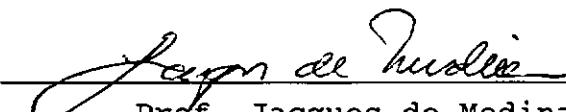


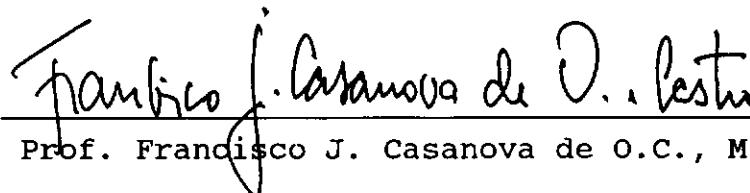
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO
DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

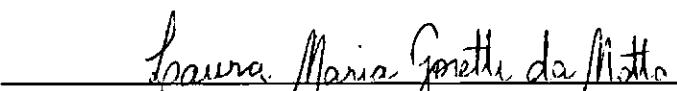
Maria da Glória Marcondes Rodrigues

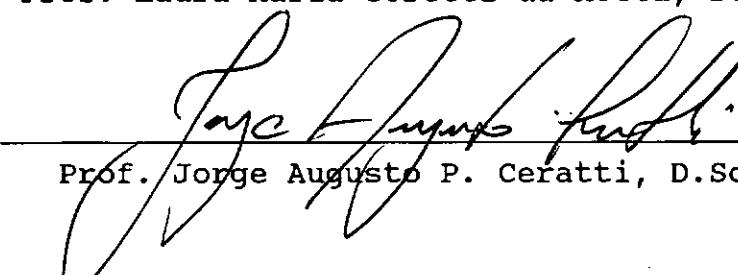
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:


Prof. Jacques de Medina, L.D.
(Presidente)


Prof. Francisco J. Casanova de O.C., M.Sc.


Prof. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.


Prof. Jorge Augusto P. Ceratti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 1992

RODRIGUES, MARIA DA GLÓRIA MARCONDES

Contribuição ao estudo do Método Físico-químico de
Dosagem do Solo-cimento [Rio de Janeiro] 1992
XI, 193 p. 29.7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia
Civil, 1991)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Método Físico-químico de Dosagem do Solo-cimento

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

A minha querida filha Lígia

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Jacques de Medina, amigo e orientador, por ter incentivado meu ingresso no Mestrado e me apoiado durante sua realização.
- Ao Professor Casanova, pelo total apoio no decorrer do curso e pela valiosa orientação, com seus constantes ensinamentos e estímulo ao desenvolvimento deste trabalho.
- À Professora Laura Maria Goretti da Motta, pela sua prestimosa colaboração, esclarecendo dúvidas e dando sugestões.
- Aos que comigo colaboraram nos ensaios para o estudo da reproduibilidade do método, Ana Maria Souza da Cruz, Paulo Alves e Osório Luiz da Silva.
- Ao Professor Franklin dos Santos Antunes e aos Engenheiros João Luiz R. Souza e José Afonso Gonçalves de Macedo por terem gentilmente cedido os solos utilizados na tese.
- À professora Helena Polivanov pelas análises de Raio-x dos solos.
- Ao professor Marcos Francisco Vidal Melo pelos esclarecimentos estatísticos.

- Aos irmãos Marcelo e Marcondes Silveira da Costa pelo trabalho de digitação e composição gráfica.
- Ao Gilmar Fernandes pelos desenhos.
- Aos colegas do laboratório de Geotecnia, que direta ou indiretamente colaboraram na realização da pesquisa e pelo apoio que recebi de todos.
- Ao meu irmão Mauro, por sua colaboração na revisão do inglês.
- Ao amigo Ronaldo pelas sugestões na melhoria do texto e pelo seu companheirismo durante a realização dos ensaios.
- À minha incansável mãe por ter sempre procurado emprestar-me a paz necessária ao desenvolvimento do meu trabalho.
- Finalmente agradeço à minha madrinha Lygia que com seu incentivo foi a responsável por meu ingresso no campo das pesquisas.

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO
DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

Maria da Glória Marcondes Rodrigues

Maio, 1992

Orientador: Prof. Jacques de Medina

Programa: Engenharia Civil

Estudou-se o chamado "Método Físico-químico de Dosagem do Solo-cimento", utilizando quatro solos de alteração laterítica, com características diferentes. Fez-se uma avaliação da precisão do método através dos índices de repetibilidade e reprodutibilidade. Para este fim, foram realizados dez ensaios para cada solo com o mesmo operador e um programa interlaboratorial utilizando-se quatro laboratórios, os quatro solos e três repetições por amostra.

Observou-se também, as influências de um aditivo (CaCl_2), do pré-tratamento com ultra-som e da temperatura, nos resultados do método.

Apresenta-se algumas correlações da variação volumétrica percentual com as características dos solos.

Finalmente, define-se um novo critério para a escolha do teor de cimento requerido pelo solo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE PHYSICO-CHEMICAL
METHOD FOR ASSESSMENT OF SOIL-CEMENT

Maria da Glória Marcondes Rodrigues

May, 1992

Thesis Supervisor: Prof. Jacques de Medina

Department: Civil Engineering

This dissertation concerns a study developed on the method known as Physico-chemical Assessment of Soil-Cement, by using four soils of lateritic weathering with different characteristics.

The method's precision was appraised by means of repeatability and reproducibility indicators. For this purpose, ten assays were made on each soil with the same operator and an interlaboratorial program using four different laboratories, the four soils and three repetitions per sample.

The influences exerted by an admixture (CaCl_2), ultrasonic pretreatment and temperature on the method's results were also observed.

This thesis further presents a few correlations between percent volumetric change and soil characteristics.

