

**Estabilização de Solos com
Cimentos Pozolânicos de
Cinza de Casca de Arroz e de
Resíduo Cerâmico**

Alex Kenya Abiko

ALEX KENYA ABIKO

Engenheiro Civil, EPUSP, 1973.

Mestre em Engenharia Urbana e de Construção Civil,
EPUSP, 1980.

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTOS POZOLANICOS
DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E DE RESÍDUO CERAMICO

Tese apresentada à

Escola Politécnica da USP para a obtenção

do Título de Doutor em Engenharia - 1987

Orientador: Prof. Dr. Francisco Romeu Landi

Professor Titular do Departamento de Engenharia
de Construção Civil da EPUSP.

Aos meus pais

Agradecimentos

ao Francisco Romeu Landi que orientou

ao IPT que apoiou

à Eternit que auxiliou

ao Vahan Agopyan que discutiu

ao Luiz Carlos Martins Bonilha que incentivou

à Claudia Prada que desenhou

aos José Luis Wey de Britto, Márcia Paterno Joppert e

Silvia Regina Scarpelli que assessoraram

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTOS POZOLANICOS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E DE RESÍDUO CERAMICO

Resumo

A questão central deste trabalho é demonstrar a viabilidade técnica e econômica da estabilização de solos com os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico.

Para alcançar este objetivo o trabalho foi desenvolvido em duas etapas: a primeira referente ao desenvolvimento dos cimentos pozolânicos e a segunda referente à estabilização do solo propriamente dita.

Em ambas as etapas adotou-se o critério da simplicidade e da possibilidade de utilização de equipamentos leves e de absorção de mão-de-obra não especializada.

Os resultados técnicos e econômicos referentes ao cimento pozolânico de cinza de casca de arroz foram animadores; porém o mesmo não ocorreu com o cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresentou um desempenho em um patamar inferior.

Quanto à estabilização de solos, os experimentos e a avaliação econômica efetuada mostram que a eficácia dos cimentos pozolânicos utilizados é limitada sendo difícil a obtenção de resultados comparáveis com o atualmente obtido com o cimento portland.

Soil Stabilization with Pozzolanic Cements made from
Rice Husk Ash and Waste Bricks and Tiles

Summary

The main scope of this work is to demonstrate the technical and economical viability of the soil stabilization with pozzolanic cements made from rice husk ash and waste bricks and tiles.

In order to reach this objective the work has been developed in two stages: the first refers to the development of the pozzolanic cement and the second one refers to the soil stabilization.

In both these stages the criteria that has been adopted was of the simplicity, of the use of light equipments and of non skilled labour.

The technical and economical results referring to the rice husk ash pozzolanic cement were encouraging; but the same was not the case with the waste bricks and tiles pozzolanic cement that had an inferior performance.

As regards the soil stabilization, the tests and the economical evaluation show that the efficiency of the pozzolanic cement is limited thus the results achieved are not as good as of the portland cement.

INDICE

1.	Introdução	1
2.	Objetivo	6
3.	Cimento pozolânico	7
3.1.	Histórico	7
3.2.	Cal	12
3.3.	Pozolana	16
3.3.1.	Definição	16
3.3.2.	Atividade pozolânica	19
3.3.3.	Surki	24
3.3.4.	Cinza de casca de arroz	26
4.	Cimento pozolânico de resíduo cerâmico e de cinza de casca de arroz	28
4.1.	Metodologia	28
4.2.	Resultados obtidos com cimento pozolânico de resíduo cerâmico	28
4.3.	Resultados obtidos com cimento pozolânico de cinza de casca de arroz	34
4.4.	Discussão dos resultados	37

5.	Estabilização de solos	44
5.1.	Histórico	44
5.2.	Metodologia	47
5.3.	Apresentação dos resultados	50
5.3.1.	Solo	50
5.3.2.	Solo e cal	51
5.3.3.	Solo e cimento pozolânico	52
5.4.	Discussão dos resultados	58
6.	Considerações econômicas	67
6.1.	Metodologia	67
6.2.	Consumo de energia	68
6.3.	Custo do cimento pozolânico de cinza de casca de arroz	70
6.4.	Custo do cimento pozolânico de resíduo cerâmico	73
7.	Comentários e conclusões	75
8.	Referências bibliográficas	80

Lista de Tabelas

- 1 - Produção de cimento portland pozolânico no Brasil
- 2 - Relação cimento com adições para cimento sem adições
- 3 - Conteúdo energético de cimento portland na França (kcal/kg)
- 4 - Atividade pozolânica de surkis
- 5 - Poder calorífico da casca de arroz
- 6 - Poder calorífico superior de diversos materiais (Mcal/kg)
- 7 - Índice de resistência à compressão referida a 28 dias de cura
- 8 - Índice de resistência à compressão aos 28 dias referido a 7% de cimento portland comum
- 9 - Parâmetros estatísticos dos valores de resistência à compressão
- 10 - Relação de resistência à compressão simples referida a 28 dias de cura
- 11 - Parâmetros estatísticos relativos aos valores de resistência à compressão
- 12 - Influência da cura na resistência à compressão

Lista de Quadros

- 1 - Métodos de ensaio para determinação de atividade pozolânica
- 2 - Análise química de argilas
- 3 - Análise química de resíduo cerâmico e cinza de casca de arroz
(ASTM C311)
- 4 - Análise química da cal 1 e cal 2 em % (NBR 6473)
- 5 - Análise física da Cal 1 e da Cal 2 (NBR 7175)
- 6 - Resistência à compressão de misturas resíduo cerâmico/cal
- 7 - Resistência à compressão em ensaios acelerados
- 8 - Ensaio em pasta e em argamassa fresca
- 9 - Resistência à compressão de misturas cinza de casca de arroz/cal
- 10 - Parâmetros para cimentos de alvenaria
- 11 - Resultados obtidos dos ensaios de compactação
- 12 - Resultados de ensaios referentes à Programação A
- 13 - Resultados de ensaios referentes à Programação B
- 14 - Resultados de ensaios referentes à Programação C
- 15 - Resultados de ensaios referentes à Programação D
- 16 - Resultados de ensaios referentes à Programação E
- 17 - Produção de arroz (em casca), segundo as unidades da Federação
- 18 - Total de cinza obtida do arroz (em casca), segundo as unidades da Federação
- 19 - Produção de arroz (em casca) no Estado de São Paulo
- 20 - Total de cinza de casca de arroz disponível no Estado de São Paulo

Lista de Gráficos

- 1 - Ensaio de pozolanicidade
- 2 - Resíduo cerâmico C1 e Cal 1, Resistência à compressão p/ idade
- 3 - Resíduo cerâmico C1 e Cal 2, Resistência à compressão p/ idade
- 4 - Resíduo cerâmico C2 e Cal 1, Resistência à compressão p/ idade
- 5 - Resíduo cerâmico C2 e Cal 2, Resistência à compressão p/ idade
- 6 - Resíduo cerâmico C1 e Cal 1, Resistência à compressão p/ % C1
- 7 - Resíduo cerâmico C1 e Cal 2, Resistência à compressão p/ % C1
- 8 - Resíduo cerâmico C2 e Cal 2, Resistência à compressão p/ % C2
- 9 - Resíduo cerâmico C2 e Cal 1, Resistência à compressão p/ % C2
- 10 - Cinza A1 e Cal 1, Resistência à compressão p/ idade
- 11 - Cinza A1 e Cal 2, Resistência à compressão p/ idade
- 12 - Cinza A1 e Cal 1, Resistência à compressão p/ % A1
- 13 - Cinza A1 e Cal 2, Resistência à compressão p/ % A1
- 14 - Análise granulométrica do solo
- 15 - Programação A, C1-70-1, Resistência à compressão p/ %C1-70-1
- 16 - Programação A, A1-70-2, Resistência à compressão p/ %A1-70-2
- 17 - Programação A, C1-70-1, Res. compressão p/ tempo de cura
- 18 - Programação A, A1-70-2, Res. compressão p/ tempo de cura
- 19 - Programação B, C1-70-1, Res. compressão p/ desvio de umidade
- 20 - Programação B, A1-70-2, Res. compressão p/ desvio de umidade
- 21 - Programação B, C1-70-1, Res. compressão p/ tempo de cura
- 22 - Programação B, A1-70-2, Res. compressão p/ tempo de cura
- 23 - Programação C, C1-70-1, Res. compressão p/ golpes de soquete
- 24 - Programação C, A1-70-2, Res. compressão p/ golpes de soquete

- 25 - Programação C, C1-70-1, Res. compressão p/ tempo de cura
- 26 - Programação C, A1-70-2, Res. compressão p/ tempo de cura
- 27 - Programação C, C1-70-1, Expansão p/ tempo de cura
- 28 - Programação C, A1-70-2, Expansão p/ tempo de cura
- 29 - Prg D, C1-70-1 e A1-70-2, Res compressão p/ tempo de cura
- 30 - Programação E, CP-320, Res. compressão p/ teor de cimento

Lista de Figuras

- 1 - Forno para queima de casca de arroz
- 2 - Distribuição da produção de arroz (em casca) no Brasil, por unidade da Federação, 1984 (ton)
- 3 - Distribuição da produção de arroz (em casca) no Estado de São Paulo, 1984/1985 (%)

1 . Introdução

1. Introdução

Ao longo da elaboração da dissertação de mestrado Tecnologias apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento pôde-se amadurecer diversas questões relacionadas com o desenvolvimento dos materiais de construção. (1)

Duas dessas questões se mostraram particularmente importantes: uma referida ao conceito de tecnologia apropriada e a outra relacionada ao solo-cimento.

O trabalho desenvolvido demonstrou que a tecnologia apropriada pode contribuir para o barateamento dos materiais de construção. E em especial o solo-cimento se constitui em uma alternativa viável desde que sejam respeitadas algumas condições.

A constatação de que a tecnologia apropriada pode contribuir para o barateamento dos materiais de construção tem sido demonstrada através de trabalhos apresentados em diversos Congressos. Entre eles pode-se citar o Último Congresso do CIB, Conseil International du Bâtiment realizado em Washington em 1986 e o Colóquio Internacional de Materiais, Técnicas e Economia da Construção em Países em Desenvolvimento realizado também em 1986 em Paris e organizado pelo CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment e École Nationale des Ponts et Chaussées.

Entre os diversos materiais de construção apresentados nesses Congressos o solo se constituiu de forma relevante em uma das alternativas mais viáveis. Todavia o solo sempre aparece consorciado com outros materiais conhecidos como estabilizadores cujo exemplo mais conhecido é o cimento portland.

Sem dúvida o cimento portland tem se revelado como o mais eficiente estabilizador apresentando porém a desvantagem de se constituir em material nem sempre disponível. Em termos mundiais muitos países não produzem cimento portland e são obrigados a importar este material básico a um preço muitas vezes proibitivo inviabilizando construções de baixo custo.

Este problema apontou para a necessidade de se estudar outros estabilizadores que pudessem apresentar características mecânicas, de disponibilidade e de custo compatíveis com a utilização pretendida, isto é, aumentar a durabilidade e a resistência mecânica do solo enquanto material de construção.

Dentre os diversos materiais possíveis de serem utilizados como estabilizadores: cal, asfalto, fibras vegetais, cinzas de madeira, resinas, escolheu-se o cimento pozolânico.

Não o cimento portland pozolânico mas o cimento pozolânico conhecido desde a antiguidade.

Escolheu-se o cimento pozolânico pois observa-se internacionalmente e inclusive no Brasil uma tendência para o estudo destes materiais por se constituírem em alternativas aos aglomerantes atualmente empregados.

Na antiguidade este cimento pozolânico era constituído de cal e de certos materiais de origem vulcânica conhecidos atualmente como pozolanas.

Estes materiais tem sido redescobertos nos dias de hoje pois apresentam algumas vantagens sobre o cimento portland como menor consumo energético, possibilidade de produção em menor escala e também atenuam a ocorrência de fissuras e podem aumentar a durabilidade e a trabalhabilidade de concretos.

Para o presente estudo foram escolhidas duas pozolanas: a cinza de casca de arroz e o pó de resíduo cerâmico. Procurou-se desta forma o emprego de resíduos agrícolas e resíduos industriais que atualmente ou são sub-utilizados ou são desprezados sem nenhuma utilização. Algumas vezes estes resíduos também apresentam problemas de destinação.

A questão central deste trabalho é demonstrar a viabilidade técnica e económica da estabilização de solos com os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico.

Para tanto o trabalho foi desenvolvido em duas etapas bem definidas: a primeira referente ao desenvolvimento dos cimentos pozolânicos e a segunda referente à estabilização do solo propriamente dita.

Para o desenvolvimento do cimento pozolânico inicialmente foi estudada a produção das pozolanas adotando-se o critério da simplicidade e da possibilidade de utilização de equipamentos leves e de absorção de mão-de-obra não especializada. Estas pozolanas assim produzidas foram misturadas com a cal em diferentes proporções

procurando-se obter o cimento pozolânico de melhor desempenho.

Com esse cimento pozolânico foi desenvolvida a segunda etapa do trabalho, ou seja a de estabilização do solo.

Para isso foi escolhido um solo e avaliou-se diferentes misturas solo/cimento pozolânico através de ensaios de resistência à compressão em equipamento reduzido.

As variáveis contempladas foram a unidade de compactação, energia de compactação e tipo de cura.

Com os aspectos técnicos equacionados procurou-se verificar a viabilidade econômica dos cimentos pozolânicos e da estabilização de solos com estes estabilizadores.

Os resultados referentes especificamente ao cimento pozolânico de cinza de casca de arroz foram animadores; porém o mesmo não se pode falar do cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresentou um desempenho em um patamar inferior.

Quanto à estabilização de solos, os experimentos e a avaliação econômica efetuada mostram que a eficácia dos cimentos pozolânicos utilizados é limitada sendo difícil a obtenção de resultados comparáveis com o atualmente obtido com o cimento portland.

Este resultado é restrito pois somente se estudou um solo e ainda persistem dúvidas a respeito da interação dos materiais solo/cal/pozolana que, se respondidas a contento podem contribuir para a melhoria de desempenho desta estabilização.

Cabe ressaltar que, apesar do resultado parcial e no caso, contrário à expectativa inicial, conseguiu-se implementar uma metodologia própria onde a questão tecnológica emerge em um contexto globalizante que envolve também as questões econômicas e sociais.

2 . Objetivo

2. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica da estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduos cerâmicos.

Adjacente a este objetivo geral este trabalho se preocupa com:

- um entendimento de materiais de construção numa ótica de tecnologia apropriada considerando aspectos históricos, de disponibilidade e econômicos;
- desenvolvimento de cimentos pozolânicos a partir de pozolanas obtidas localmente com equipamentos leves e empregando mão-de-obra não especializada;
- desenvolvimento de equipamento leve para a produção de cinza de casca de arroz;
- metodologia para a avaliação de cimentos pozolânicos;
- metodologia para a estabilização de solos com cimentos pozolânicos;
- metodologia para apreciação econômica de cimentos pozolânicos.

3 . Cimento pozolânico

3. Cimento Pozolânico

3.1. Histórico

Os primeiros aglomerantes empregados pelo homem foram talvez o barro e o betume. Posteriormente foram descobertos o gesso e a cal aérea, utilizados por caldeus, babilônios, assírios, sumerianos, egípcios.

(2)

Os aglomerantes eram empregados no rejuntamento de pedras, de adobes, de tijolos, e no preenchimento de estruturas de madeira tal como nas construções em taipa.

O grande problema desses aglomerantes é sua durabilidade, principalmente em presença de umidade.

Os gregos e os romanos conseguiram melhorar a durabilidade de argamassas de cal e areia ao adicionar certos materiais de origem vulcânica.

Os gregos usavam as terras vulcânicas da ilha de Santorini; os romanos utilizavam cinzas vulcânicas, encontradas junto ao Vesúvio, principalmente na localidade de Pozzuoli. Estas últimas eram conhecidas como pozolanas.

Vitruvius, arquiteto e engenheiro romano do primeiro século AC escreveu no segundo livro do seu tratado "De Architectura Libri

Decem", capítulo VI que tem o título de "Da pozolana e como empregá-la" que a pozolana "é uma espécie de pó a qual a natureza deu uma virtude admirável... ao misturá-la com a cal e agregados torna a alvenaria tão forte podendo ser empregada não só em edifícios comuns como também no fundo do mar enrijecendo e endurecendo maravilhosamente". (3)

Com a expansão do Império Romano a mistura cal-pozolana foi largamente difundida em obras civis e militares apresentando um desempenho compatível com a sua utilização.

Somente no século passado, com a invenção do cimento portland em 1824, declinou a utilização da mistura cal-pozolana.

Realmente o cimento portland apresentou qualidades que revolucionaram a construção civil: durabilidade, rapidez de endurecimento, resistência mecânica.

A retomada da pozolana como material de construção se deu nos anos 70 a partir de dois fatos principais:

- a crise energética;
- a disseminação dos conceitos de tecnologia apropriada resgatando e adaptando as tecnologias tradicionais.

Atualmente a mistura de pozolanas com cal em proporções adequadas, que em presença de umidade forma compostos estáveis de poder aglomerante é chamada de cimento pozolânico.

Quando se substitui a cal por clínquer portland obtém-se o cimento portland pozolânico definido pela NBR 5736 (4)* é o aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer portland e

materiais pozolânicos moídos em conjunto ou em separado; durante a moagem é permitida a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio; o teor de materiais pozolânicos secos deve estar compreendido entre 15% e 40% da massa total do aglomerante."

Nos últimos anos a produção de cimento portland pozolânico no Brasil tem aumentado percentualmente à produção de cimento portland comum conforme pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 : Produção de cimento portland pozolânico no Brasil

	CP(t)	AF(t)	POZ(t)	POZ/CP(%)	(POZ+AF)/CP(%)
1980	22006212	3084939	2027287	09.2	23.2
1981	21243776	2315170	2423009	11.4	22.3
1982	19878276	2231186	3190219	16.0	27.3
1983	15827163	1813842	3046112	19.2	30.7
1984	19497272	1800958	2837389	14.5	23.8
1985	20634513	2076436	3346974	16.2	26.3

CP: cimento portland comum
 AF: cimento portland de alto forno
 POZ: cimento portland pozolânico

SNIC(4)

O aumento da produção de cimento portland pozolânico no Brasil segue uma tendência mundial.

Esta tendência de se produzir cimento portland com adições, pozolanas ou escória de alto forno é registrada na Tabela 2 que apresenta as perspectivas de utilização de cimentos com adições a nível mundial.

Tabela 2: Relação cimento com adições para cimento sem adições

	1980	1983	1990	2000
Europa	18	20	30	45
USA	1	3	10	25
Japão	3	5	15	25

MIC(5)

Isto se deve a fatores de ordem econômica e técnica.

Do ponto de vista econômico os cimentos portland pozolânicos permitem uma redução de custo devido a redução do consumo de clínquer. Esta redução de clínquer se reflete na redução da quantidade de energético utilizado em seu processo de produção.

No caso de se utilizar alguns subprodutos industriais como as cinzas volantes pode-se obter uma economia ainda maior.

Para exemplificar apresenta-se na Tabela 3 o conteúdo energético por tonelada de cimento posto fábrica, em 1978, na França.

Tabela 3: Conteúdo energético de cimento portland na França

(kcal/kg)

CPA 55 (comum)	1218
CPJ 55 (com adição de pozolana)	1077
CPA 45 (comum)	1179
CPJ 45 (com adição de pozolana)	980
CPJ 35 (com adição de pozolana)	922

MIC(5)

Do ponto de vista técnico o cimento portland pozolânico apresenta algumas vantagens sobre o cimento portland comum:

- despreendem menor quantidade de calor durante a hidratação contribuindo para atenuar a possibilidade de ocorrência de fissura, sobretudo em concreto massa;
- a pozolana torna o concreto mais durável ao reagir com a cal fixando-a impedindo que reaja com sulfato formando a etringita cujos efeitos expansivos podem vir a desagregar o concreto.
- aumento da trabalhabilidade do concreto através do aumento da plasticidade e da diminuição da tendência à desagregação devido a finura da pozolana.

Por outro lado o cimento pozolânico apresenta duas desvantagens importantes:

- o incremento de sua resistência mecânica é mais lento devido a menor velocidade de suas reações de hidratação;
- a sua menor finura exige uma relação água/cimento mais elevada e conseqüentemente pode-se alcançar uma resistência mecânica menor.

3.2. Cal

A TB-25 (7) define cal como um "um termo geral que inclui as várias formas químicas e físicas de cal virgem, cal hidratada e cal hidráulica, usadas para qualquer finalidade". Do ponto de vista químico define-se cal como o óxido de cálcio ou a mistura de óxido de cálcio e de magnésio, isto é, CaO ou CaO.MgO . Comercialmente, este material é conhecido como cal virgem e é normalizado no Brasil pela NBR 6453.(8)

Cal hidratada é o "pó seco obtido pela hidratação adequada de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de magnésio e óxido de magnésio".(9)

Cal hidráulica, que não existe comercialmente no Brasil, é "produto cimentiforme hidratado e seco, obtido pela calcinação de um calcário contendo sílica e alumina, ou pela calcinação de uma mistura em proporções adequadas de calcário e material argiloso a uma temperatura próxima a da fusão incipiente, a fim de formar suficiente hidróxido de cálcio livre, para permitir a hidratação e ao mesmo tempo deixar desidratados suficientes silicatos de cálcio, para dar ao pó seco suas propriedades hidráulicas"(7)

O termo cal é também raramente utilizado para denominar carbonatos tais como: incrustação em caldeiras ou cal residual de estações de tratamento de esgoto.

A cal é um dos principais produtos minerais e está presente em

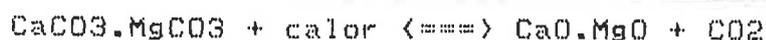
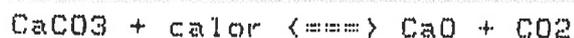
diversos setores:

- na siderurgia (40%)
- no tratamento de águas residuais e para fins potáveis (2%)
- nas indústrias de papel, açúcar, cerâmica,... (28%)
- na construção civil, em argamassas, tintas, blocos sílico-calcários, estabilização de solos (30%)

O valor apresentado entre parentesis é a estimativa atual da distribuição em setores do consumo brasileiro de cal. (10)

A cal é obtida pela decomposição térmica de rochas calcárias ou dolomíticas constituídas predominantemente dos minerais calcita, CaCO_3 e dolomita, $(\text{Mg,Ca})(\text{CO}_3)_2$.

Quimicamente a obtenção dos óxidos de cálcio e magnésio exige que o calcário ou o dolomito sejam aquecidos até a temperatura de dissociação dos carbonatos e aí mantido por um certo tempo, em ambiente onde a remoção do dióxido de carbono seja possível, tal como representado na expressão estequiométrica reversível:



A temperatura para a decomposição térmica do calcário situa-se entre 1000 e 1100 graus centígrados e do dolomito entre 900 e 1000 graus centígrados (11).

Para o carbonato de cálcio puro esta temperatura é de 900 graus centígrados e para a dolomita é de 725 graus centígrados (12).

A eficiência desta operação industrial varia, podendo atingir um

máximo de até 55%.

A cal virgem também conhecida como cal viva reage com água produzindo a cal hidratada, ou cal extinta, na qual o óxido de cálcio CaO é transformado em hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

O óxido de magnésio MgO das cales dolomíticas não reage com a água tão rapidamente quanto o óxido de cálcio, e muitas vezes a maior parte do óxido de magnésio permanece como óxido de magnésio. A cal hidratada resultante, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$ é denominada cal hidratada normal conforme Boyton (12).

A partir de 1940 surgiram processos para a hidratação da cal virgem, produzindo cal dolomítica altamente hidratada que é essencialmente constituída de $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$.

Após a hidratação, as cales são moídas em moinho de martelo ou moinho de cilindro anelado e classificadas por um separador de ar; a cal hidratada deve passar 99,5% em peneira ABNT $\phi.600$ mm (no.30) e 85% em peneira ABNT $\phi.075$ mm (no.200), conforme a NBR 7175 (9).

Esta norma classifica as cales hidratadas para as argamassas brasileiras em tipo "E" e tipo "C" conforme sua composição química:

- tipo "E" constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e de hidróxido de magnésio;
- tipo "C" constituída essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

As cales hidratadas francesas não são classificadas em tipos (13) e as normas inglesas classificam as cales hidratadas para construção em 4 tipos (14), conforme suas características químicas:

- alto-cálcio

- alto-cálcio de resíduos
- semi-hidráulica
- magnésiana

A ASTM americana classifica as cales hidratadas conforme sua utilização:

- para acabamentos (15)
- para alvenaria (16)
- para utilização com pozolana (17)
- para usos químicos (18)
- para estabilização de solos (19)

Para cada um dos casos são estabelecidas exigências químicas e físicas.

Como pode-se observar a normalização da cal hidratada brasileira que estabelece os requisitos técnicos de sua qualidade ainda é precária voltando sua atenção apenas para argamassas.

Uma avaliação crítica dessa normalização e da qualidade das cales brasileiras pode ser observada em estudo patrocinado pela ABPC, Associação Brasileira dos Produtores de Cal (20)

Neste trabalho constata-se que, em amostras coletadas no comércio varejista em alguns estados do Brasil, a qualidade das cales varia consideravelmente e a maioria delas não atende a normalização brasileira em suas diferentes exigências.

3.3 Pozolana

3.3.1. Definição

Pozolanas ou materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentícias. (4)

Conforme Massazza (21) as pozolanas podem ser classificadas como naturais ou como artificiais.

As pozolanas naturais são aquelas formadas por algum processo da natureza necessitando geralmente de apenas uma moagem. Elas podem ser:

- Pozolanas de origem vulcânica formadas a partir de erupções vulcânicas que ao se resfriarem bruscamente produzem uma massa vítrea reativa. Destes materiais apenas os de composição ácida e ricos em vidro podem ser considerados como pozolanas (22).

Estas pozolanas são encontradas na Alemanha, Rússia, Grécia e Itália sendo estas últimas as mais exploradas e estudadas.

A ocorrência destas pozolanas no Brasil é discreta sendo encontradas em pequenas regiões no Nordeste, Leste da Amazônia, Rio Grande do Sul e Paraná. (23)

- Pozolanas de origem sedimentar, representadas pelas argilas, cherts opalinos e diatomitos.

Alguns autores não consideram a argila, em seu estado natural uma pozolana pois não apresentam características para tal.

Os cherts opalinos são rochas que contém mais de 80% de sílica principalmente sob forma de opala apresentando boas qualidades quando moído.

O diatomito ou kieselguhr é um material pulverulento, leve, encontrado em depósitos sedimentares principalmente em zona de formação lacustre ou oceânica. Constitui-se basicamente de sílica amorfa ou opalina.

Esse material, comercializado em sua forma natural ou calcinada, é encontrado em praticamente todo o Brasil principalmente no Ceará, Bahia, Rio Grande do Norte, Rio de Janeiro e Santa Catarina. (24)

As pozolanas artificiais são aquelas obtidas por meio de um processamento industrial ou como um subproduto industrial. Elas podem ser classificadas em:

- Cinzas volantes que são resíduos finamente divididos obtidos nas usinas termoelétricas em que se utiliza como combustível carvão mineral pulverizado ou granulado.

As usinas termoelétricas situam-se no Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul próximas às jazidas de carvão mineral e suas cinzas volantes representam no Brasil aproximadamente 90% dos materiais pozolânicos adicionados ao clínquer portland para a obtenção do cimento portland pozolânico.

Pela sua utilização na indústria cimenteira a cinza volante é a

mais estudada das pozolanas.

Quimicamente as cinzas das termoelétricas nacionais apresentam composição sílico aluminosa com teores de SiO_2 de 55 a 70% e de Al_2O_3 de 20 a 30%. (25)

- Argilas e folhelhos calcinados obtidos pela queima das argilas, materiais naturais constituídos por argilominerais, e dos folhelhos, argilas finamente laminadas ou estratificadas.

Argilominerais são silicatos hidratados sendo os mais interessantes na tecnologia das pozolanas, as caulinitas e as montmorilonitas. Estes argilominerais exigem respectivamente temperaturas de 600 a 800 graus centígrados e de 700 a 800 graus centígrados respectivamente para apresentarem características de pozolanas. (26)

Cada argila apresenta uma temperatura ótima para sua transformação em pozolana sendo que temperaturas superiores ou inferiores reduzem suas qualidades como pozolanas.

No Brasil apenas 10% dos materiais pozolânicos adicionados ao clínquer portland são constituídos de argila calcinada.

Este fato justifica-se, apesar da abundância de argilas, pelo consumo de energético necessário para calcinar esta matéria prima.

- Resíduos industriais e agro-industriais que apresentam em sua forma natural ou após queima, porcentagens variadas de sílica e de outros óxidos.

Alguns dos materiais estudados e nem sempre com resultados positivos são os seguintes:

- resíduos de combustão de xistos (27)

- cinzas de eucaliptos (28)
- cinzas de bagaço de cana de açúcar (29,30)
- resíduo da indústria cerâmica vermelha (30)
- cinzas da casca de arroz (31)
- cinzas de folhas de gramíneas (32)

3.3.2. Atividade pozolânica

Atividade pozolânica é a capacidade que as pozolanas tem de formar, na temperatura ambiente e quando misturadas com a cal e a água compostos estáveis de poder aglomerante.

Mais especificamente é a capacidade de reagir com hidróxido de cálcio formando compostos como silicatos e aluminatos de cálcio.

O mecanismo pelo qual este fenômeno ocorre ainda não é suficientemente conhecido mas os fatores que mais afetam a atividade pozolânica são a porcentagem elevada de sílica e de alumina e a superfície específica das pozolanas.(33)

Como os silicatos são os que mais contribuem para a resistência mecânica, a sílica deve ser o constituinte predominante, além da alumina em menor proporção. (34)

Conforme alguns autores uma pozolana deve ter no mínimo 40% de SiO₂ e até 30% de Al₂O₃ e teores mínimos de CaO e MgO (35).

Porém como a natureza precisa dos fatores que influem nas reações físico-químicas das pozolanas com a cal e a água ainda não foram estabelecidas, não é suficiente uma análise química das pozolanas para a determinação de sua atividade pozolânica.

A análise química das pozolanas é útil no controle de sua qualidade tanto ao nível da produção quanto ao nível da recepção do material.

O que se constata da literatura técnica é que existem diversas formas de se determinar a atividade pozolânica de um material. Acredita-se que a mais satisfatória seja a avaliação desta atividade pozolânica através da resistência mecânica, apesar de que muitas vezes sejam requeridas outras qualidades das pozolanas. (36)

Apresenta-se no Quadro 1, alguns métodos de ensaio que estão descritos a seguir de forma resumida:

a) NBR 5751 - Método de determinação de atividade pozolânica em pozolanas (37)

A atividade pozolânica é avaliada em misturas pozolana mais hidróxido de cálcio e areia. Esta mistura é submetida ao ensaio de compressão após um período de cura de 7 dias a uma temperatura de 55 graus centígrados. A resistência média à compressão dos corpos de prova cilíndricos ensaiados deve ser superior a 5,5 MPa, conforme a antiga EB-758 (38). A atual NBR 5736 não estabelece um valor mínimo para que a pozolana seja utilizada na fabricação de cimento portland pozolânico (4). A comissão de estudo da ABNT, CE-18:01.13 referente a materiais pozolânicos está propondo um valor mínimo para o índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias de 5,6 MPa (39).

- b) NBR 5752 - Pozolanas - Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento portland. (40)

O índice de atividade pozolânica com cimento portland é definido como a relação entre a resistência média a 28 dias dos corpos de prova moldados com pozolana e cimento portland (argamassa B) e a resistência média também a 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento portland (argamassa A).

A CE-18:01.13 está propondo um índice de atividade pozolânica mínima de 75% (39).

- c) NBR 5753, Cimentos - Método de determinação de atividade pozolânica em cimento portland pozolânico. (41)

Este ensaio também conhecido como Fratini consiste em avaliar a atividade pozolânica comparando-se a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contacto com o cimento hidratado, com a quantidade de hidróxido de cálcio que poderia saturar um meio da mesma alcalinidade.

