; grande pico endotérmico a 525°C, característico da perda de hidroxilas do $Ca(OH)_2$; grande pico endotérmico a 895°C, característico da decomposição de $CaCO_3$.

Deve-se salientar que há presença de hidróxido de magnésio apenas na Cimencal e que para todas as cais, o calcário original foi tratado termicamente de maneira imprópria, quando da obtenção do óxido de cálcio no processo produtivo.

Curva ATD 5

Caulim - nessa curva pode-se observar a presença de um pequeno pico endotérmico a 93°C, característico da perda de umidade; grande pico endotérmico a 585°C, característico da perda de hidroxilas; pequeno pico exotérmico a 953°C, característico da nucleação de mulita.

Curva ATD 6

Pozolana 750°C - nessa curva pode-se observar a presença de grande pico exotérmico a 945°C, característico da nucleação de mulita.

Curva ATD 7

Pozolana 800°C - nessa curva pode-se observar a presença de grande pico exotérmico a 945°C, característico da nucleação de mulita.

Curva ATD 8

Pozolana 850°C - nessa curva pode-se observar a presença de grande pico exotérmico a 945°C, característico da nucleação de mulita.

Curva ATD 9

Pozolana 900°C - nessa curva pode-se observar a presença de pequeno pico exotérmico a 955°C, característico da nucleação de mulita.

Curva ATD 10

Pozolana 950°C - não observa-se a presença de picos, devido ao material ter sido previamente tratado a 950°C.

Para as pozolanas não se observa a presença do pico característico da perda de hidroxilas, o que significa que as mesmas foram bem calcinadas, além de que, com o aumento da temperatura de calcinação, podemos observar que ocorreu o decréscimo e desaparecimento do pico característico da nucleação de mulita.

4.1.9- Análise Termogravimétrica - ATG

A Figura 2 mostra a perda de massa com a temperatura (ATG) das cais pozolânicas industriais. Na Tabela 4 podemos observar que: a Cimencal apresenta o maior teor de $Mg(OH)_2$ (5,4%), e as demais apresentam valores de 2,1% a 2,2%; para o teor de $Ca(OH)_2$ a cal hidratada I apresenta valor de 75,8% e as outras apresentam valores de 26,7% (Calcimento) a 55,0% (cal hidratada II) e para o teor de $CaCO_3$ as cais apresentam valores de 25,8% (cal hidratada I) a 62,0% (Calcimento).

4.2- Ensaio tecnológicos

4.2.1- Determinação de Pega

As Tabelas 5a e 5b, apresentam os resultados obtidos para determinação de início e final de pega para as cais pozolânicas industriais e os cimentos Portland, e para as misturas do Aglomerante II respectivamente.

Para as cais podemos observar que o início de pega varia de 6,5h (Cimencal) a 7,0h (cal hidratada II); já o final de pega ocorreu entre 45,6h (Cimencal) e 47,5h (cal hidratada I). Podemos verificar que para as cais, a duração da pega não ultrapassa 2 dias, o que contradiz as pesquisas estatísticas de Vicat, que para cais fracamente e medianamente hidráulicas, a duração de pega leva de 2 a 3 semanas e de 1 a 4 semanas respectivamente, Leprevost (1953).

Para os cimentos Portland, podemos observar que o início de pega se dá em 1,0h para o pozolânico e em 1,3h para o comum, e o final de pega se deu em 6,0h para o pozolânico e em 6,5h para o comum. Apenas os valores para início de pega satisfazem as especificações da NBR-5732, (1988), que são de no mínimo 1,0h; já os de final de pega são de no mínimo 10h.

Para as misturas do Aglomerante II, podemos observar que o início de pega varia de 7,0h (para hidraulicidade de 0,14) a 8,5h (para hidraulicidade de 0,46), e o final de pega varia de 23,4h (para hidraulicidade de 0,52) a 47,6h (para hidraulicidade de 0,14). Podemos verificar que com o aumento de hidraulicidade das misturas do Aglomerante II, ocorreu um decréscimo na duração da pega, ou seja, baixou de aproximadamente de 2 dias para 1 dia, o que não pôde ser observado para o início de pega, pois durante a realização dos ensaios, a temperatura ambiente era muito inconstante.

4.2.2- Resistência à Compressão Simples - RCS

As Tabelas 6, 7a, 7b, 7c, 7d, 7e, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 mostram os valores obtidos para RCS das cais pozolânicas industriais, cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 750°C (CPA750), cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 800°C (CPA800), cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 850°C (CPA850), cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 900°C (CPA900), cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 950°C (CPA950), misturas do Aglomerante I, misturas do Aglomerante II, misturas do Aglomerante III, misturas do Aglomerante IV, misturas do Aglomerante V e misturas do Aglomerante VI respectivamente.

Cais pozolânicas industriais - a Tabela 6 apresenta os resultados de RCS, para estas cais. Podemos observar que para idades de 7 dias, a cal hidratada I apresenta o menor valor de RCS (0,26 MPa); já a cal hidratada II apresenta o maior valor (0,53 MPa); para idade de 28 dias a Cimencal apresentou o maior valor de RCS (1,74 MPa) distanciando-se das demais que variam de 0,37 a 0,85 MPa; para a idade de 60 dias a Cimencal apresenta valor de RCS de 2,21 MPa e a Calcimento apresenta valor de RCS bem próximo (2,11 MPa) ; já a cal hidratada I apresenta o menor valor de RCS (1,79 MPa).

Sendo importante observar que para as cais pozolânicas industriais os valores não aumentam com os índices de hidraulicidade; isto se deve ao fato das cais terem diferentes procedências, ou seja, a Cimencal (CIGRA) foi provavelmente produzida em temperatura superior às demais (Dolomil).

CPA750 - podemos observar na Tabela 7a, que para as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 750°C, para idade de 7 dias, os resultados de RCS

variam de 0,66 a 7,60 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 1,14 a 12,76 MPa e para a idade de 60 dias, os valores de RCS variam de 1,76 a 13,92 MPa.

CPA800 - podemos observar na Tabela 7b, que para as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 800°C, para idade de 7 dias, os resultados de RCS variam de 0,74 a 7,96 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 1,21 a 15,14 MPa e para a idade de 60 dias, os valores de RCS variam de 1,90 a 17,04 MPa.

CPA850 - podemos observar na Tabela 7c, que para as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 850°C, para idade de 7 dias, os resultados de RCS variam de 0,41 a 5,24 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,88 a 6,01 MPa e para a idade de 60 dias, os valores de RCS variam de 1,71 a 8,12 MPa.

CPA900 - podemos observar na Tabela 7d, que para as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 900°C, para idade de 7 dias, os resultados de RCS variam de 0,21 a 4,61 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,24 a 5,61 MPa e para a idade de 60 dias, os valores de RCS variam de 0,43 a 6,12 MPa.

CPA950 - podemos observar na Tabela 7e, que para as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 950°C, para idade de 7 dias, os resultados de RCS variam de 0,15 a 0,89 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,21 a 1,76 MPa e para a idade de 60 dias, os valores de RCS variam de 0,52 a 4,09 MPa.

É importante salientar que para todas as cais pozolânicas artificiais, verifica-se o aumento de RCS com os índices de hidráulidade. De maneira geral, podemos observar que as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolana a 800°C (CPA800) apresentam os maiores valores de RCS para todas as idades.

Aglomerante I - podemos observar na Tabela 8, que as misturas de cal hidratada I e cimento Portland pozolânico, para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,26 a 8,39 MPa; para idades de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,37 a 10,12 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 1,08 a 10,36 MPa.

Sendo importante salientar que apesar da mudança na amostra da cal, ainda assim é possível observar o aumento da RCS com os índices de hidráulidade.

Aglomerante II - podemos observar na Tabela 9, que as misturas de cal hidratada II e pozolana 800°C, para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,42 a 5,83 MPa; para idades de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,85 a 9,86 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 1,05 a 10,21 MPa.

Para este aglomerante, os valores de RCS aumentam com os índices de hidráulidade. Comparando o Aglomerante I e o Aglomerante II, podemos verificar que o Aglomerante II possui as melhores resistências até o índice de hidráulidade de 0,36; Além de possuir percentuais de pozolana 800 °C muito mais baixo que os percentuais de cimento Portland pozolânico.

Aglomerante III - podemos observar na Tabela 10, que as misturas de cal hidratada II e cimento Portland comum, para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,53 a 18,79 MPa; para idades de 28 dias, os valores de RCS variam

de 0,65 a 31,56 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 0,65 a 35,03 MPa.

Devemos salientar que os valores de 18,79; 31,56 e 35,03 MPa são referentes a RCS para 7, 28 e 60 dias respectivamente, do cimento Portland comum puro, ou seja, sem adição de cal hidratada II. Da mesma forma que o Aglomerante II, este também tem sua resistência aumentada com os índices de hidraulicidade.

Comparando-se Aglomerante II com o Aglomerante III, podemos verificar que o segundo possui as melhores resistências, mas em troca o percentual de pozolana 800°C é bem inferior ao percentual de cimento Portland comum, o que torna o Aglomerante II mais viável economicamente.

Aglomerante IV - podemos observar na Tabela 11, que as misturas de cal hidratada II, cimento Portland pozolânico (25%) e pozolana 800°C (75%), para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,34 a 4,60 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,53 a 8,77 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 0,82 a 9,60 MPa.

Aglomerante V - podemos observar na Tabela 12, que as misturas de cal hidratada II, cimento Portland pozolânico (50%) e pozolana 800°C (50%), para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,53 a 6,92 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,85 a 9,12 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 1,44 a 12,88 MPa.

Aglomerante VI - podemos observar na Tabela 13, que as misturas de cal hidratada II, cimento Portland pozolânico (75%) e pozolana 800°C (25%), para idade de 7 dias, os valores de RCS variam de 0,50 a 12,03 MPa; para idade de 28 dias, os valores de RCS variam de 0,80 a 13,09 MPa, e para a idade de 60 dias os valores de RCS variam de 1,08 a 17,82 MPa.

Da mesma forma que os aglomerantes anteriores, estes também tiveram suas resistências aumentadas com o índice de hidráulicidade.

Comparando o Aglomerante IV, o Aglomerante V e o Aglomerante VI, podemos verificar que o Aglomerante IV, possui resistências bem próximas às do Aglomerante V e VI, além de ter percentuais de cimento Portland pozolânico bem menores que os demais, o que o torna mais viável economicamente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Aglomerantes tradicionais e aglomerantes alternativos, estes últimos produzidos artificialmente a partir de misturas em diversas proporções de cal, cimento Portland pozolânico, cimento Portland comum e pozolanas (obtidas artificialmente a partir de caulim calcinado a temperatura de 750, 800, 850, 900 e 950°C), foram estudados no decorrer deste trabalho, com o objetivo de desenvolver-se aglomerantes intermediários entre cal hidratada e o cimento Portland.

5.1- Cais

Tratam-se de cais calcílicas carbonatadas, com hidraulicidades compreendidas entre fracamente e medianamente hidráulicas e duração de pega inferior a 48 horas.

A Cimencal é a menos densa entre elas, com a maior área específica, logo é a mais reativa; apesar de possuir o menor índice de hidraulicidade, é a que apresentou os maiores valores de RCS para 28 e 60 dias.

5.2- Caulim

Trata-se de um caulim caulínítico, baixa área específica.

5.3- Pozolanas

As pozolanas obtidas a 750 e 800°C são as que apresentam granulometria mais fina.

A pozolana 800°C é a de maior área específica, o que indica ser a de maior reatividade.

5.4- Cimentos Portland

Os cimentos estudados, encontram-se dentro das especificações estabelecidas pela NBR-5732 (1988), com exceção no que diz respeito ao ensaio de pega.

5.5- Cais pozolânicas artificiais - CPA

Os valores de RCS aumentam com o índice de hidraulicidade das CPA.

As CPA800 apresentam os maiores valores de RCS em relação às obtidas com as outras pozolanas.