Finally, a new criterion is defined to select the cement content required by the soil.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 5	
II.1 - Ligações químicas.....	5
II.2 - A natureza dos solos.....	9
II.3 - A atividade físico-química dos solos.....	16
II.4 - O Cimento - Mecanismos de Hidratação e Propriedades Eletrocinéticas.....	24
II.5 - Estabilização Alcalina de Solos.....	30
II.5.1 - Mecanismos.....	30
II.5.2 - Influência da Composição Mineralógica dos Solos na Estabilização.....	40
II.6 - Solo-cimento e os métodos de dosagem.....	42
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS..... 55	
III.1 - Solos.....	55
III.1.1 - Localização, classificação e características físicas.	55
III.1.2 - Análises Químicas.....	58
III.1.3 - Análise Mineralógica.....	61
III.1.4 - Preparação dos Solos.....	62
III.2 - Cimento.....	64
III.3 - Descrição do Método Físico-químico de Dosagem do Solo-cimento.....	66

III.4 - Ensaios realizados e equipamentos utilizados.....	67
III.4.1 - Ensaios de Repetibilidade.....	67
III.4.2 - Ensaios de Reprodutibilidade.....	68
III.4.3 - Influência de Aditivo.....	69
III.4.4 - Influência de Pré-tratamento.....	69
III.4.5 - Influência da Temperatura.	70
 CAPÍTULO IV - RESULTADOS.....	71
IV.1 - Ensaios de Repetibilidade.....	71
IV.2 - Ensaios de Reprodutibilidade.....	72
IV.3 - Influência de Aditivo.....	73
IV.4 - Influência do Ultra-som.....	73
IV.5 - Influência da Temperatura.....	73
 CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	160
V.1 - Ensaios de Repetibilidade.....	160
V.2 - Ensaios de Reprodutibilidade.....	163
V.3 - Intervalos de confiança para os teores de cimento obtidos através dos ensaios de repetibilidade.....	167
V.4 - Proposta de alteração do critério de dosagem do solo-cimento pelo método estudado.....	169
V.5 - Estudo das correlações entre a variação volumétrica e as	

características dos solos.....	172
V.6 - Influência de Aditivo.....	173
V.7 - Influência de Pré-tratamento.....	174
V.8 - Influência da Temperatura.....	175
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180
APÊNDICE I.....	187

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A estabilização de solos com aditivos tem sido uma solução técnica e econômica, para a utilização de solos que "in natura" não poderiam ser empregados em camadas de pavimentação. Dentre esses aditivos, o Cimento Portland tem-se tornado um dos mais utilizados, tanto na pavimentação quanto em outras aplicações na engenharia civil.

O estudo do solo-cimento começou em 1935 e foi introduzido no Brasil a partir de 1940, com algumas experimentações na pavimentação rodoviária. Em 1941, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) adotou e adaptou, para uso no Brasil, a metodologia de ensaios para a dosagem de solo-cimento da PCA (Portland Cement Association). No entanto continuaram-se os estudos, com o objetivo de tornar o método mais rápido, até que em 1952, esta Associação divulgou resultados que deram origem à Norma Simplificada de Dosagem, reduzindo o trabalho pela metade. Ainda assim é uma metodologia trabalhosa, pois necessita determinar a caracterização física do solo e fazer ensaio de compactação, para então, através de ábacos, escolher o teor de cimento que será testado pelo ensaio de resistência à compressão. Da mesma forma, a Nova Norma de Dosagem do Solo-Cimento da ABCP, apresentada na 25^a Reunião Anual de Pavimentação, continua

necessitando de um tempo relativamente grande de execução, pessoal tecnicamente treinado, material adequado de laboratório e uma quantidade razoável de amostra.

Tentando simplificar essa dosagem, tem sido propostos outros métodos, mas todos com desvantagens e sujeitos a grandes variações de resultados.

Em 1971, um pesquisador indiano do Central Road Research Institute de Nova Deli publicou um trabalho (CHADDA, 1971), mostrando que a interação físico-química entre as partículas dos argilominerais e as do cimento em hidratação, podia ser utilizada para a dosagem do teor de cimento requerido pela argila ou pelo solo. Propôs um ensaio que, embora realizado em condições afastadas da realidade, principalmente quanto a relação água cimento grande e a inexistência de compactação, seria capaz, de medir indiretamente essa interação.

Este trabalho foi analisado em 1985 por Ceratti e Casanova na COPPE/UFRJ e testado com argilominerais puros, oxihidróxidos de ferro e alumínio e solos sesquióxidicos e cauliníticos (CASANOVA e CERATTI, 1985). Devido aos resultados positivos, o estudo sobre o método teve seu escopo ampliado, sendo estendido a uma gama variada de solos e seus resultados comparados com os obtidos pelas normas da ABCP (CERATTI e CASANOVA, 1988), obtendo-se uma correlação significativa.

O entusiasmo pelo método vem da perspectiva de ser

uma alternativa rápida e simples de orientação ao projetista de uma obra, do teor mínimo de cimento necessário para estabilizar o solo. Esta indicação avalia se este tipo de estabilização é viável economicamente, além de facilitar a determinação dos teores de cimento para o ensaio de resistência mecânica.

Tem como vantagens requerer pouca quantidade de amostra, equipamento simples, pessoal tecnicamente não especializado e rapidez de execução.

As pesquisas continuam sendo realizadas na COPPE, sob a orientação do professor Casanova e na UFRGS com o professor Ceratti. Por ocasião da defesa de tese "Estudo Comparativo entre o Método Mecânico e o Método Físico-químico para Dosagem de Solo-Cimento" de Márcio Alvarado Enamorado(1990), foi questionada a validade do método no tocante aos índices de precisão.

Surgiu então a idéia do presente trabalho, que é estudar o método em si, avaliando sua precisão através de índices de repetibilidade e reprodutibilidade, isto é, realizando repetidos ensaios em algumas amostras, por um mesmo operador em condições iguais e por outros laboratórios respectivamente.