Esta avaliação se deve ao fato de que no cimento portland pozolânico a concentração de hidróxido de cálcio em solução é sempre inferior à concentração de saturação.

O resultado do ensaio é expresso em alcalinidade total e teor em óxido de cálcio em milimoles por litro locados em um diagrama adequado de atividade pozolânica; se o ponto representativo estiver situado abaixo da isoterma de solubilidade, o cimento ensaiado é considerado como pozolânico.

- d) ASTM C311 - Método de ensaio de cinzas volantes e pozolanas naturais para a utilização em concreto de cimento portland - Atividade pozolânica com cal. (41)

Este ensaio é semelhante ao preconizado pela NBR 5751; a ASTM C618, Especificação para cinzas volantes e pozolanas naturais estabelece uma resistência à compressão mínima de 5,5 MPa para corpos de prova moldados com pozolana e cal (43)

e) ASTM C311 - Atividade pozolânica com cimento pozolânico (42)

Este ensaio é semelhante ao preconizado pela NBR 5752 e a ASTM C618 estabelece uma relação mínima de 75% entre a resistência média de corpos de prova moldados com pozolana e cimento portland e a resistência média de corpos de prova moldados com cimento portland.

f) ASTM C593 - Especificação para cinzas volantes e outras pozolanas empregadas com cal (44)

Esta norma estabelece a forma pela qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova de pozolana, cal e areia; exige-se uma resistência mínima de 4,1 MPa após 7 dias de cura em vapor, a (54 ± 2) graus centígrados.

g) Spence e Allen (45,46)

Estes pesquisadores propõem um método de ensaio simplificado com corpos de prova cúbicos de pequenas dimensões preparados a partir de uma mistura de cal, pozolana e areia. Estes corpos de prova são submetidos a uma temperatura de 50 graus centígrados durante 48 horas, após 48 horas da data da moldagem e posteriormente mais 3 dias imersos em água a 20 graus centígrados. Os resultados de resistência à compressão destes corpos de prova devem ser utilizados de forma comparativa.

h) Srinivasan (47)

Este pesquisador propõem um método de ensaio para se avaliar a atividade pozolânica classificando posteriormente as pozolanas de muito inativa a muito ativa. Esta classificação é feita em função da resistência à compressão de corpos de prova de hidróxido de cálcio quimicamente puro, pozolana, areia normal e água destilada.

Pode-se observar dois pontos importantes nos métodos de ensaio para a avaliação da atividade pozolânica:

- primeiro, que a avaliação é feita em presença de cal ou cimento, isto é, a atividade pozolânica está associada a um outro material cuja composição é variável; portanto esta atividade também deve variar conforme a natureza do material que reage com a pozolana e o teor de seus componentes;
- segundo, que a cura dos corpos de prova é feita em temperaturas acima da do ambiente, em torno de 50 graus centígrados, sendo frequente a situação em que se mantém os corpos de prova em recipientes herméticos; este procedimento se justifica pois as reações pozolânicas são lentas na temperatura ambiente e há a necessidade de acelerar estas avaliações em laboratório.

3.3.3 Surki

O surki é um material de construção largamente utilizado na Índia há centenas de anos sendo empregado em edificações assim como em outras obras civis. (48)

Esse material é uma pozolana sendo empregado com a cal ou o cimento na obtenção de argamassas e concretos.

É uma argila calcinada e moída obtida a partir de resíduos de tijolos e de telhas cerâmicas. Algumas vezes o surki também é produzido a partir de solos que por conterem uma porcentagem elevada de areia não são adequados para a fabricação de tijolos ou de outros produtos cerâmicos.

Para se produzir surki utilizando estas argilas cava-se uma vala circular no solo e o material retirado é recolocado em camadas alternadas com lenha. Todo o conjunto é queimado resultando em um material que necessita de uma moagem simples para ser utilizado. (49)

A qualidade dos surkis depende das características da argila empregada e de sua temperatura de queima. Isto faz com que os surkis provenientes de diferentes indústrias cerâmicas apresentem diferentes atividades pozolânicas. Também é importante o seu grau de moagem que influe na sua capacidade de reagir com a cal.

Srinivasan relata surkis com resistência à compressão variando de 2,22 MPa a 14,5 MPa. (47)

Para se evitar esta variação de qualidade estão sendo feitos estudos

na Índia a partir da caracterização de argilas, a forma mais adequada de queimá-las e de moê-las.

Para testar as inovações em escala industrial e para divulgar as melhorias alcançadas com um controle de qualidade e um processamento racional, foi implantado em Nova Delhi uma fábrica de cimento pozolânico obtido a partir de cal hidratada e argila calcinada. (50)

Para se avaliar a qualidade dos surkis empregam-se corpos de prova cúbicos, de aresta $a=38\text{mm}$, preparados com hidróxido de cálcio quimicamente puro, surki, areia normalizada e água e mantidos durante 48 horas em câmara úmida.

Posteriormente os corpos de prova são moldados e mantidos em recipiente hermético durante 8 dias a 50 graus centígrados até a sua ruptura à compressão.

O grau de atividade pozolânica é classificado conforme o critério da Tabela 4 (47) :

Tabela 4 : Atividade pozolânica de surkis

Res. compressão (MPa)	Grau de atividade
< 1,4	muito inativo
1,4 a 2,8	inativo
2,8 a 4,1	pouco inativo
4,1 a 5,5	atividade média
5,5 a 6,9	ativo
> 6,9	muito ativo

3.3.4. Cinza de casca de arroz

O beneficiamento do arroz que compreende o descascamento, limpeza e tratamento é responsável pela geração de uma grande quantidade de resíduo, principalmente a casca de arroz.

Uma tonelada de arroz produz aproximadamente 200 kg de casca. Esta casca tendo pequena densidade necessita de muito espaço para ser estocada.

Este material muitas vezes é lançado em cursos de água. Outras vezes é utilizado como combustível sendo também intenso o seu emprego na agricultura para cobertura retendo a umidade do solo ou na avicultura como cama nos galinheiros.

As cascas de arroz também tem sido utilizadas na preparação das rações. Porém o seu valor alimentício é baixo e pode irritar o aparelho digestivo de alguns animais por apresentar elevado teor de sílica. (51)

Em Burma foi sugerida a utilização destas cascas como origem da sílica para a produção do vidro e em Madras foi estudado o seu emprego na fabricação de carvão ativado poroso (52).

Na indústria de plástico a casca de arroz pode ser utilizada na produção de furfurool, aminoplástico e fenoplástico. (53)

Na fabricação de tijolos cerâmicos a casca de arroz pode ser incorporada à massa cerâmica que posteriormente será queimada. Este procedimento diminui a densidade do tijolo pois após a sua queima a

casca de arroz desaparece deixando um vazio. Além disso a casca de arroz também se constitui em combustível fornecendo energia para a queima do tijolo. (54,55)

Uma outra utilização para a casca de arroz é aquela advinda de sua queima : a cinza de casca de arroz se constitui em material pozolânico. (56,57)

Existem patentes para a produção de cinza de casca de arroz através de equipamentos e tecnologias sofisticadas demonstrando o seu uso corrente como matéria prima para a fabricação de cimento portland pozolânico. (58)

Esta solução já foi empregada no Brasil, em Goiás, por uma fábrica que se utilizava de casca de arroz abundante na região para fabricar cimento portland pozolânico. (59)

Processos controlados de queima de arroz maximizam a reatividade da sílica produzindo cimento portland pozolânico de alta qualidade com resistência à compressão da ordem de 58 MPa aos 28 dias.(58)

Uma das utilizações deste cimento é em obras de concreto massa de resistência elevada nas quais a elevação de temperatura devido a hidratação do cimento pode ser responsável por fissuras e trincas. (60)

Existem formas mais simples de se obter materiais pozolânicos a partir da queima da casca de arroz; uma delas é montar pilhas de casca de arroz de forma cônica iniciando a combustão pela superfície externa e queimando de fora para dentro. (61)

**4 . Cimento pozolânico de
resíduo cerâmico e
de cinza de casca de arroz**

4. Cimento pozolânico de resíduo cerâmico e de cinza de casca de arroz

4.1. Metodologia

O cimento pozolânico de resíduo cerâmico é obtido através da mistura em quantidades adequadas de resíduo cerâmico e cal hidratada.

O cimento pozolânico de cinza de casca de arroz é obtido através da mistura em quantidades adequadas de cinza de casca de arroz e cal hidratada.

Ambos os cimentos pozolânicos são obtidos a partir da mistura de materiais pozolânicos com a cal hidratada.

Inicialmente procura-se obter um material pozolânico que apresente qualidade e custo compatíveis através de processos simples que não requeiram equipamentos complexos ou que consumam energia em abundância. Este requisito é próprio do aproveitamento racional de resíduos.

No caso de resíduo cerâmico procurou-se uma indústria de cerâmica vermelha que tivesse caracterizadas a sua matéria prima e a temperatura de queima de seus produtos. Também era importante que a indústria apresentasse um processo de fabricação uniforme e controlado.

Posteriormente o resíduo cerâmico desta indústria foi moído adequadamente em 2 finuras. O pó de resíduo cerâmico assim obtido foi caracterizado quimicamente e quanto a sua atividade pozolânica.

No caso da cinza de casca de arroz, esta foi obtida queimando-se a casca em equipamento adequado controlando-se a temperatura de queima. Este equipamento foi desenvolvido respeitando-se o critério de simplicidade e de desempenho adequado.

Após a queima a cinza foi caracterizada quimicamente e quanto a sua atividade pozolânica.

O pó de resíduo cerâmico e o pó de cinza de casca de arroz, caracterizados como materiais pozolânicos, foram misturados com dois tipos de cal: dolomítica e cálcica. Essas cales tinham sido anteriormente caracterizadas sob o ponto de vista químico e físico.

A mistura foi elaborada variando-se as proporções de seus componentes procurando-se investigar:

- qual o melhor tipo de cal para o material pozolânico;
- qual a melhor proporção cal/material pozolânico.

Essas avaliações foram feitas em função da resistência à compressão de corpos de prova de argamassa preparados com a mistura. Com a mistura que apresentou os melhores resultados de resistência à compressão foram executados ensaios em pasta: expansibilidade Le Chatelier, tempo de início e fim de pega e plasticidade; e em argamassa fresca foi executado ensaio de retenção de água.

Estes ensaios visaram qualificar os cimentos pozolânicos a fim de verificar a sua adequação em diversas utilizações.

Cabe lembrar que nos Gráficos referentes a esta etapa dos estudos optou-se por unir os pontos (x,y) para ilustrar o que ocorre não significando que estas retas reproduzam com exatidão o observado.

4.2. Resultados obtidos com cimento pozolânico de resíduos cerâmicos

Para este trabalho foram obtidos resíduos de uma indústria da região de Itu que produz blocos cerâmicos por extrusão a vácuo a partir da queima a 960 graus centígrados da mistura de argilas caracterizadas no Quadro 2.

Este resíduo cerâmico foi moído em duas finuras:

- amostra C1
- amostra C2

A amostra C1 apresentou uma massa específica de 2,73 g/cm³ (NBR 6474) e superfície específica Blaine de 7350 cm²/g (NBR 7224). (62,63)

A amostra C2 apresentou uma massa específica de 2,72 g/cm³ (NBR 6474) e superfície específica Blaine de 1655 cm²/g. (NBR 7224).

A moagem foi efetuada da seguinte forma: primeiramente o resíduo com dimensões aproximadas de 5 a 10cm foi submetido a um britador de mandíbulas e posteriormente a um moinho de discos até a obtenção da finura final.

No Quadro 3 apresenta-se uma análise química do pó de resíduo

cerâmico, amostra C1, conforme método ASTM C311. (42)

Para verificação da atividade pozolânica do pó de resíduo cerâmico foi utilizado o método NBR 5753. (41)

Este ensaio somente foi realizado com mistura da amostra C1 com clínquer portland nas proporções, em massa, de 40:60, 30:70, 20:80. Os resultados deste ensaio são apresentados no Gráfico 1.

O pó de resíduo cerâmico C1 apresentou resultados onde a mistura é considerada um cimento pozolânico, indicando que o material é ativo reagindo permanentemente com o cálcio liberado na hidratação do clínquer.

Posteriormente o resíduo cerâmico foi misturado com dois tipos de cal encontrados no mercado: a cal 1, dolomítica e a cal 2, cálcica.

No Quadro 4 são apresentadas as características químicas das cales 1 e 2 ensaiadas conforme a NBR 6473. (64)

No Quadro 5 são apresentadas as características físicas das cales 1 e 2 ensaiadas conforme os Projetos de norma 18:05.11-001, 18:05.11-002, 18:05.11-003 e 18:05.11-004. (65,66,67,68)

Para a mistura resíduo cerâmico/cal adotou-se a nomenclatura a-b-c onde,

a = C1 ou C2, tipo do resíduo cerâmico

b = 60, 70 ou 80%, porcentagem em massa do resíduo cerâmico

c = 1 ou 2, tipo da cal

A avaliação da melhor proporção das misturas foi feita em termos de resistência à compressão em cilindros de 5cm de diâmetro e 10cm de

altura moldados e rompidos conforme as diretrizes gerais da NBR 7215 (69)

A quantidade de água de amassamento empregada foi aquela necessária para se obter uma consistência na mesa de "flow" de (165 ± 5) mm.

Os corpos de prova foram ensaiados após 7,28 e 90 dias.

Para fins de comparação também foram ensaiadas as cales 1 e 2 sem o resíduo cerâmico, conforme o mesmo método de ensaio.

Os resultados de resistência à compressão das misturas encontram-se no Quadro 6 e nos Gráficos 2 a 9.

A mistura que apresentou os melhores resultados foi a C1-70-1, isto é, 70% de resíduo cerâmico C1 e 30% de cal dolomítica, com resistência à compressão de 2,8 MPa aos 28 dias e 4,7 MPa aos 90 dias.

Com a mistura C1-70-1 foram executados dois ensaios nos quais a cura é efetuada em temperatura acima da do ambiente com a finalidade de se avaliar ensaios com cura acelerada.

Os ensaios foram denominados de M1 e M2.

O método M1 consiste em se moldar os cilindros de 5cm de diâmetro por 10cm de altura conforme a NBR 7215, com uma consistência medida na mesa de "flow" de (165 ± 5) mm. Após a moldagem os corpos de prova permanecem por 48 horas em câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura de (23 ± 2) graus centígrados, sendo posteriormente desmoldados e imersos em água a 50 graus centígrados durante 48 horas. Ao final deste período os corpos de prova são mantidos em

água a temperatura de 20 graus centígrados por 72 horas até a sua ruptura por compressão.

Este método de ensaio segue os procedimentos de cura mencionados por Spence e Allen.

O método M2 consiste em se moldar os cilindros de 5cm de diâmetro por 10cm de altura conforme a NBR 7215 com uma consistência medida na mesa de "flow" de (165 ± 5) mm. Após a moldagem os corpos de prova permanecem por 24 h na câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura de (23 ± 2) graus centígrados, sendo posteriormente desmoldados e imersos em água a 50 graus centígrados durante 6 dias.

Retira-se os corpos de prova deste banho 4 h antes da ruptura, esfriando-os ao ar até atingir a temperatura ambiente.

Posteriormente ensaia-se os corpos de prova à compressão.

Este método segue os procedimentos de cura da NBR 5751.

Os resultados destes ensaios M1 e M2 são apresentados no Quadro 7 e foram plotados no Gráfico 6.

Com a mistura C1-70-1 também foram executados ensaios em pasta: expansibilidade Le Chatelier (NBR 7215), tempo de início e fim de pega (NBR 7215), estabilidade (projeto de norma 18:05.11-002), plasticidade (projeto de norma 18:05.11-003). Em argamassa fresca foi executado ensaio de retenção de água (projeto de norma 18:05.11-004). Os resultados são apresentados no Quadro 8.

4.3 Resultados obtidos com cimento pozolânico de cinza de casca de arroz.

Para esta etapa do trabalho foi obtida casca de arroz de uma beneficiadora da região de Laranjal Paulista.

Esta casca foi queimada em um forno especialmente construído (Figura 1) conforme recomendações do Pakistan Council for Scientific and Industrial Research. (70)

Este forno é construído com dois tambores de 200 l e de 100 l que constituem uma câmara na qual a casca de arroz é queimada. Esta casca necessita de ignição para iniciar a combustão e posteriormente se queima sozinha sem necessitar de combustível.

A temperatura de queima da casca de arroz para produzir uma pozolana deve estar compreendida entre 450 e 750 graus centígrados. A temperatura média registrada com um potenciômetro durante a queima da casca no forno construído foi de 500 graus centígrados.

Esta cinza ao sair do forno é friável e após uma ligeira moagem em moinho de bolas apresentou uma superfície específica Blaine (NBR 7224) de 12210 cm²/g e uma massa específica (NBR 6474) de 2,45 g/cm³.

A este pó de cinza de casca de arroz se deu a denominação de amostra A1.

No Quadro 3 apresenta-se uma análise química da cinza de casca de arroz, amostra A1, conforme método ASTM C311 (42).

Para verificação da atividade pozolânica de cinza de casca de arroz foi utilizado o método NBR 5753. (41)

Este ensaio foi realizado com mistura da amostra A1 com clínquer portland nas proporções, em massa, de 40:60, 30:70, 20:80.

Os resultados deste ensaio são apresentados no Gráfico 1.

O pó de cinza de casca de arroz A1 apresentou resultados na região onde a mistura é considerada um cimento pozolânico, indicando que o material é ativo reagindo permanentemente com o cálcio liberado na hidratação do clínquer.

Posteriormente a cinza foi misturada com 2 tipos de cal encontrados no mercado, a cal 1, dolomítica e a cal 2, cálcica. Nos quadros 4 e 5 são apresentadas as características físicas e químicas destas cales.

Para a mistura cinza de casca de arroz/cal adotou-se a nomenclatura a-b-c onde,

a = 1, amostra de cinza

b = 60, 70 ou 80%, porcentagem em massa da cinza

c = 1 ou 2, tipo de cal.

A avaliação da melhor proporção das misturas foi feita em termos de resistência à compressão da mesma forma como se avaliou a mistura de resíduo cerâmico/cal.

Os resultados de resistência à compressão das misturas encontram-se no Quadro 9 e nos Gráficos 10 a 13.

A mistura que apresentou os melhores resultados foi a A1-70-2, isto

é, 70% de cinza de casca de arroz A1 e 30% de cal cálcica, com resistência à compressão de 5,2 MPa aos 28 dias e 5,6 MPa aos 90 dias.

Com a mistura A1-70-2 foram executados ensaios em pasta: expansibilidade Le Chatelier (NBR 7215), tempo de início e fim de pega (NBR 7215), estabilidade (projeto de norma 18:05.11-002), plasticidade (projeto de norma 18:05.11-003); em argamassa fresca foi executado ensaio de retenção de água (projeto de norma 18:05.11-004). Os resultados são apresentados no Quadro 8.

Finalmente foi determinado o poder calorífico superior e inferior da casca de arroz conforme o ensaio da norma ASTM D2015 (70). Os valores encontrados foram os da Tabela 5:

Tabela 5 : Poder calorífico da casca de arroz

poder calorífico superior	(3,18±0,04)Mcal/kg
poder calorífico inferior	(2,95±0,04)Mcal/kg

4.4 Discussão dos resultados

Os experimentos efetuados com o cimento pozolânico de resíduo cerâmico e de cinza de casca de arroz apontaram tres grupos de questões: um referente à obtenção da pozolana, outro referente à obtenção de cimento pozolânico e o terceiro referente à sua utilização.

No que se refere à obtenção da pozolana de resíduo cerâmico pode-se comentar o seguinte:

- Da mesma forma que ocorre com o surki, talvez a melhor temperatura de queima das argilas caracterizadas no Quadro 2 não seja a de 960 graus centígrados utilizada na indústria de cerâmica vermelha que forneceu o resíduo. Isso do ponto de vista da atividade pozolânica. Também a conformação da cerâmica através de uma extrusora a vácuo dificulta a moagem posterior pois torna o material mais compacto. Todavia essas condições estavam estabelecidas a priori pois procura-se neste trabalho utilizar os resíduos existentes.
- A moagem do resíduo em 2 finuras teve por objetivo verificar a sua influência na obtenção do cimento pozolânico. Conforme o critério estabelecido pela NBR 5736 para cimento portland pozolânico que é de 2500 a 2900 cm²/g dependendo do tipo, a amostra C1 pode ser considerada como pozolana. Por este critério a amostra C2 não pode ser considerada como pozolana. Deve-se lembrar para o fato de que para se obter finuras mais elevadas consome-se maior energia de moagem, elevando-se o custo da

cominuição e conseqüentemente da pozolana.

No que se refere à obtenção da pozolana de cinza de casca de arroz pode-se comentar:

- O forno especialmente construído para a obtenção da cinza de casca de arroz se mostrou adequado para este experimento e também para a produção de pequenas quantidades, isto é, até 300 L de casca/dia. A sua vantagem é que se constitui em equipamento simples, de fácil execução e manutenção podendo ser utilizado por pequenas comunidades urbanas ou rurais. O inconveniente deste equipamento é a sua baixa capacidade de produção e a geração, na combustão da casca, de fumaça que pode ser considerada poluente.
- A finura da cinza obtida após a moagem é bastante elevada, se comparada com o mínimo recomendado pela NBR 5736. Esta finura foi obtida sem grande dificuldade pois a cinza é friável necessitando de pequena energia para a sua cominuição.
- Se comparado o poder calorífico superior da casca de arroz com outros materiais apresentados na Tabela é concluí-se que o mesmo é inferior a todos eles mas é aproximado ao da madeira. Este fato faz com que a casca de arroz possa ser caracterizada como material energético e desta forma possa ser utilizada como combustível.

Tabela 6: Poder calorífico superior de diversos materiais
(Mcal/kg)

madeira e papel	4
álcool hidratado	6
álcool etílico	7
carvão mineral	8
gasolina	11

- Para ambas as pozolanas é válida a observação de que sua análise química não é definitiva para a avaliação de sua atividade pozolânica. Todavia os resultados apresentados no Quadro 3 demonstram que tanto o pó de resíduo cerâmico, amostra C1, como o pó de cinza de casca de arroz, A1, são pozolanas por apresentarem uma porcentagem de $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 \geq 70\%$, umidade $\leq 3\%$ e perda ao fogo $\leq 10\%$. (71) A amostra A1 apresentou uma porcentagem de $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 = 86,2\%$, valor semelhante àqueles encontrados na bibliografia consultada, de 77,4% (70) a 92% (58). Em princípio pode-se considerar a amostra A1 mais ativa que a amostra C1 em função da sílica presente, o que significa que a resistência mecânica a ser alcançada posteriormente pelo aglomerante seja maior devido a formação de maior quantidade de silicatos hidratados.

No segundo grupo de questões referentes à obtenção do cimento pozolânico observou-se que :

- As cales utilizadas no experimento foram aquelas encontradas no mercado respeitando-se com isto o enfoque deste trabalho, isto é,

utilizar-se ao máximo do material disponível localmente. Ambas as cales 1 e 2 atenderam em grande parte a NBR 7175. Adotando-se o critério de classificar as cales conforme o seu teor de óxido de cálcio pode-se classificar a cal 1 como dolomítica e a cal 2 como cálcica.(74)

- O cimento pozolânico de resíduo cerâmico obtido através da mistura com a cal 1, dolomítica, apresentou melhores resultados de resistência à compressão do que o obtido através da mistura com a cal 2. Esta constatação é válida para todas as porcentagens resíduo/cal ensaiadas. Por outro lado o cimento pozolânico de cinza de casca de arroz obtido através da mistura com a cal 2, cálcica apresentou melhores resultados de resistência à compressão do que o obtido através da mistura com a cal 1, constatação válida também para todas as porcentagens cinza/cal ensaiadas. Isto significa que diferentes pozolanas reagem de forma diferente na presença de cales dolomíticas ou cálcicas. No caso a amostra C1 apresentou melhores resultados em presença de menor quantidade de óxido de cálcio. Este fato é contraditório e não se encontrou explicação na bibliografia consultada.
- O processo de cura adotado para a avaliação da resistência à compressão foi o de câmara úmida e temperatura ambiente pois em termos de método de ensaio é o que mais se aproxima das condições usuais. Apesar do pequeno número de corpos de prova o processo de cura acelerado reproduziu aproximadamente os resultados obtidos na cura à temperatura ambiente após os 28 dias.

O último grupo de questões é referente à utilização dos cimentos pozolânicos:

- Os resultados apresentados no Quadro 8 caracterizam uma utilização potencial dos cimentos pozolânicos. Estes resultados podem ser comparados com os valores do Quadro 10: parâmetros de cimentos de alvenaria que apresenta os principais parâmetros de diversas normas técnicas internacionais. (76,77,78,79,80) Os números constantes do Quadro 10 devem ser entendidos como ordens de grandeza pois os métodos de ensaio para obtê-los nem sempre são os mesmos entre si. Os cimentos de alvenaria são materiais de construção utilizados há mais de 30 anos em outros países e no Brasil sua produção se iniciou em 1981 (81). Este cimento pode ser utilizado no assentamento de alvenaria, seja de vedação ou portante, no revestimento de paredes, contrapisos, cimentados, assentamento de ladrilhos cerâmicos ou azulejos. Em termos de resistência mecânica pode ser considerado como um produto intermediário entre a cal e o cimento portland.
- Nesta comparação com o Quadro 10, o cimento pozolânico de resíduo cerâmico não pode ser considerado como um cimento de alvenaria pois não atende aos requisitos de tempo de final de pega e de resistência à compressão. O cimento pozolânico de cinza de casca de arroz também não pode ser considerado como um cimento de alvenaria pois não atende aos requisitos de tempo de final de pega e retenção de água.
- Apesar dos resultados alcançados, duas observações são importantes para o prosseguimento dos estudos. Primeiramente ainda não se conhece no país, com a devida profundidade, as

características das argamassas tradicionais, mistas ou de cal, que são utilizadas quer no assentamento das alvenarias quer no seu revestimento. Isto posto é necessário que prossigam os estudos atualmente em curso de avaliação de argamassas com materiais nacionais através de suas propriedades de trabalhabilidade, retenção de água, capacidade de absorver deformações, a extensão e a resistência de aderência e a durabilidade, além da resistência mecânica(82). Em função destes estudos deverão ser preparadas argamassas com o cimento pozolânico em diversas proporções estabelecendo-se com o devido rigor a sua utilização enquanto cimento de alvenaria. A segunda observação pode ser feita analisando-se a NBR 7200 (83) na qual são estabelecidos traços de argamassas exclusivamente de cal para determinadas funções . Pelos Gráficos 2 a 11 constata-se que os cimentos pozolânicos apresentam resistência mecânica mais elevada que as cales 1 e 2. Comparando-se o Quadro 5 com o Quadro 8 as amostras C1 e A1 apresentam valores de plasticidade mais elevados que as cales 1 e 2, possuindo conseqüentemente melhor trabalhabilidade. O ponto mais deficiente é a retenção de água. Com estas características o cimento pozolânico poderia substituir a cal.

- Com estas observações conclui-se que não se deve descartar a utilização dos cimentos estudados em argamassas de assentamento e de revestimento. Alguns estudos também podem ser feitos no sentido de introduzir aditivos ao cimento pozolânico a fim de melhorar as propriedades de retenção de água e de tempo de início e fim de pega.

- Uma outra utilização possível , esta apenas para o cimento pozolânico de resíduo cerâmico , é em pinturas, onde a pozolana devido a sua cor originada do material cerâmico se constitui em pigmento inorgânico.

5 . Estabilização de solos

5. Estabilização de solos

5.1. Histórico

O solo pode ser empregado como material de construção em edificações, em estradas ou em barragens da forma como é encontrado "in natura". Isto é aconselhado apenas em regiões onde o solo seja de boa qualidade (avaliação feita em experiências locais) ou em regiões de baixa ou nenhuma precipitação pluviométrica.

Nos outros locais aconselha-se ao uso de estabilizadores que são adicionados ao solo para primordialmente aumentar a sua durabilidade.

São vários os tipos de estabilizadores existentes, cada um deles atuando de forma específica sobre o solo. Os mais comuns são o cimento portland, a cal, o asfalto, a palha, e outras fibras vegetais. (84)

Dentre esses um dos mais antigos é a cal e também a cal-pozolana que eram empregadas na construção de estradas romanas há várias centenas de anos A.C.(85). Pela inexistência de equipamentos de compactação na construção destas estradas o solo-cal e o solo-cal-pozolana eram empregados como argamassas no rejuntamento de pedras.

Mais recentemente, o estabilizador mais empregado tem sido o cimento

portland. Este material foi utilizado pela primeira vez em 1915 nos USA pelo Eng. Bert Reno que pavimentou uma rua com uma mistura de conchas marinhas, areia de praia e cimento portland. Porém só a partir de 1935 a PCA, Portland Cement Association iniciou pesquisas estudando a tecnologia deste material.

Desde então o solo-cimento tem sido empregado principalmente em pavimentação de estradas e aeroportos. Além disso também se conhecem utilizações em revestimento de canais, diques, reservatórios e barragens de terra, estabilização de taludes e mais recentemente em tijolos, blocos, e painéis para construção de moradias.(86)

O mecanismo de interação do solo com o cimento é pouco conhecido; todavia sabe-se que o endurecimento da mistura é devido em grande parte às reações entre os argilominerais existentes no solo e cal liberada na hidratação do cimento.(87)

Existem algumas hipóteses de como se dão estas reações; uma delas distingue dois processos de endurecimento: primário e secundário (88)

A reação primária é constituída basicamente pela hidratação do cimento produzindo aluminatos e silicatos hidratados. Os argilominerais participam do processo secundário reagindo com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 formado durante a hidratação do cimento.

Primeiramente ocorre uma troca de cátions de sódio, potássio e hidrogênio dos argilominerais por cátions de cálcio saturando a argila de Ca^{++} . Esta reação causa a aglomeração das partículas argilosas.

Outra reação é devido a atividade pozolânica da argila; este fenômeno é lento e alguns autores não consideram esta reação como pozolânica.

O mecanismo descrito é válido tanto para estabilização com o cimento portland comum, como com o cimento pozolânico. Neste caso não ocorrem as reações devidas à hidratação do cimento sendo a mesma substituída em grande parte pelas reações pozolânicas no cimento de mesmo nome. (89)

Pode-se considerar também a estabilização com o cimento pozolânico como uma estabilização com a cal adicionando-se pozolana para melhorar a sua qualidade. (90)

A desvantagem de trabalhar com pozolanas é que possuem uma superfície específica maior exigindo um consumo maior de água e com isso diminuindo a resistência mecânica das misturas. Como vantagem observou-se uma diminuição de fissuras na estabilização de solos argilosos (91).

5.2 Metodologia

Para consecução dos objetivos desta etapa do trabalho, ou seja avaliar as misturas solo/cimento pozolânico foi adotada uma metodologia baseada em ensaios de resistência à compressão em equipamento reduzido, já utilizado em diversos laboratórios (92)

Os corpos de prova moldados neste equipamento tem 5cm de diâmetro e 5cm de altura sendo obtidos após a aplicação de 5 golpes de soquete em cada lado.

A densidade do corpo de prova assim obtido é próxima da densidade máxima do ensaio normal de compactação, também conhecido como Proctor normal.

Pode-se observar no entanto que a resistência à compressão de corpos de prova com relação altura/diâmetro igual a um não podem ser considerados como resistência à compressão simples. Todavia o valor da resistência obtido avalia o grau de estabilização do solo assim como é indicativo do comportamento relativo das misturas ensaiadas.

A moldagem dos corpos de prova por este equipamento tem a vantagem de necessitar dez vezes menos material do que quando se emprega o cilindro de Proctor, além de economizar tempo no desenvolvimento dos estudos.

Inicialmente foi recolhido uma amostra de solo de significativa ocorrência no Estado de São paulo.

Este solo foi devidamente caracterizado determinando-se a massa

específica dos grãos, os limites de Atterberg e a curva de distribuição granulométrica.