Os valores de RCS para as CPA aumentam até às CPA800, depois decrescem com o aumento da temperatura de obtenção das pozolanas.

5.6- Misturas de Aglomerantes

Com o aumento na hidraulicidade das misturas, aumentam também os valores de RCS para todos os aglomerantes.

Quanto à prefixação dos índices de hidraulicidade para o cálculo das percentagens, podemos concluir que é inviável devido às limitações quando um dos componentes possui alta hidraulicidade.

Comparando-se os aglomerantes I, II, III, podemos concluir que:

-O Aglomerante II apresenta maiores valores de RCS que o Aglomerante I até hidraulicidade de 0,36.

-O Aglomerante III apresenta maiores valores de RCS que o Aglomerante II; mas o Aglomerante II é mais viável economicamente, devido aos baixos teores de pozolana 800°C, em comparação aos altos teores de cimento Portland utilizados nos outros dois aglomerantes.

Comparando o Aglomerante IV, V, VI, podemos concluir que:

-O Aglomerante IV apresenta valores de RCS bem próximos aos do Aglomerante V;

-O Aglomerante VI apresenta altos valores de RCS, mas é inviável economicamente, devido aos altos valores percentuais de cimento Portland utilizados. Logo, Aglomerante IV é o de melhor viabilidade econômica.

Comparando agora, o Aglomerante II e IV podemos concluir que o Aglomerante II é o de melhor viabilidade econômica.

De modo geral podemos concluir que as cais pozolânicas artificiais obtidas com pozolanas a 800°C são bastante promissoras, devido ao baixo custo energético necessário à fabricação das pozolanas, se comparados com o alto custo dos cimentos; podendo também, serem aditivadas com cimento quando se desejar altas resistências, diminuindo assim o consumo de materiais dispendiosos, como são atualmente considerados as cais e os cimentos Portland.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A fim de dar continuidade a esta pesquisa, abaixo encontram-se relacionadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) utilizar maiores percentuais de pozolana a fim de verificar o comportamento mecânico destas cais.
- b) determinar o ótimo teor de pozolana para o maior valor de resistência à compressão simples.
- c) estudar a resistência à tração em argamassas de cal pozolânica e areia.
- d) verificar o comportamento de argamassas com diferentes traços de cal pozolânica e areia.
- e) estudar diferentes fatores água-cimento.
- f) estudar o comportamento em concretos de baixa resistência para pequenas obras de engenharia.
- g) fazer uma melhor caracterização da cal utilizada, seguindo a norma NBR-7175, de cal hidratada para argamassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
Areia Normal para Ensaio de Cimento
NBR-7214, 1982
- _____ - Cal Hidratada para Argamassa
NBR-7175, 1981.
- _____ - Cimento Portland Comum - Especificação
NBR-5732, 1988.
- _____ - Cimento Portland Pozolânico - Especificação
NBR-5736, 1986.
- _____ - Determinação da Finura de Cimento Portland Mediante Emprego
do Aparelho de Permeabilidade do Ar.
NBR-7224, 1984.
- _____ - Determinação de Massa Específica Real
NBR-6474, 1984.
- _____ - Ensaio de Cimento Portland
NBR-7215, 1982.
- _____ - Granulometria por Peneiramento e Sedimentação
NBR-7181, 1984.
- _____ - Teor de Umidade
NBR-64, 1957.

ASTM - American Society For Testing and Materials,
Standard Sand, C778-80a, Philadelphia, 1987.

____ - Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolanic for Use as
a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete,
C618, Philadelphia, 1985.

Andriolo, F. R., A Utilização de Pozolana na Construção do Conjunto
Hidroelétrico de Urubupungá, São Paulo, 1975.

Bauer, F. L. A., Materiais de Construção, Editora Livros Técnicos e Científicos,
2ª Edição, Rio de Janeiro, 1985.

Bogue, R. H., The Chemistry of Portland Cement, Reinhold, New York, 1947.

Calleja Carrete, J., Las Puzolanas, Madrid, 1958

Calvet, E., Química General Aplicada a la Indústria, Química Inorgânica, Tomo
I, parte II, p.873-874, Salvat Editores S.A, Barcelona, 1936.

Castro Sobrinho, J. F., Pozolana como Material de Construção: Sua Fabricação
Artificial em Urubupungá, São Paulo, 1970.

Cincotto, M. A., Estudo da Composição Química da Cal Hidratada Produzida
no Estado de São Paulo, Dissertação de mestrado, EPUSP, , São Paulo,
1977.

____, Características da Cal para Argamassas, A Construção São Paulo,
(2220-2224), Editora PINI, 1990.

_____, Marques, J. C., Helene, P. R. L., Propriedades das Argamassas Cimento/Cal/Areia, In: Seminário sobre Argamassas, Instituto Brasileiro de Concreto, São Paulo, 1985.

_____, Kaupatez, R. M. Z., Seleção de Materiais Quanto à Atividade Pozolânica, A construção São Paulo (1905): 15-18, 1984.

_____, Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil, A construção São Paulo (1855): 27-30, 1983.

Coutinho, A. S., Pozolanas, Betões com Pozolanas e Cimentos Pozolânicos, LNEC, Lisboa, 1958.

Davis, A. C., Portland Cement, Concrete Pub., London, 1934.

Ferreira, H. C., Caracterização e Aplicações Industriais de Argilas, Caulins e Feldspatos do Nordeste Brasileiro (Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte), Tese de doutorado, DEQ/EPUSP, São Paulo, 1973.

Ghorab, H., Rogai, J. & Antar, A., Surface and Bulk Properties of Ancient Egyptian Mortars. Part I: X-Ray Diffraction Studies. Cement and Concrete Research, 16(6): 813-22, Elmsford, 1986.

Giolito, I., Métodos Termoanalíticos de Investigação I- Análise Térmica Diferencial, Departamento de Química Fundamental, Instituto de Química, USP, 1974.

Gitahy, H. S., O Problema dos Agregados para os Concretos da Barragem de Jupia, IPT, São Paulo, 1963.

Gonzales, G. M., Teoria e Problemas de Materiais de Construção, Editora Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, 1978.

Gooding, P. & Halstead, P. E., The Early History of Cement in England, In: Proceeding of the International Symposium on the chemistry of cement, 3 rd, London, 1952.

Guimarães, J. E. P., A Indústria da Cal no Brasil, Associação Brasileira dos Produtores de cal, São Paulo, 1990.

_____, Terminologia de Calcários-Dolomitos e da Cal, Associação Brasileira dos Produtores de cal, São Paulo, 1989.

Indian Standards Institution (IS), Specification for Burnt Clay pozzolana, IS-1344, New Delhi, 1968.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações, Tecnologia de Aditivos: Curso realizado de 21 a 25 de março, Vol I, São Paulo, 1983.

Jawed, I., Skalny, J. & Youg, J. F., Hydration of Portland Cement, In: BARNES, Ed: Structure and Performance of Cements, Applied Science, London, 1983.

Kihara, Y. & Shukuzawa, J. K., Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil, Cerâmica, 28(145), 15 (1982).

_____, & Zampieri, V. A., A Experiência Brasileira na Pesquisa e Produção de Pozolana de Argila Calcificada, In: 36º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Vol II, p.923-929, Caxambu, 1992.

Kiyohara, P. K., Souza Santos, P., Souza Santos, H. e Ferreira, H. C., Algumas Propriedades Físico-Químicas de Caulins da Amazônia (Rio Jari e Rio Capim) e do Estado da Paraíba (Campina Grande), 7ª Convenção Anual da Associação Brasileira de Celulose e Papel, p.49, São Paulo, 1974.

Lea, F. M., The Chemistry of Cement and Concrete, 3. ed., Edward Arnold, London, 1970.

_____, The Chemistry of Pozzolans, In: Simposium on the Chemistry of Cement, Stockhln, 1938.

Leprevost, A., Cal Hidráulica, Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, Curitiba, 1953.

Massaza, F., Chimica delle Aggiunte Pozzolaniche e dei Cementi di Miscela, Il Cement, 73(1): 3-38; gen./mar., Roma, 1976.

Mielenz, R. C., Wilte, L. P. e Glantz, O. J., Effect of Calcination on Natural Pozzolans, In: ASTM Symposium on Use of Pozzolan Materials in Mortars and Concretes, p. 43-92, Philadelphia, 1949.

Papadakis, M. & Venuat, M., Empleo en los Cementos y Hormigones, Fabricação, Características y Aplicaciones de los Diversos Tipos de Cemento, Técnicos Asociados, p. 170-1, Barcelona, 1968.

Petrucci E. G. R., Concreto de Cimento Portland, Editora Globo, Porto Alegre, 1979.

_____, Materiais de Construção, Editora Globo, Porto Alegre, 1978.

Prizkulnic S., Estudo Tecnológico dos Cimentos Portland Brasileiros, Dissertação de mestrado, Deptº de Engenharia Química, EPUSP, São Paulo, 1977.

Rodrigues, D. P., Ferreira, H. C., Influência de Diversos Aditivos na Área Específica de Argilas Esmectíticas, Cauliníticas e Plásticas para Cerâmica Branca, In: Congresso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, São Carlos, 1992.

Ruas, A. P. L., Produção de Pozolana Artificial, In: Reunião de Técnicos da Indústria de Cimento, 25ª, ABCP, São Paulo, 1977.

Saad, M. N. A., Andrade, W. P. & Paulon, V. A., Propriedades do Concreto Massa Contendo Pozolana de Argila, In: Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), Colóquio sobre Concreto Massa, São Paulo, 1983a.

_____, Oliveira, P. J. R. & Salles, F. M., Avaliação das Propriedades Pozolânicas de Argilas e Cinzas Volantes, In: Instituto Brasileiro de Cimento (IBRACON), Colóquio sobre Concreto Massa, São Paulo, 1983b.

Scanduzzi L. & Andriollo, F. R., Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaio, PINI, São Paulo, 1986.

_____, Materiais Pozolânicos: Utilização e Benefícios, In: Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), Colóquio sobre Concreto Massa, São Paulo, 1981.

Shukuzawa, J. K., Influência das Condições de Resfriamento na Microestrutura do Clínquer e nas Propriedades do Cimento Portland, Cerâmica, 32(200), 219 (1986).

Silva, C. R., Ferreira, H. C., Estudo Comparativo entre Cais Pozolânicas, In: ⁴ Simpósio Franco-Brasileiro de Ciência dos Materiais, Ouro Preto, 1992.

_____, Neves, G. A., Ferreira, H. C., Estudo Comparativo entre Aglomerantes Pozolânicos, In: 36º Congresso Brasileiro de Cerâmica, vol II, p.915-922, Caxambú 1992.

Silva, E., Florindo, M. C. & Almeida, C., Estudo e Avaliação Comparativa do Poder Aglomerante da Escória de Alto-Forno Granulada, A construção, São Paulo, (2248), março, 1991.

Silva, M. R., Materiais de Construção, Ed. Pini, São Paulo, 1985.

Souza, J. V., Estudo de Algumas Argilas e do Caulins do Recôncavo do Estado da Bahia, Cerâmica 12 (47/48), 21 (1966).

_____, Estudos Tecnológicos de Algumas Argilas do Recôncavo do Estado da Bahia, Tese de doutoramento, EPUSP, junho de 1966.

Souza Santos, P., Argilas para Pozolanas, Cerâmica, 12(47/48), 294, (1966).

_____, Tecnologia de Argilas, Vol II, Edgard Blücher, São Paulo, 1975.

Thober, C. W. A., Northfleet, I. M. L., Krahl, C. A. & Pacheco, R. G., Obtenção de Aglomerante Hidráulico em Reator de Leito Fluidizado Multi-Estágio - Parte I, In: III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1984.

_____, Obtenção de Aglomerante Hidráulico em Reator de Leito Fluidizado Multi-Estágio - Parte II, In: III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1984.