Outro ponto da pesquisa é o estudo de influências no método, de pré-tratamento do solo com ultra-som, de aditivo e da temperatura. Com as observações de grande número de ensaios, pretende-se tirar algumas correlações e conclusões que possam contribuir para o esclarecimento do

mecanismo físico-químico do método.

É importante enfatizar que o objetivo primordial do estudo desse procedimento, não é a tentativa de substituição pura e simples da metodologia mecânica, mas sim, de estabelecer simples e rapidamente parâmetros (creatividade do solo, teor mínimo de cimento) que orientem o estudo mecânico da estabilização.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

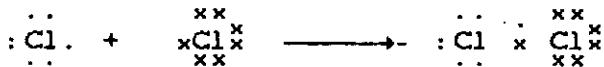
II.1 - Ligações químicas

O átomo é constituído de um núcleo (com prótons e neutrons) e elétrons situados ao redor deste núcleo em diferentes níveis (ou camadas) energéticos. Quando dois átomos se aproximam, estão buscando um estado de maior estabilidade, ou seja, de menor energia. Os elétrons da camada mais externa de um dos átomos são atraídos pelo núcleo do outro e vice-versa. Quando as forças repulsivas entre os núcleos carregados positivamente tenham determinado a posição de maior aproximação, o processo associativo termina. Neste ponto, o sistema dos dois núcleos e dos elétrons atingiu uma estabilidade muito maior que a dos dois átomos isolados, surgindo assim a molécula. Esta atração entre os átomos é chamada de ligação química.

Os três tipos mais comuns de ligação química são :

(1)Ligação Covalente - ocorre quando os elétrons de valência são compartilhados entre os núcleos, não se identificando mais com nenhum dos dois núcleos. Os átomos compartilham os elétrons para completarem sua camada externa.

Exemplo: União entre 2 átomos de cloro.



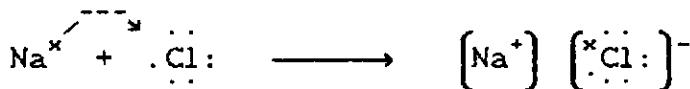
Compartilhando este par de elétrons, cada átomo de cloro completa seus 8 elétrons na camada externa, adquirindo estabilidade.

Ela ocorre entre 2 átomos de não-metais, ou semi-metais ou, então, entre esses elementos e o hidrogênio. E tem caráter direcional.

(2) Ligação Iônica - ocorre quando não há o compartilhamento dos elétrons ou se há é muito pequeno. Há formação de íons a partir de átomos livres com a perda ou ganho de elétrons. Os íons tendo cargas opostas se atraem e se mantém unidos pela ligação iônica (forças eletrostáticas). Têm caráter não-direcional.

Exemplo: União do átomo de sódio com de cloro.

O átomo de sódio entrega definitivamente um elétron de valência ao átomo de cloro. Deste modo forma-se um íon positivo (cátion Na^+) e um íon negativo (ânion Cl^-), ambos com o "octeto completo" que é a regra para a estabilidade.



Para as moléculas homonucleares como H_2 , N_2 e O_2 fica claro que o par de elétrons é igualmente atraído pelos dois núcleos. Mas para átomos heteronucleares pode haver atração para um deles preferencialmente, devido à diferença de eletronegatividade. Assim, o caráter da

ligação se distancia da covalência pura.

Entre os dois extremos (compartilhamento igual e não compartilhamento) é possível descrever quantitativamente as ligações parcialmente iônicas ou parcialmente covalentes através do momento de dipolo elétrico (ou medindo a constante dielétrica). A maioria das ligações nos minerais dos solos são deste tipo.

(3)Ligação Metálica - no estado sólido os átomos dos metais se agrupam de forma geometricamente ordenada, dando origem às células, grades ou reticulados cristalinos.

Pela teoria da Nuvem Eletrônica, o metal seria um aglomerado de átomos neutros e cátions, mergulhados num "mar" de elétrons livres. Essa nuvem (ou "mar") de elétrons funciona como ligação metálica, mantendo os átomos "colados" entre si. Segundo a Teoria das Bandas Eletrônicas, no reticulado cristalino do metal, haveria uma espécie de "fusão" das camadas externas de todos os átomos, de modo a formar uma "banda eletrônica" que serviria de ligação metálica. Esta ligação não tem importância para nosso estudo de solos.

Existem também outras forças importantes intermoleculares. Elas são mais fracas que as ligações descritas acima, mas fortes suficientes para determinar o arranjo final dos átomos nos sólidos. São também fontes de atração entre partículas bem pequenas e entre líquidos e partículas sólidas (MITCHELL, 1976). São elas:

1)Forças Dipolo-Dipolo: quando uma molécula é polar

(HCl), ela apresenta uma extremidade mais eletropositiva e outra mais eletronegativa. Logo, suas extremidades vão atrair os lados opostos de moléculas vizinhas. Essas forças de coesão recebem o nome de forças dipolo-dipolo.

2)Forças de Van der Waals: são forças que mantêm unidas moléculas apolares como H_2 , Cl_2 , O_2 , CO_2 , CCl_4 , etc. Diferentemente da ligação covalente que atinge pequenas distâncias internucleares, que está associada a um recobrimento e troca de elétrons, e consequentemente, envolve altas energias, a ligação de Van der Waals pode operar a distâncias onde existe pequeno ou mesmo nenhum recobrimento ou troca de elétrons, e em geral, é associada a energias menores. Outra diferença da ligação covalente é ser, em grande parte, não-direcional.