Com o intuito de avaliar as condições de trabalhabilidade deste solo na compactação foram preparados corpos de prova com solo e cimento pozolânico com objetivo de avaliar a variação dos parâmetros de compactação, isto é, umidade e massa específica aparente seca das misturas.

Com base nos resultados obtidos dos ensaios de compactação foram moldados corpos de prova de misturas de solo e cimento pozolânico para serem submetidos a ensaios de compressão simples, após 2, 7, 28 dias de cura.

Procurou-se avaliar o comportamento das misturas em termos de resistência à compressão simples, em face da variação do teor de cimento pozolânico, do desvio de umidade em relação à ótima, da energia de compactação e do tipo de cura.

Após o período de cura estabelecido, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas à temperatura ambiente, sendo a seguir rompidos em prensa de carga controlada, com velocidade de carregamento de aproximadamente 0,15 MPa/minuto.

Além da análise dos resultados obtidos nestes ensaios, para parametrizá-los foram executados os ensaios de resistência à compressão em cimento portland comum CP-320.

A avaliação da durabilidade, normalmente efetuada em estudos de estabilização de solos, com o ensaio de perda de massa por molhagem e secagem, não foi verificada pois neste estudo pretende-se observar

o comportamento do solo/ cimento pozolânico face a uma possível utilização em componentes de edificações. Sabe-se que nestes casos a resistência à compressão representa não só a característica que estabelece a situação mais restritiva para os teores de estabilizadores empregados como também é a variável que mais facilmente pode ser avaliada em laboratório.

Cabe também lembrar, que nos Gráficos referentes a esta etapa dos estudos optou-se por unir os pontos (x,y) para ilustrar o que ocorre não significando que estas retas reproduzam com exatidão o observado.

5.3. Apresentação dos resultados

5.3.1. Solo

A amostra de solo foi coletada de um corte situado no km 29 + 500m da Rodovia Castelo Branco, pista Interior-Capital, na direção do pórtico de sinalização.

Trata-se de um saprolito de granito/gnaiss de significativa ocorrência no Estado de São Paulo.

Sobre a amostra deste solo foram executados os ensaios para a determinação de massa específica, NBR 6508, dos limites de Atterberg, NBR 6459 e NBR 7180 e da análise granulométrica, NBR 7181. (93,94,95,96)

Os resultados de caracterização deste solo são apresentados no Gráfico 14.

Biblioteca da Escola Politécnica
São Paulo

FT-922

5.3.2. Solo e cal

Com este solo foram executados preliminarmente ensaios de compactação no equipamento reduzido. O objetivo deste ensaio era de testá-lo e avaliar as condições de trabalhabilidade deste solo.

Foram ensaiadas tres misturas: a primeira somente o solo sem a cal e as outras duas com 3,4% e 8% de cal respectivamente.

Os ensaios foram realizados aplicando-se cinco golpes de soquete em cada lado do corpo de prova; a energia desta compactação corresponde à energia normal de compactação no cilindro de Proctor.

Os resultados destes ensaios encontram-se no Quadro 11.

Pode-se observar pelo Gráfico 11 que a massa aparente do solo seco varia inversamente com a adição de cal, isto é, quanto maior quantidade de cal, menor a massa específica, pelo menos para os teores ensaiados.

5.3.3. Solo e cimento pozolânico

Os cimentos Ci-70-1 e Ai-70-2 foram misturados ao solo em teores de 5%, 8%, 11%, 14% e 17% (peso do cimento pozolânico em relação ao peso do solo seco) procurando abranger uma faixa ampla para se avaliar a variação dos parâmetros de compactação das misturas, isto é, unidade e massa específica aparente seca.

A energia de compactação empregada foi a normal, isto é, cinco golpes de soquete em cada lado do corpo de prova.

No Quadro 11 apresentam-se a massa específica aparente seca máxima e a unidade ótima determinada em cada ensaio.

Pode-se observar pelo Quadro 11 que, à medida que se aumenta o teor de cimento pozolânico, diminui a massa específica aparente.

Todos os ensaios foram executados sem secagem prévia e sem reuso do material.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de compactação foram moldados corpos de prova de misturas solo e cimentos pozolânicos que foram ensaiados conforme quatro programações denominadas A, B, C, D.

A programação E é semelhante a programação A, utilizando-se o cimento portland CP-320 como estabilizador.

- Programação A

Esta programação teve por objetivo avaliar o ganho de resistência

da mistura com o incremento do teor de cimento pozolânico. Para tanto foram fixados:

- umidade em torno das ótimas, obtidas por correspondentes ensaios de compactação;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram selecionados os teores de 5%, 11% e 17% em peso, para cada um dos cimentos C1-70-1 e A1-70-2 tendo sido moldados 9 corpos de prova para cada teor de cimento pozolânico e rompidos 3 para cada tempo de cura. A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 12 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

Nos Gráficos 15 a 18 apresentam-se a variação da resistência à compressão das misturas, em função do teor de cimento pozolânico e tempo de cura.

- Programação B

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão em função dos desvios de umidade em relação às ótimas, obtidas dos correspondentes ensaios de compactação. Para tanto foram fixados:

- teor de cimento pozolânico igual a 11% em peso;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram preparadas misturas com desvios de umidade variando de -3,0% a +3,0% em relação à ótima, para cada um dos cimentos pozolânicos C1-70-1 e A1-70-2, tendo-se moldados 9 corpos de prova para cada condição de umidade e rompidos 3 para cada tempo de cura.

A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar a perda de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 13 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples em função do desvio de umidade e do tempo de cura, estando apresentados também os resultados obtidos na Programação A, para o teor de 11%.

- Programação C

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão em função da energia de compactação. Para tanto foram fixados:

- teor do cimento pozolânico igual a 11% em peso;
- umidade em torno das ótimas, obtidas dos correspondentes ensaios de compactação realizados com 5 golpes do soquete por face do corpo de prova;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Para cada um dos cimentos pozolânicos Ci-70-1 e Ai-70-2 foram moldados duas séries de 9 corpos de prova, aplicando-se 4 ou 10 golpes do soquete por corpo de prova, tendo-se rompido 3 corpos de prova, de cada série, para cada tempo de cura.

A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova acondicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 14 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples, bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

Nos Gráficos 23 a 28 apresentam-se as variações da resistência à compressão em função do número de golpes e do tempo de cura, estando apresentados os resultados obtidos na Programação A, para o teor de 11%.

- Programação D

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão quando se procede a cura dos corpos de prova ao ambiente. Para tanto foram fixados:

- teor de estabilizador igual a 11% em peso;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- umidade em torno das ótimas obtidas dos correspondentes ensaios de compactação.

Foram preparadas misturas para cada um dos cimentos pozolânicos

C1-70-1 e A1-70-2 tendo-se moldados 9 corpos de prova para cada cimento e rompidos 3, para cada tempo de cura.

A cura foi processada ao ambiente, sem proteção especial, porém em local não exposto aos raios solares.

No Quadro 15 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples, bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

No Gráfico 29 apresentam-se as curvas de variação da resistência à compressão em função do tempo de cura.

- Programação E

Esta programação teve por objetivo servir como parâmetro de comparação. Para tanto utilizou-se como estabilizador o cimento portland comum CP-320.

A curva de compactação foi obtida para o teor de 7% de cimento conforme o método da ABCP (98).

Para se avaliar o ganho da resistência da mistura com o incremento do teor de cimento portland comum foram fixados:

- unidade em torno da ótima, obtidas por correspondentes ensaios de compactação;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram selecionados os teores de 4%, 7% e 10% em peso, tendo sido moldados 9 corpos de prova para cada teor de cimento e rompidos 3

para cada tempo de cura. A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 16 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

No Gráfico 30 apresenta-se a variação da resistência à compressão das misturas, em função do teor de cimento portland comum e tempo de cura.

5.4. Discussão dos resultados

Para o conjunto de ensaios executados, a análise dos resultados será agrupada conforme a questão estudada:

a) Compactação

- Observa-se que a adição da cal e dos cimentos C1-70-1 e A1-70-2 ao solo reduz a sua massa específica aparente seca máxima, conforme Quadro 11; esta tendência está relacionada com o aumento do teor de estabilizadores e ocorre mais acentuadamente com o A1-70-2;
- Por outro lado, a adição da cal reduz a umidade ótima, verificando-se porém uma tendência inversa para os outros dois estabilizadores e mais acentuadamente para o A1-70-2;
- Em todas as misturas nota-se um achatamento das curvas de compactação quando comparadas com a do solo, inferindo-se que desvios de umidade, em relação à ótima, relativamente amplos introduzem pequenas variações do grau de compactação, para a energia considerada;

b) Programação A

- Observa-se no Gráfico 16 que não há variação da resistência à compressão, para os corpos de prova com 2 dias de cura, qualquer que seja o teor do cimento A1-70-2. Para este estabilizador, após 7 dias nota-se uma estabilização da resistência a partir de um teor da ordem de 11% em peso, ao passo que para 28 dias, a

resistência é continuamente ascendente com o incremento do estabilizador adicionado. Tal fato é indicativo de que para maiores teores de estabilizador as reações para serem completadas requerem maior tempo de cura, o que pode ser visualizado no Gráfico 16 e na Tabela 7.

Tabela 7: Índice de resistência à compressão referida a 28 dias de cura

teor de A1-70-2 (%)	2 dias	7 dias	28 dias
5	0,65	0,95	1,00
11	0,25	0,72	1,00
17	0,18	0,55	1,00

- Nota-se nos Gráficos 15 e 17 que o teor de 5% de C1-70-1 é insuficiente para estabilizar o solo, visto que os corpos de prova sofreram esboroamento quando imersos em água para o tempo de cura investigados;
- Observando-se as curvas de resistência para 7 e 28 dias de cura nota-se que aparentemente as reações se processam mais rapidamente quando se emprega o cimento C1-70-1 que o cimento A1-70-2, para os teores investigados;
- Na faixa investigada o cimento A1-70-2 apresentou melhor desempenho em termos de resistência representando 220% a mais para teores de 11% e 130% a mais para os teores de 17%, para os 28 dias de cura. É possível que elevando-se os teores de C1-70-1

possa-se atingir valores mais elevados de resistência à compressão;

- Ao se comparar com a programação E obtém-se os valores da Tabela 8:

Tabela 8: Índice de resistência à compressão aos 28 dias referido a 7% de cimento portland comum

Estabilizador	5% em peso	11% em peso	17% em peso
A1-70-2	0,27	0,81	1,06
C1-70-1	--	0,25	0,46

Observa-se que a estabilização com cimento portland comum apresenta os melhores resultados. Para se conseguir atingir uma resistência à compressão de 2,08 MPa aos 28 dias, obtida com 7% de cimento portland é necessário aproximadamente o dobro de cimento A1-70-2.

c) Programação B

- Observa-se nos Gráficos 20 e 22 que para o cimento A1-70-2, à excessão dos corpos de prova que sofreram esboroamento (cura de 2 dias e desvio de umidade em torno de -3%), os desvios de umidade no intervalo investigado exercem pouca influência na resistência, para cada tempo de cura como mostra a Tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros estatísticos dos valores de resistência à compressão

tempo de cura (dias)	Resistência à compressão		
	média (MPa)	desvio padrão (MPa)	coef. var. (%)
2	0,37	0,05	13,5
7	1,07	0,09	8,4
28	1,57	0,13	8,3

- Verifica-se ainda uma excelente concordância com as relações obtidas na Programação A, para teor de 11%, no tocante às relações de resistência para os diferentes tempos de cura, como mostra a Tabela 10:

Tabela 10: Relação de resistência à compressão simples referida a 28 dias de cura

Programação	2 dias	7 dias	28 dias
A (11% de A1-70-2)	0,25	0,72	1,00
B (resis. médias)	0,24	0,68	1,00

- Observa-se nos Gráficos 19 e 21 que para o cimento C1-70-1, à excessão dos corpos de prova que sofreram esboroamento (cura de 2 dias e desvio de umidade em torno de -3%), os desvios de umidade no intervalo investigado exercem pouca influência na resistência, para cada tempo de cura como mostra a Tabela 11:

Tabela 11: Parâmetros estatísticos relativos aos valores de resistência à compressão

tempo de cura (dias)	Resistência à compressão		
	média (MPa)	desvio padrão (MPa)	coef. var. (%)
2	0,43	0,02	4,7
7	0,58	0,04	6,9
28	0,61	0,07	11,5

- Para o teor de 11% em peso e para o intervalo de desvio de umidade, de -3% a +3%, a resistência à compressão simples praticamente independe do teor de umidade, para ambos os cimentos C1-70-1 e A1-70-2.
- Confirmam-se as conclusões da Programação A no sentido de que as reações do cimento C1-70-1 aparentemente se processam de forma mais acelerada, e que o cimento A1-70-2 tem melhor desempenho em termos de resistência, para iguais teores.

d) Programação C

- A rigor os corpos de prova deveriam ter sido moldados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima obtidas das curvas correspondentes à cada energia de compactação (4,5 e 10 golpes por face do corpo de prova). Tendo em vista porém que as curvas de compactação resultaram relativamente achatadas e que os desvios de umidade, em uma faixa bastante ampla, praticamente não introduziram variações nos valores de resistência, como visto na Programação B, é de se esperar que o procedimento adotado não conduziu a conclusões

diferentes daquelas que seriam obtidas adotando-se o procedimento alternativo. Da mesma forma os graus de compactação e os desvios de unidade deveriam ser referidos, respectivamente, às massas específicas aparentes secas máximas e umidades ótimas correspondentes à cada energia de compactação, não se tendo procedido desta forma visando facilitar a comparação.

- Observa-se nos Gráficos 24 e 26 que para o cimento A1-70-2 não há ganho de resistência com o aumento de energia de compactação acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, para 2 e 7 dias de cura. Por outro lado verifica-se aos 28 dias de cura um aumento de resistência com o incremento da energia de compactação, confirmando-se assim que as reações se processam com certa intensidade mesmo após 7 dias de cura. Os ganhos de resistência com o aumento de energia de compactação tomando-se por exemplo o tempo de cura de 28 dias são da ordem de 24% e de 22% para as relações 5 golpes/4 golpes e 10 golpes/ 5 golpes, respectivamente. Em outras palavras, acima de 5 golpes por face do corpo de prova, o ganho de resistência com o incremento da energia de compactação é relativamente baixo, quando comparados com energias inferiores.

- Contudo, a análise dos graus de compactação obtidos após a moldagem para 4 e 5 golpes, conforme apresentado no Quadro 14 conduz a um aparente paradoxo, visto que a graus de compactação praticamente iguais correspondem resistências sensivelmente diferentes. Tal fato explica-se porém pela variação de volume dos corpos de prova durante a imersão em água, e conseqüente variação no volume de vazios. No tocante à expansão ou seja à variação de

volume dos corpos de prova nota-se no Gráfico 28, uma tendência decrescente da mesma, ou de estabilização volumétrica, com o aumento do tempo de cura. Observa-se nos Gráficos 23 e 25 que para o estabilizador C1-70-1, à excessão dos ensaios efetuados após 2 dias de cura, o incremento de energia confere um relativo ganho de resistência, da ordem de 40% e 63%, para 7 e 28 dias de cura, respectivamente, quando se passa de 5 para 10 golpes do soquete por face do corpo de prova. Tal tendência não foi constatada para 4 e 5 golpes, em virtude de os graus de compactação, após imersão, serem praticamente iguais. Nota-se ainda no Gráfico 27 uma tendência de estabilização volumétrica dos corpos de prova com o aumento do tempo de cura.

- A energia de compactação exerce uma relativa influência sobre a resistência. Acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, os ganhos relativos de resistência são mais acentuados para o cimento C1-70-1, tendência que se inverte abaixo da mencionada energia.
- O grau de compactação determinado após a imersão constitui-se em um parâmetro que deve ser considerado, quando se analisam os parâmetros de resistência, em decorrência do índice de vazios provocada pela expansão dos corpos de prova, a qual por sua vez, apresenta uma tendência decrescente com o aumento do tempo de cura.
- Confirmam-se as conclusões da Programação A, no sentido de que as reações do cimento C1-70-1, aparentemente se processam de forma mais acelerada e que o cimento A1-70-2 tem melhor desempenho, em termos de resistência, para iguais teores.

e) Programação D

- Observa-se no Gráfico 29 que para o cimento A1-70-2 a resistência à compressão simples tende a se estabilizar de forma mais acelerada do que na Programação A, fato indicativo de que as reações, aliadas possivelmente a fatores inibidores como a recarbonatação e a diminuição da água de hidratação, estabilizam-se mais rapidamente ao ambiente do que em condições de cura em câmara úmida e isolada do ar. Destaque-se que os corpos de prova com cura de 2 dias sofreram esboroamento quando imersos em água, o que não aconteceu nas Programações anteriores para condições semelhantes de moldagem. Por outro lado a cura ao ambiente provocou uma queda da resistência da ordem de 50% quando comparada com a cura em câmara úmida, como pode ser observada na Tabela 12:

Tabela 12: Influência da cura na resistência à compressão

tempo de cura (dias)	Prog A(MPa)	Prog D(MPa)	Prog D/Prog A(%)
7	1,21	0,62	51
28	1,69	0,77	46

- Para o cimento C1-70-1 o esboroamento dos corpos de prova quando imersos em água, para os tempos investigados, mostra que a cura em câmara úmida, com os corpos de prova isolados do ar, é de relevante importância sob o ponto de vista da estabilização do solo.

As conclusões resultantes da estabilização de solos com cimento pozolânico podem ser resumidas como se segue:

- Para os teores de cimento pozolânico investigados, o A1-70-2 apresentou desempenho sensivelmente superior, em termos de resistência;
- Para o cimento Ci-70-1 as reações aparentemente se processaram-se de forma mais acelerada, nos tempos de cura investigados;
- Os desvios de umidade, em relação à ótima, na faixa investigada, tiveram pouca influência na resistência à compressão simples;
- A cura em câmara úmida, com os corpos de prova isolados do ar, exerceu decisiva influência no comportamento do solo estabilizado;
- A estabilização com o cimento portland comum CP-320 apresentou os melhores resultados de resistência à compressão se comparados com o teores de cimento A1-70-2 e Ci-70-1 analisados;

Para a continuidade das investigações pode-se sugerir:

- Aumentar os teores de cimento A1-70-2 e Ci-70-1 nas misturas;
- Desenvolver estudo semelhante com outros solos de significativa ocorrência no Estado de São Paulo;
- Utilizar as misturas na produção de tijolos e avaliar o seu desempenho.

6 . Considerações econômicas

6. Considerações Econômicas

6.1. Metodologia

A produção de cimento pozolânico de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico, além de envolver aspectos técnicos, envolve também aspectos econômicos e sociais.

Do ponto de vista social constitui-se em uma atividade geradora de empregos, na maioria de mão-de-obra não especializada, necessários tanto para a produção da cal, como para a produção da pozolana.

Este trabalho não irá quantificar o número de empregos gerados pela produção de cimento pozolânico mas pode-se supor que é várias vezes superior à mão-de-obra utilizada pela indústria do cimento portland.(98)

Do ponto de vista econômico um aspecto já tratado anteriormente e que irá ser novamente mencionado é o relativo ao consumo de energia para a produção destes cimentos pozolânicos.

Para uma avaliação do custo do cimento pozolânico A1-70-2 e C1-70-1 inicialmente foi efetuado um levantamento das quantidades disponíveis de casca de arroz e resíduo cerâmico no Brasil e no Estado de São Paulo.

Esse levantamento teve por objetivo verificar a distribuição da

ocorrência destes resíduos e a potencialidade de sua utilização.

A partir destes dados foram elaborados dois estudos de caso para cada cimento pozolânico, sendo um no Estado de São paulo, e outro fora do Estado, cada um deles referido à localização mais factível do empreendimento. Uma vez definida a localização, procedeu-se à estruturação do custo padrão para uma planta mínima.

O custo dos insumos foi aquele praticado em março de 1986

Para isso adotou-se um diagrama de produção com as suas operações unitárias e procedeu-se aos cálculos de custo levando-se em consideração os itens usualmente utilizados para esta análise (99):

- insumos básicos como resíduo e cal;
- insumos secundários como energia e transporte;
- mão-de-obra;
- capital de inversão e de giro.

6.2. Consumo de energia

O consumo de energia tem sido uma das grandes preocupações no estudo dos insumos industriais devido ao seu custo e à sua escassez.

No caso dos cimentos pozolânicos A1-70-2 e C1-70-1, o parâmetro (apesar da resistência mecânica superior) é o consumo de energia na produção de cimento portland comum que varia em torno de 1200

kcal/kg conforme a Tabela 3.

Para estes cimentos que se utilizam de resíduos, a principal contribuição em termos de consumo de energia é devida à utilizada na produção de cal.

Apesar da grande variação de tipos de fornos para a calcinação do calcário e conseqüentemente na grande variação respectiva de consumo de energia, pode-se adotar um valor médio de 2000kcal/kg de cal produzida (100)

Como a participação da cal é de 30% nos cimentos A1-70-2 e C1-70-1, o consumo de energia referente à cal decresce para 600 kcal/kg de cimento pozolânico.

O consumo de energia referente à produção de pó de resíduo cerâmico é relativamente pequeno e representa aproximadamente 50 kcal/kg consumido basicamente na cominuição dos resíduos. Como a participação da pozolana é de 70%, em cada kg de cimento pozolânico ter-se-á consumido 35 kcal.

Portanto o total de energia será de 635 kcal/kg de cimento pozolânico C1-70-1 que é pouco mais da metade do consumo de cimento portland comum.

No caso do cimento pozolânico A1-70-2 este número é menor tendendo a 600 kcal/kg pois na queima da casca de arroz não se consome energia e a cinza obtida é friável necessitando de pouca energia para ser cominuída.

6.3. Custo do cimento pozolânico de cinza de casca de arroz

O levantamento do total da produção de arroz em casca para todas as unidades da Federação foi efetuada a partir de dados obtidos do Anuário Estatístico do Brasil de 1984 da FIBGE (101)

O Quadro 17 indica a produção de arroz em casca, segundo as unidades da Federação, para os anos de 1983 e 1984 e a Figura 2 indica a distribuição da produção de arroz em casca no Brasil, por unidade da Federação para o ano de 1984.

Aproximadamente 20% em peso da produção de arroz em casca é constituída pela própria casca. Adotando-se que 14% da casca quando queimada resulta em cinza obteve-se o Quadro 18 na qual discrimina-se a quantidade de cinza obtida na queima da casca de arroz, por unidade da Federação, em 1983 e 1984.

O mesmo procedimento foi adotado no Estado de São Paulo, utilizando-se as informações obtidas no Anuário Estatístico do Estado de São Paulo da Fundação SEADE, obedecendo-se a divisão do Estado em DIRAS (Divisão Regional Agrícola) (102,103)

O Quadro 19 apresenta a produção de arroz em casca no Estado de São Paulo; o Quadro 20 apresenta o total de cinza de casca de arroz disponível e a Figura 3 a distribuição da produção de arroz em casca no Estado de São Paulo por DIRAS.

A produção brasileira ainda é muito pequena se comparada com a previsão do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para a safra mundial de 1984/1985, de 467,8 milhões de toneladas de arroz

em casca. Deste total a China deverá produzir 178 milhões e a Índia 89,3 milhões. (104)

Para um estudo de caso foi escolhida uma unidade de produção de 10t/mês no Município de Ribeirão Preto que é sede do DIRA com maior produção de arroz no Estado de São Paulo.

= inversões com recursos próprios

- aluguel mensal de um terreno de 5000 m2
incluindo uma construção de alvenaria de 100
m2 com benfeitorias.....cz\$ 7000,00
- tambores para queima da casca, ferramentas.....cz\$ 9000,00
- moinho para cominuição da cinza.....cz\$ 5000,00
- "start-up" e taxas.....cz\$12000,00
- total.....cz\$33000,00

= elementos para o cálculo de custos

- custo da palha(somente transporte).....cz\$ 48,00/ton
- custo da cal colocada em R. Preto.....cz\$ 10,68/20kg
- custo de queima da casca de arroz
- 1 servente.....cz\$ 1500,00
- custo da moagem da cinza
- eletricidade e 1 meio oficial.....cz\$ 3000,00

- despesas financeiras
 - com capital
 - capital próprio.....cz\$33000,00
 - remuneração (1% a.m.).....cz\$ 330,00
 - com capital de giro
 - palha.....cz\$ 2400,00
 - cal.....cz\$ 1600,00
 - aluguel.....cz\$ 7000,00
 - mão-de-obra.....cz\$ 4000,00
 - remuneração (1% a. m.).....,.....cz\$ 150,00

- resumo para uma produção de 10 ton/mes
 - palha.....cz\$ 2400,00
 - cal.....cz\$ 1600,00
 - queima da casca.....cz\$ 1500,00
 - moagem da cinza.....cz\$ 3000,00
 - aluguel.....cz\$ 7000,00
 - despesas financeiras com capital.....cz\$ 330,00
 - despesas financeiras com capital de giro.....cz\$ 150,00
 - subtotal.....cz\$15980,00
 - eventuais + taxas diversas (5%).....cz\$ 800,00
 - taxa de administração.....cz\$ 3196,00
 - total.....cz\$19976,00

- custo por 50 kg = cz\$ 100,00

6.4 Custo do cimento pozolânico de resíduo cerâmico

O setor produtor de telhas e tijolos cerâmicos caracteriza-se por uma pulverização no espaço das unidades produtoras e pela quase que falta absoluta de informações.

No Estado de São Paulo existem aproximadamente 1500 indústrias de telhas e de tijolos cerâmicos (106). Cada indústria produz de 10000 a 25000 telhas/dia ou 20000 a 30000 tijolos/dia (107)

Isto representa uma produção diária de aproximadamente 75000 ton ou seja de 22500000 ton anuais, no Estado de São Paulo.

Se for adotado um índice de 2% de perdas o volume total anual de resíduo cerâmico seria de 450000 ton.

Para o Brasil pode-se estimar uma quantidade de resíduo cerâmico 3 vezes maior.

Para um estudo de caso foi escolhida uma unidade de produção de 10 ton/mes no Município de Itu que representa uma grande concentração de indústrias cerâmicas.

- inversões com recursos próprios
 - aluguel mensal de um terreno de 5000 m2
incluindo uma construção de alvenaria
de 100 m2 com benfeitorias.....cz\$ 7000,00
 - moinho para trituração de resíduo com
capacidade de 400 kg/dia.....cz\$ 4800,00
 - "start-up" e taxas.....cz\$12000,00
 - total.....cz\$23800,00

- elementos para o cálculo de custos
 - custo do resíduo(somente transporte).....cz\$ 800,00/ton
 - custo da cal.....cz\$ 10,68/20kg
 - custo da moagem
 - (1 servente, 1/2 oficial, energia elétrica)...cz\$ 4500,00/mes
- despesas financeiras
 - com capital
 - capital próprio.....cz\$23800,00
 - remuneração (1% a.m.).....cz\$ 238,00
 - com capital de giro
 - resíduo cerâmico.....cz\$ 5600,00
 - cal.....cz\$ 1600,00
 - aluguel.....cz\$ 7000,00
 - mão-de-obra.....cz\$ 4000,00
 - remuneração (1% a.m.).....cz\$ 182,00
- resumo
 - resíduo cerâmico.....cz\$ 5600,00
 - cal.....cz\$ 166,00
 - moagem do resíduo.....cz\$ 4500,00
 - aluguel.....cz\$ 7000,00
 - despesas financeiras c/ capital.....cz\$ 238,00
 - despesas financeiras c/ capital de giro.....cz\$ 182,00
 - subtotal.....cz\$19120,00
 - eventuais + taxas diversas (5%).....cz\$ 956,00
 - taxa de administração (20%).....cz\$ 3824,00
 - total.....cz\$23900,00
- custo por 50 kg = cz\$ 119,50

7 . Comentários e conclusões

7. Comentários e conclusões

Ao longo deste estudo foram apresentadas diversas constatações principalmente nos itens referentes à discussão dos resultados.

Ao final do trabalho é oportuno rerepresentá-las contextualizando as constatações de tal forma a situá-las numa problemática mais geral.

Desta forma lista-se a seguir as principais constatações:

- a) Os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico podem ser obtidos com relativa facilidade a partir de uma mistura de cales hidratadas de boa qualidade e de cinza de casca de arroz ou de pó de resíduo cerâmico. Para a sua obtenção são necessários equipamentos disponíveis no mercado ou que possam ser fabricados com material de baixo custo. A mão-de-obra empregada não necessita de especialização sendo porém recomendado um treinamento específico.
- b) A obtenção dos cimentos pozolânicos estudados consome praticamente a metade do consumo de energia empregado na produção do cimento portland comum. Este fato é importante na medida em que se procura racionalizar a utilização de energéticos nas sociedades industrializadas.
- c) Observa-se porém sérios inconvenientes na queima da casca de arroz : primeiro, a baixa capacidade de produção do equipamento estudado e em segundo, a geração, na combustão, de fumaça que

pode ser considerada como poluente.

- d) Apesar disso, se comparado o poder calorífico da casca de arroz com outros materiais tais como o álcool, carvão, madeira ou gasolina, conclui-se que o mesmo é inferior a todos eles mas é aproximado ao da madeira. Este fato faz com que a casca de arroz possa ser caracterizada como material energético e desta forma possa ser utilizada como combustível.
- e) Em termos de disponibilidade no Estado de São Paulo, a cinza representa praticamente 2,5% do existente de resíduo cerâmico. Para o Brasil este número se eleva para 20% o que é um indicativo da importância relativa destes resíduos. Se por hipótese 50% da casca de arroz do Brasil fosse transformada em cinza, este resíduo seria suficiente para produzir 15% do total de cimento portland produzido em 1985, no Brasil. E este número se eleva para 80% quando se raciocina com o resíduo cerâmico. Somando-se a cinza com o resíduo cerâmico poder-se-ia produzir a mesma quantidade de cimento portland pozolânico produzido em 1985. Com estes números pode-se afirmar simplificadaamente, que a disponibilidade dos resíduos estudados é grande e tem uma importância significativa.
- f) O custo dos cimentos pozolânicos estudados é praticamente o dobro do preço do cimento portland comum, na data de março de 1986, que era de cz\$ 51,00. O custo do cimento pozolânico pode chegar ao preço do cimento portland comum se não forem computados custos de mão-de-obra, de aluguel do edifício e de taxa de administração, o que pode ocorrer eventualmente em uma produção informal. Estes dados demonstram que o custo dos

cimentos estudados é maior que o do cimento portland comum, considerando-se o Brasil que produz cimento portland em quantidade compatível com as suas necessidades.

- g) O cimento pozolânico de casca de arroz que apresenta os melhores resultados é aquele obtido através da mistura com a cal cálcica e em contrapartida o cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresenta os melhores resultados é aquele obtido com a cal dolomítica; em ambos os casos a melhor proporção da mistura é de 30% de cal para 70% de pozolana, ou seja, aproximadamente 1/3 de cal para 2/3 de pozolana;
- h) O cimento pozolânico de casca de arroz apresentou melhores características de resistência mecânica que o cimento pozolânico de resíduo cerâmico;
- i) Apesar dos cimentos pozolânicos não atenderem a normalização existente para cimentos portland pozolânicos e para cimentos de alvenaria, não se pode descartar a sua utilização em argamassas de assentamento e de revestimento;
- j) O cimento pozolânico de casca de arroz e de resíduo cerâmico na estabilização do solo estudado apresenta desempenho inferior que o cimento portland comum CP-320;
- k) Ao se considerar os aspectos econômicos, confirma-se que os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico desenvolvidos para este trabalho apresentam desempenho inferior ao cimento portland comum na estabilização do solo estudado;

- l) A resistência mecânica do solo estabilizado foi acompanhado durante um período de no máximo 28 dias tendo em vista o horizonte aceitável de aplicação e utilização deste material. Entende-se porém que outros estudos devam ser feitos para períodos de observação mais dilatados tendo em vista a velocidade das reações pozolânicas que ocorrem nos materiais consorciados na estabilização com cimento pozolânico.
- m) Para os teores de cimento pozolânico investigados, o de cinza de casca de arroz, A1-70-2 apresentou desempenho sensivelmente superior, ao de resíduo cerâmico C1-70-1, em termos de resistência mecânica, para a estabilização do solo estudado;
- n) Para ambos os cimentos pozolânicos os desvios de umidade, em relação à ótima, na compactação tiveram pouca influência na resistência à compressão; este fato se traduz em uma facilidade da definição do teor de água na estabilização do solo em termos de obra;
- o) A cura em câmara úmida com os corpos de prova isolados ao ar, exerceu decisiva influência na resistência à compressão simples sendo que a cura ao ambiente provocou uma queda de resistência da ordem de 50% quando comparada com a cura em câmara úmida; esta constatação aponta para a necessidade de se diminuir o contacto com o ar das misturas solo/cimento pozolânico, o que evidentemente dificulta a execução da estabilização do solo;
- p) A energia de compactação exerce uma relativa influência sobre a resistência mecânica. Acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, os ganhos relativos de resistência, para o tempo

de cura observado, são mais acentuados para o cimento Ci-70-1, tendência que se inverte abaixo da mencionada energia.