Torres, A. F., Constituição Química do Cimento Portland, p. 17 e 18, Dissertação, São Paulo, 1941.

Verçosa, E. J., Materiais de Construção, Editora Sagra S/A, Porto Alegre, 1975.

Vorobiev, V., Matériaux de Construction, Éditions Mir, Moscou, 1967.

Webb, T. L., Kruger, J. E., Differential Thermal Analysis, Academic Press, London, 1972.

Zampieri, V. A., Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 1989.

APÊNDICE I

Para determinarmos a percentagem com que cada componente irá participar em uma mistura de hidraulicidade fixa, é necessário conhecermos alguns dados como: a hidraulicidade da mistura e a composição química de cada um dos componentes.

Como exemplo tomaremos o aglomerante I, composto pela cal hidratada I e o cimento Portland pozolânico.

Para uma mistura de hidraulicidade (i), igual a 0,22, a equação 3,1, torna-se:

$$0,22 = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + \%MgO} \quad (I.1)$$

Chamando-se de $A_m = \%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3$ e $B_m = \%CaO + \%MgO$, teremos

$$0,22 = \frac{A_m}{B_m} \quad (I.2)$$

Pela Tabela 1, temos que para a cal hidratada $A_c = 8,31$ e $B_c = 63,07$, Já para o cimento Portland pozolânico temos $A_p = 42,46$ e $B_p = 53,16$.

Onde, os subíndices m, c, p, se referem a mistura, a cal hidratada I e ao cimento Portland pozolânico, respectivamente.

Se colocarmos em um recipiente, X% de cal hidratada I e Y% de cimento pozolânico, teremos uma mistura que corresponde a

$$X\% \text{ de cal} + Y\% \text{ de cimento} = 100\% \text{ mistura}$$

ou seja

$$X + Y = 100 \% \quad (I.3)$$

Se utilizarmos X% das composições da cal hidratada I e Y% das composições do cimento Portland pozolânico, teremos:

Para cal hidratada I

$$8,31.X = A_x$$

$$63,07.X = B_x$$

Para o cimento Portland pozolânico

$$42,46.Y = A_y$$

$$53,16.Y = B_y$$

Logo, uma mistura composta por estes dois materiais terá:

$$A_m = A_x + A_y = 8,31.X + 42,46.Y$$

$$B_m = B_x + B_y = 63,071.X + 53,16.Y$$

Substituindo em (1.2), temos

$$0,22 = \frac{A_m}{B_m} = \frac{8,31.X + 42,46.Y}{63,07.X + 53,16.Y} \quad (1.4)$$

resolvendo (1.4), temos

$$11,69.Y + 13,87.X = 42,46.Y + 8,31.X$$

$$5,56.X = 30,77.Y$$

$$X = 5,53.Y$$

Substituindo (1.5) em (1.3), teremos

$$5,53.Y + Y = 100\%$$

$$Y = 15,31\% \quad (1.5)$$

$$\text{logo: } X = 100\% - 15,31\% \rightarrow X = 84,69\%$$

Aproximando os valores de X e Y teremos

$$X = 85\% \text{ e } Y = 15\%$$

Então, para que minha mistura tenha hidraulicidade de 0,22, é necessário usarmos 85% da cal hidratada I e 15% do cimento pozolânico.

TABELAS

Amostra	RI	PR	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Cimencal	1,00	27,81	5,82	0,83	0,62	54,05	6,99	0,61	2,36
Cal hidra. I	n.d.	27,80	4,06	4,17	0,08	61,07	2,00	0,04	0,83
Cal hidra. II	4,19	27,65	7,60	0,41	0,19	55,12	1,93	0,32	2,62
Calcimento	n.d.	28,52	9,36	1,64	0,31	51,54	2,00	0,30	2,03
Caulim	n.d.	13,53	46,33	38,98	0,47	traços	0,28	0,54	0,34
Cimento poz.	n.d.	2,54	28,96	10,38	3,12	50,15	3,01	0,15	0,83
Cimento com.	0,44	3,09	18,86	9,04	0,31	62,37	1,99	0,91	2,36

TABELA 1- Composição Química das Amostras.

n.d. = não determinado, poz. = pozolânico e com. = comum.

Amostra	Massa	Finura		Umidade	
	Específica (g/cm ³)	# 325 %	# 200 %	Blaine (m ² /g)	%
Cimencal	2,01	98,5	23,7	1,46	1,76
Cal hidra. I	2,07	89,6	28,4	0,73	1,01
Cal hidra. II	2,09	98,4	28,4	0,90	0,81
Calcimento	2,28	97,2	24,8	0,64	1,11
Caulim	2,65	100,0	11,6	1,25	0,60
Pozolana 750° C	2,72	85,0	16,0	1,37	n.d.
Pozolana 800° C	2,43	89,0	17,0	1,39	n.d.
Pozolana 850° C	2,40	91,0	17,0	1,30	n.d.
Pozolana 900° C	2,40	94,0	17,0	1,25	n.d.
Pozolana 950° C	2,41	98,0	20,0	1,07	n.d.
Cimento poz.	2,94	99,3	7,3	0,46	0,17
Cimento com.	2,72	98,4	8,6	0,28	2,12

TABELA 2- Caracterização Física das Amostras.

n.d. = não determinado

Peneira ABNT n°	AMOSTRA							
	Cal hidra. I		Cal hidra. II		Calcimento		Cimencal	
	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat
50	0,0	100,0	0,2	99,8	0,1	99,9	0,6	99,4
100	0,4	99,6	0,6	99,4	0,8	99,2	2,4	97,6
200	14,0	86,0	20,6	79,4	16,1	83,9	12,2	87,8
325	19,2	80,8	47,0	53,0	17,7	82,3	34,8	65,2

TABELA 3a- Composição Granulométrica das Cais Pozolânicas Industriais.

%ac = percentagem acumulada

%pat = percentagem que passa da amostra total

Peneira ABNT n°	Caulim		Pozolana 750° C		Pozolana 800° C		Pozolana 850° C		Pozolana 900° C		Pozolana 950° C	
	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat	%ac	%pat
	50	0,0	100,0	7,4	92,6	5,8	94,2	7,2	92,8	7,4	92,6	14,4
100	0,4	99,6	10,8	89,2	10,4	89,6	12,6	87,4	11,8	88,2	21,4	78,6
200	1,2	98,8	15,4	84,6	15,8	84,2	19,2	80,8	16,8	83,2	28,4	71,6
325	3,4	96,6	18,4	81,6	26,8	73,2	38,2	61,8	39,4	60,6	45,6	54,4

TABELA 3b- Composição Granulométrica do Caulim e das Pozolanas.

%ac = percentagem acumulada

%pat = percentagem que passa da amostra total

Amostra	Peso Inicial (mg)	Temperatura de Perda de Peso Observada (°C)		Perda de Peso Observada (mg)	Fase Identificada	% da fase Calculada (experimental)
		início	fim			
Cal hidra. I	31,0	350	430	0,2	Mg(OH) ₂	2,1
		430	490	23,5	Ca(OH) ₂	75,8
		490	760	8,0	CaCO ₃	25,8
Cal hidra. II	30,0	370	440	0,2	Mg(OH) ₂	2,2
		440	490	16,5	Ca(OH) ₂	55,0
		490	790	12,0	CaCO ₃	40,0
Cimencal	30,0	350	430	0,5	Mg(OH) ₂	5,4
		430	490	15,5	Ca(OH) ₂	51,7
		490	780	7,8	CaCO ₃	26,0
Calcimento	30,0	370	410	0,2	Mg(OH) ₂	2,2
		410	460	8,0	Ca(OH) ₂	26,7
		460	890	18,6	CaCO ₃	62,0

TABELA 4- Resumo da Análise Termogravimétrica das Cais Pozolânicas Industriais.

Amostra	i*	TEMPO DE PEGA	
		Início (horas)	final (horas)
Cimencal	0,12	6,5	45,6
Cal hidratada I	0,13	6,8	47,5
Cal hidratada II	0,14	7,0	47,4
Calcimento	0,21	6,7	45,7
Cimento comum	0,44	1,3	6,5
Cimento pozolânico	0,80	1,0	6,0

TABELA 5a- Determinação de Início e Fim de Pega para as Cais Pozolânicas Industriais e os Cimentos.

* i = índice de hidráulidade

AGLOMERANTE II			TEMPO DE PEGA	
Cal hidratada II %	Pozolana 800° C %	i*	Início (horas)	final (horas)
100,0	0,00	0,14	7,0	47,4
99,06	0,94	0,16	8,1	47,6
97,90	2,10	0,18	7,8	47,5
96,20	3,80	0,21	7,0	33,4
95,00	5,00	0,23	7,0	29,9
93,73	6,27	0,26	7,5	28,5
88,92	11,08	0,38	8,3	28,9
84,58	15,42	0,46	8,5	28,9
81,80	18,20	0,52	7,2	23,4

TABELA 5b- Determinação de Início e Fim de Pega para as Misturas do Aglomerante II.

* i = índice de hidráulidade

i*	CAIS POZOLÂNICAS INDUSTRIAIS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
		TEMPO DE CURA		
		7 dias	28 dias	60 dias
0,12	Cimencal	0,46	1,74	2,21
0,13	Cal hidratada I	0,26	0,37	1,79
0,14	Cal hidratada II	0,53	0,85	1,87
0,21	Calcimento	0,31	0,79	2,11

TABELA 6 - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Industriais para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

i*	Cal hidra.I %	Pozolana 750°C %	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
			TEMPO DE CURA		
			7 dias	28 dias	60 dias
0,23	93,8	6,2	0,66	1,14	1,76
0,36	87,3	12,7	5,86	8,24	8,64
0,46	82,7	17,3	6,56	9,42	12,89
0,52	80,2	19,8	7,60	12,76	13,92

TABELA 7a - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Artificiais Obtidas com Pozolana a 750° C para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

i*	Cal	Pozolana	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.I	800° C	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,23	93,8	6,2	0,74	1,21	1,90
0,36	87,3	12,7	6,06	9,27	9,51
0,46	82,7	17,3	6,55	12,47	13,26
0,52	80,2	19,8	7,96	15,14	17,04

TABELA 7b - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Artificiais Obtidas com Pozolana a 800° C para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

i*	Cal	Pozolana	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.I	850° C	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,23	93,8	6,2	0,41	0,88	1,71
0,36	87,3	12,7	3,40	4,03	6,12
0,46	82,7	17,3	3,98	4,54	6,41
0,52	80,2	19,8	5,24	6,01	8,12

TABELA 7c - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Artificiais Obtidas com Pozolana a 850° C para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

i*	Cal	Pozolana	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.I	900° C	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,23	93,8	6,2	0,21	0,24	0,43
0,36	87,3	12,7	2,99	4,65	4,79
0,46	82,7	17,3	3,83	4,82	5,38
0,52	80,2	19,8	4,61	5,61	6,12

TABELA 7d - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Artificiais Obtidas com Pozolana a 900° C para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidraulicidade

i*	Cal	Pozolana	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.I	950° C	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,23	93,8	6,2	0,15	0,21	0,52
0,36	87,3	12,7	0,62	1,42	3,24
0,46	82,7	17,3	0,72	1,56	3,62
0,52	80,2	19,8	0,89	1,76	4,09

TABELA 7e - Resistência à Compressão Simples para Cais Pozolânicas Artificiais Obtidas com Pozolana a 950° C para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidraulicidade

i*	Cal	Cimento	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.I	Pozolânico	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,13	100,0	0,0	0,26	0,37	1,79
0,16	95,0	5,0	0,30	0,68	1,08
0,18	90,0	10,0	0,76	1,08	1,22
0,21	91,1**	8,9	0,85	0,96	1,61
0,22	85,0	15,0	0,53	0,96	1,42
0,23	87,9**	12,1	1,21	1,48	2,04
0,25	80,0	20,0	0,88	2,20	2,76
0,36	66,7**	33,3	4,14	4,87	8,26
0,46	49,8**	50,2	8,39	10,12	10,36
0,52	38,0	62,0	6,03	8,14	9,63