3)Pontes de Hidrogênio: é um caso extremo de atração dipolo-dipolo quando tem-se o hidrogênio ligado a átomos fortemente eletronegativos como o flúor, oxigênio e nitrogênio. Apesar de ser mais fraca que a ligação covalente, é bem mais forte que as forças de Van der Waals. Há casos em que a ponte de hidrogênio é estabelecida dentro da própria molécula - intramolecular. Elas parecem se formar em direções preferenciais e existem fundamentalmente no estado sólido e líquido. Segundo MITCHELL (1976), este tipo de ligação é importante na determinação de algumas características dos argilominerais e nas interações entre partículas de solo e água.

II.2 - A natureza dos solos

O solo é considerado um corpo natural, resultante de duas forças: destrutiva e sintética. Como exemplos de processo destrutivo tem-se o intemperismo e a decomposição microbiana dos resíduos orgânicos. Já a formação de novos minerais, como as argilas, e o desenvolvimento de camadas de forma característica são exemplos da força sintética (BUCKMAN, 1974). É constituído de camadas que diferem pela natureza física, química, mineralógica e biológica, que se desenvolvem com o tempo sob a influência do clima e da própria atividade biológica. A formação do solo segue um ciclo com duas fases: a primeira corresponde à formação da massa do solo através dos processos de intemperização (desintegração, decomposição e recomposição das rochas e minerais) e a segunda está relacionada com a transformação dessa massa no verdadeiro solo, através dos processos bioquímicos e biocoloidais. Ele é composto por três fases: a sólida, a líquida e a gasosa. A sólida é representada por duas frações, uma mineral constituída pelos produtos de decomposição das rochas e minerais e outra orgânica, formada por detritos de origem animal e vegetal decompostos ou pelos organismos vivos. A fase líquida é composta pela água do solo que fica em movimento ou estacionada entre as partículas sólidas. A gasosa também ocupa os poros, ou seja, os espaços entre as partículas sólidas (VIEIRA, 1975).

A parte mineral do solo é constituída de partículas unitárias de tamanhos variados, desde fragmentos de rochas

até partículas coloidais de argila. Contém argila cristalina, material argiloso amorfos, minerais não argilosos e sais precipitados. A fração não argilosa é composta principalmente de: quartzo - sílica tetraédrica agrupada em espirais com todos os oxigénios ligados ao silício, não tendo ions fracamente ligados na sua estrutura, não tendo plano de clivagem e tendo grande resistência; feldspato - mineral silicatado com a estrutura tri-dimensional, onde parte do silício é substituída pelo alumínio e o excesso de carga negativa, devido a essa substituição, é balanceado por cátions como potássio, cálcio, sódio, estrôncio e bário, tornando-o assim moderadamente resistente ao intemperismo e relativamente fácil de quebrar, pois passa a apresentar plano de clivagem; mica - algumas vezes presente; carbonatos e óxidos de ferro e alumínio (MITCHELL, 1976).

A argila, fração menor que 2 μm , é a parte ativa do solo, onde ocorrem os fenômenos físicos-químicos que tem grande influência no seu comportamento. É composta por argilominerais cristalinos e amorfos e componentes não-argilominerais cristalinos (silicatos, hidróxidos, óxidos, carbonatos, nitratos, sulfatos, sulfetos) e amorfos (ácidos silícicos, hidróxidos, ácido húmico) (SANTOS, 1975). Os argilominerais cristalinos se dividem em dois tipos: a)filosilicatos (silicatos em folhas) e b)silicatos com estrutura fibrosa (sepiolita e paligorskita ou atapulgita). A maioria dos argilominerais tem estrutura lamelar, isto é, são do primeiro tipo. As duas unidades básicas nestas estruturas são o grupo

tetraédrico com o íon silício coordenado tetraédricamente com quatro oxigénios e o octaédrico com o íon alumínio ou magnésio coordenado octaédricamente com seis oxigénios ou hidroxilos. Eles estão ligados entre si formando folhas hexagonais contínuas tetraédricas e octaédricas respectivamente. As várias maneiras como estas folhas podem se encaixar dão origem às estruturas fundamentais dos argilominerais. Os principais grupos de argilominerais em função da estrutura são os seguintes: Canditas, Esmectitas, Vermiculitas, Cloritas, Micas e de Camadas Mistas descritas a seguir.

- Grupo das Canditas: caulinita, haloisita e diquita.

Empilhamento regular de camadas 1:1 em que cada camada consiste de 1 folha tetraédrica e 1 folha octaédrica de alumínio (ou folha de gibbsita) ligadas entre si através do oxigénio em comum. As camadas ou unidades estão unidas através de ligação de pontes de hidrogênio, não havendo assim expansão no eixo c, nem entrada de H_2O e nem há cátions trocáveis nestes planos basais. Sua estrutura é eletricamente neutra. A clivagem se dá no plano basal. A distância interplanar basal é a distância máxima entre uma unidade e outra. É através dessa distância que pode-se identificar os argilominerais através da difração de raios-x. No caso desse grupo é 7 Å.

Na haloisita 4 H_2O (endelita) a união das camadas é feita pela oxidrila (moléculas de água), aumentando sua distância interplanar basal para 10 Å, e havendo também maior capacidade de retenção de cátions.

- Grupo das Esmectitas: montmorilonitas, beidelite, bentonita, hectorita e nontronita.

Constituído por camadas 2:1. Cada camada formada por duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica entre as outras duas, unidas por oxigênicos comuns. A distância interplanar basal é de 14 Å. As camadas são ligadas por cátions trocáveis como o Mg, Na, Ca, H⁺ ou Al. A água pode entrar no espaço interlamelar, ser adsorvida pelo cátion, expandindo assim o argilomineral (para 18 Å). Devido à essa ligação fraca e às substituições isomórficas ocorridas no reticulado cristalino e nos cátions trocáveis, as partículas destes argilominerais são de fácil clivagem em meio líquido.