- q) Finalmente deve-se alertar para o fato que este estudo aponta algumas direções que só serão efetivamente entendidas como alternativas tecnológicas na medida em que outros estudos de aplicação dos cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico e de estabilização de solos com estes cimentos forem sendo efetuados. Pode-se apontar para os estudos de argamassas e de componentes para alvenaria, além de outros elementos das edificações.

8 . Referências bibliográficas

8. Referências bibliográficas

- (1) ABIKO, Alex Kenya - Tecnologias Apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento. Dissertação de mestrado. São Paulo, EPUSP, 1980.
- (2) CHOISY, Auguste - Histoire de l'architecture. Paris, Gauthier-Villars Imprimeur-Libraire, 1899.
- (3) VITRUVIUS - Les dix livres d'architecture (avec les notes de Perrault). Paris, Editores E. Tardieu, A. Coussin, 1837.
- (4) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, ABNT, 1985. (NBR 5736/EB-758).
- (5) BRASIL. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - Relatório anual 1985. Rio de Janeiro, SNIC, 1985.
- (6) BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO - Perspectivas da Indústria Cimenteira na Presente Década. Brasília, Lafarge Consultoria e Estudos, 1982.
- (7) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Terminologia de Cal e Materiais Calcários. Rio de Janeiro, ABNT, 1954. (TB-25).

- (8) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cal virgem para construção. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. (NBR 6453/ EB-172).
- (9) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (NBR 7175/ EB-153)
- (10) GUIMARÃES, J. E. P. - Dimensões do Universo da Cal. Anais da V Reunião Aberta da Indústria da Cal. São Paulo, EPUSP, 1985.
- (11) CINCOTTO, M.A. - Conceitos Básicos sobre a tecnologia da cal. Anais da V Reunião Aberta da Indústria da Cal. São Paulo, EPUSP, 1985.
- (12) BOYTON, R.S. - Chemistry and Technology of Lime and Limestone. New York, Interscience Publishers Division-John Wiley and Sons, 1967.
- (13) ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMES TECHNIQUES - Chaux aériennes éteintes pour le bâtiment. Paris, AFNOR, 1981. (NF P 15-510)
- (14) BRITISH STANDARD INSTITUTE - Specification for building limes. London, BSI, 1972. (BS 890 : 1972).
- (15) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - Standard specification for finishing hydrated lime. Philadelphia, ASTM, 1984. (C206-84).
- (16) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for hydrated lime for masonry purposes. Philadelphia, ASTM, 1979. (C207-79)

- (17) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for lime for use with pozzolans. Philadelphia, ASTM, 1978. (C821-78)
- (18) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for quicklime, hydrated lime and limestone for chemical uses. Philadelphia, ASTM, 1979. (C911-79)
- (19) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for quicklime and hydrated lime for soil stabilization. Philadelphia, ASTM, 1983. (C977-83)
- (20) CINCOTTO, M. A. & HELENE, P. R. L. & UEMOTO, K. L. - Estudo das cales hidratadas comercializadas em alguns estados do Brasil. Boletim No. 11, ABPC, Associação Brasileira de Produtores de Cal, São Paulo, 1980.
- (21) MASSAZZA, F. - Chimica delle aggiunte pozzolaniche e dei cementi di miscela. Il cemento, 73(1), 3, 1976.
- (22) TURRIZIANI, R. & SCHIPPA, G. - Sull' esistenza del monocarboalluminato di calcio idrato. Ricerca Sci. 26(9), 2792, 1956.
- (23) KIHARA, Y. & SHUKUZAWA, J. - Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. Revista Cerâmica. Sao Paulo, 28(145), 1982.
- (24) SOUZA, J. F. - Perfil analítico da diatomita. Boletim No. 11 Rio de Janeiro, DNPM, 1973.
- (25) KIHARA, Y. - O estudo das cinzas volantes brasileiras. Revista Cerâmica, São Paulo, 32(193), 1986.

- (26) MIELENZ, R.C. & WITTE, L.P. & GLANTZ, D.J. - Effect of calcination on natural pozzolans. ASTM Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concretes. Philadelphia, ASTM, 1949.
- (27) SOUZA SANTOS, P. - Argilas para pozolanas. Revista Cerâmica. São Paulo, 12 (47/48), 284, 1966.
- (28) FONSECA, M.C. & SANTOS, P.S. & SCHMAL M. - Estudos sobre a utilização do xisto pirolisado do processo Petrosix para produção de pozolanas. Revista Cerâmica. São Paulo, 30 (176). agosto 1984.
- (29) KITTL, P. & GOLDSCHIMIDT, A. & RAMOS, M. - Caracterização das cinzas de eucaliptus e bagaço de cana de açúcar. Revista Cerâmica. São Paulo, 28 (146), fev 1982.
- (30) CINCOOTTO, M.A. & KAUPATEZ, R.M.Z. - Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica. A Construção, São Paulo, (1905), ago 1984.
- (31) RICE hull ash cement... highquality, acid-resisting - Journal of the American Concrete Institute, vol 72, No5, pp 235236, may 1965.
- (32) LABORIAU, L.G. & MOSQUIM, P. & MORHY, L. - Deposição de sílica nas folhas de Casearia grandiflora St. Hilaire. Anais da Academia Brasileira de Ciências. vol 45, No3/4, 1973.
- (33) MASSAZZA, F. & COSTA, U. - Aspetti dell'attività pozzolanica e proprietà dei cementi pozzolanici. Il cemento. (1),3,1979.

- (34) SRINIVASAN, N.R. - The probable factors governing pozzolanic action. Journal of Scientific and Industrial Research. New Delhi, vol 15A, No11, 1956.
- (35) DAVIS, R.E. - A review of pozzolanic materials and their use in concrete. Symposium on pozzolanic materials in mortars and concretes, ASTM Special Technical Publication. Philadelphia, No99.
- (36) MORAN, W.T. & GILLILAND, J.L. - Summary of Methods for determining pozzolanic activity. Symposium on pozzolanic materials in mortars and concretes. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, No99, pp103,109.
- (37) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimentos, Método de determinação de atividade pozolânica em pozolanas. Rio de Janeiro, ABNT, 1977. (NBR 5751/MB960).
- (38) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, ABNT, 1974. (NBR 5736/EB-758).
- (39) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Materials pozolânicos, Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1986. (Projeto CE-18:01.13-001). (em cópia).
- (40) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Pozolanas, Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento portland. Rio de Janeiro, ABNT, 1977. (NBR 5752/MB-1153).
- (41) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimentos, Método de determinação de atividade pozolânica em cimento

portland pozolánico. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. (NBR 5753/MB-1154).

- (42) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard Methods of sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete. Philadelphia, ASTM, 1985. (C311-85).
- (43) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for fly ash and raw or calcinated natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete. Philadelphia, ASTM, 1985. (C618-85)
- (44) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard specification for fly ash and others pozzolans for use with lime. Philadelphia, ASTM, 1985. (C593-85).
- (45) SPENCE, R.J.S. & ALLEN, W.J. - Simpler tests for lime-pozzolans. Building research and Practice. May/june 1981.
- (46) SPENCE, R.J.S. & ALLEN, W.J. - The properties and testing of lime-pozzolana mixture. Proceedings of the eight CIB Triennial congress, Building Research World Wide, vol 1a, Norwegian Buiding Research Institute, june 1980.
- (47) SRINIVASAN, N.R. - A new approach to the problem of surki as a puzzolana. New Delhi, Central Road Research Institute.
- (48) SPENCE, R.J.S. - Alternative cements in India. London, Intermediate Technology Development Group, 1976.

- (49) SPENCE, R.J.S. - Lime and surkhi manufacture in India. Proceedings of a meeting on a small-scale manufacture of cementitious materials. London, Intermediate Technology Group, 1975.
- (50) GUPTA, J.S. - Demonstration-cum-training plant for production of dry hydrated lime and clay pozzolana at Delhi. N.B.O. Journal. New Delhi, oct 1977.
- (51) KOK, E.A. - O arroz e seus subprodutos na alimentação dos animais. Boletim de Agricultura da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo. São Paulo, 1949.
- (52) COMO aproveitar a casca de arroz? - Chácaras e Quintais. São Paulo, vol 63, 1941.
- (53) MACHADO, A.A.S. - Aproveitamento da casca de arroz na indústria de material plástico. Boletim do Instituto de Química Agrícola. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas, No44, 1956.
- (54) CARTER, G.W. & CONNOR, M.A. & MANSELL, D.S. - Properties of bricks incorporating unground rice husks. Building and Environment. London, vol17, No4, 1982.
- (55) MAKSOUD, M.A. & KHALIL, A.A. & ARAFA, M. - Making bricks from rice-hull ash. Building Research and Practice. March/april 1977.
- (56) REHSI, S.S. - Pozzolana Based Binders. Appropriate Technology. London, vol15, No4, fev1979.

- (57) DANIEL, N.T. - Obtencion de cemento a partir de la ceniza de cascarilla de arroz. *Arroz*. Bogota, vol30, No310, ene/fev1981.
- (58) MEHTA, P.K. - Properties of cements made from rice husk ash. (draft copy).
- (59) FREIRE, P.M. - A palha de arroz na fabricação de cimento portland. *Revista Cerâmica*, São Paulo, 27(135), mar 1981.
- (60) MEHTA, P.K. & PIRTZ, D. - Use of rice hull ash to reduce temperature in high-strength mass concrete. *ACI Journal*. feb 1978.
- (61) CADY, P.D. & GRONEY, P.R. - Hydraulic cement from rice husks. *Cement Technology*. nov/dec 1976.
- (62) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cimento portland e outros materiais em pó, determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (NBR 6474/MB-346).
- (63) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - Cimento portland e outros materiais em pó, determinação da área específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (NBR 7224/MB-348)
- (64) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Análise química de cal virgem e cal hidratada. Rio de Janeiro, ABNT, 1985. (NBR 6473/MB-342).
- (65) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cal hidratada para argamassas, determinação da finura. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (Projeto 18:05.11-001).

- (66) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS --Cal hidratada para argamassas, determinação da estabilidade. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (Projeto 18:05.11-002).
- (67) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS --Cal hidratada para argamassas, determinação da plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (Projeto 18:05.11-003).
- (68) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -- Cal hidratada para argamassas, determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (Projeto 18:05.11-004).
- (69) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -- Ensaio de cimento portland. Rio de Janeiro, ABNT, 1979. (NBR 7215/MB-1).
- (70) COOK, D.J. - Using rice husk for making cement-like materials. Appropriate technology. vol6, No4, feb1980.
- (71) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standard methods for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. Philadelphia, ASTM, 1977. (D2015)
- (72) MEHTA, P.K. - Standard specification for mineral admixtures, an overview. Proceedings of the second conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Detroit, ACI, 1986.
- (73) ALVES, J.D. & GOULART, B.C. -Atividade pozolânica da cinza de casca de arroz. Goiania, Universidade Federal de Goiás, 1981.

- (74) GUIMARÃES, J.E.P. - A cal; sua origem, seus tipos, suas aplicações, sua importância econômica e social, sua participação nas obras e nas argamassas da engenharia civil. Revista Cerâmica, São Paulo, 30(169), Jan 1984.
- (75) MASSAZZA, F. - General report of theme IV, Structure of pozzolana and fly-ash and the hidratation of pozzolanic and fly ash cements. Proceedings of the 7th International Congress of the Chemistry of Cement. Paris, 1980.
- (76) IRAM -Cemento de albañileria. Buenos Aires, 1970. (1685)
- (77) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS -Standard specification for mansory cement. Philadelphia, ASTM, 1983. (C91)
- (78) ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMES RECHNIQUES -Ciments a maçonner. Paris, AFNOR, 1969. (NF P 15-307).
- (79) BRITISH STANDARD INSTITUTION - Specification for masonry cement. London, BS, 1976. (5224)
- (80) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -Cimento de alvenaria. Rio de Janeiro, ABNT, 1976. (CE-18:01.11).
- (81) MANUAL técnico Argamix
- (82) CINCOTTO, M.A. & MARQUES, J.C. & HELENE, P.R.L. - Propriedade das argamassas cimento:cal:areia. IBRACON. São Paulo, 1985.
- (83) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Revestimento de paredes e tetos com argamassas; materiais, preparo, aplicação, e manutenção. Rio de Janeiro, 1982. (NBR

7200/NB-231)

- (84) CONSTRUCTION en terre. Paris, Institut de l'environnement, 1975.
- (85) DAVIDSON D.T. & HANDY, R.L. - Lime and lime-pozzolan stabilization. Highway Engineering Handbook. McGraw Hill Book Company Inc., 1960.
- (86) ABIKO, A.K. - Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas. A Construção. São Paulo, No1863, 24.10.83.
- (87) INGLES, D.G. & METCALF J.B. - Soil Stabilization . Butterworths- Melbourne , 1972.
- (88) HANDY, R.L. - Cementation of soil minerals with portland cement or alkalis. Highway Research Board . Washington, Bulletin 198, 1958.
- (89) PUTILIN, E.I. - Estabilização de solos com cimento pozolânico. Avtomobil'nye Dorogi. No8, 1975.
- (90) GUIMARÃES, L.E.P. - Estabilização de solos. Boletim No5 . São Paulo, ABPC, 1971.
- (91) DAVIDSON, D.T. & KATTI, R.K. & WELCH D.E. - Use of fly ash with portland cement for stabilization of soils. Highway Research Board. Washington, Bulletin 198, 1958.
- (92) PINTO, C.S. - Equipamento reduzido para moldagem de corpos de prova de solo-aditivo. IV Reunião anual de pavimentação. Rio de Janeiro, 1965.
- (93) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Grãos de

- solo que passam na peneira de 4,8mm, determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. (NBR 6508/MB-28).
- (94) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -Solo; determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. (NBR 6459/MB-30)
- (95) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Solo; determinação do limite de plasticidade e do índice de plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. (NBR 7180/MB-31).
- (96) BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -Solo; análise granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (NBR 7181/MB-32).
- (97) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - Normas de dosagem e métodos de ensaio de solo-cimento. São Paulo, ABCP, 1978.
- (98) KHANIJO, M.K. & AHUJA, Y.L. & RAO, A.V.R. - Employment potential of the lime and pozzolana industry. N.B.O. Journal - New Delhi, vol XXIII, april 1978.
- (99) SAUNI, J.T.M. & SAKULA, J.H. -Oldonyo Sambu pozzolime industry. Arusha, 1980.
- (100) GUIMARÃES, J.E.P. -A indústria da cal no Brasil. São Paulo, ABCP, 1983.
- (101) ANUÁRIO Estatístico do Brasil 1984 - Rio de Janeiro, FIBGE, 1985.
- (102) ANUÁRIO Estatístico do Estado de São Paulo 1984 - São Paulo, Fundação SEADE, 1985.

- (103) ANUÁRIO Estatístico do Estado de São Paulo 1983 - São Paulo, Fundação SEADE, 1984.
- (104) Prognóstico 85/86 . Instituto de Economia Agrícola . São Paulo, vol 12, 1985.
- (105) ANUÁRIO Brasileiro de cerâmica 1986 - Associação Brasileira de Cerâmica. São Paulo, 1986.
- (106) ANUÁRIO Brasileiro de cerâmica 1980 - Associação Brasileira de Cerâmica. São Paulo, 1979.

Quadros, Gráficos, Figuras

Quadro 1: Metodos de ensaio para determinacao de atividade pozolanica

Metodo	CP (mm)	Constituintes	Cura	Parametro
NBR 5751= ASTM C311 (com cal)	cilindrico Ø50x100	*Ca(OH) ₂ *pozolana *areia normal *agua	*(24±2)h no molde em temperatura ambiente *desmoldar e manter 6 dias em agua a (55±2)gC *(4±0,5)h antes do ensaio, esfriar ate (21±2)gC e romper	resistencia a compressao >= 5,5 MPa
NBR 5752= ASTM C311 (c/ cimento)	cilindrico Ø50x100	*cim portland *pozolana *areia normal *agua	*(22±2)h no molde em temperatura de (21±2)gC *desmoldar e manter em recipiente hermetico por 27 dias a (38±2)gC *esfriar ate (21±2)gC, romper	
NBR 5753	-	-	-	grafico
ASTM C593	cubico a=50	*cal *pozolana *areia *agua	*7 dias no molde, no vapor, a (54±2)gC	resistencia a compressao >= 4,1 MPa
Spence e Allen	cubico a=25	*cal *pozolana *areia *agua	*2 dias em temp. ambiente *48h em agua a 50gC *3 dias em agua a 20gC	avaliacao comparativa
Srinivasan	cubico a=38	*Ca(OH) ₂ *pozolana *areia normal *agua	*48h no molde em camara umida *desmoldar e manter em recipiente hermetico por 8 dias a 50gC *esfriar ate 21gC	classificacao conforme resistencia a compressao

Quadro 2: Análise química de argilas

Determinações	Argila 1 (%)	Argila 2 (%)
Perda ao fogo	10,58	11,61
Anidrido silícico (SiO ₂)	56,70	56,70
Oxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	19,71	18,15
Oxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	8,16	7,69
Oxido de titânio (TiO ₂)	0,92	0,91
Oxido de manganês (MnO)	0,07	0,20
Oxido de cálcio (CaO)	0,02	0,04
Oxido de magnésio (MgO)	0,88	1,24
Oxido de sódio (Na ₂ O)	0,15	0,12
Oxido de potássio (K ₂ O)	2,39	2,59

Quadro 3: Análise química de resíduo cerâmico e cinza de casca de arroz (ASTM C311)

Determinações	Resíduo cerâmico C1(%)	Cinza de casca de arroz A1(%)
Umidade	0,37	3,66
Perda ao fogo	0,49	7,29
Anidrido silícico (SiO ₂)	62,90	84,70
R2O3 (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	32,10	1,54
Oxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	-	0,09
Oxidos de ferro (em Fe ₂ O ₃)	-	1,46
Oxido de cálcio (CaO)	n.e.	0,99
Oxido de magnésio (MgO)	1,70	0,95
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	n.e.	0,21
Oxido de sódio (Na ₂ O)	-	-
Oxido de potássio (K ₂ O)	-	-
TOTAL	97,52	99,37
Alcalis disponíveis		
Oxido de sódio (Na ₂ O)	0,03	0,03
Oxido de potássio (K ₂ O)	0,78	0,63

Quadro 4: Análise química da cal 1 e cal 2 em % (NBR 6473)

Determinações	Cal 1	Cal 2	Tipo E(NBR 7175)	Tipo C(NBR 7175)
Perda ao fogo	24,50	25,60	-	-
Insolúveis em ácido clorídrico	5,00	1,43	-	-
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	2,25	0,48	-	-
CaO	43,00	71,60	-	-
MgO	24,90	0,67	-	-
CO ₂	3,90	3,45	(=7(deposito))	(=7(deposito))
Oxido de cálcio disponível (em CaO)	31,70	-	-	-
Na base do material original (calculado)				
-óxido de cálcio não hidratado (CaO)	0,00	0,00	-	-
-óxido de magnésio não hidratado (MgO)	6,20	0,00	-	-
Na base de não voláteis (calculado)				
-CaO + MgO	89,9	97,1	>=88	>=88

Quadro 5: Análise física da Cal 1 e da Cal 2 (NBR 7175)

	Cal 1	Cal 2	Tipo E(NBR 7175)	TIPO C(NBR 7175)
Finura (Proj 18:05.11-001)				
-material retido na peneira 30 (%)	0,1	0,4	≤0,5	≤0,5
-material retido na peneira 200 (%)	18,1	3,0	≤15,0	≤15,0
Plasticidade (Proj 18:05.11-003)	87	112		-
Retenção de água (%) (Proj 18:05.11-004)	87	73	≥85	≥75
Estabilidade (Proj 18:05.11-002)	não apresentaram cavidade ou protuberâncias		não apresentar cavidades ou protuberâncias	

Quadro 6: Resistencia a compressao de misturas residuo ceramico/cal

Resistencia a compressao (MPa)			
Amostra	7 dias	28 dias	90 dias
C1-60-1	0.5	2.6	4.6
	0.5	2.6	4.5
C1-70-1	0.6	2.8	4.7
	0.6	2.6	4.7
C1-80-1	0.7	2.5	2.6
	0.6	2.4	2.6
C2-60-1	0.3	1.0	1.8
	0.3	1.0	1.7
C2-70-1	0.3	1.0	2.6
	0.2	1.0	2.6
C2-80-1	0.3	0.9	0.9
	0.2	0.8	0.8
Cal 1	0.5	1.1	1.9
	0.5	1.2	1.9
C1-60-2	0.2	1.2	2.9
	0.2	1.1	2.8
C1-70-2	0.3	1.4	3.2
	0.3	1.3	3.1
C1-80-2	0.1	0.6	1.4
	0.1	0.6	1.3
C2-60-2	0.1	0.6	1.1
	0.1	0.6	1.0
C2-70-2	0.2	0.8	1.4
	0.1	0.7	1.4
C2-80-2	0.3	1.3	3.8
	0.3	1.2	3.7
Cal 2	0.2	0.8	1.0
	0.2	0.8	0.9

Quadro 7: Resistência a compressão em ensaios acelerados

Amostra	Relação água/aglomerante	Consistência	Método	Tensão de ruptura
C1-70-1	0,72	162mm	M1	3,7MPa
				3,4MPa
			M2	2,8MPa
				3,3MPa
A1-70-2	0,85	162mm	M1	4,1MPa
				4,1MPa
			M2	2,8MPa
				3,4MPa

Quadro 8: Ensaio em pasta e em argamassa fresca

	C1-70-1	A1-70-2
agua para pasta de consistencia normal (% do peso do aglomerante)	43,2	93,0
expansibilidade Le Chatelier (NBR 7215)		
* a frio (7 dias)	0,0mm	0,0mm
* a quente (5 horas)	0,0mm	0,0
determinacao do tempo de pega (NBR 7215)		
* inicio	7h10min	30h15min
* fim	78h50min	79h25min
determinacao da plasticidade (Proj 18:05.11-003)		
* agua para pasta de consistencia normal (% do peso do aglomerante)	53,0	63,0
* plasticidade	121	115
agua para argamassa de consistencia normal (% do peso do aglomerante)	83,2	104,8
retencao de agua (Proj 18:05.11-004)	57,9%	45,0%
resistencia a compressao (NBR 7215)		
* 7 dias	0,6MPa	3,7MPa
* 28 dias	2,8MPa	5,2MPa

Quadro 9: Resistencia a compressao de misturas cinza de casca de arroz/cal

Resistencia a compressao (MPa)			
Amostra	7 dias	28 dias	90 dias
A1-60-1	2.7	3.0	3.8
	2.6	2.9	3.7
A1-70-1	1.4	1.7	1.4
	1.4	1.6	1.4
A1-80-1	0.4	0.5	0.5
	0.4	0.5	0.4
A1-60-2	2.8	4.6	5.5
	3.0	4.6	5.4
A1-70-2	3.7	5.2	5.6
	3.6	5.2	5.4
A1-80-2	3.6	4.7	4.6
	3.6	4.6	4.5
Cal 1	0.5	1.2	1.9
	0.5	1.1	1.9
Cal 2	0.2	0.8	1.0
	0.2	0.8	0.9

Quadro 10: Parametros para cimentos de alvenaria

Pais	Norma	Tipo	Tempo de pega		Expansao	Ar incorporado (%)	Retencao de agua (%)	Resistencia a compressao (MPa)	
			inicial (min)	final (h)				7 dias	28 dias
Argentina	IRAM 1685	-	>=90	<=24	-	12 a 24	>=55	>=3,5	>=6,5
USA	ASTM C91	N	>=120	<=24	<=1,0%	12 a 22	>=70	>=3,45	>=6,21
		S	>=90	<=24	<=1,0%	12 a 20	>=70	>=8,95	>=14,49
		M	>=90	<=24	<=1,0%	12 a 20	>=70	>=12,42	>=20,01
Franca	NF P 15-307	CM 160	>=30	-	<=3mm	-	-	>=10	>=16
		CM 250	>=30	-	<=3mm	-	-	>=16	>=25
Inglaterra	BS 5224	-	>=45	<=10	<=10mm	10 a 25	70 a 95	>=4	>=6
Brasil	CE-18:01.11	-	>=90	<=24	<=10mm	10 a 20	>=60	>=3	5 a 15

Quadro 11: Resultados obtidos dos ensaios de compactação

Material	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Unidade ótima (%)
Solo	1,726	17,6
Solo + 3,4% de cal	1,639	15,5
Solo + 8,0% de cal	1,609	15,8
Solo + 5,0% de A1-70-2	1,555	20,5
Solo + 8,0% de A1-70-2	1,517	21,0
Solo + 11,0% de A1-70-2	1,471	22,2
Solo + 14,0% de A1-70-2	1,436	23,1
Solo + 17,0% de A1-70-2	1,412	24,0
Solo + 5,0% de C1-70-1	1,651	17,7
Solo + 8,0% de C1-70-1	1,629	18,7
Solo + 11,0% de C1-70-1	1,611	18,2
Solo + 14,0% de C1-70-1	1,609	19,6
Solo + 17,0% de C1-70-1	1,592	19,0

Quadro 12: Resultados de ensaios referentes a Programacao A

Cimento pozolanico	Teor de cimento pozolanico (% em peso)	Desvio de umidade em relacao a otima (%)	Grau de compactacao (%)	Tempo de cura (dias)	Resistencia a compressao simples (MPa)
A1-70-2	5	1.1	99.3	2	0.37
			99.0	7	0.54
			100.8	28	0.57
A1-70-2	11	1.4	99.2	2	0.42
			98.4	7	1.21
			98.2	28	1.69
A1-70-2	17	2.0	98.0	2	0.39
			97.7	7	1.20
			97.8	28	2.20
C1-70-1	5	1.0	96.1	2	*
			97.0	7	*
			96.9	28	*
C1-70-1	11	1.3	98.7	2	0.42
			98.6	7	0.55
			98.4	28	0.52
C1-70-1	17	1.5	98.6	2	0.52
			98.1	7	0.90
			97.9	28	0.95

Notas: a) *os cp se esboroaram durante a imersao em agua
 b) os cp foram moldados aplicando-se 5 golpes/face
 c) os cp foram curados em camara umida e isolados do ar
 d) o grau de compactacao e a resistencia a compressao simples apresentados,

Quadro 13: Resultados de ensaios referentes a Programacao B

Cimento pozolanico	Teor de cimento pozolanico(% em peso)	Desvio de unidade em relacao a otima (%)	Grau de compactacao (%)	Tempo de cura (dias)	Resistencia a compressao simples (MPa)	
A1-70-2	11	-2,5	100,9	2	*	
			100,8	7	0,99	
			100,8	28	1,62	
		-1,9	100,0	2	0,41	
			99,6	7	1,10	
			100,0	28	1,44	
		-1,5	100,1	2	0,38	
			99,9	7	1,06	
			100,2	28	1,38	
		0,2	100,6	2	0,38	
			0,5	100,1	7	1,13
				100,7	28	1,54
		1,4 **		99,2	2	0,42
			98,4	7	1,21	
			98,2	28	1,69	
2,0	100,1	2	0,37			
	100,1	7	0,98			
	100,1	28	1,54			
3,2	100,8	2	0,29			
	101,1	7	0,99			
	101,0	28	1,75			
C1-70-1	11	-2,8	99,2	2	*	
			99,2	7	0,64	
			99,6	28	0,75	
		-1,5	97,7	2	0,43	
			97,4	7	0,59	
			97,9	28	0,56	
		-1,0	98,3	2	0,44	
			98,5	7	0,59	
			98,3	28	0,60	
		0,5	98,2	2	0,41	
			98,3	7	0,62	
			98,7	28	0,62	
		1,3 **	98,7	2	0,42	
			98,6	7	0,55	
			98,4	28	0,52	
1,6	98,6	2	0,46			
	98,4	7	0,56			
	98,8	28	0,61			
2,9	99,3	2	0,39			
	98,9	7	0,52			
	99,1	28	0,59			

- Notas: - *os cp se esboroaram durante a imersao em agua
 - ** estes resultados sao os obtidos na Programacao A
 - os cp foram moldados aplicando-se 5 golpes de soquete por face do cp
 - os cp foram curados em camara umida e isolados do ar
 - o grau de compactacao e a resistencia a compressao simples apresentados constituem uma media de 3 determinacoes

Quadro 14: Resultados de ensaios referentes a Programacao C

Cimento pozoianico	Teor de cimento pozoianico (% em peso)	N. golpes do soquete por face do cp	Desvio de unidade em relacao a otima (%)	Grau de compactacao (%)		Tempo de cura (dias)	Resistencia a compressao simples (MPa)
				Apos a moldagem	Apos a imersao		
A1-70-2	11	4	0,1	98,2	96,2	2	0,21
				98,0	96,9	7	0,77
				98,1	96,9	28	1,36
A1-70-2	11	5	1,4 **	99,2	97,6	2	0,42
				99,0	98,2	7	1,21
				98,6	98,3	28	1,69
A1-70-2	11	10	0,1	103,5	102,1	2	0,42
				103,4	102,2	7	1,26
				103,3	102,7	28	2,07
C1-70-1	11	4	-0,2	98,3	-	2	*
				98,2	96,8	7	0,52
				98,0	97,3	28	0,56
C1-70-1	11	5	1,3 **	98,7	97,5	2	0,42
				98,6	97,1	7	0,55
				98,4	97,9	28	0,52
C1-70-1	11	10	-0,2	103,6	100,5	2	0,31
				103,1	101,9	7	0,77
				102,9	101,9	28	0,85

- Notas: - * os cp se esboroaram durante a imersao em agua
 - ** estes resultados sao os obtidos da Programacao A
 - os cp foram curados em camara umida e isolados do ar
 - os graus de compactacao e a resistencia a compressao simples apresentados constituem uma media 3 determinacoes
 - os graus de compactacao e os desvios de unidade foram calculados tomando-se como base as massas especificas aparentes secas maximas e as unidades otimas obtidas dos ensaios de compactacao realizados com 5 golpes de soquete por face do cp

Quadro 15: Resultados de ensaios referentes a Programacao D

Cimento pozolanico	Teor de cimento pozolanico (% em peso)	Desvio de umidade em relacao a otima (%)	Grau de compactacao (%)	Tempo de cura (dias)	Resistencia a compressao simples (MPa)
			99,0	2	*
A1-70-2	11	1,9	99,2	7	0,62
			98,9	28	0,77
			96,1	2	*
C1-70-1	11	-0,8	96,7	7	*
			95,9	28	*

- Notas: - * os cp se esboroaram durante a imersao em agua
 - os cp foram moldados aplicando-se 5 golpes do soquete por face do cp
 - os cp foram curados ao ar
 - o grau de compactacao e a resistencia a compressao simples apresentados constituem uma media de 3 determinacoes

Quadro 16: Resultados de ensaios referentes a Programacao E

Teor de CP-320 (% em peso)	Desvio de umidade em relacao a optima (%)	Grau de compactacao (%)	Tempo de cura (dias)	Resistencia a compressao (MPa)
		98,6	2	0,59
4	1,0	98,7	7	0,68
		98,4	28	0,80
		98,0	2	0,81
7	0,4	97,7	7	1,60
		97,8	28	2,08
		98,6	2	0,81
10	1,0	97,9	7	2,10
		98,0	28	3,05