TABELA 8 - Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante I para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidraulicidade

** Foi utilizada uma nova amostra de cal com hidraulicidade de 0,14.

i*	Cal	Pozolana	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.II	800° C	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,14	100,0	0,0	0,53	0,85	1,87
0,16	99,06	0,94	0,42	0,85	1,05
0,18	97,09	2,10	0,79	1,45	1,56
0,21	96,20	3,80	1,57	2,44	2,96
0,23	95,00	5,00	2,46	3,22	4,21
0,26	93,73	6,27	2,64	3,87	5,42
0,36	88,92	11,08	4,32	6,88	8,51
0,46	84,58	15,42	4,78	8,65	9,25
0,52	81,80	18,20	5,83	9,86	10,21

TABELA 9- Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante II para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidraulicidade

i*	Cal	Cimento	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		
	hidra.II	Comum	TEMPO DE CURA		
	%	%	7 dias	28 dias	60 dias
0,14	100,0	0,0	0,53	0,85	1,87
0,16	94,8	5,2	0,60	0,65	0,65
0,18	87,5	12,5	1,12	1,19	1,22
0,21	79,5	20,5	1,49	2,19	3,86
0,23	74,0	26,0	3,30	4,10	4,53
0,26	63,3	36,7	5,59	6,48	7,15
0,36	29,1	70,9	11,57	17,18	19,28
0,44	0,0	100,0	18,79	31,56	35,03

TABELA 10- Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante III para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

i*	Cal	Cimento	Pozolana	RCS (MPa)**		
	hidra.II	Pozolânico	800° C	TEMPO DE CURA		
	%	%(25)	%(75)	7 dias	28 dias	60 dias
0,14	100,0	0,0	0,0	0,53	0,85	1,87
0,16	98,8	0,3	0,9	0,34	0,53	0,82
0,18	97,4	0,7	1,9	0,65	0,91	1,56
0,21	95,4	1,1	3,5	0,68	0,97	1,70
0,23	94,1	1,5	4,4	1,19	2,25	2,54
0,26	92,0	2,0	6,0	1,35	2,41	3,12
0,36	86,0	3,5	10,5	3,20	4,42	5,30
0,46	80,4	4,9	14,7	4,42	6,29	6,55
0,52	77,3	5,7	17,0	4,60	8,77	9,60

TABELA 11- Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante IV para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

** RCS(MPa) = Resistência à Compressão Simples em MPa

i*	Cal	Cimento	Pozolana	RCS (MPa)**		
	hidra.II	Pozolânico	800° C	TEMPO DE CURA		
	%	%(50)	%(50)	7 dias	28 dias	60 dias
0,14	100,0	0,0	0,0	0,53	0,85	1,87
0,16	98,4	0,8	0,8	0,65	0,74	1,44
0,18	96,6	1,7	1,7	0,68	1,01	1,62
0,21	93,8	3,1	3,1	1,17	1,66	3,67
0,23	92,0	4,0	4,0	2,12	2,69	4,70
0,26	89,2	5,4	5,4	3,20	3,53	5,97
0,36	80,8	9,6	9,6	3,85	5,37	8,57
0,46	73,0	13,5	13,5	6,03	8,88	11,66
0,52	68,6	15,7	15,7	6,92	9,12	12,88

TABELA 12- Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante V para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidráulidade

** RCS(MPa) = Resistência à Compressão Simples em MPa

i*	Cal	Cimento	Pozolana	RCS (MPa)**		
	hidra.II	Pozolânico	800° C	TEMPO DE CURA		
	%	%(75)	%(25)	7 dias	28 dias	60 dias
0,14	100,0	0,0	0,0	0,53	0,85	1,87
0,16	97,6	1,8	0,6	0,50	0,80	1,08
0,18	94,7	4,0	1,3	0,67	0,93	1,31
0,21	90,5	7,1	2,4	1,34	1,76	2,21
0,23	87,6	9,3	3,1	1,63	2,03	2,79
0,26	83,4	12,5	4,1	1,84	3,30	4,09
0,36	69,8	22,6	7,6	6,26	7,96	8,53
0,46	56,7	32,5	10,8	8,85	11,40	13,41
0,52	49,2	38,1	12,7	12,03	13,09	17,82

TABELA 13- Resistência à Compressão Simples das Misturas do Aglomerante VI para Tempos de Cura de 7 Dias, 28 Dias e 60 Dias.

* i = índice de hidraulicidade

** RCS(MPa) = Resistência à Compressão Simples em MPa

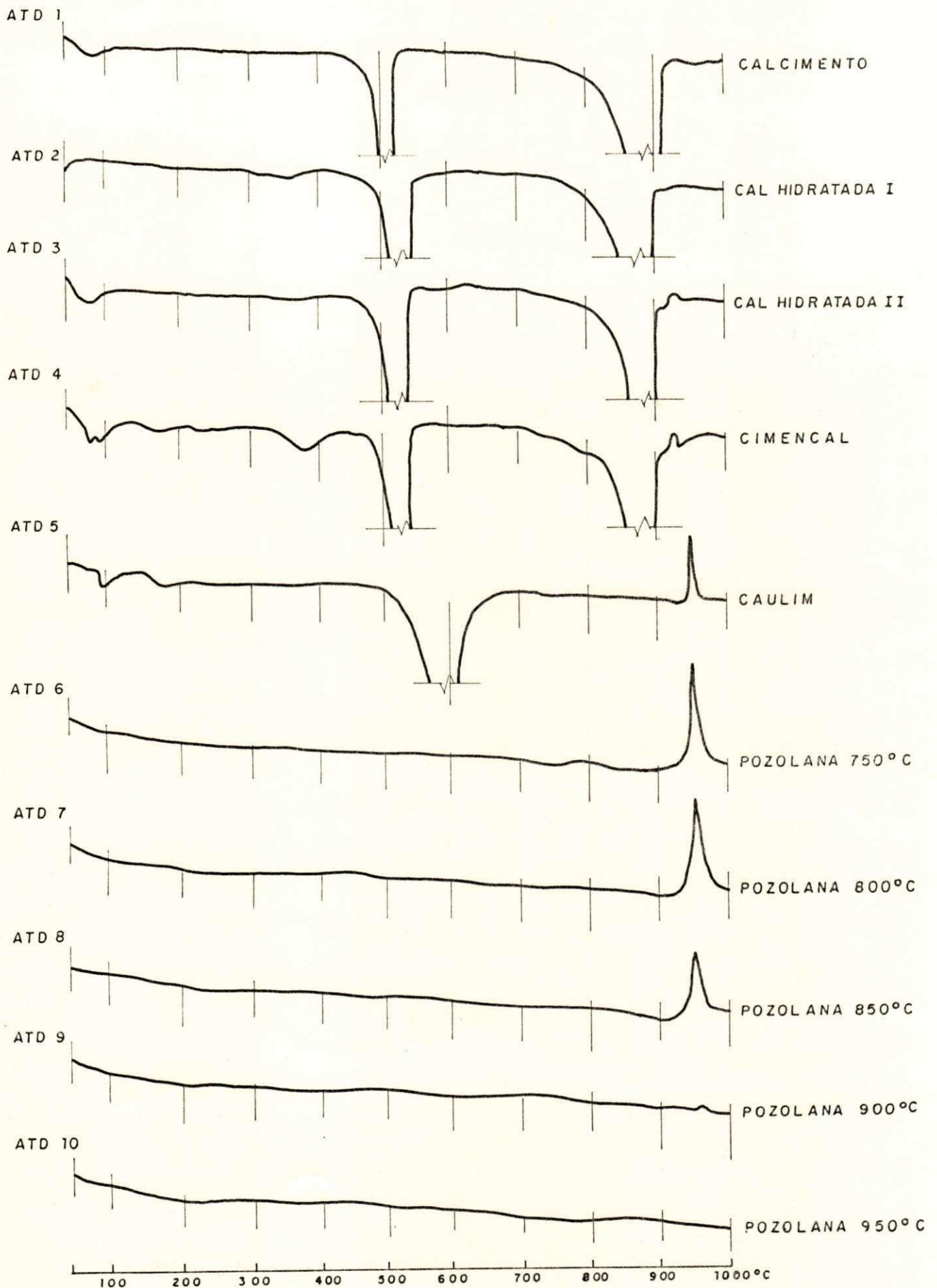


FIGURA 1 — TERMOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CAIS POZOLÂNICAS
 INDUSTRIAIS, CAULIM E POZOLANAS.