- Grupo das Vermiculitas: também são formadas por camadas 2:1, sendo ligadas por magnésio rodeado por 4 moléculas de água. Com isso a água interlamelar existe como no outro grupo e o mineral pode expandir, isto é, a quantidade dessa água ou de substâncias polares é variável bem como o espaçamento basal ao longo do eixo c, apesar dessa expansão ser limitada. A distância interplanar basal é de 14 Å.

- Grupo das Cloritas: são formadas pelas camadas 2:1, sendo ligadas fortemente por folhas octaédricas de magnésio (chamadas de brucita). O magnésio da camada brucita é substituído parcialmente por íons alumínio e férrico, para fornecer o excesso de carga positiva necessário para neutralizar as substituições de alumínio

em lugar do silício na folha de silicato. A distância interplanar basal é de 14 Å.

- Grupo das Micas: Ilita. Formada por camadas 2:1 ligadas fortemente entre si pelo potássio, não havendo possibilidade de entrada de água entre as camadas. Sua distância interplanar basal é de 10 Å.

- Grupo de Camadas Mistas: são formadas por união de diferentes argilominerais, tais como, esmectita-ilita, esmectita-vermiculita, etc.

As partículas de argila têm dimensões coloidais devido a estrutura dos argilominerais ser frágil, ter muitas tensões internas e as ligações entre as camadas cristalinas serem relativamente fracas. As tensões internas podem ser provocadas por substituições isomórficas, que fazem com que a estrutura fique eletrostaticamente desequilibrada, quer dizer, há substituições de íons durante a formação dos minerais, sem alteração das dimensões das unidades estruturais. Além das cargas negativas oriundas deste processo, podem existir outras decorrentes das ligações quebradas nas arestas dos cristais e/ou, em certas condições, da dissociação de hidrogênios das hidroxilas expostas nas arestas das partículas ou de superfícies basais externas. Logo, os argilominerais são eletronegativos, apesar de poderem apresentar "zonas" de carga positiva.

As principais origens da acidez dos solos são a matéria orgânica, os aluminossilicatos das frações finas dos solos, os sesquióxidos e certos sais solúveis.

A perda de bases arrastadas por águas de infiltração é uma das causas mais importantes da acidez do solo. Os ions hidrogénios são provenientes de reações de hidrólise da água do solo com seus materiais, de reações de troca entre as bases trocáveis do solo e o hidrogênio permutável das raízes das plantas, e de reações de troca com ácidos solúveis (como ácido carbônico, nítrico e sulfúrico). A alcalinidade do solo normalmente se verifica quando não há esse arraste das bases pelas águas de infiltração e existe um elevado grau de saturação do complexo de troca. Sais solúveis como os carbonatos de cálcio, magnésio ou sódio contribuem também para o aumento da concentração de hidroxila. O solo tem ação tamponizante, isto é, oferece resistência a variações de pH quando submetido a adições de ácidos ou bases. Essa tamponização resulta principalmente de fenômenos de troca catiônica: a resistência à neutralização por bases se deve a liberação de ions hidrogênio, enquanto a resistência à acidificação é devida a libertação de bases adsorvidas e retenção de ions hidrogênio pelo solo (COSTA, 1973).

Outro ponto importante a abordar é a conceituação do sistema argilatágua (SANTOS, 1975), devido a sua grande influência no comportamento físico e físico-químico do solo. Como a água e as superfícies do solo não são quimicamente inertes, é natural que haja uma interação

entre eles. Devido as moléculas de água terem um caráter dipolar, elas são atraídas por ions em solução; os ions positivos atraem a parte negativa enquanto os negativos atraem a parte positiva das moléculas. Assim, a água contida no solo fica adsorvida na superfície das partículas dos argilominerais. Esta água adsorvida, principalmente nas superfícies paralelas aos planos basais dos cristais, é constituída por moléculas "orientadas" da água que tem sua estrutura mais similar a do gelo do que a da água líquida - uma espécie de estrutura rígida que depende, juntamente com sua espessura e estabilidade, da estrutura cristalina do argilomineral, da natureza dos ions adsorvidos e de outros fatores, tais como matéria orgânica. A transição entre esta água e a líquida pode ser brusca ou gradual. Os cátions monovalentes, com exceção do K^+ e NH_4^+ , favorecem a uma repulsão entre as partículas de argilominerais provocando a dispersão do meio. Enquanto que os cátions polivalentes, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , tem uma tendência maior a ligar as partículas entre si, formando aglomerados que sedimentam sob a ação da própria massa - fenômeno da flocação. Quando os ions cálcio e magnésio se hidratam, diminuem a espessura da camada de água adsorvida pela sua maior carga e pequeno raio iônico, dando-lhe uma configuração geométrica definida. O ion-sódio, no entanto, apesar de ter o mesmo raio iônico, tem menor carga, permitindo uma espessura maior da camada de água e um menor grau de orientação.

II.3 - A atividade físico-química dos solos

Sendo as partículas de argila de pequeno tamanho e grande área superficial, ocorrem interações entre elas, os cátions adsorvidos e a água. Surgem forças de atração e repulsão entre as partículas, que influenciam o comportamento das argilas em suspensão, como a flocação-deflocação e mudanças de volume.

Para descrever estas interações no sistema argila-água-eletrolito (MITCHELL, 1978), é utilizada a química de colóides, mais precisamente a teoria da dupla camada elétrica, desenvolvida para descrever fenômenos que ocorrem em superfícies carregadas eletricamente. Uma partícula coloidal de argilomineral em água tem carga negativa resultante de substituição isomórfica ou defeitos estruturais da rede cristalina; dissolução iônica nas superfícies da partícula coloidal e ionização de grupos funcionais orgânicos ativos (UPENDRA, 1986).