Quadro 17: Producao de arroz (em casca), segundo as unidades da Federacao

Unidade da Federacao	Producao (t)		Producao (%)	
	1983	1984	1983	1984
Rondonia	100576	181847	1.30	2.02
Acre	19085	44813	0.25	0.50
Amazonas	1277	2194	0.02	0.02
Roraima	4235	15409	0.05	0.17
Para	102865	148991	1.33	1.65
Amapa	1884	1431	0.02	0.02
Maranhao	430939	1145223	5.57	12.69
Piaui	53763	200057	0.69	2.22
Ceara	30077	82597	0.39	0.92
R. Grande do Norte	1335	8731	0.02	0.10
Paraiba	3607	13261	0.05	0.15
Pernambuco	10709	15688	0.14	0.17
Alagoas	11368	13632	0.15	0.15
Sergipe	22734	26625	0.29	0.30
Bahia	58508	30338	0.76	0.34
Minas Gerais	779249	592957	10.07	6.57
Espirito Santo	74795	85244	0.97	0.94
Rio de Janeiro	98055	96007	1.27	1.06
Sao Paulo	617400	398790	7.98	4.42
Parana	368313	242570	4.76	2.69
Santa Catarina	395389	451942	5.11	5.01
R. Grande do Sul	2220497	3119013	28.68	34.57
Mato Grosso do Sul	450796	381649	5.82	4.23
Mato Grosso	784179	672671	10.13	7.46
Goiias	1080720	1037760	13.96	11.50
Distrito Federal	18649	12170	0.24	0.13
Brasil	7741004	9021610	100.00	100.00

Quadro 18: Total de cinza obtida do arroz (em casca), segundo as unidades da Federacao

Unidade da Federacao	Cinza (t)	
	1983	1984
Rondonia	2816	5092
Acre	534	1255
Amazonas	36	61
Roraima	119	431
Para	2880	4172
Amapa	53	40
Maranhao	12066	32066
Piaui	1505	5602
Ceara	842	2313
R. Grande do Norte	37	244
Paraiba	101	371
Pernambuco	300	439
Alagoas	318	382
Sergipe	637	465
Bahia	1638	849
Minas Gerais	21819	16603
Espirito Santo	2094	2387
Rio de Janeiro	2745	2688
Sao Paulo	17287	11166
Parana	10313	6792
Santa Catarina	11071	12654
R. Grande do Sul	62174	87332
Mato Grosso do Sul	12622	10686
Mato Grosso	21957	18835
Goiias	30260	29057
Distrito Federal	522	341
Brasil	216748	252605

Quadro 19: Producao de arroz (em casca) no Estado de Sao Paulo

DIRA	Ano-safra 1983/1984 (t)	Ano-safra 1982/1983 (t)
Sao Paulo	10200	9960
Vale do Paraiba	58200	58800
Sorocaba	64800	90000
Campinas	44400	75000
Ribeirao Preto	79800	121200
Bauru	10800	19440
S. Jose do Rio Preto	69000	145800
Aracatuba	22200	41520
Pres. Prudente	11400	19680
Marilia	18000	36000
Estado de Sao Paulo	388800	617400

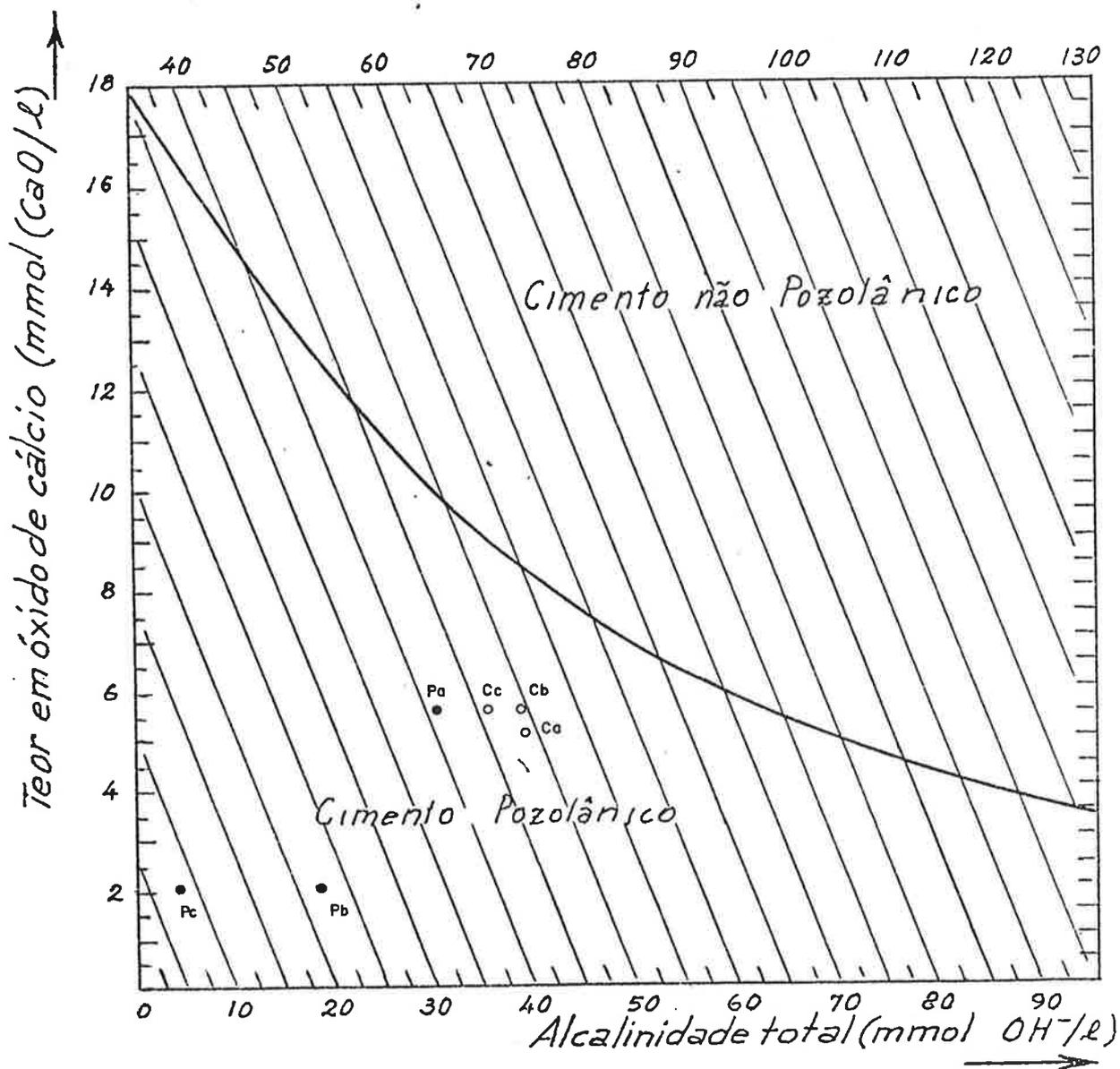
Fonte: Anuario estatistico do Estado de Sao Paulo (1984 e 1983)
Fundacao Seade, 1985 e 1984

Quadro 20: Total de cinza de casca de arroz disponivel no Estado de Sao Paulo

DIRA	Ano-safra 1983/1984 (t)	Ano-safra 1982/1983 (t)
Sao Paulo	286	279
Vale do Paraiba	1630	1646
Sorocaba	1814	2520
Campinas	1243	2100
Ribeirao Preto	2234	3394
Bauru	302	544
S. Jose do Rio Preto	1932	4082
Aracatuba	622	1163
Pres. Prudente	319	551
Marilia	504	1008
Estado de Sao Paulo	10886	17287

Gráfico 1 - Ensaio de pozolanicidade

Solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em presença de álcalis a 40 °C



ADIÇÃO (%) 20 30 40

○ RESÍDUO CERÂMICO - Ca, Cb, Cc.

● PALHA DE ARROZ - Pa, Pb, Pc.

Grafico 2: Residuo ceramico C1 e Cal 1

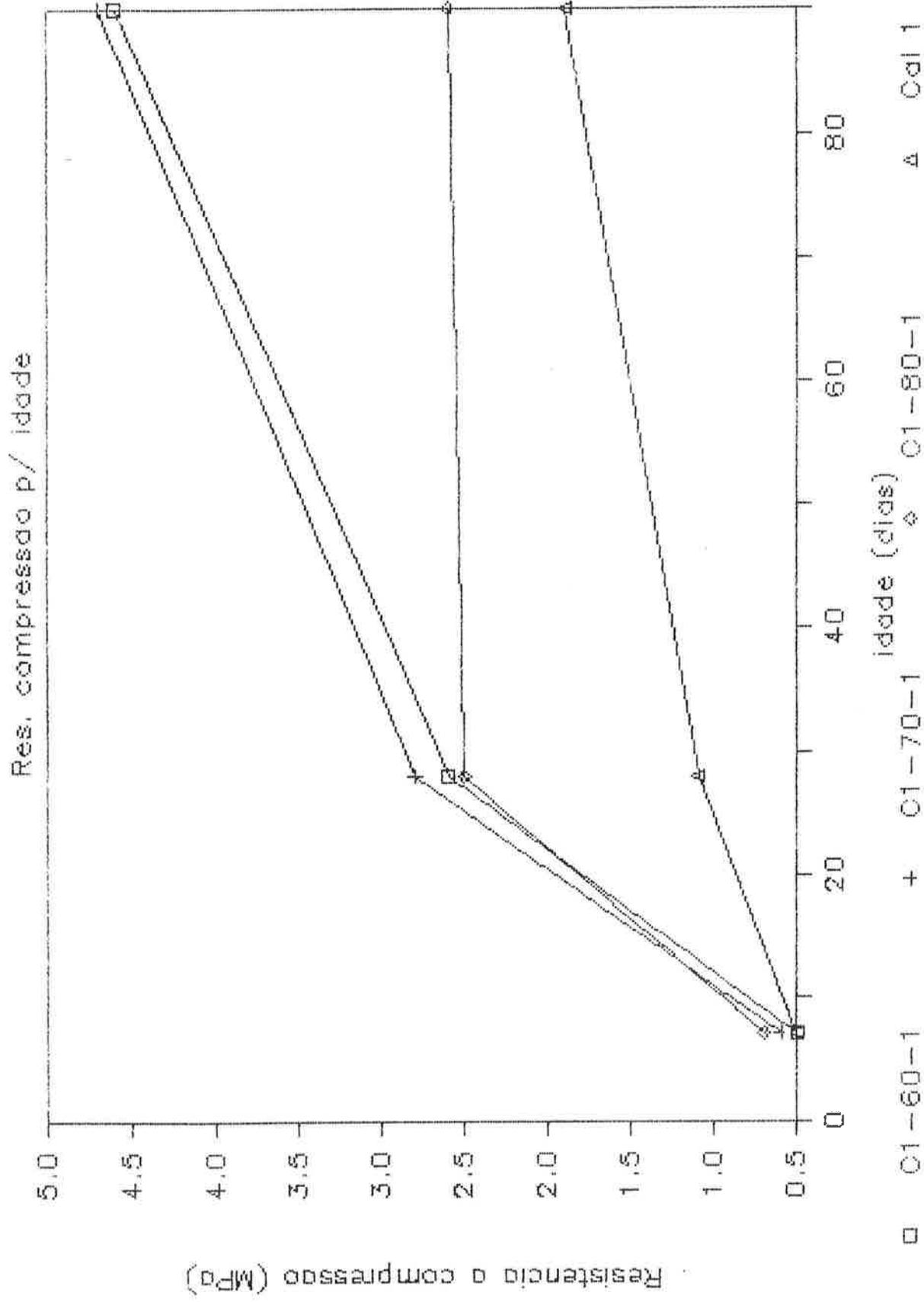


Grafico 3: Residuo ceramico C1 e Cal 2

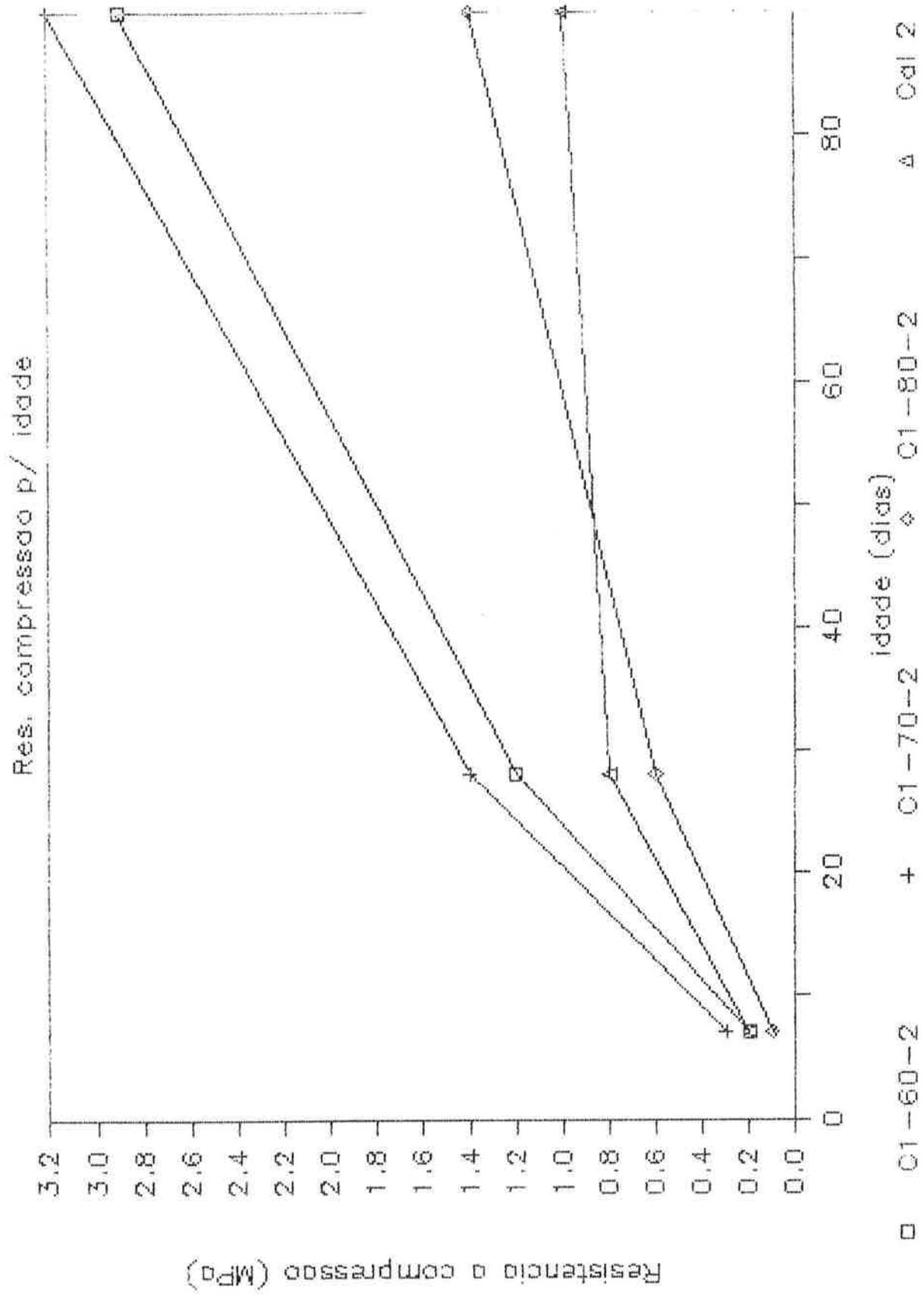


Grafico 4: Residuo ceramico C2 e Cal 1

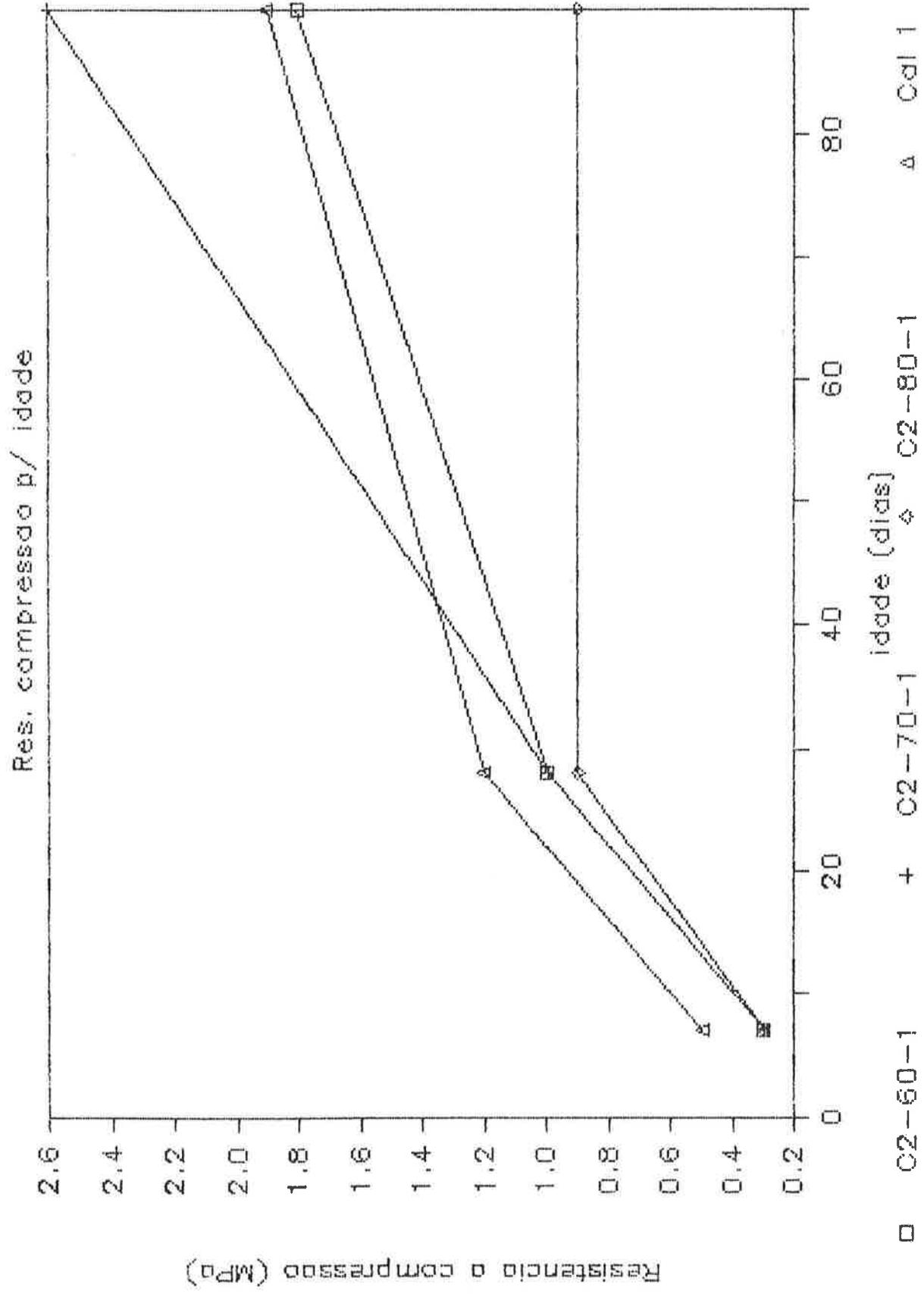
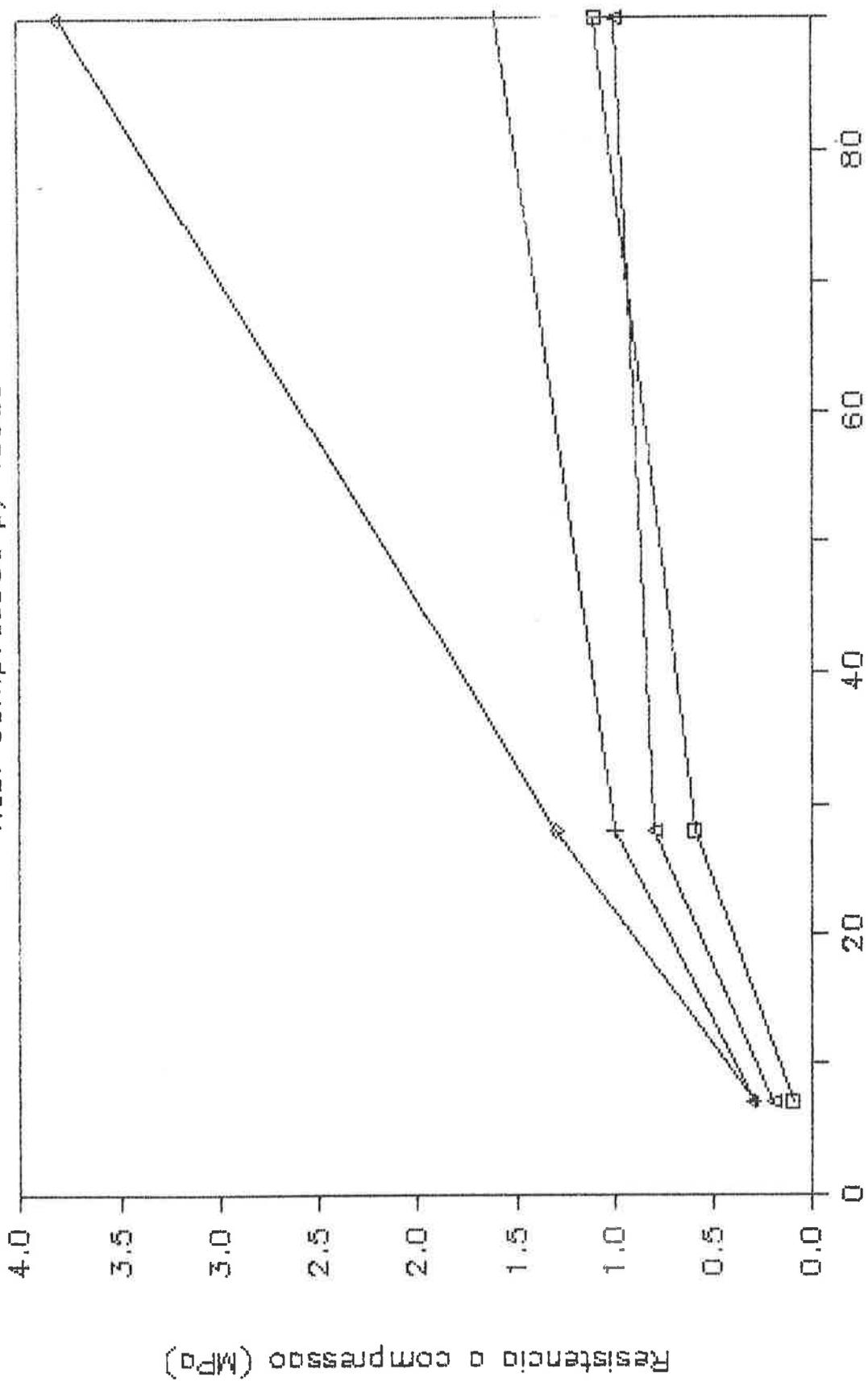