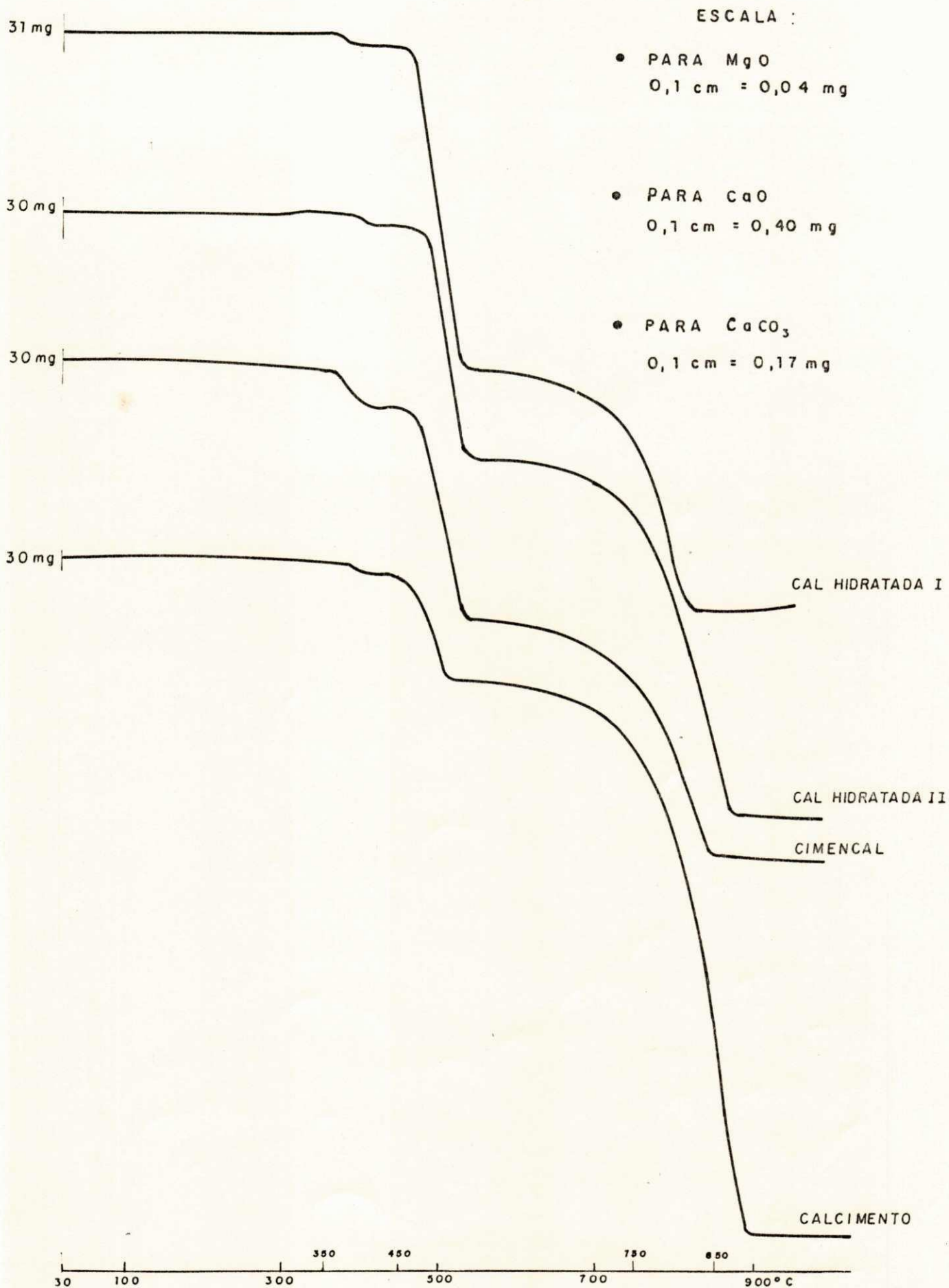


FIGURA 2 - CURVAS DE ATG DAS CAIS POZOLÂNICAS INDUSTRIAIS ATÉ 900°C

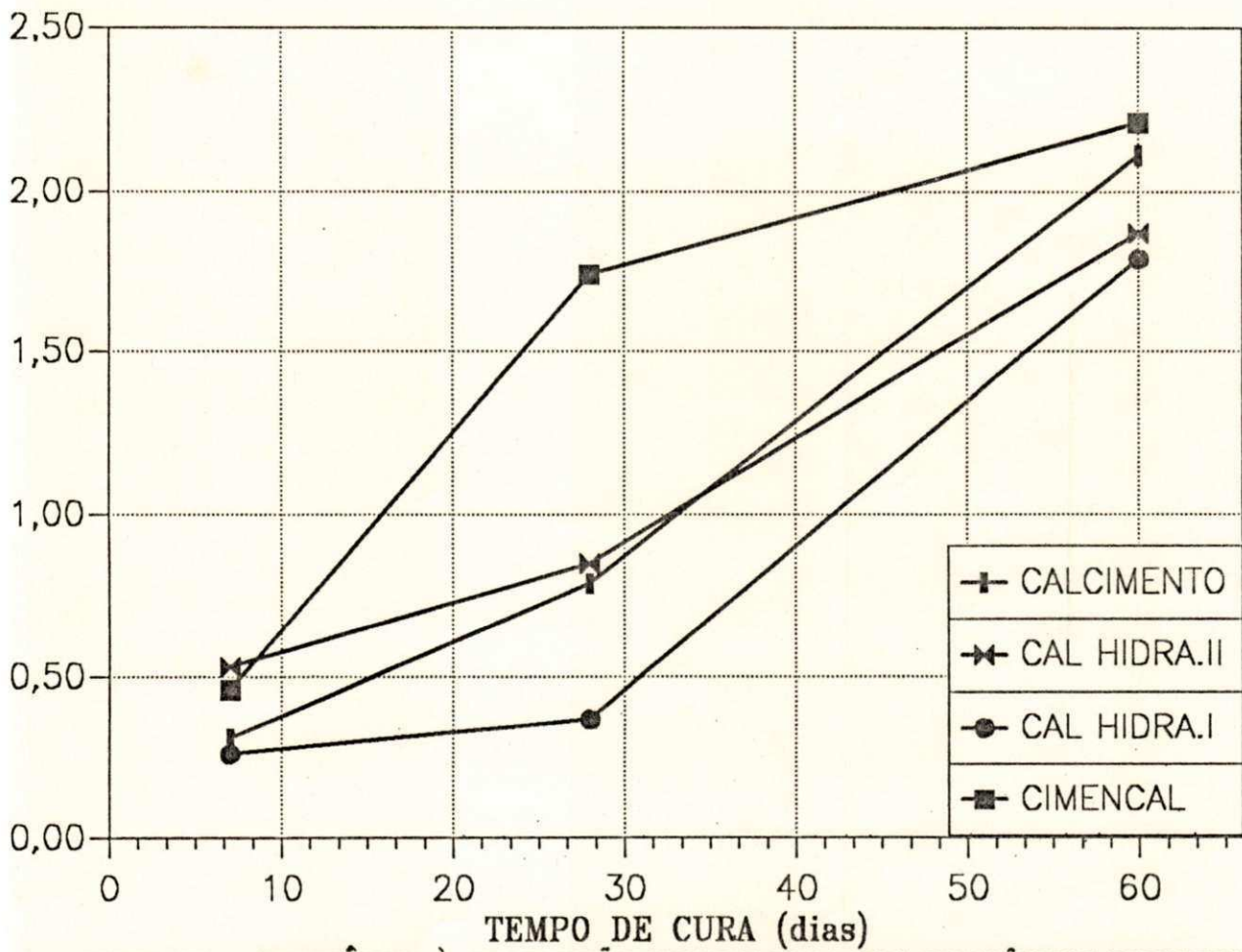


FIGURA 3 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA CAIS POZOLÂNICAS INDUSTRIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

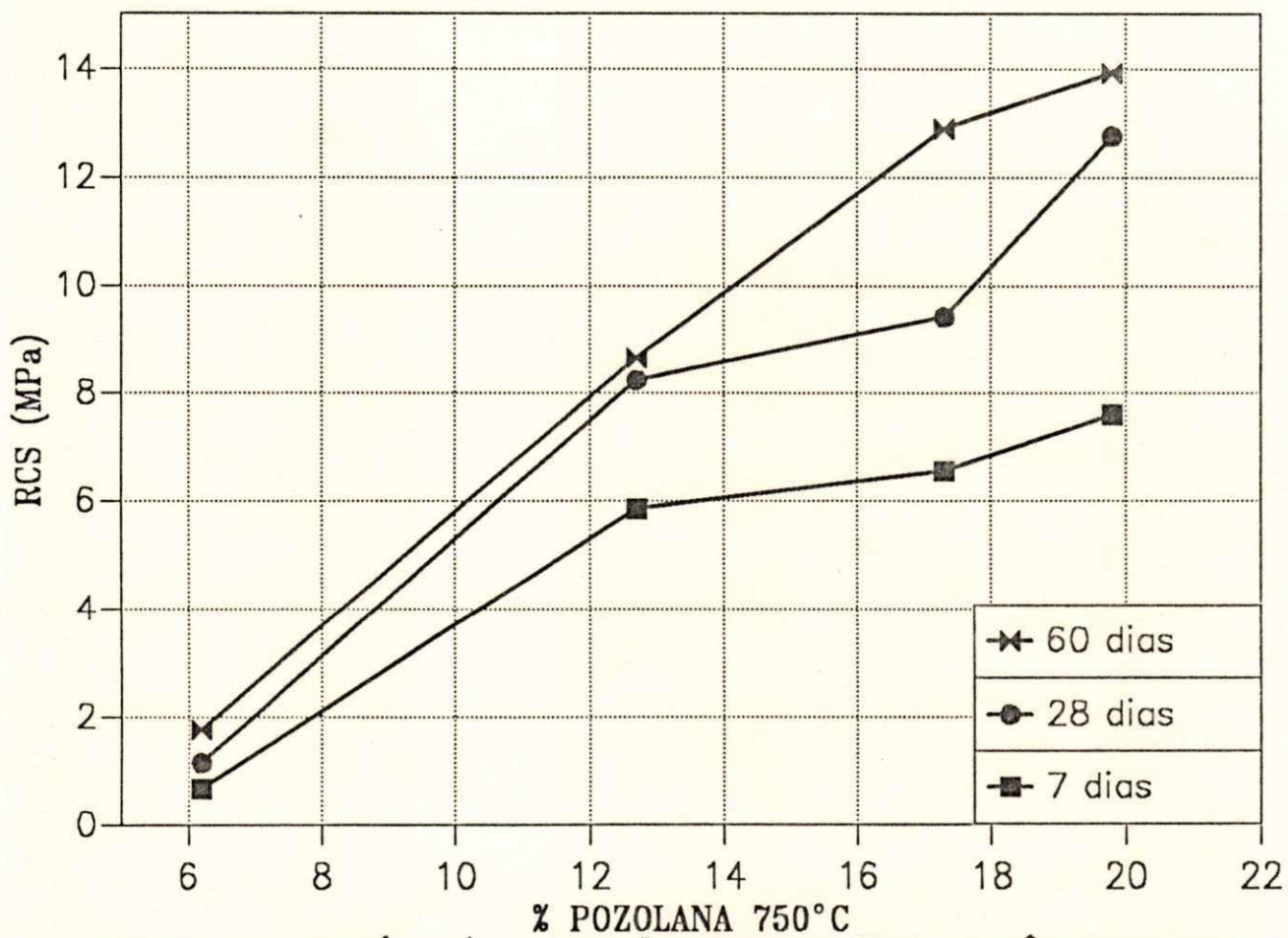


FIGURA 4a - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CAIS POZOLÂNICAS ARTIFICIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

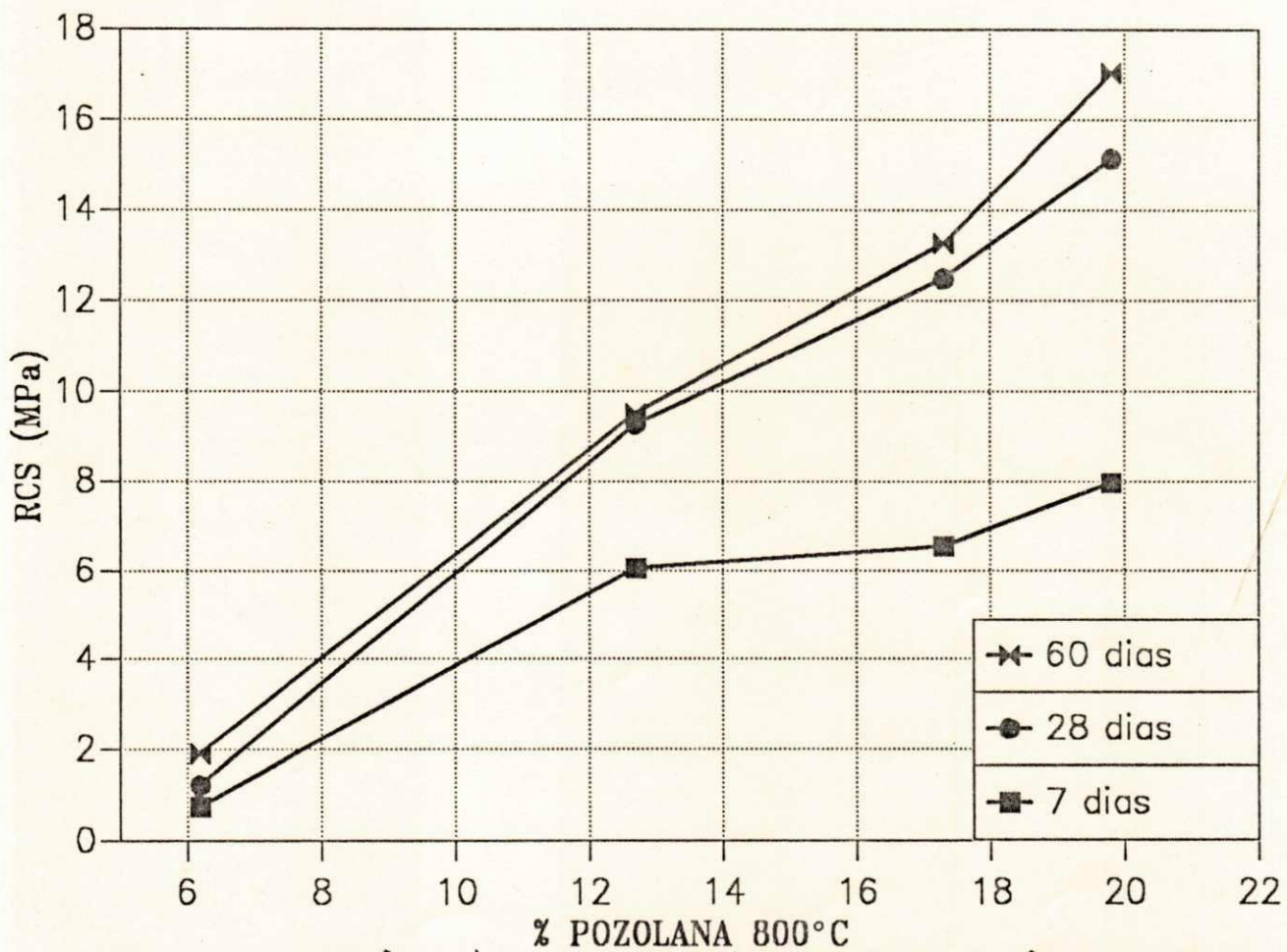


FIGURA 4b - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CAIS POZOLÂNICAS ARTIFICIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