A dupla camada elétrica pode ser descrita como a seguir : existe uma camada interna de contra-ions rigidamente ligada à superfície, chamada de camada de Stern e uma outra camada difusa desses contra-ions. Estes são cátions atraídos para a superfície por forças eletrostáticas e que também tendem a difundir em direção oposta devido a existência de um gradiente de concentração. Em condições de equilíbrio há uma concentração maior de cátions próximo à superfície,

diminuindo com a distância até que a concentração na parte principal da solução é atingida. Os ânions, chamados de coions, são repelidos da superfície, aumentando sua concentração com a distância. A "espessura" da camada difusa, segundo SANTOS (1975) é dada por δ que é a distância na qual o potencial é ψ_d/ϵ , chamado de potencial zeta (vide página 20).

A espessura da dupla camada é dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{DkT}{8\pi n_0 e^2 z^2} \right)^{1/2}$$

onde $1/K$ = espessura

D = constante dielétrica

k = constante de Boltzman

n_0 = concentração da solução em equilíbrio (ions/cm^3)

e = carga do elétron

z = valência do contra-íon

T = temperatura absoluta

Ela é sensível à carga superficial(σ) ou potencial de superfície(ψ_0) e às variáveis citadas acima.

Segundo LOBO (1986), quando as cargas originam-se a partir de imperfeições nas estruturas cristalinas (substituição isomórficas nas argilas silicatadas 2:1) elas são denominadas carga constante, permanente ou estrutural. Enquanto que as cargas originadas na face exterior dos colóides devido à adsorção de íons, como nos óxidos e colóides orgânicos, são descritas pelo modelo de

potencial constante ou carga variável. A carga elétrica na superfície é calculada pela equação:

$$\sigma_s = (2n_0 DkT/n)^{1/2} \operatorname{senh}(z\psi_0/2kT)$$

Mantendo-se o potencial (ψ_0) constante, a carga deve variar com a concentração eletrolítica, a constante dielétrica e a valência do íon. E se a carga superficial permanecer constante, o potencial varia com essas variáveis.

VAN RAIJ (1986) descreve três tipos de íons em solução quanto ao seu comportamento em relação à superfície sólida:

- íons indiferentes que se comportam como contra-íons ou coíons sendo que a interação com a superfície não ultrapassa a energia de atração coulombiana. Eles não cruzam a interface sólido-liquido. Exemplo: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- .

- íons especificamente adsorvidos que têm energia de interação relativamente alta devido a formação de ligação covalente. Não são trocáveis, passando a fazer parte da superfície sólida. Exemplo: íons ortofosfatos e íon fluoreto.

- íons determinantes de potencial que são encontrados na fase sólida e na solução, sendo a interface como uma camada semi-permeável que permite a passagem desses íons em ambas as direções. Exemplo: H^+ e OH^- .

Quando a carga superficial se deve somente a adsorção

de H^+ e OH^- , o potencial elétrico superficial é determinado pelo pH da solução de equilíbrio. Desta maneira, num determinado pH o potencial é fixo e o colóide é caracterizado como de carga variável (LOBO, 1986). Neste tipo de sistema, a carga é positiva se um excesso de íons H^+ é adsorvido e negativa se é adsorvido um excesso de íons OH^- . A situação é determinada pelo pH e pela concentração do eletrólito em equilíbrio com a superfície. No entanto, deve existir um valor de pH no qual a carga líquida da superfície reduz-se a zero - é o ponto de carga zero (PCZ) ou ponto isoelétrico. Ele constitui-se num parâmetro importante para determinar o comportamento do solo, principalmente os solos altamente intemperizados dos trópicos, que são sistemas com potencial constante ou de carga variável. Neste ponto a adsorção de íons H^+ e OH^- é igual.

Segundo LOBO (1986), as alterações da superfície que acarretam um aumento da carga positiva, mudam o PCZ para maiores valores de pH e as que acarretam um aumento da carga negativa, tendem a mudar o PCZ para menores valores de pH. Os óxidos de ferro e alumínio aumentam o PCZ enquanto a matéria orgânica e os minerais de argila com carga negativa permanente diminuem o PCZ. Solos altamente intemperizados (predominância de oxi-hidróxido de ferro e alumínio) têm PCZ alto e apresentam no pH do solo carga negativa pequena (baixa retenção de cátions) ou mesmo carga líquida positiva (capacidade de retenção de ânions). Outra afirmação é a de que aumentando o desenvolvimento pedogenético, o valor do PCZ se aproxima

do pH do solo.

No caso de solos de regiões temperadas onde predominam minerais com carga negativa permanente, o valor do PCZ é baixo ou não existe.

De acordo com UPENDRA (1986), quando duas partículas de argila se aproximam em suspensão, as suas atmosferas de contra-ions se interferem. Ocorre repulsão entre elas devido a parte externa da dupla camada ter carga de mesmo sinal (positiva). Isto acontece especialmente no caso de concentração eletrolítica baixa, quando a energia de atração é pequena. Quando as concentrações eletrolíticas aumentam, ocorre compressão das duplas camadas, reduzindo a extensão da força de repulsão.

Para sistemas com camadas 2:1 a energia de atração de Van der Waals é o principal causador da flocação. A estabilidade coloidal é determinada pelo balanço entre as forças de atração e de repulsão quando as partículas se aproximam. Medidas do potencial zeta são comumente usadas para determinar a estabilidade do solo coloidal. O potencial zeta é o potencial elétrico desenvolvido na interface sólido-líquido em resposta ao movimento das partículas coloidais numa direção (polo positivo) e dos contra-ions em outra direção (polo negativo). Para SANTOS (1975) existe um "potencial zeta crítico", acima do qual o solo é estável, quer dizer, fica em suspensão e abaixo do qual ele é instável e floacula - é o ponto isoelétrico onde a partícula não se move na eletroforese.