Grafico 5: Residuo ceramico C2 e Cal 2

Res. compressao p/ idade



□ C2-60-2 + C2-70-2 ◆ C2-80-2 △ Cal 2

Grafico 6: Residuo ceramico C1 e Cal 1

Resistencia a compressao p/ % C1

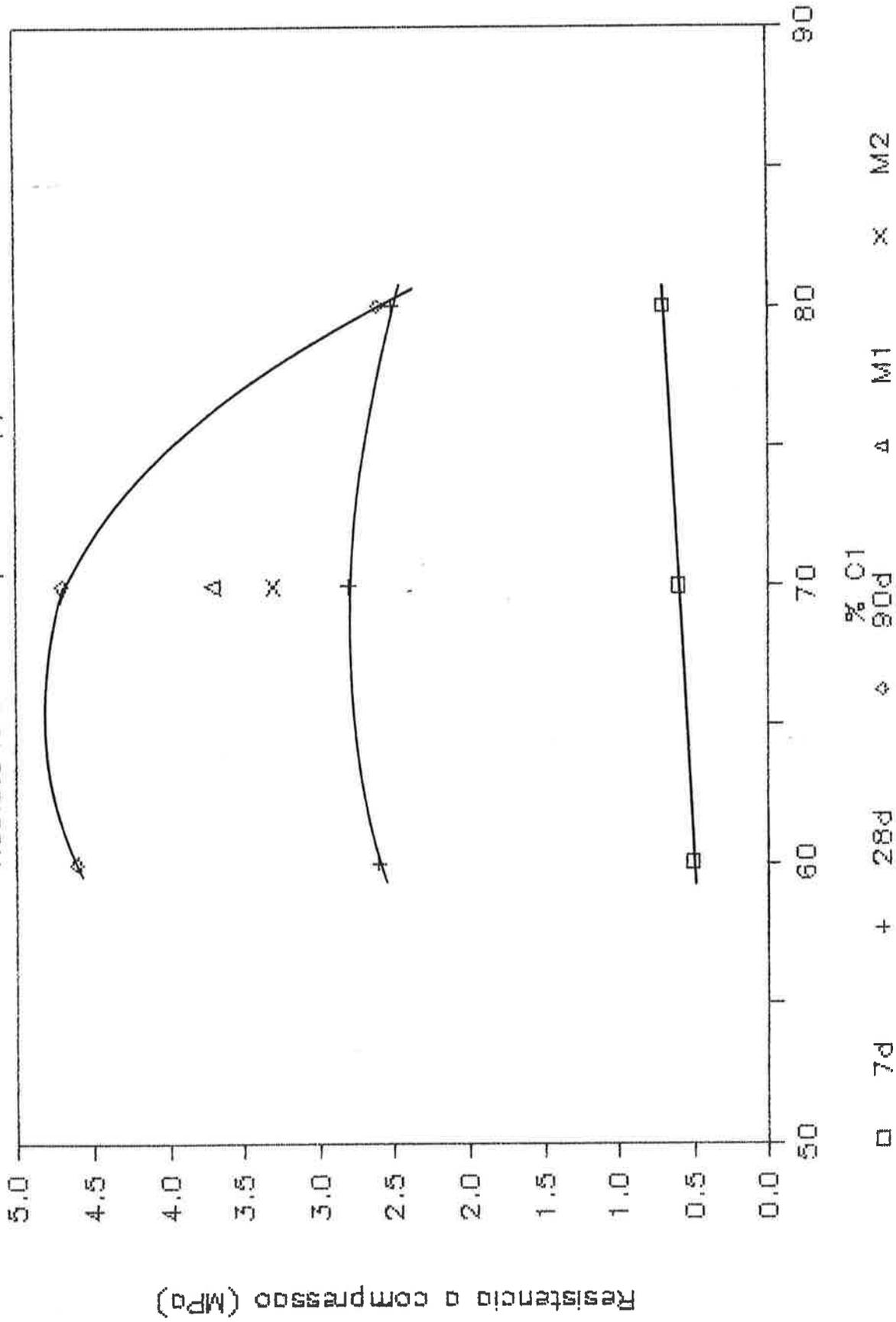


Grafico 7: Residuo ceramico C1 e Cal 2

Resistencia a compressao p/ % C1

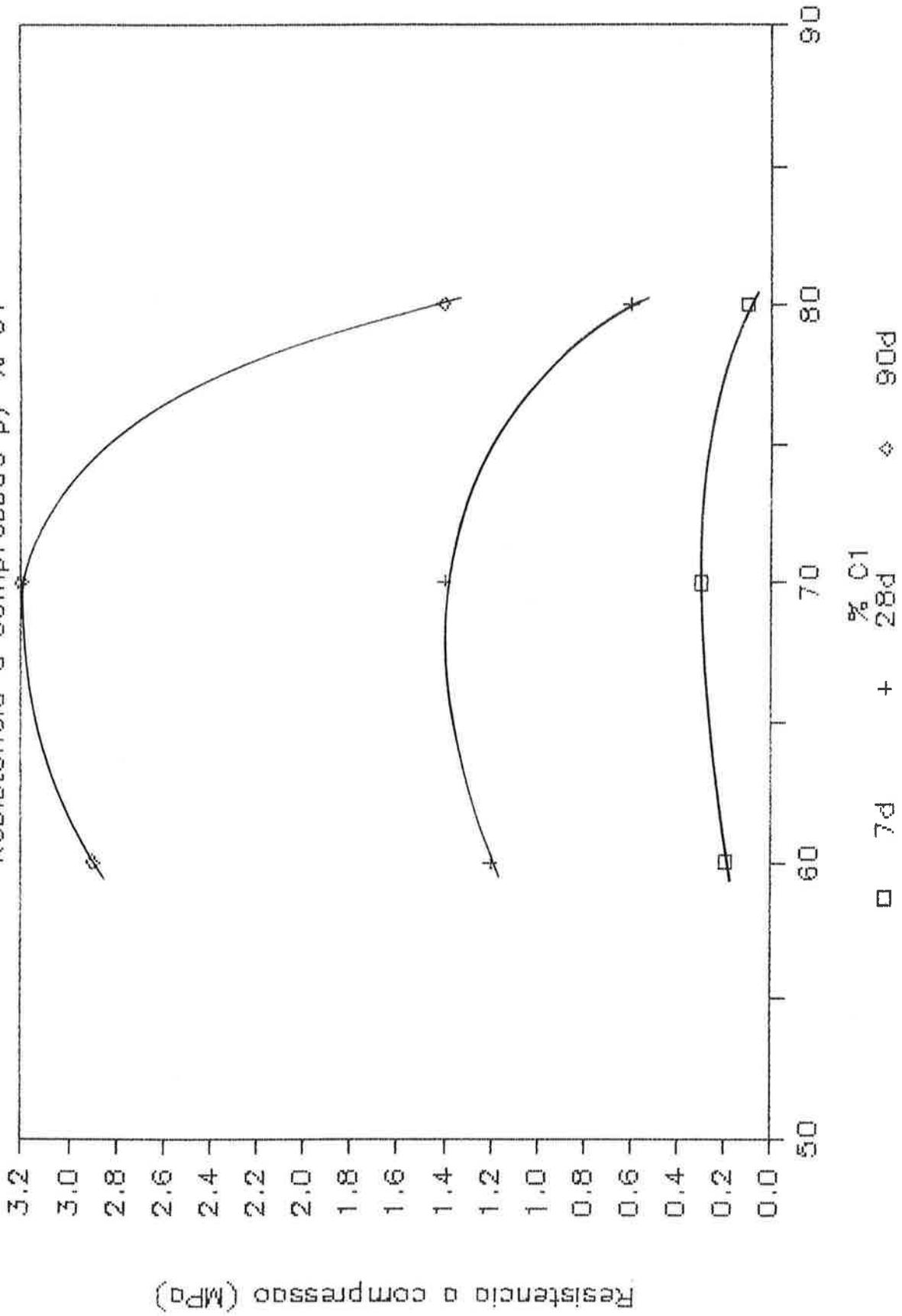


Grafico 8: Residuo ceramico C2 e Cal 2

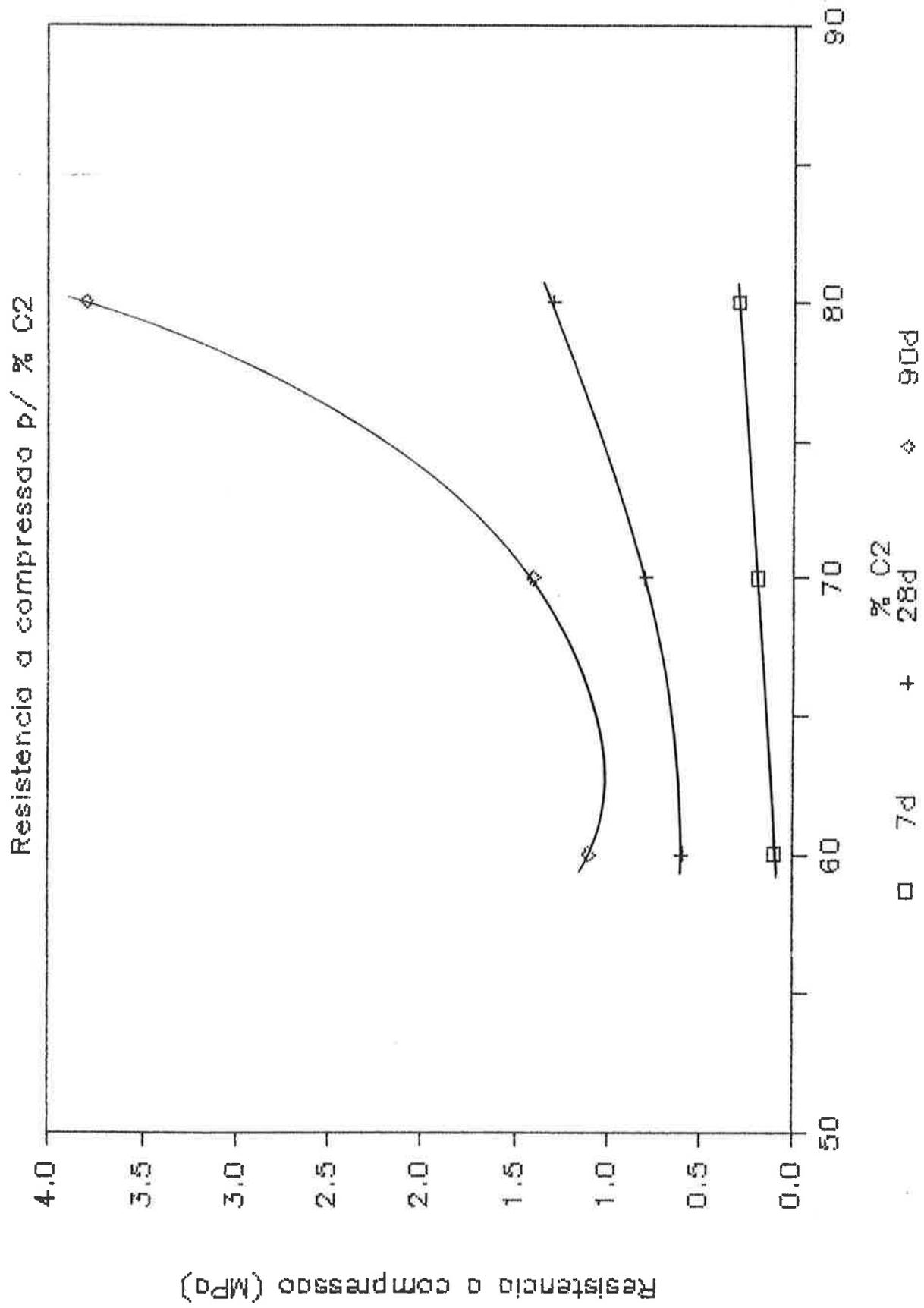


Grafico 9: Residuo ceramico C2 e Cal 1

Resistencia a compressao p/ % C2

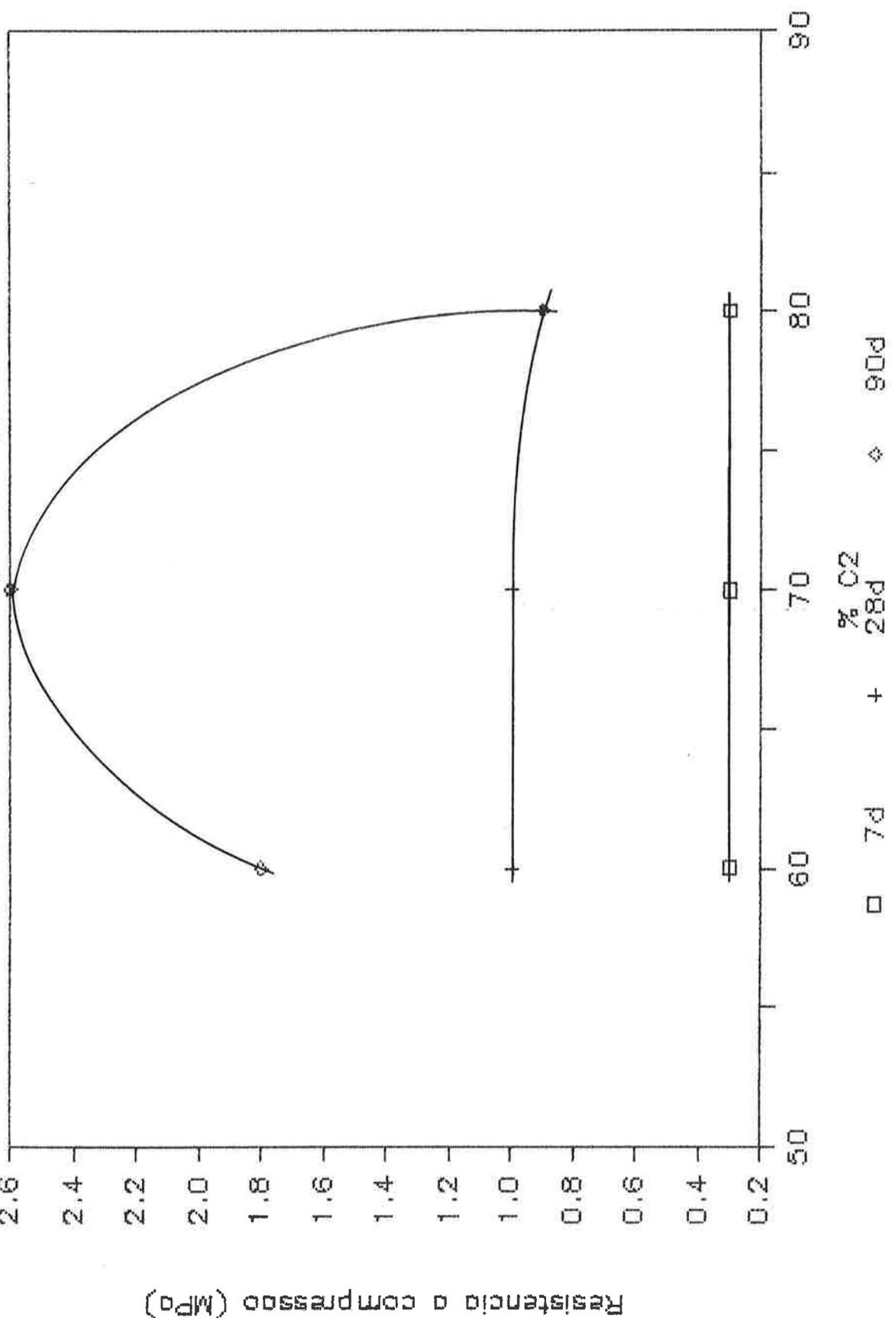
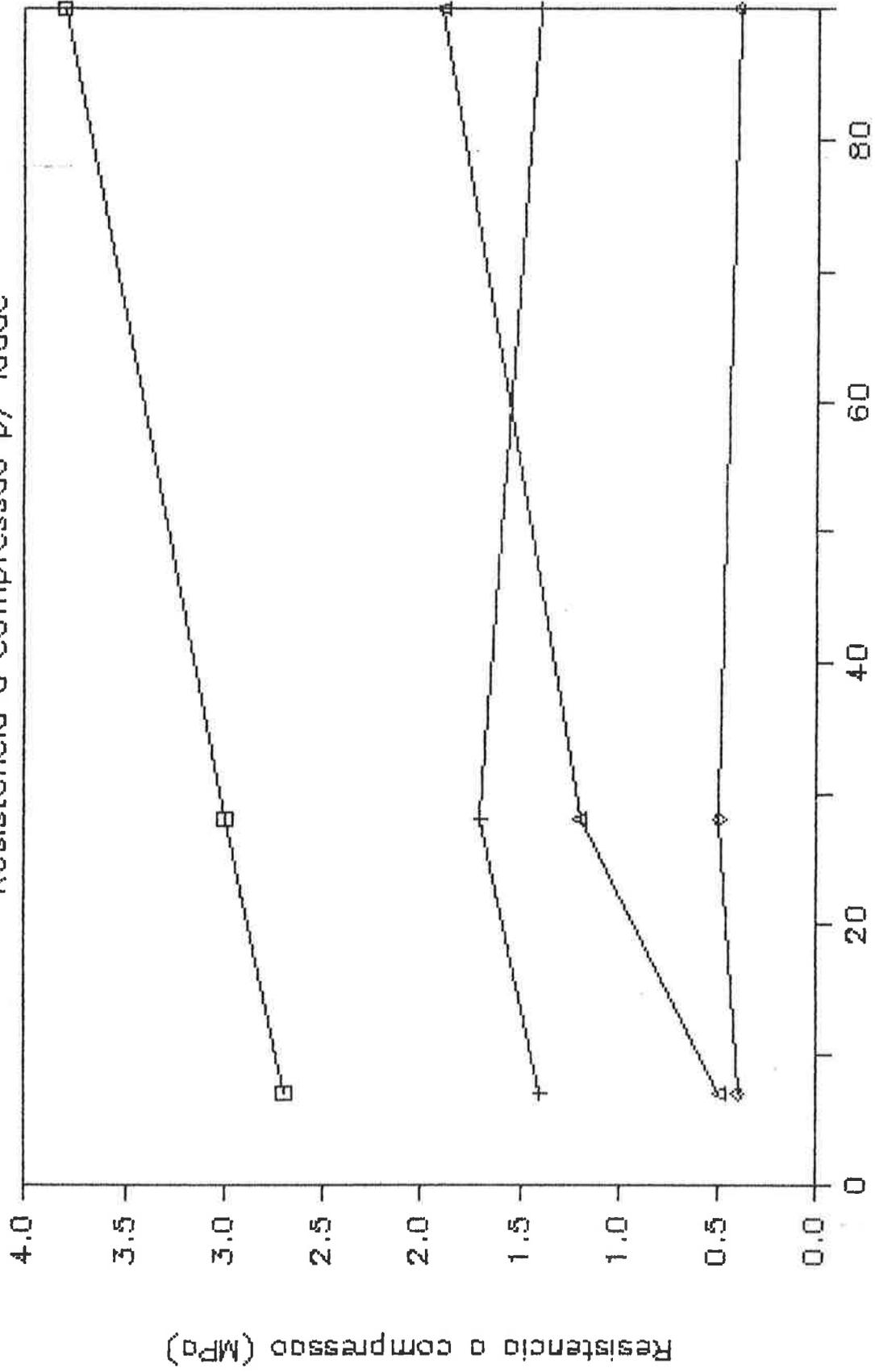