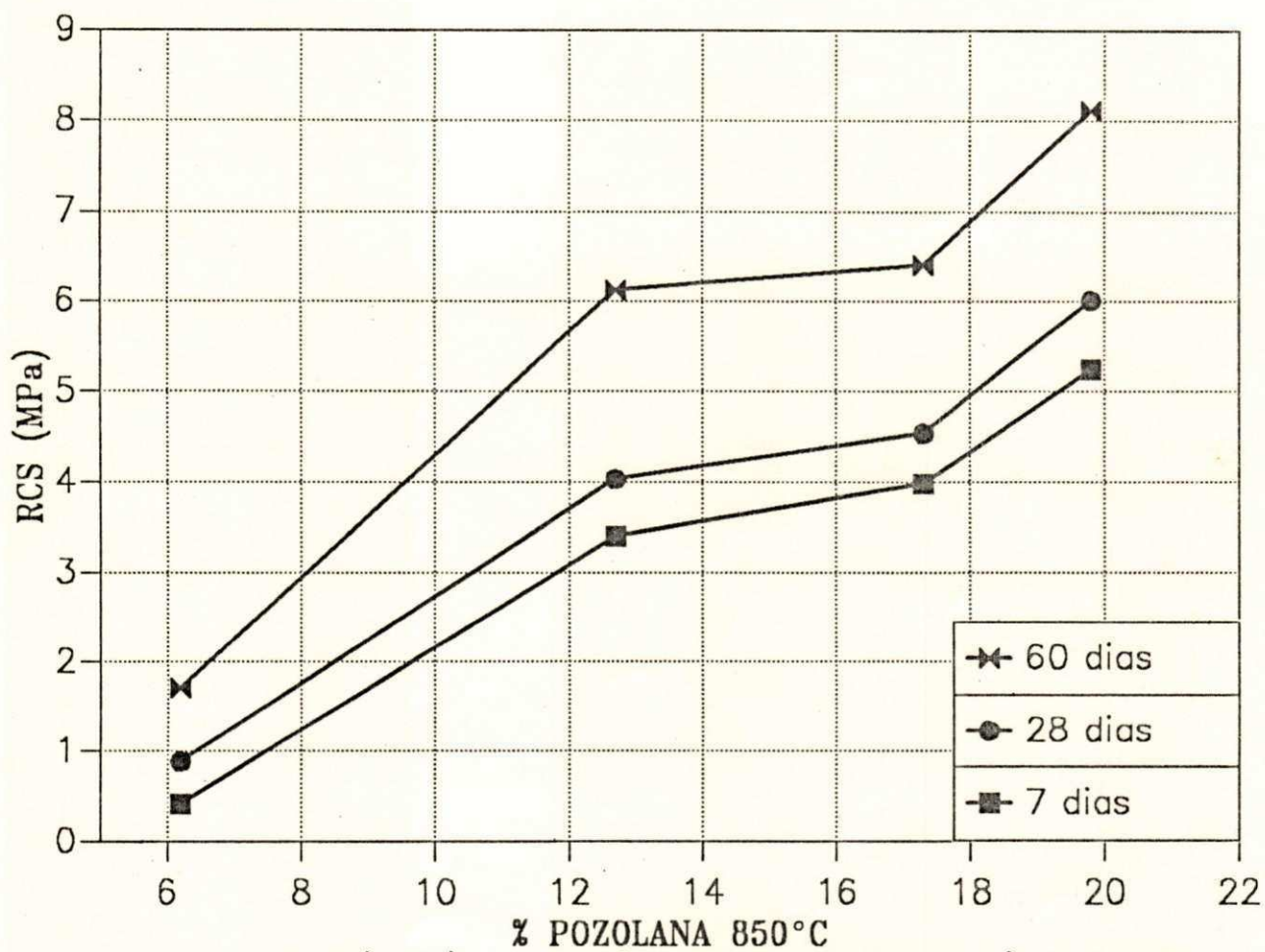


FIGURA 4c - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CAIS POZOLÂNICAS ARTIFICIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

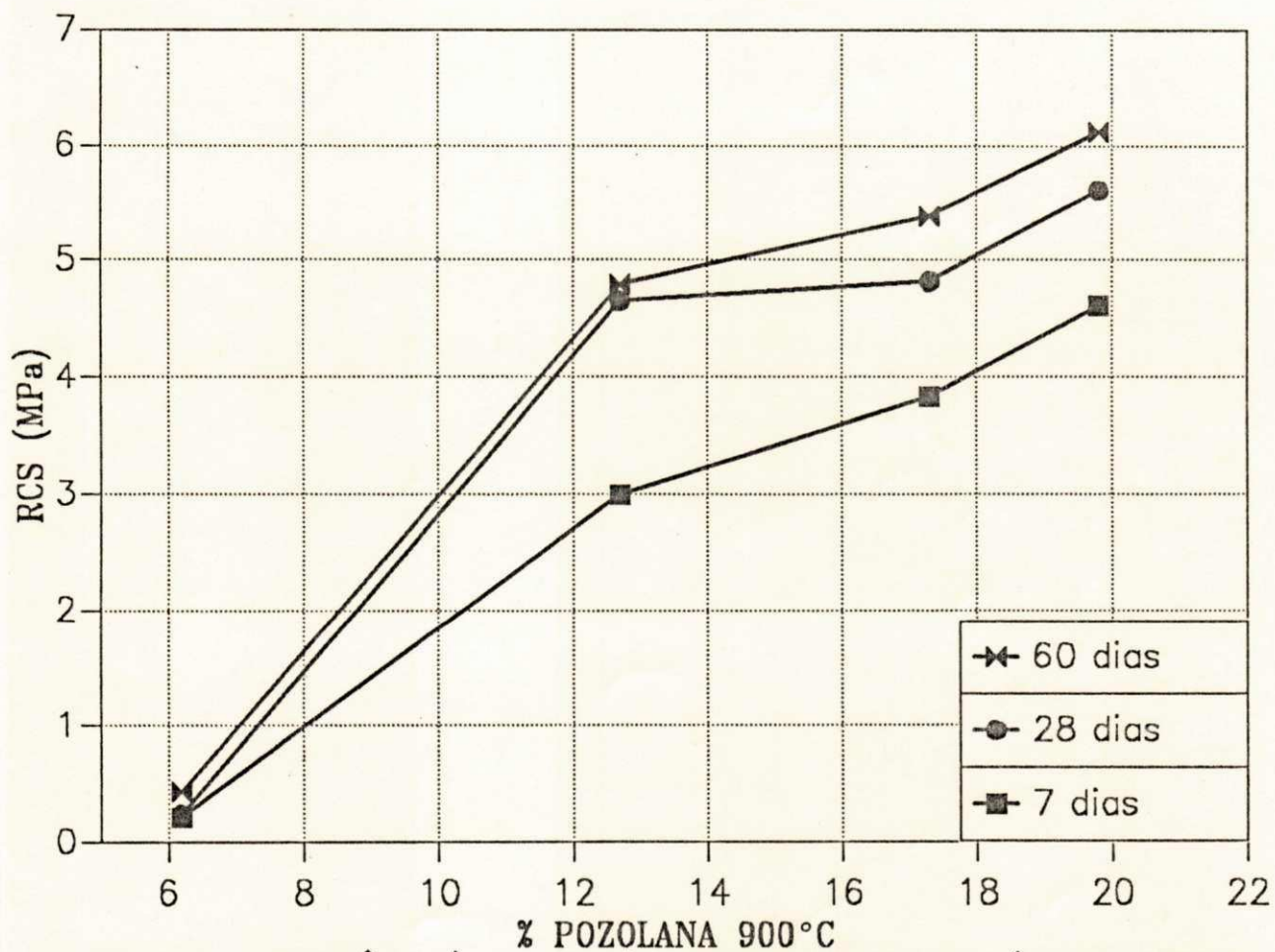


FIGURA 4d - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CAIS POZOLÂNICAS ARTIFICIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

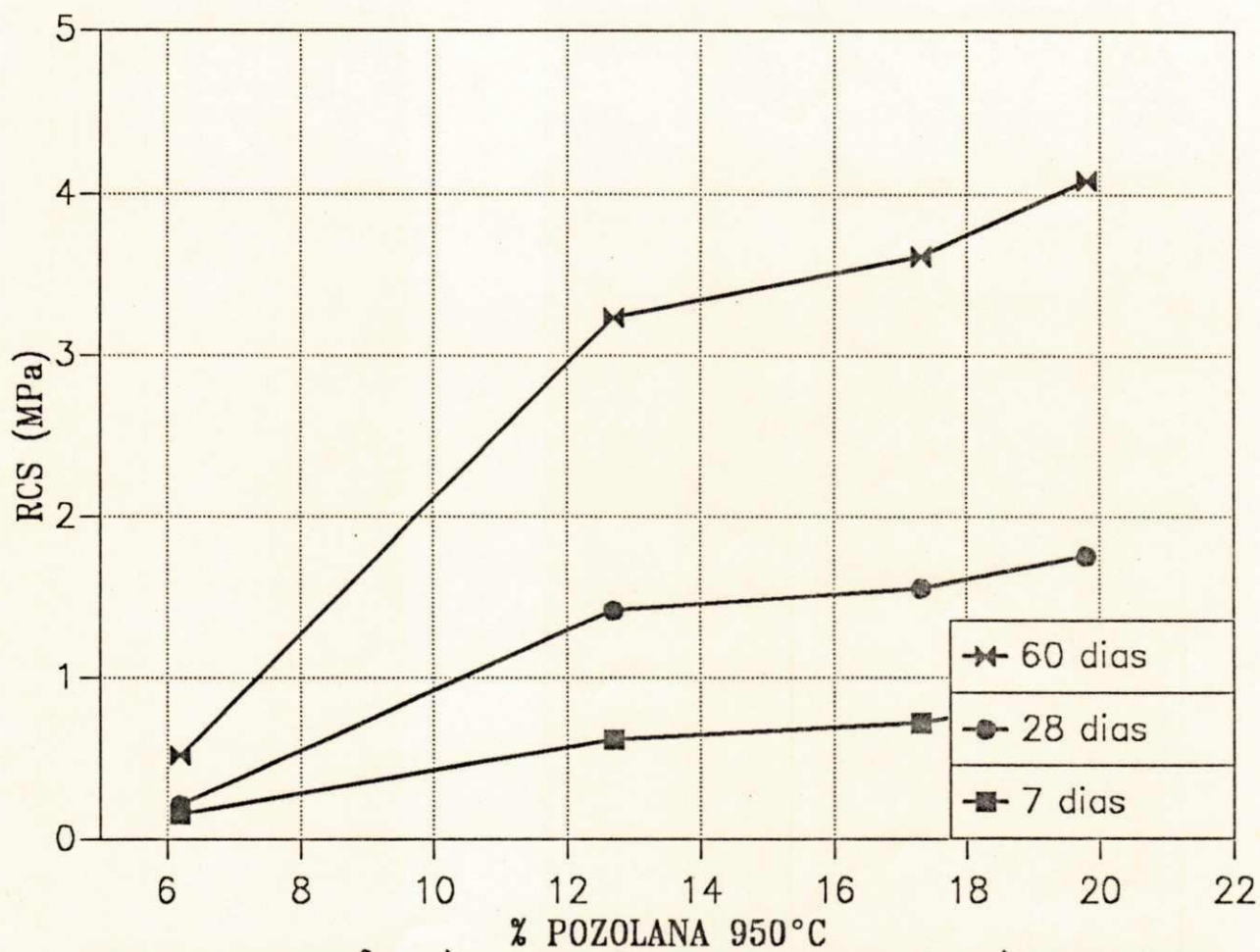


FIGURA 4e - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CAIS POZOLÂNICAS ARTIFICIAIS PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