As partículas de argilas têm suas faces maiores com

carga negativa e suas faces menores com carga positiva. As interações entre estas partículas são feitas de três maneiras : 1) entre as faces maiores; 2) entre a face maior e face menor e 3) entre face menor e face menor (SANTOS,1975). O fenômeno de flocular e deflocular ocorre apenas na dupla camada. Nos casos 1 e 3 a interação ocorre entre as duas camadas difusas enquanto no caso 2 a interação é predominantemente eletrostática devido às cargas opostas das camadas difusas.

Para partículas de carga variável, tanto a energia de atração de Van der Waals quanto a energia de atração eletrostática estão envolvidas. Tais sistemas com cargas positivas e negativas são mutuamente floculados (UPENDRA,1986), o que explica a agregação estável de solos com argilas 1:1 e óxidos de ferro e alumínio.

Segundo MITCHELL (1976), as repulsões da dupla camada e as atrações de Van der Waals se combinam formando a curva de interação (Fig.II.1). No caso em que esta curva exibir uma barreira grande de energia repulsiva, a suspensão das partículas é estável pois elas não se aproximam. Nos casos em que essa barreira não existe, as partículas se aproximam resultando em floculação. Essas interações da dupla camada são influenciadas pelo tipo e quantidade de cátions do sistema. Sob certas condições do meio, a argila adsorve cátions com carga total fixada, não afetando a estrutura das partículas. Esta capacidade de troca de íons tem grande importância devido a sua influência nas propriedades fisico-químicas do solo. A

reação química de troca iônica pode efetuar-se num meio líquido ou em faces contíguas ou entre partículas de argilomineral e outro mineral qualquer. Os cátions não são trocados com a mesma energia em todos os argilominerais. Eles podem ser agrupados segundo uma série de substituição: $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$.

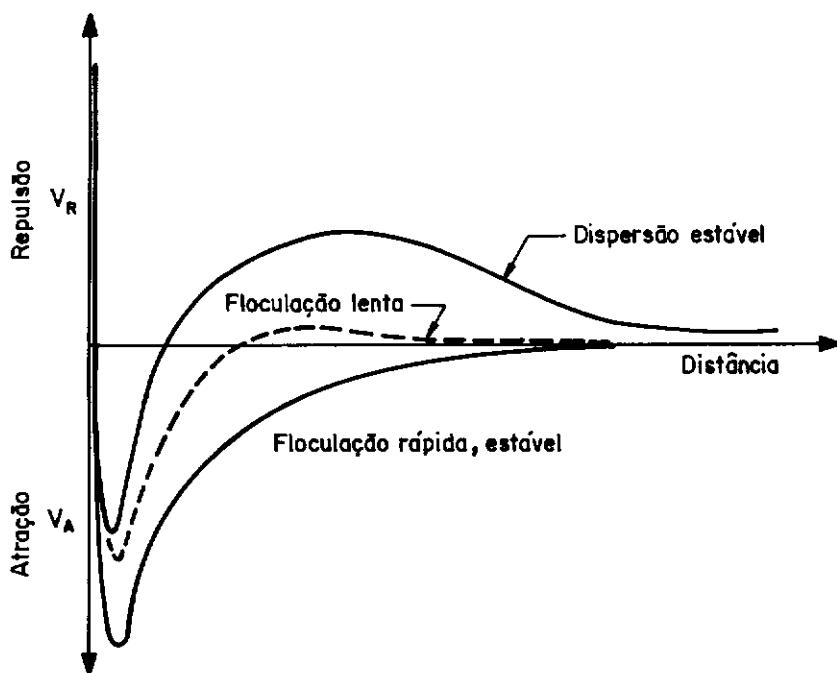


Fig. II.1 - Curvas de interação entre duplas camadas.
(MITCHELL, 1976)

A velocidade de troca varia com o tipo de argila, concentrações das soluções, temperatura, etc. A caulinita, por exemplo, tem reações de troca rápidas enquanto que as esmectitas precisam um tempo maior.

A capacidade de troca catiônica varia de

3 a 15 meq/100g para a caulinita, de 10 a 40 meq/100g para a ilita ou clorita, de 80 a 150 meq/100g para a montmorilonita e de 100 a 150 meq/100g para a vermiculita. A matéria orgânica contida nas argilas pode ter até 300 meq/100g de capacidade de troca catiônica.

II.4 - O Cimento - Mecanismos de Hidratação e Propriedades Eletrocinéticas

Quando o cimento entra em contato com a água, ocorrem interações físicas e químicas que provocam sua pega e posterior endurecimento. Segundo DOUBLE (1980), a fonte principal de resistência vem da hidratação das duas fases silicatadas principais do clínquer (C_3S e $\beta-C_2S$). As fases secundárias aluminosas (aluminato tricálcico C_3A e alumino-férreo C_4AF) influenciam a pega mas não contribuem significativamente para a resistência final da pasta.

CASTRO (1981) divide o mecanismo de hidratação do cimento em quatro etapas: a primeira etapa é bastante exotérmica (40 cal/g/h) e dura aproximadamente 5 a 10 min; os componentes do cimento começam a reagir liberando o hidróxido de cálcio que se dissolve parcialmente na fase aquosa, elevando o pH para 13 (Fig.II.2); a solução torna-se supersaturada, precipitando $Ca(OH)_2$ como cristais hexagonais pouco cristalinos; apenas 1% do cimento se hidrata nesta etapa. A segunda etapa tem energia de reação bem menor (1 cal/g/h) e dura aproximadamente 1 hora; é denominado período de indução, durante o qual as superfícies dos grãos ficam cobertas com géis neo-formados; o tamanho dos grãos varia pouco neste período; durante esta etapa, uma camada gelatinosa de silicatos e aluminatos hidratados se forma ao redor dos