Grafico 10: Cinza A1 e Cal 1

Resistencia a compressao p/ idade



□ A1-60-1 + A1-70-1 ◆ Cal 1

Grafico 11: Cinza A1 e Cal 2

Resistencia a compressao p/ idade

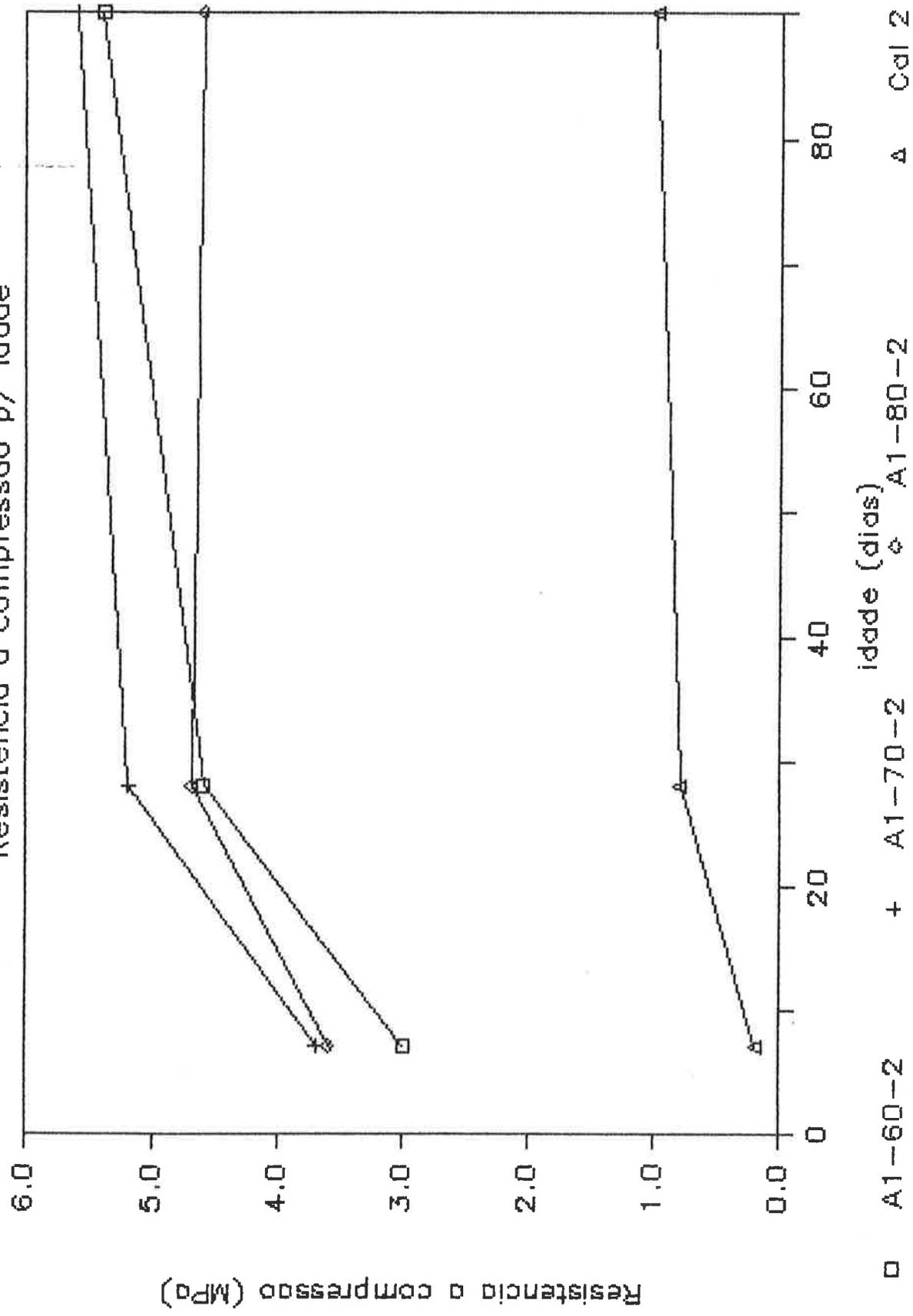


Grafico 12: Cinza A1 e Cal 1

Resistencia a compressao p/ % A1

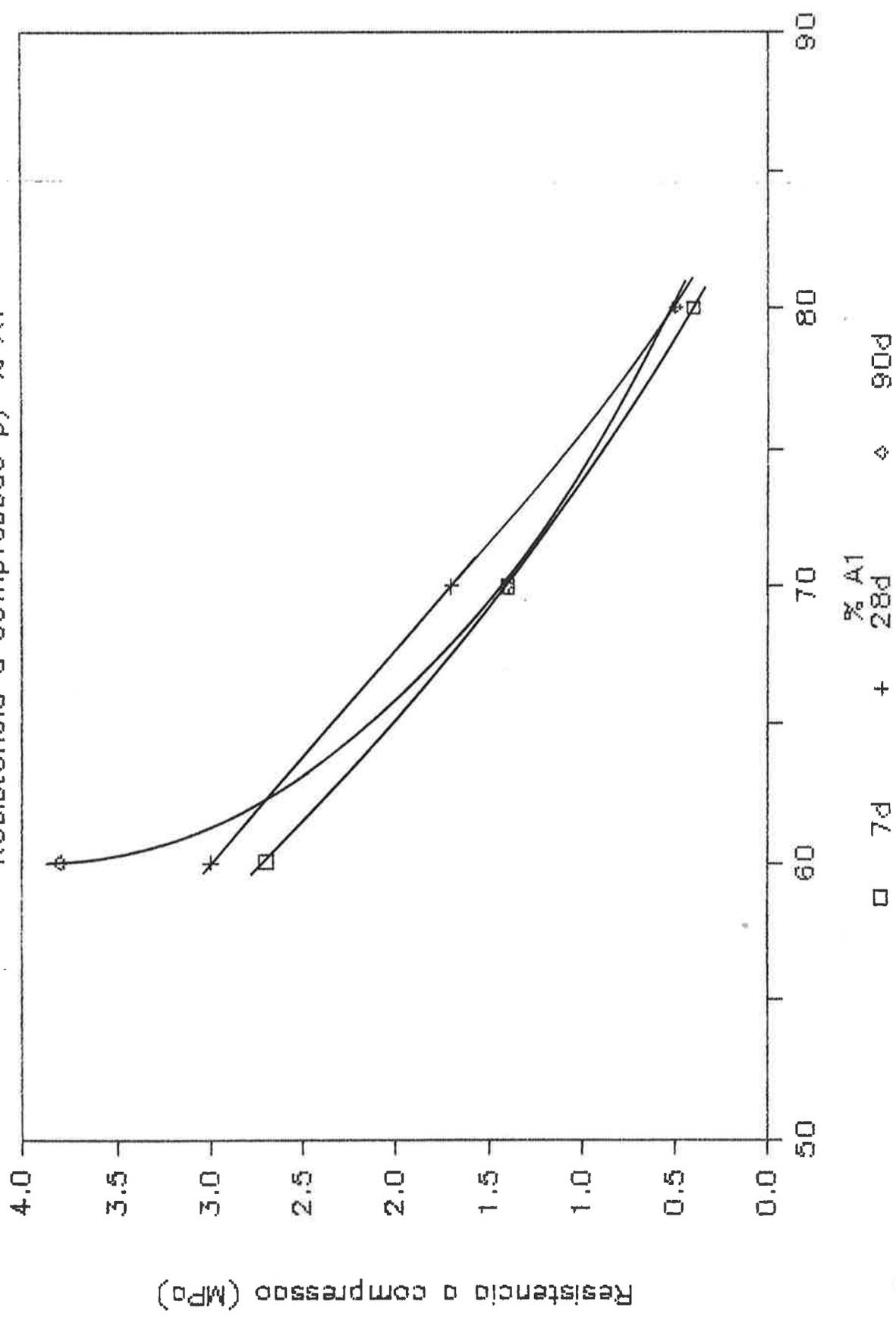


Grafico 13: Cinza A1 e Cal 2

Resistencia a compressao p/ % A1

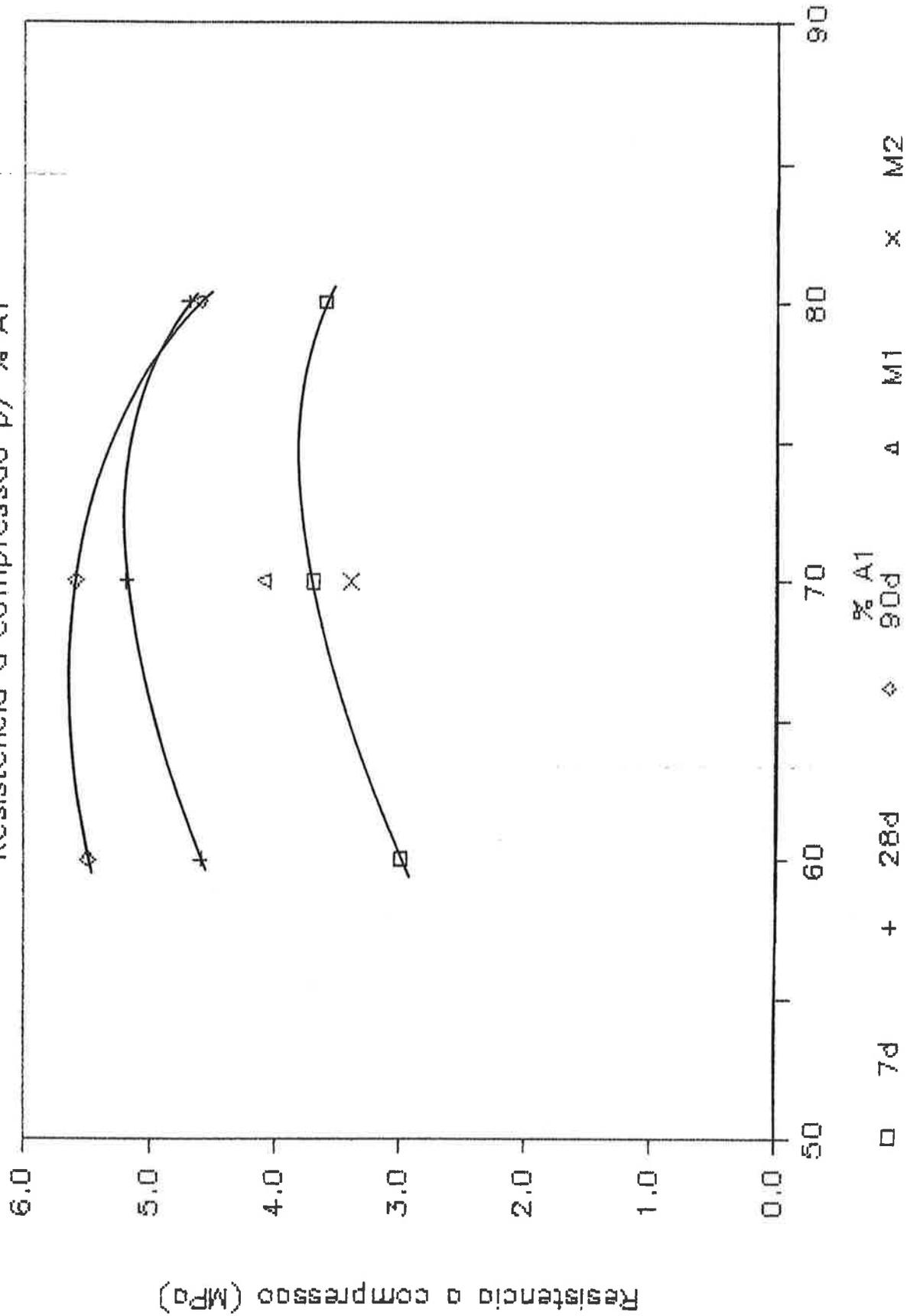


Gráfico 14: Análise granulométrica do solo

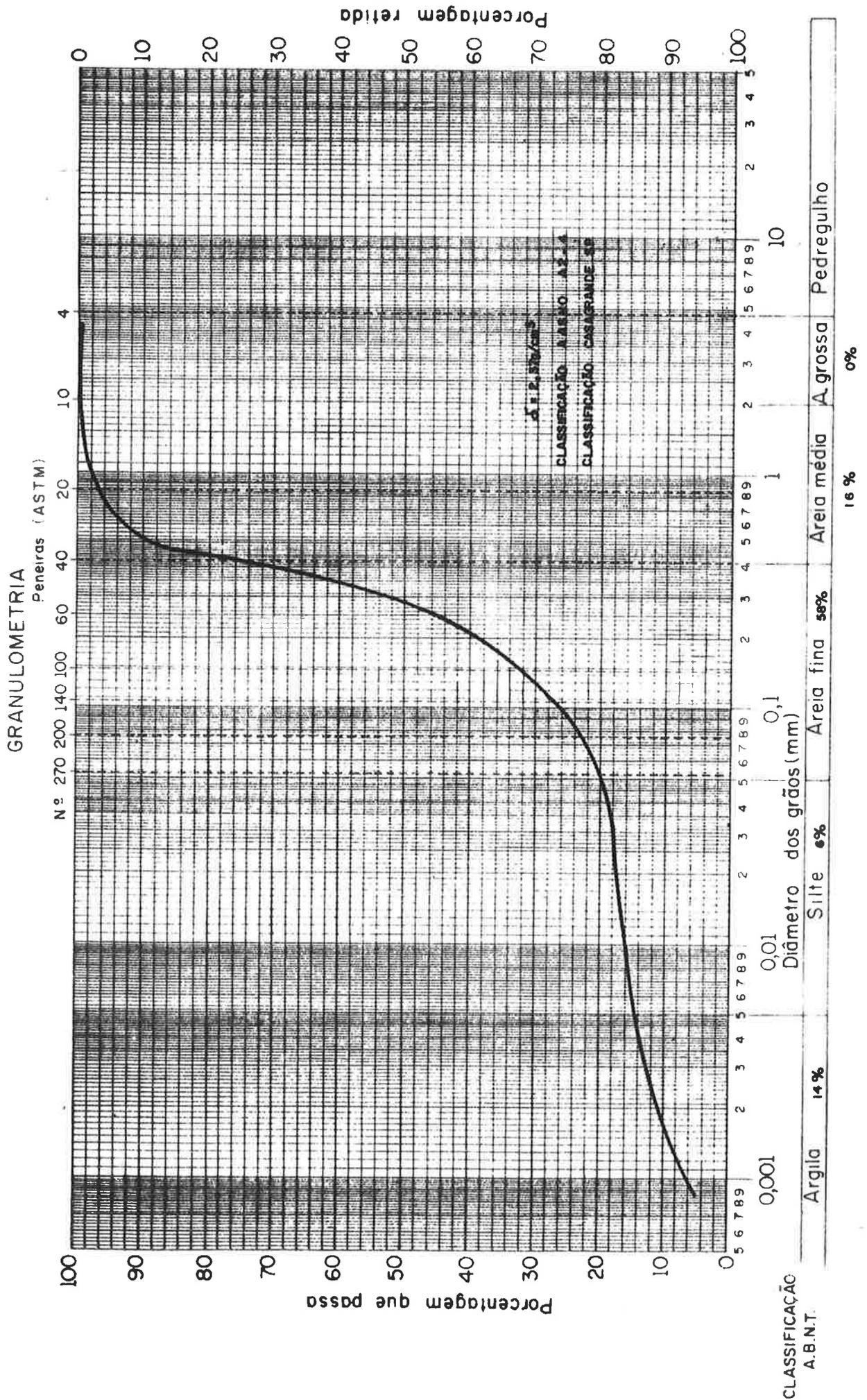


Grafico 15: Programacao A, C1-70-1

Resistencia a compressao p/ % C1-70-1

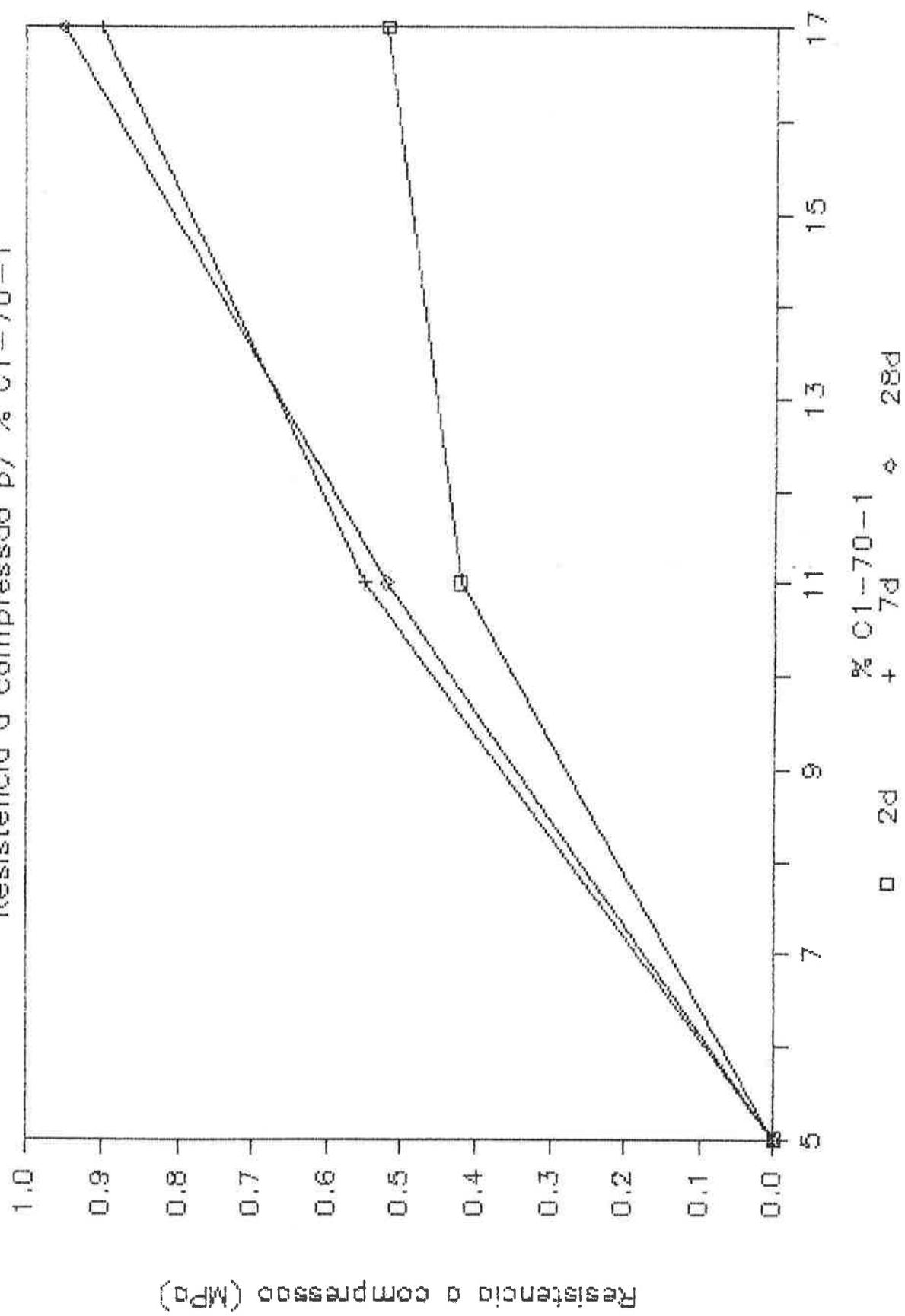


Grafico 16: Programacao A, A1-70-2

Resistencia a compressao p/ % A1-70-2

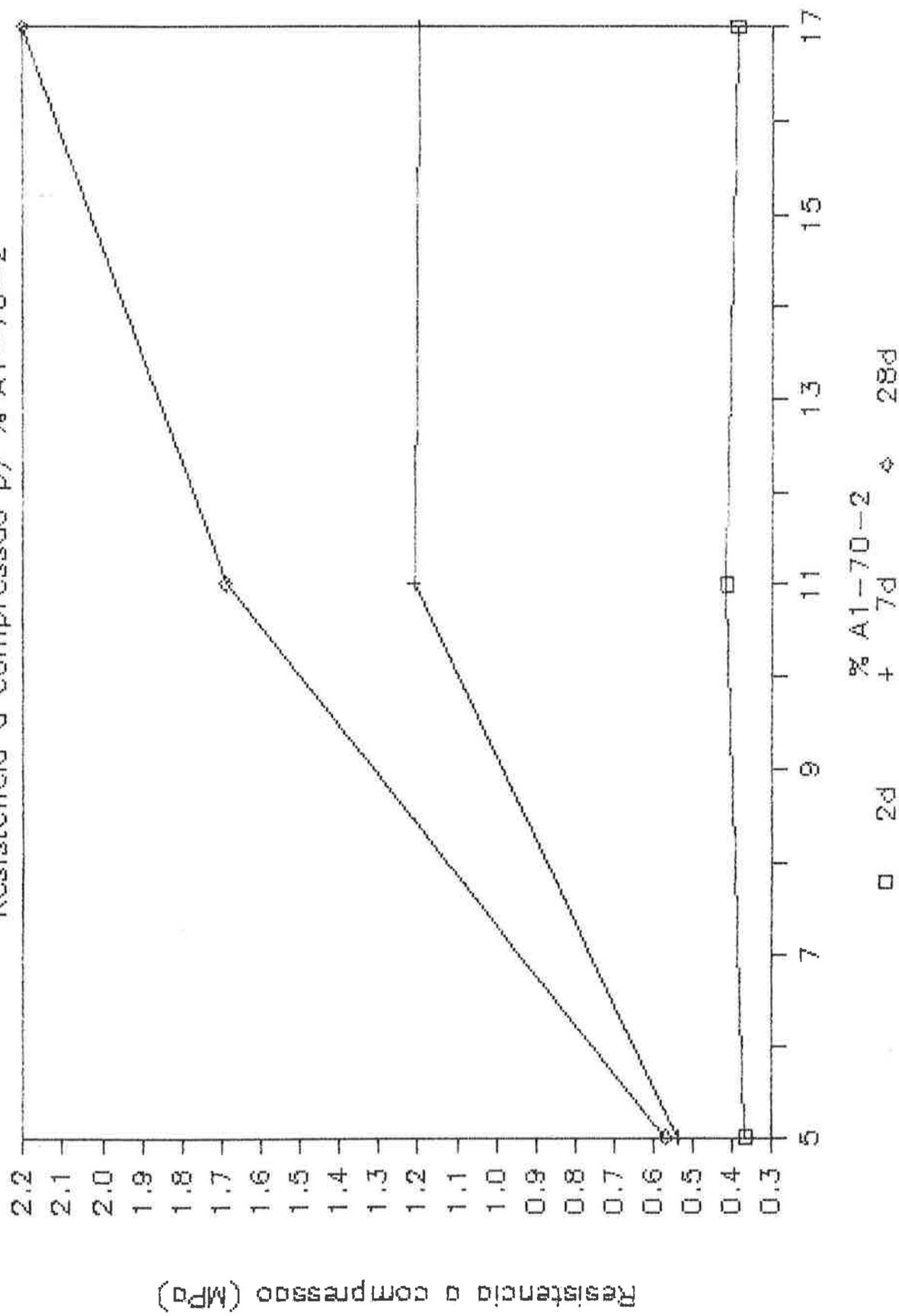


Grafico 17: Programacao A, C1-70-1

Res compressao p/ tempo de cura

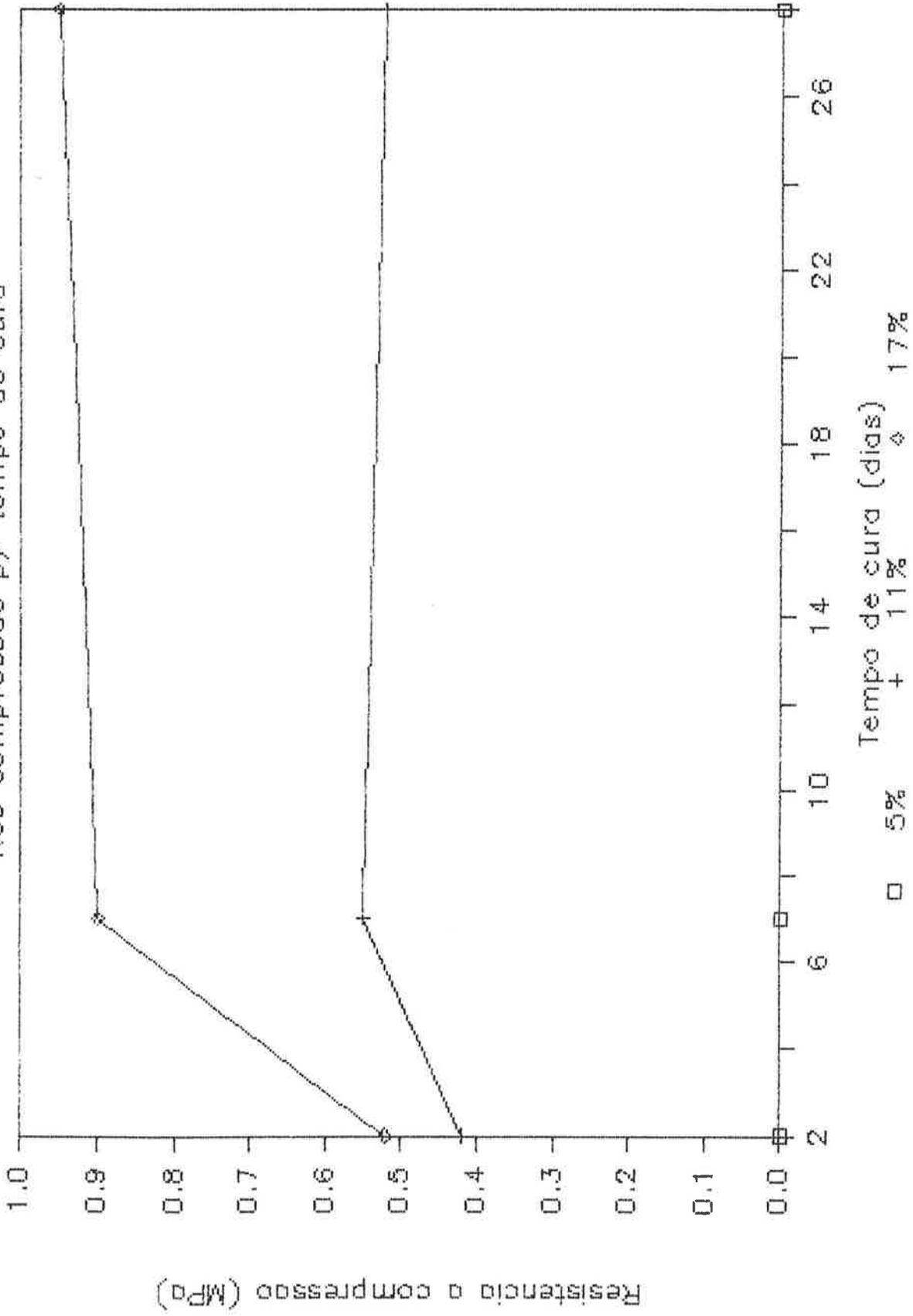


Grafico 18: Programacao A, A1,-70-2

Res compressao p/ tempo de cura

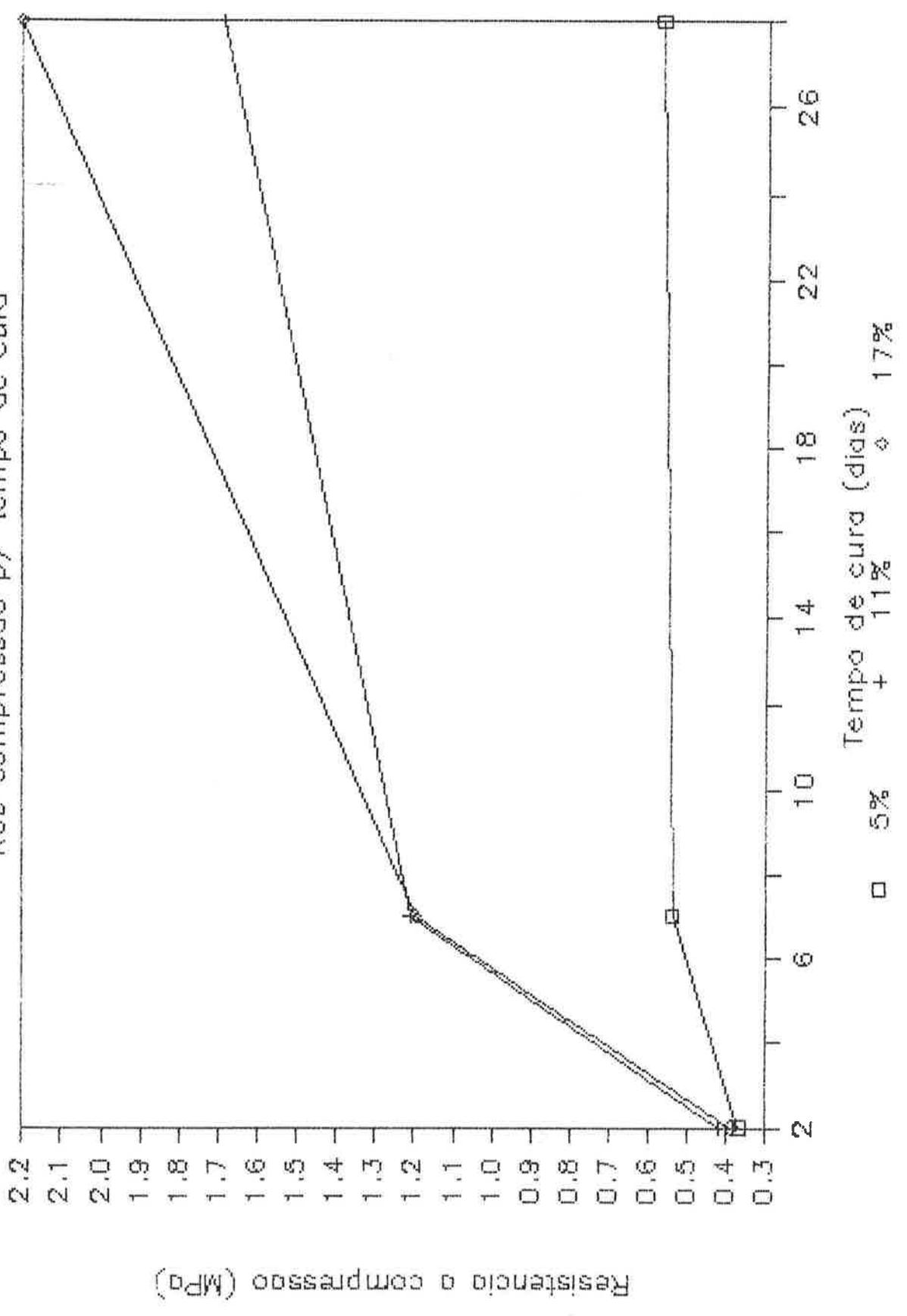


Grafico 19: Programacao B,C1-70-1

Res compressao p/ desvio de umidade

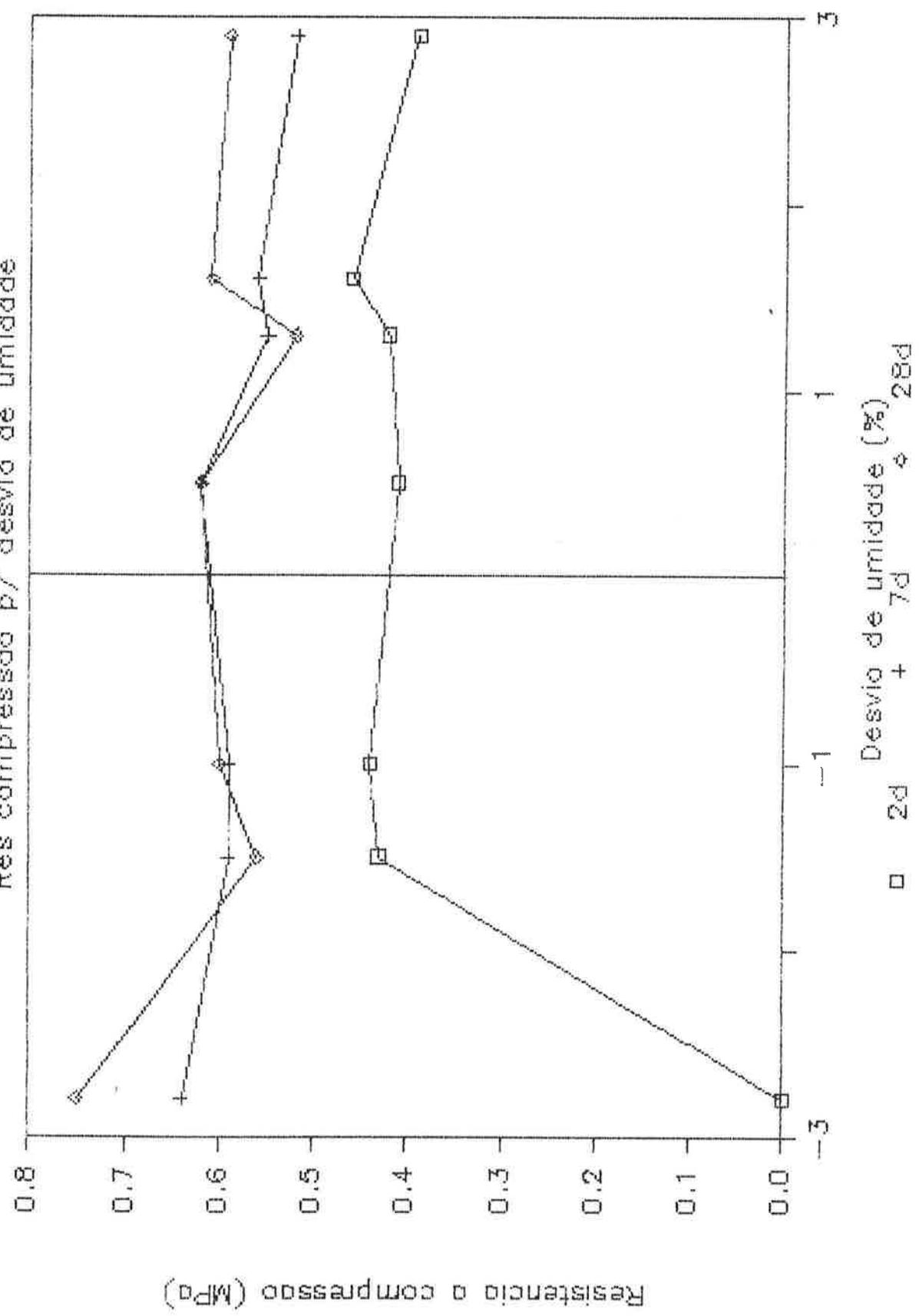


Grafico 20: Programacao B,A1-70-2

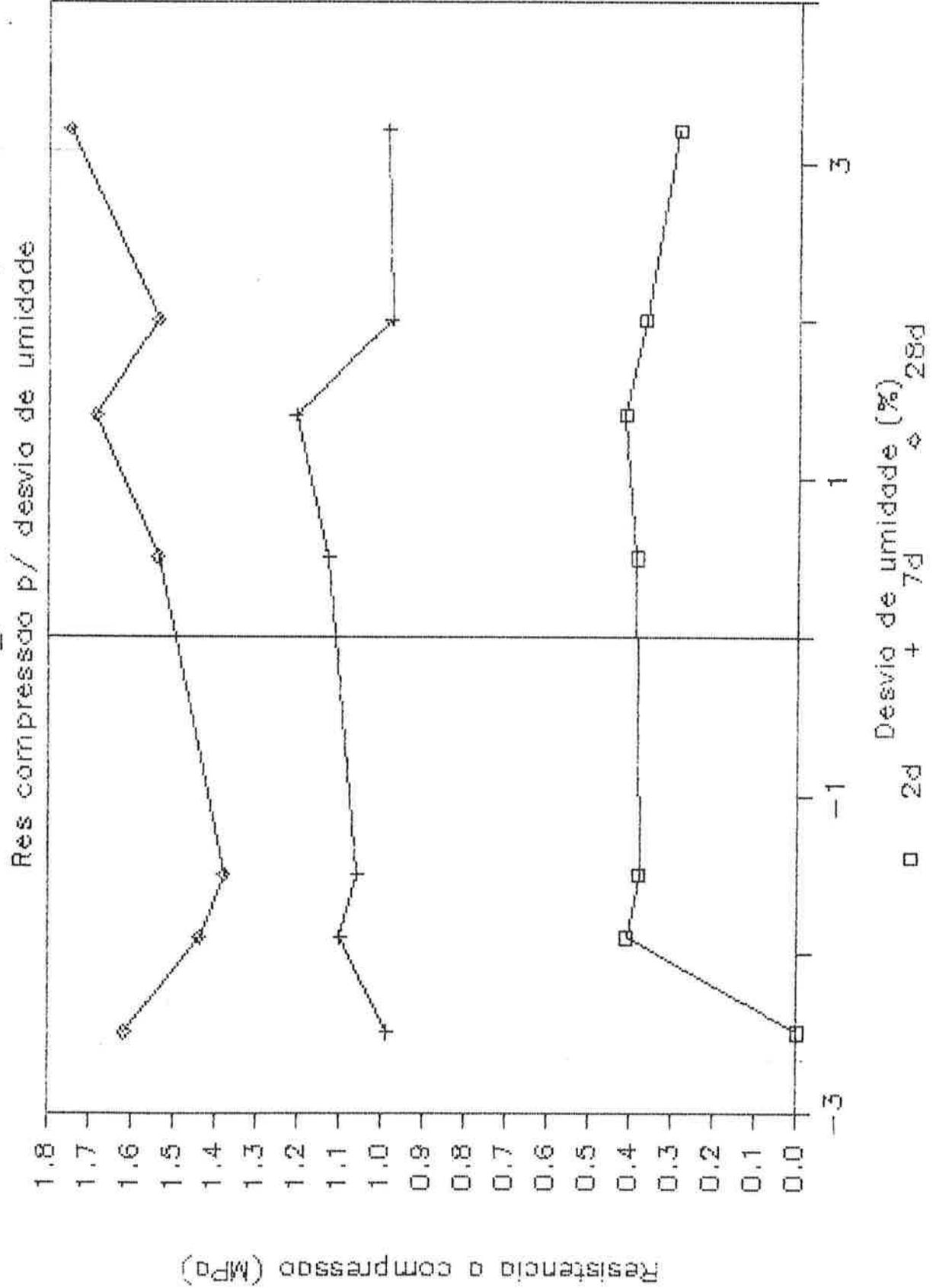
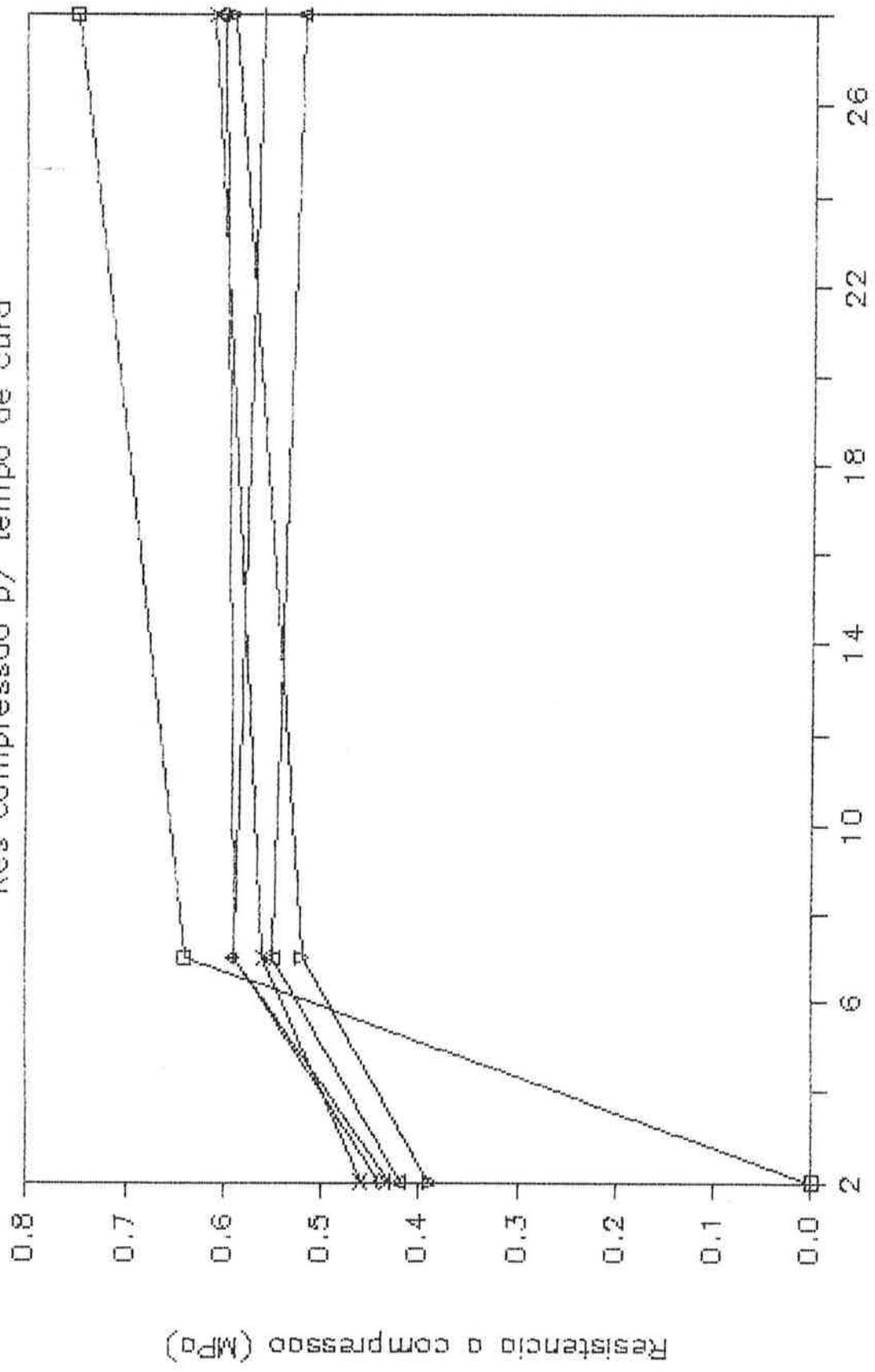


Grafico 21: Programacao B, C1-70-1

Res compressao p/ tempo de cura



- 2.8
 - 1.5
 - 1.3
 - 1.6
 - 2.9

Grafico 22: Programacao B, A1-70-2

Res comprimido p/ tempo de cura

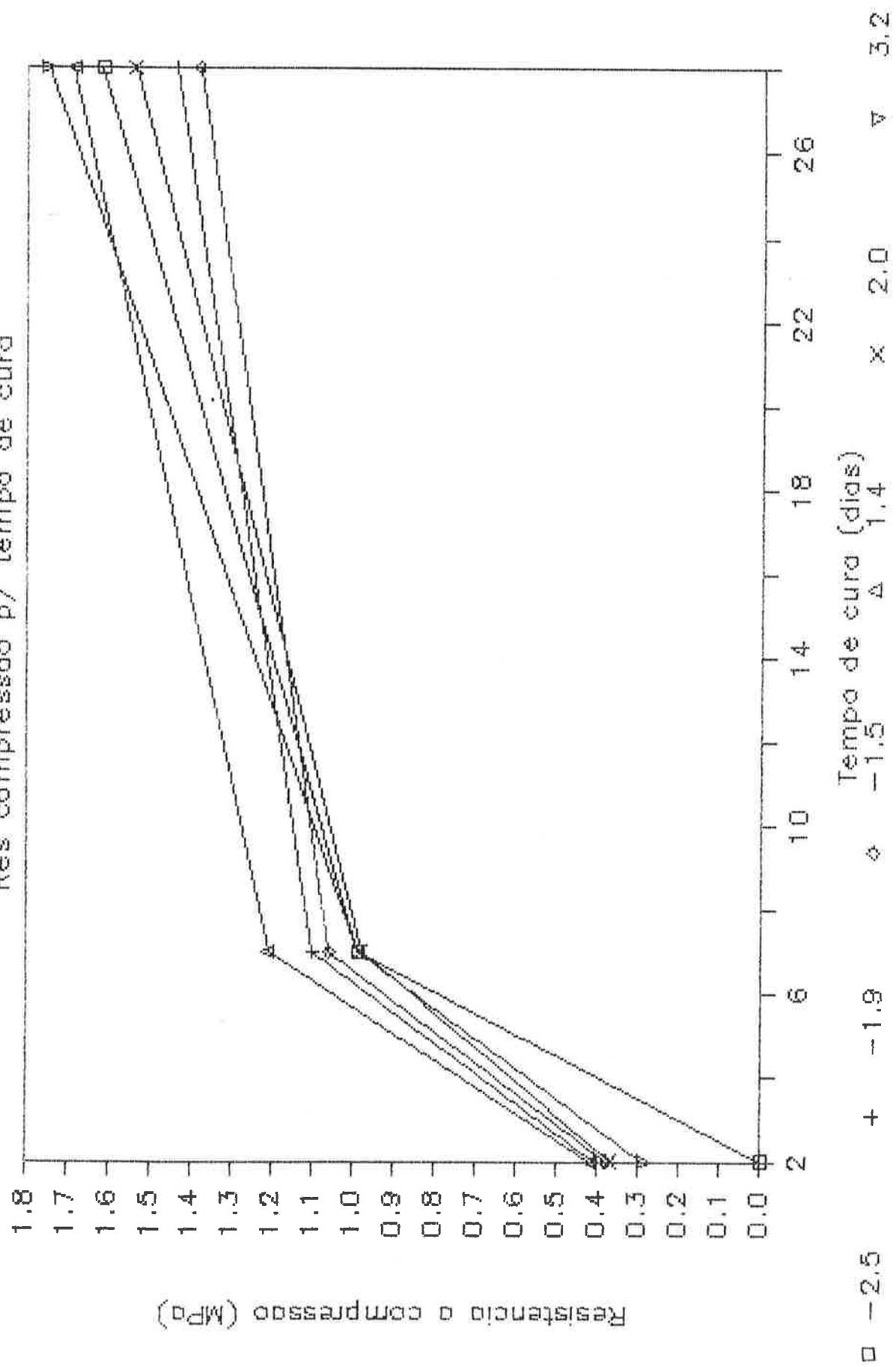


Grafico 23: Programacao C, C1-70--1

Res compressao p/ golpes de soquete

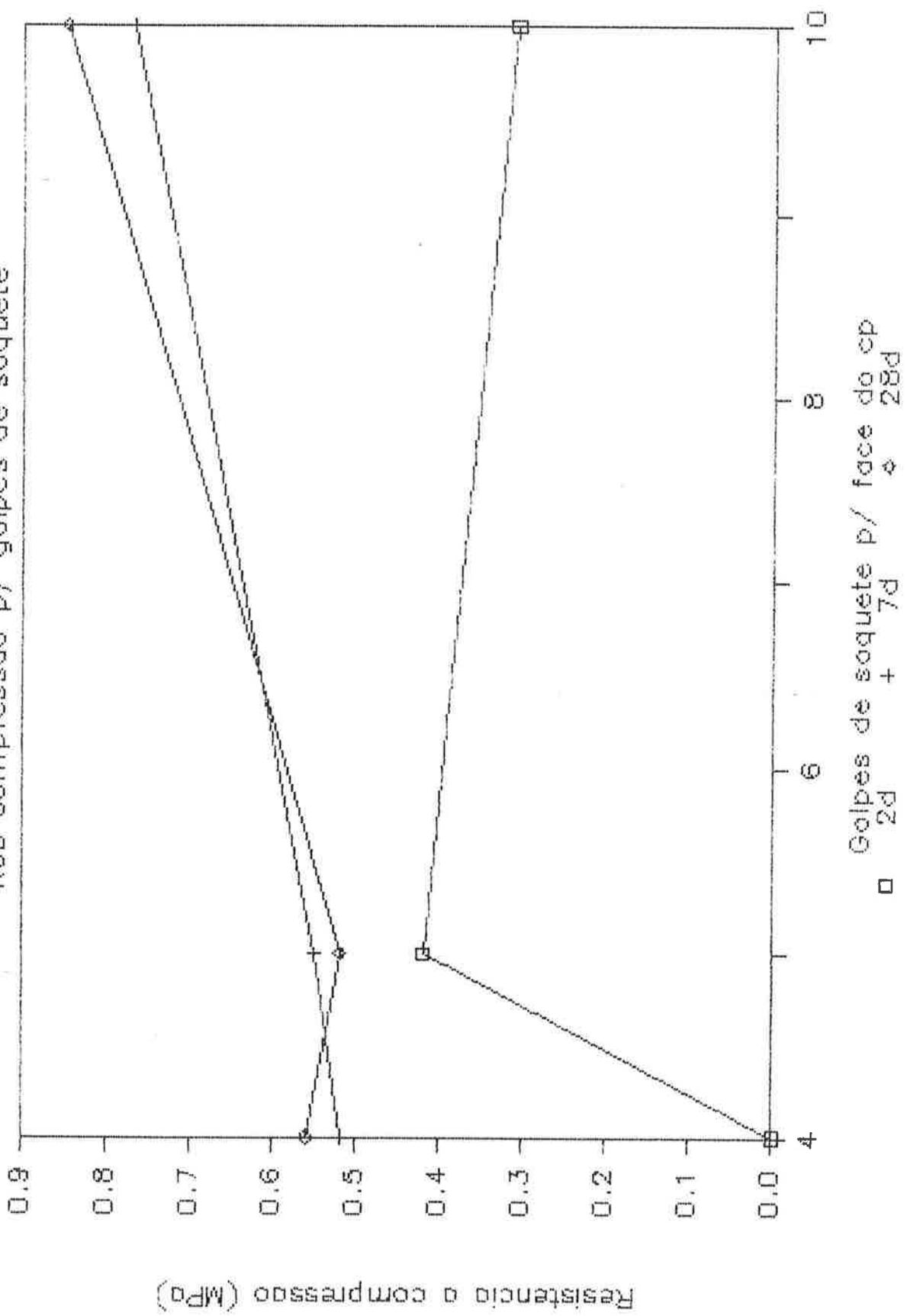
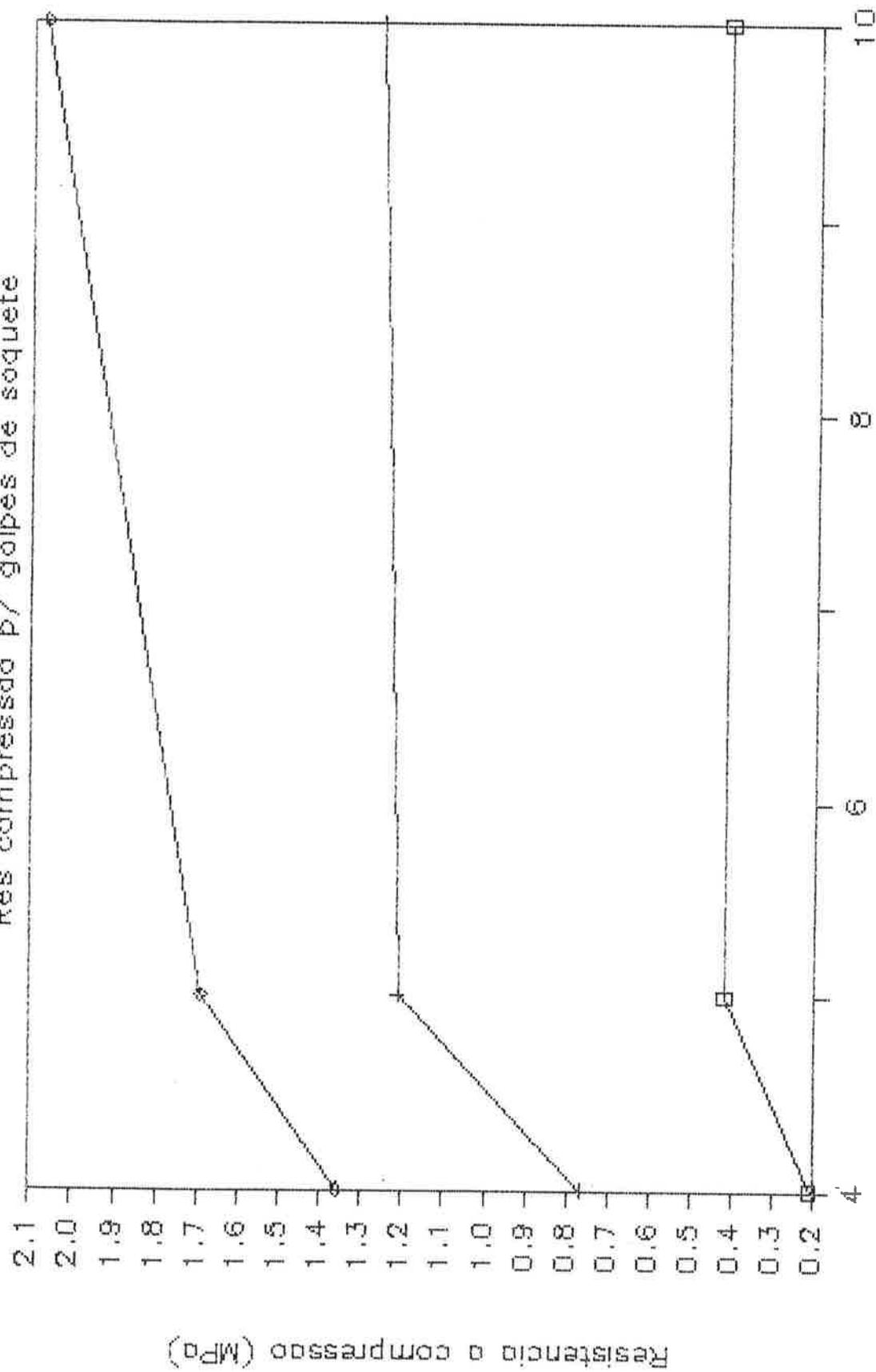