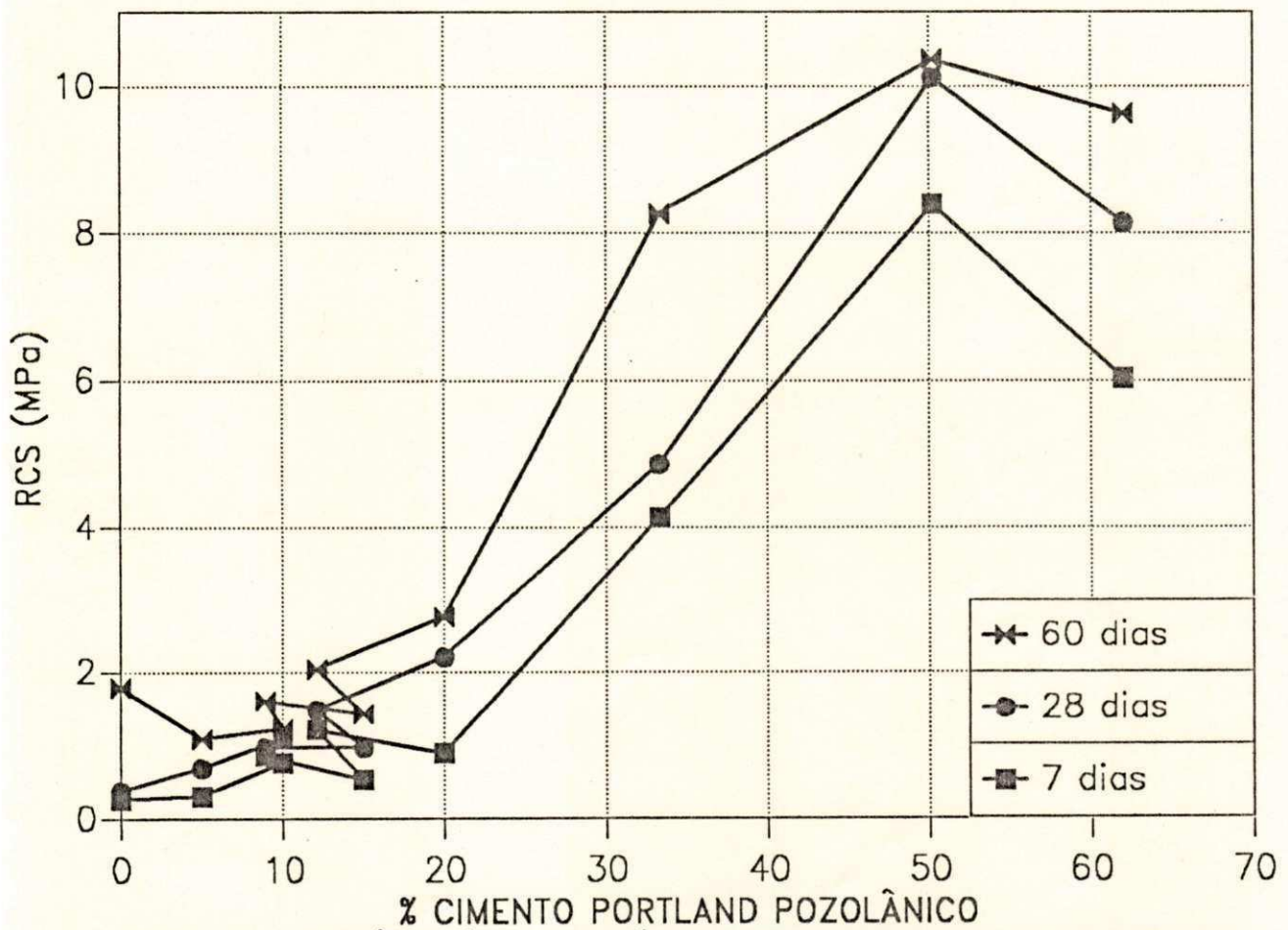


FIGURA 5 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS DO AGLOMERANTE I PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

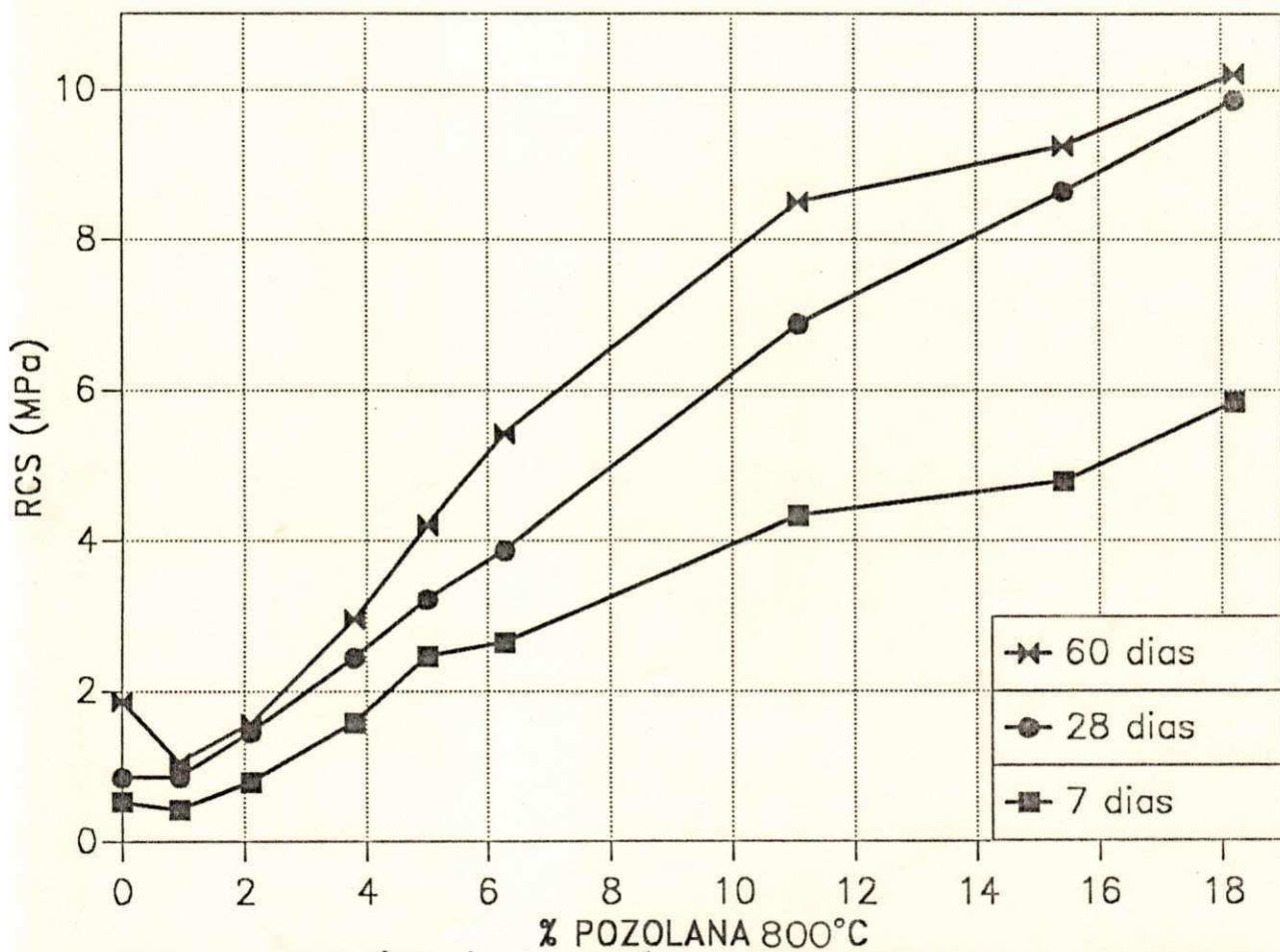


FIGURA 6 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS DO AGLOMERANTE II PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

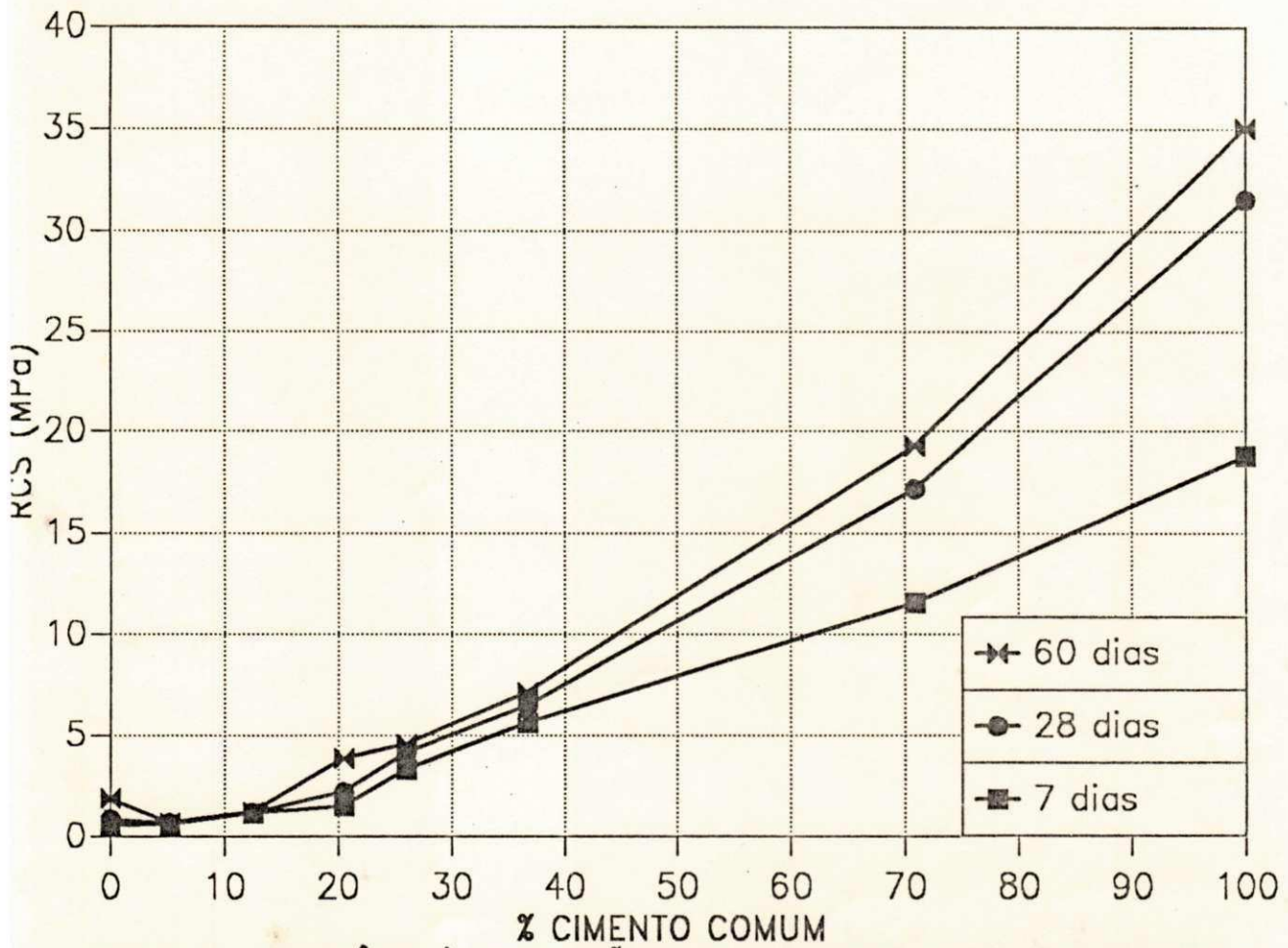


FIGURA 7 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS DO AGLOMERANTE III PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

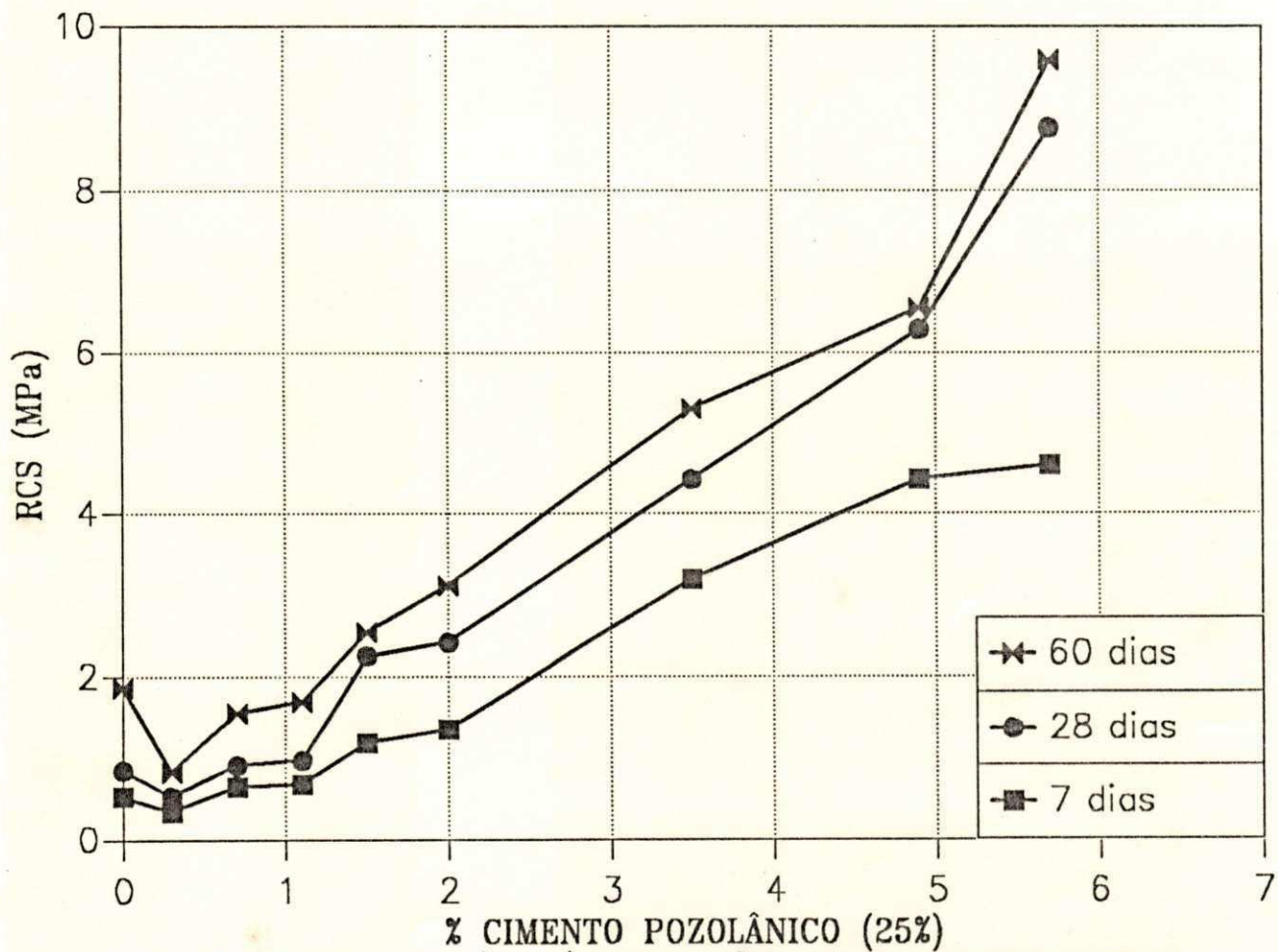


FIGURA 8 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO AGLOMERANTE IV PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

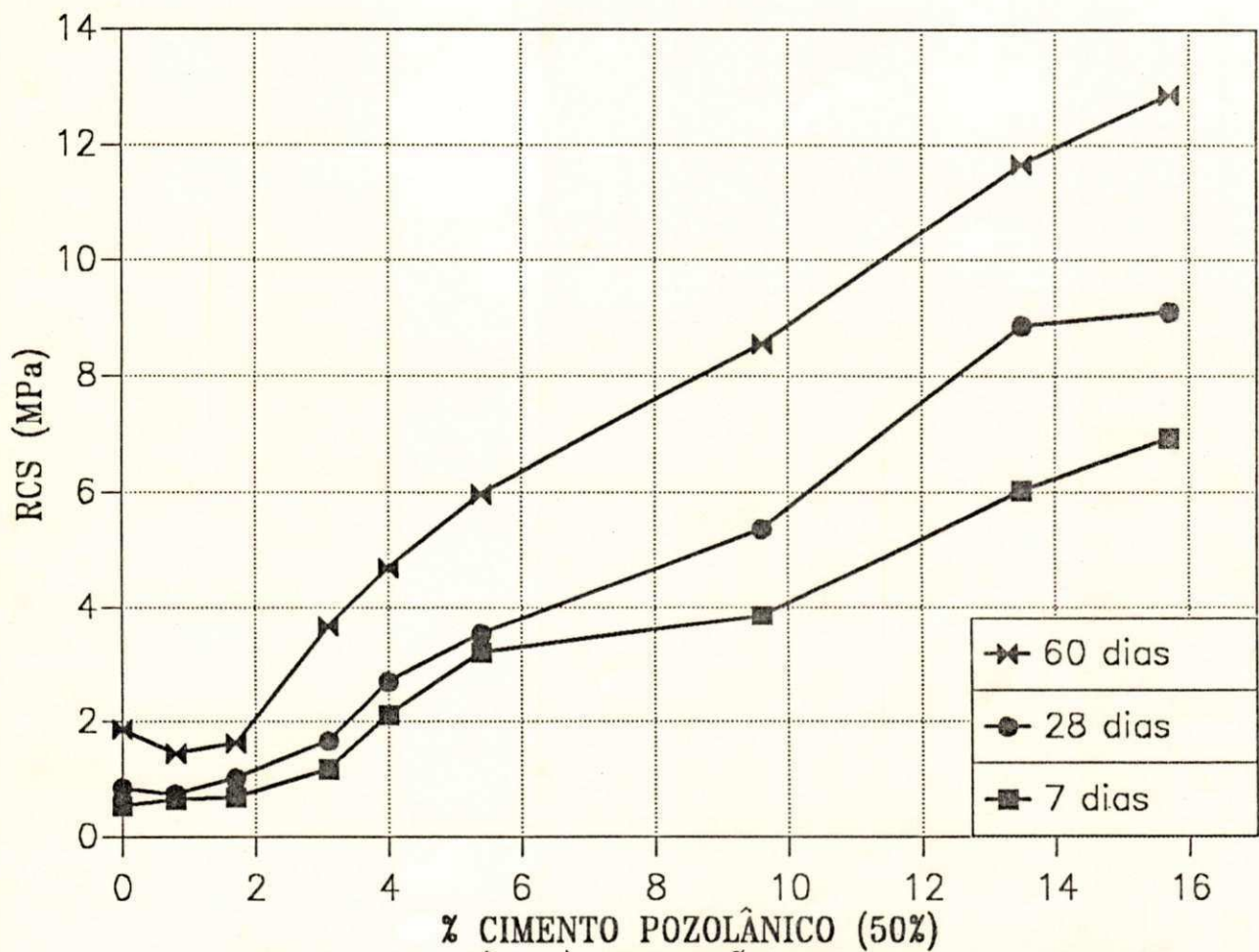


FIGURA 9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO AGLOMERANTE V PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.

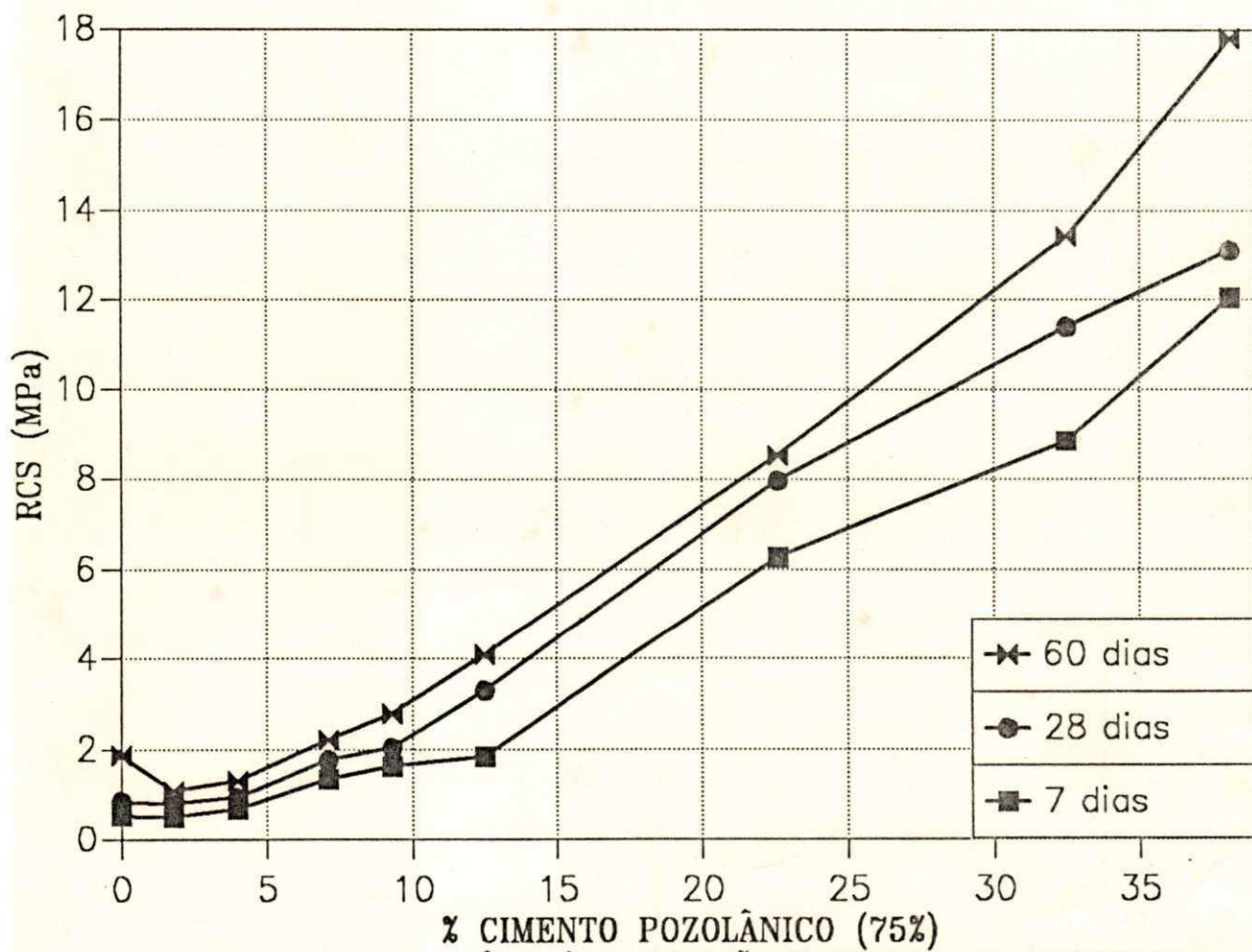


FIGURA 10 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO AGLOMERANTE VI PARA TEMPOS DE CURA DE 7 DIAS, 28 DIAS E 60 DIAS.