Grafico 24: Programacao C, A1-70-2

Res compressao p/ golpes de soquete



□ Golpes de soquete p/ face do cp + 2d
◇ 28d

Grafico 25: Programacao C, C1-70-1

Res compressao p/ tempo de cura

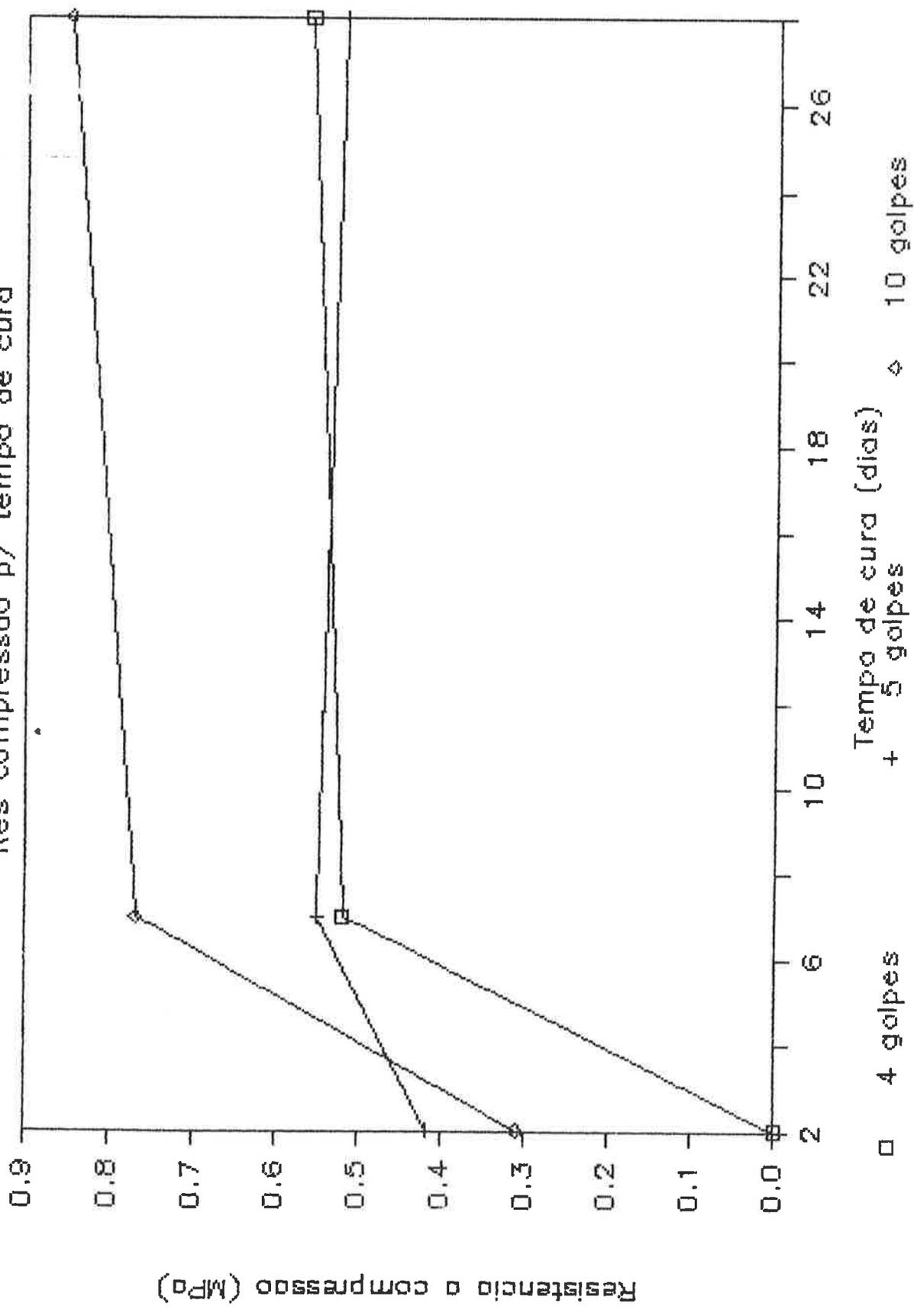


Grafico 26: Programacao C, A1-70-2

Res compressao p/ tempo de cura

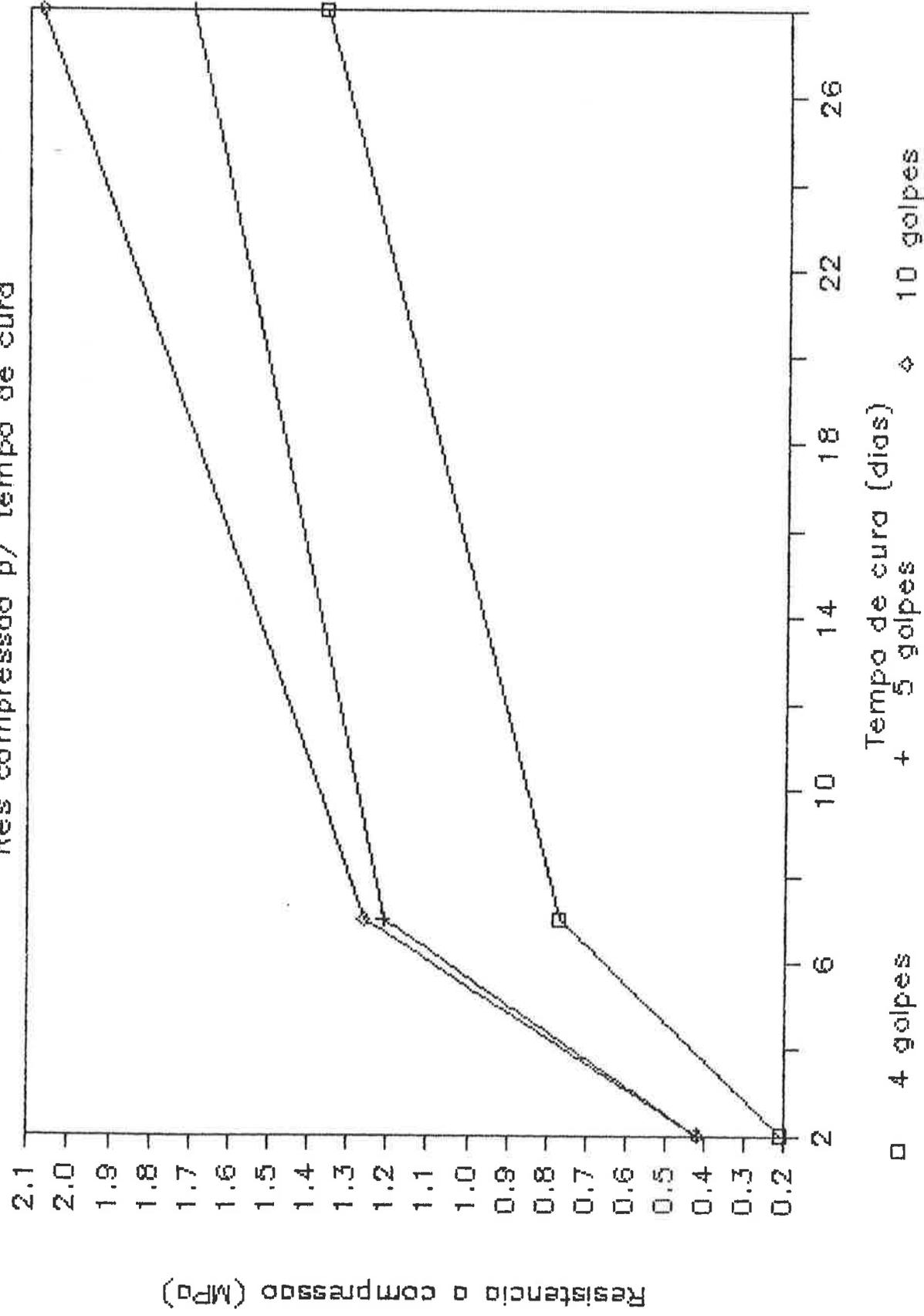


Grafico 27: Programacao C, C1-70-1

Expansao p/ tempo de cura

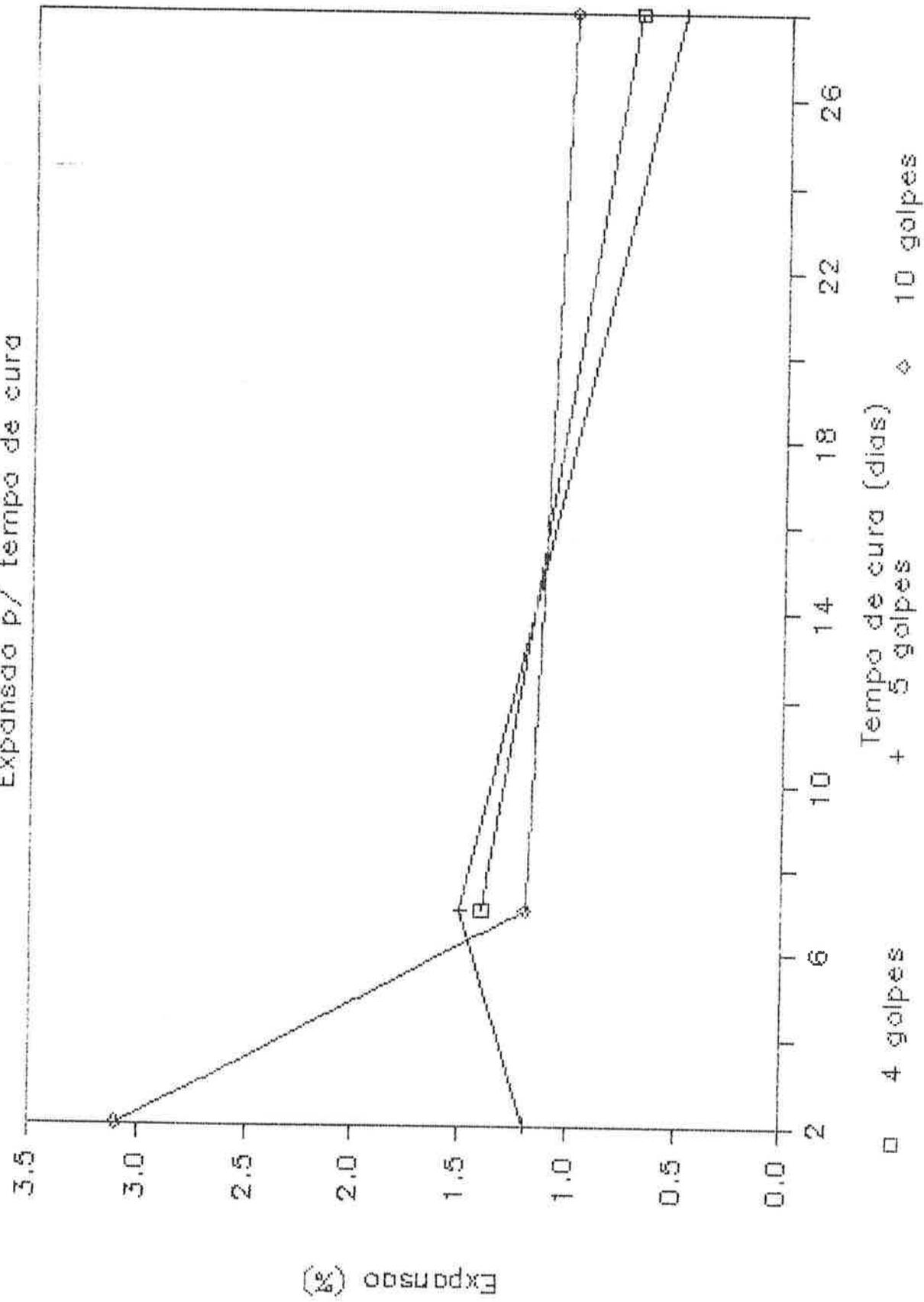


Grafico 28: Programacao C, A1-70-2

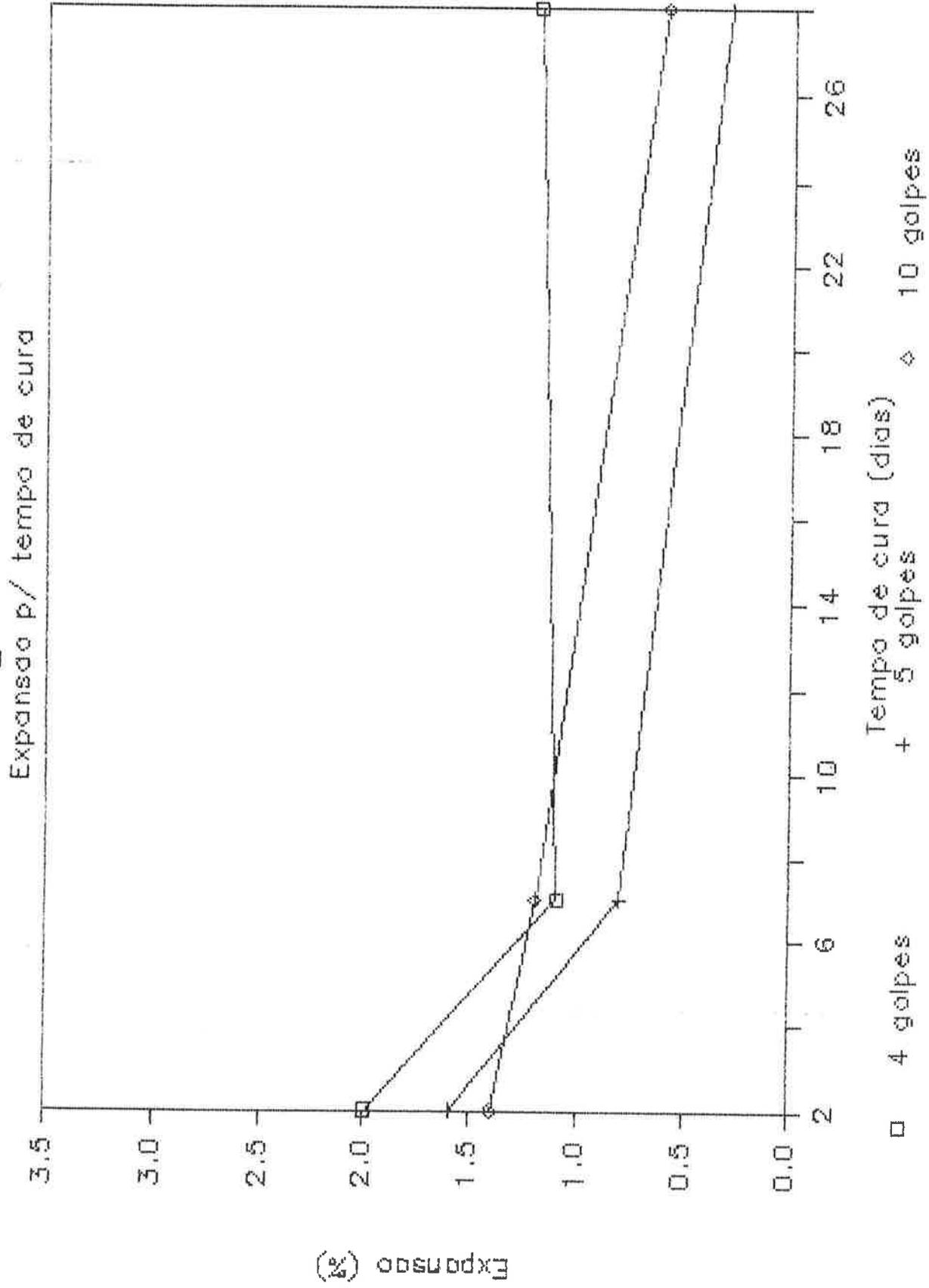
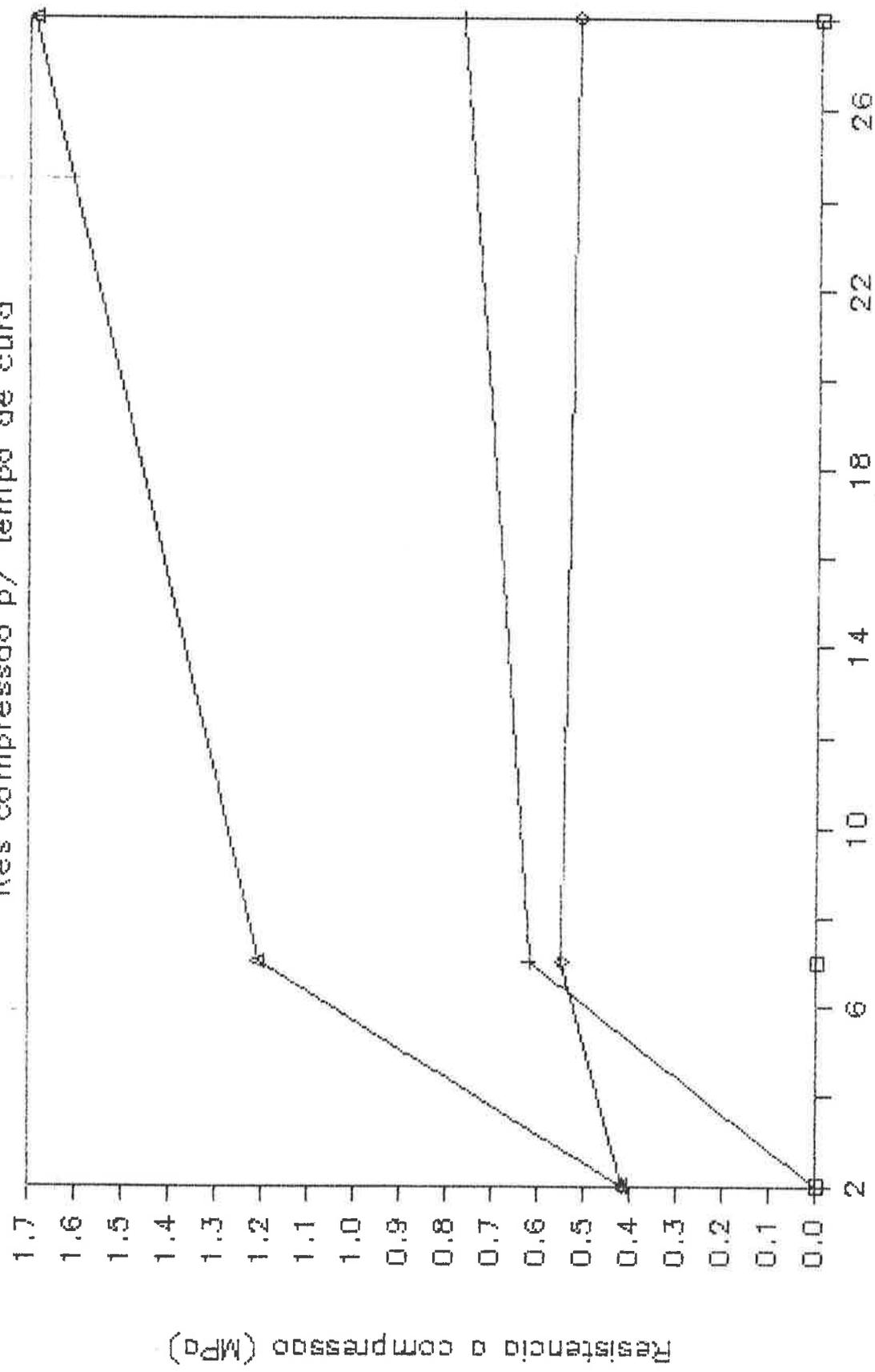


Grafico 29: PrgD, C1-70-1 e A1-70-2

Res compressao p/ tempo de cura



Tempo de cura (dias)

□ C1-70-1

+ A1-70-2

◇ PrgA,C1-70-1

△ PrgA,A1-70-2

Grafico 30: Programacao E, CP-320

Res compressao p/ teor de cimento

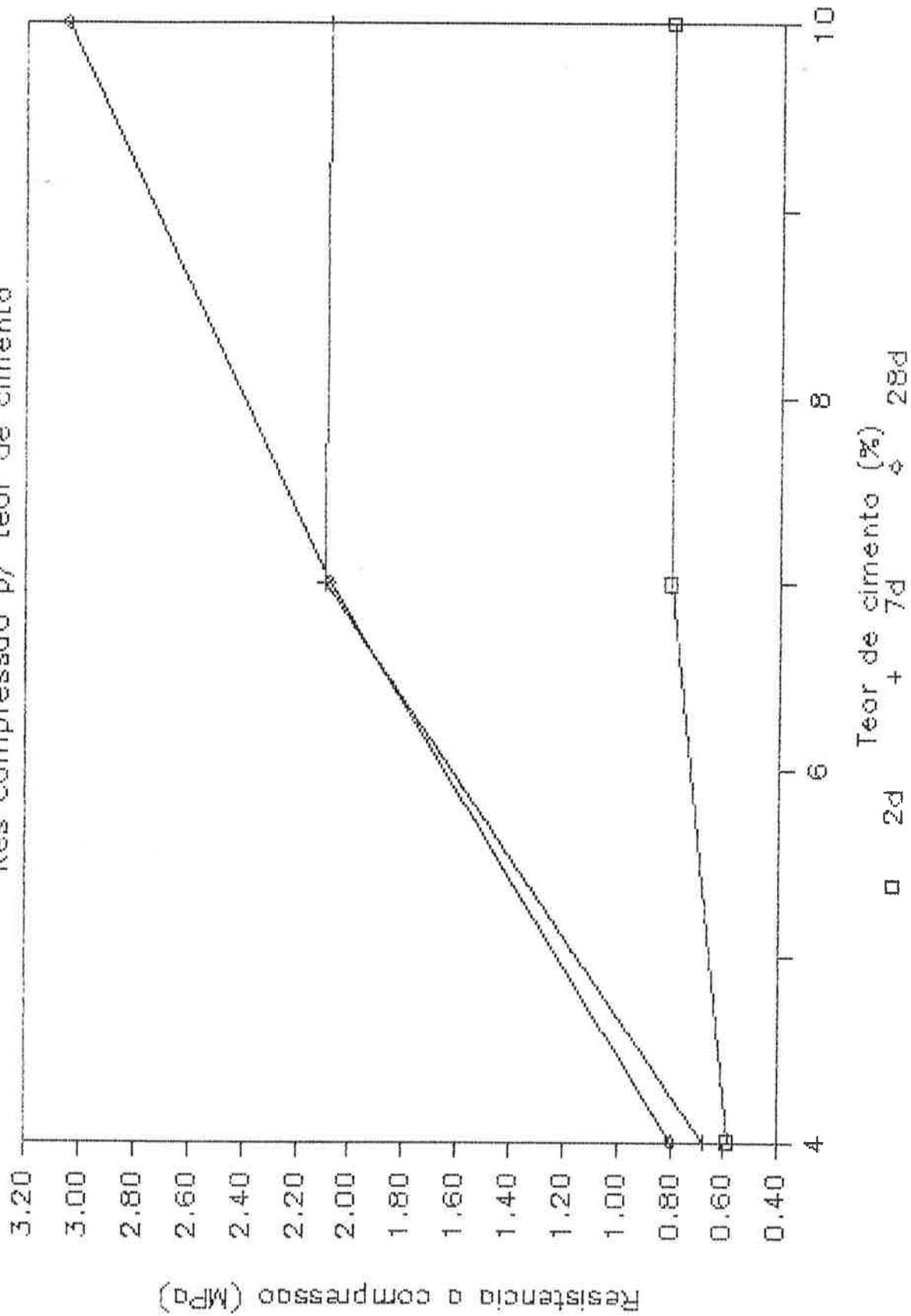
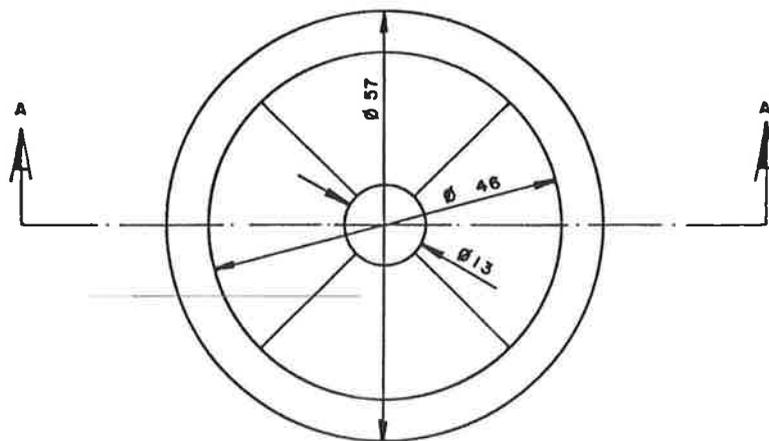
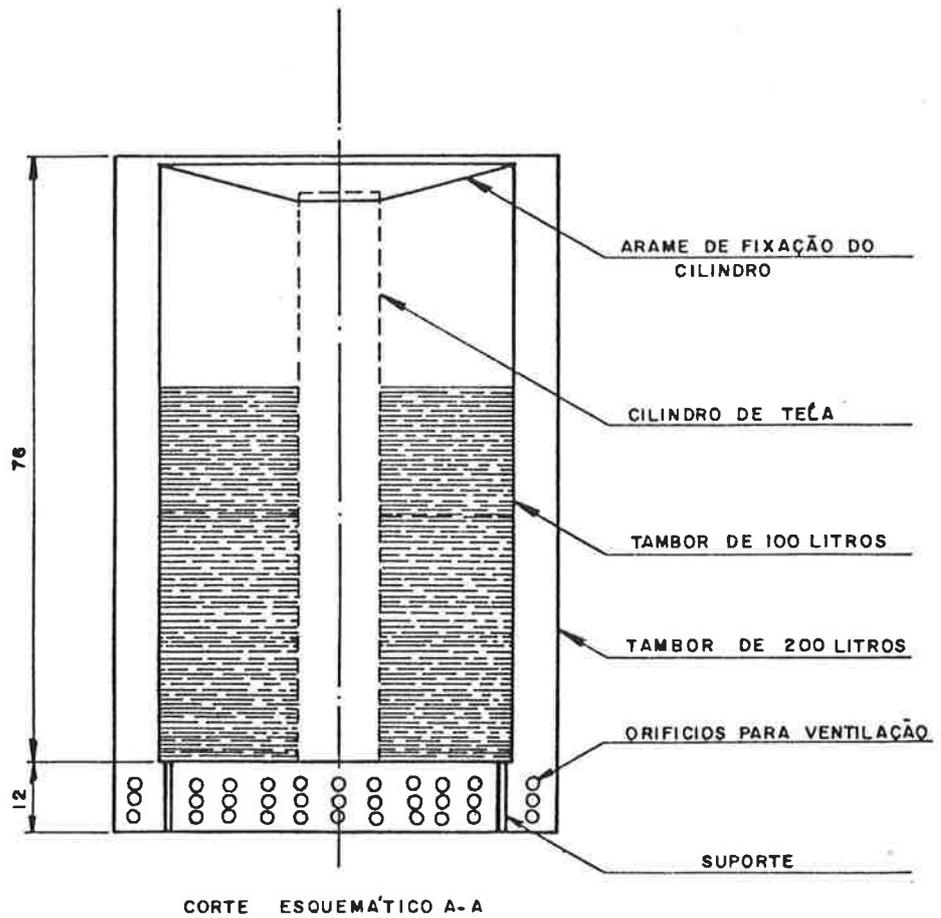


Figura 1. - Forno para queima de arroz



LEGENDA



PALHA

Des. s/ escala
Cotas em cm.

Figura 2 - Distribuição da produção de arroz (em casca) no Brasil, por unidade da Federação, 1984 (ton)

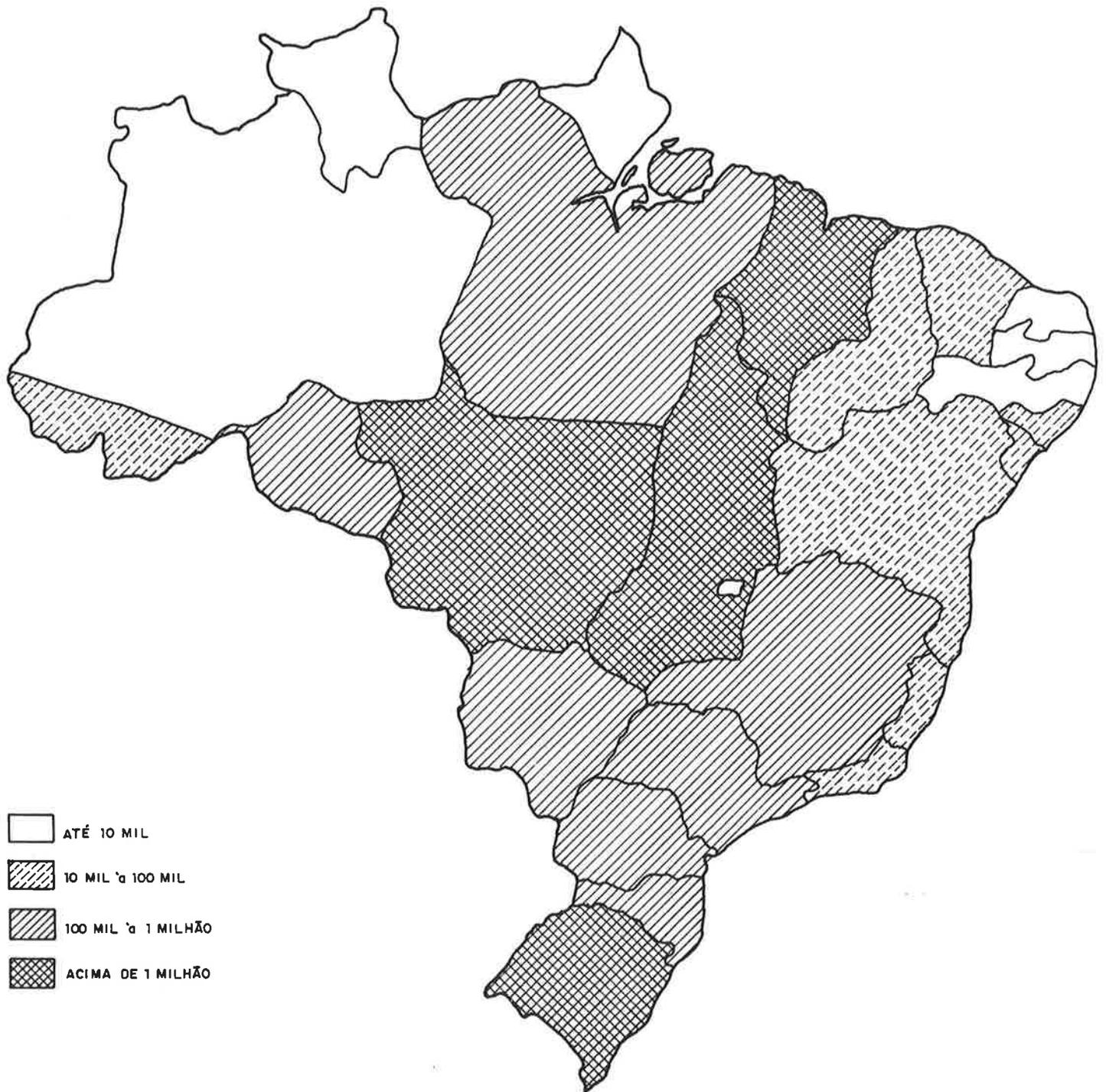


Figura 3 - Distribuição da produção de arroz (em casca) no Estado de São Paulo, 1984/1985 (%)