SILICATO TRICÁLCICO

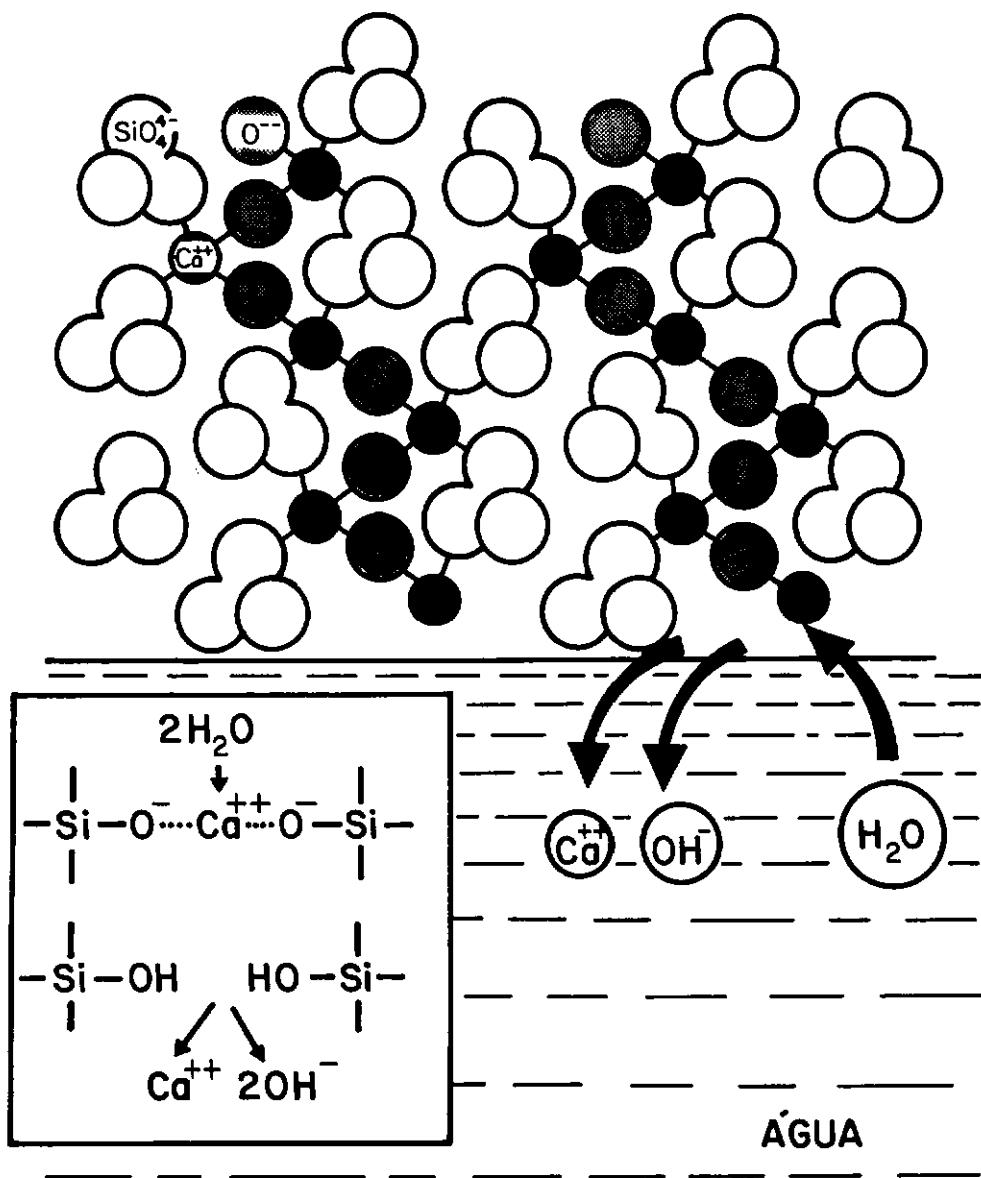


Fig. II.2 - Representação do processo de hidrólise na interface C_3S - água. (DOUBLE, 1980)

grãos de cimento; a água difunde através dessa camada enquanto os produtos formados difundem no sentido contrário; como a membrana é mais permeável ao íon cálcio do que ao íon silicato, os cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ precipitam do lado exterior da membrana enquanto o gel forma-se preferencialmente no seu interior, produzindo uma zona de transição super-saturada entre o grão e a membrana que o envolve; à medida que o grão se transforma pela ação da água aumenta a difusão dos íons silícicos para o interior do grão; após algum tempo, a transferência de água para o interior da membrana excede a dos produtos no sentido contrário, produzindo uma pressão osmótica que pode romper a membrana, forçando a solução super-saturada em produtos ser expulsa e preencher os vazios ao redor do grão; com a ruptura outros pontos da superfície dos grãos ficam livres para serem atacados pela solução aquosa não saturada, formando membranas que serão novamente rompidas. Neste estágio começa a terceira etapa chamada de período de pega, onde o calor de reação aumenta para 5 cal/g/h e dura em média 6 horas, sendo a mais importante do processo; com as várias rupturas das membranas, espalha-se o gel, que endurece, promovendo a ligação entre os grãos parcialmente hidratados. Segundo STEOPOE (1958), a pega do cimento é a transformação da pasta plástica de consistência normal em um sólido friável; um microconglomerado de grãos de clinquer não hidratados, cobertos de películas de novas formações e de concreções cristalinas, ligados entre si pelos géis neo-formados por intermédio de películas de água adsorvida. Nos últimos estágios da hidratação, a

difusão se torna mais difícil, podendo ocorrer reação topoquímica direta. Finalmente a 4^a etapa é a de endurecimento, quando o calor de reação volta a ser 1 cal/g/h e dura de semanas a anos (Fig.II.3).

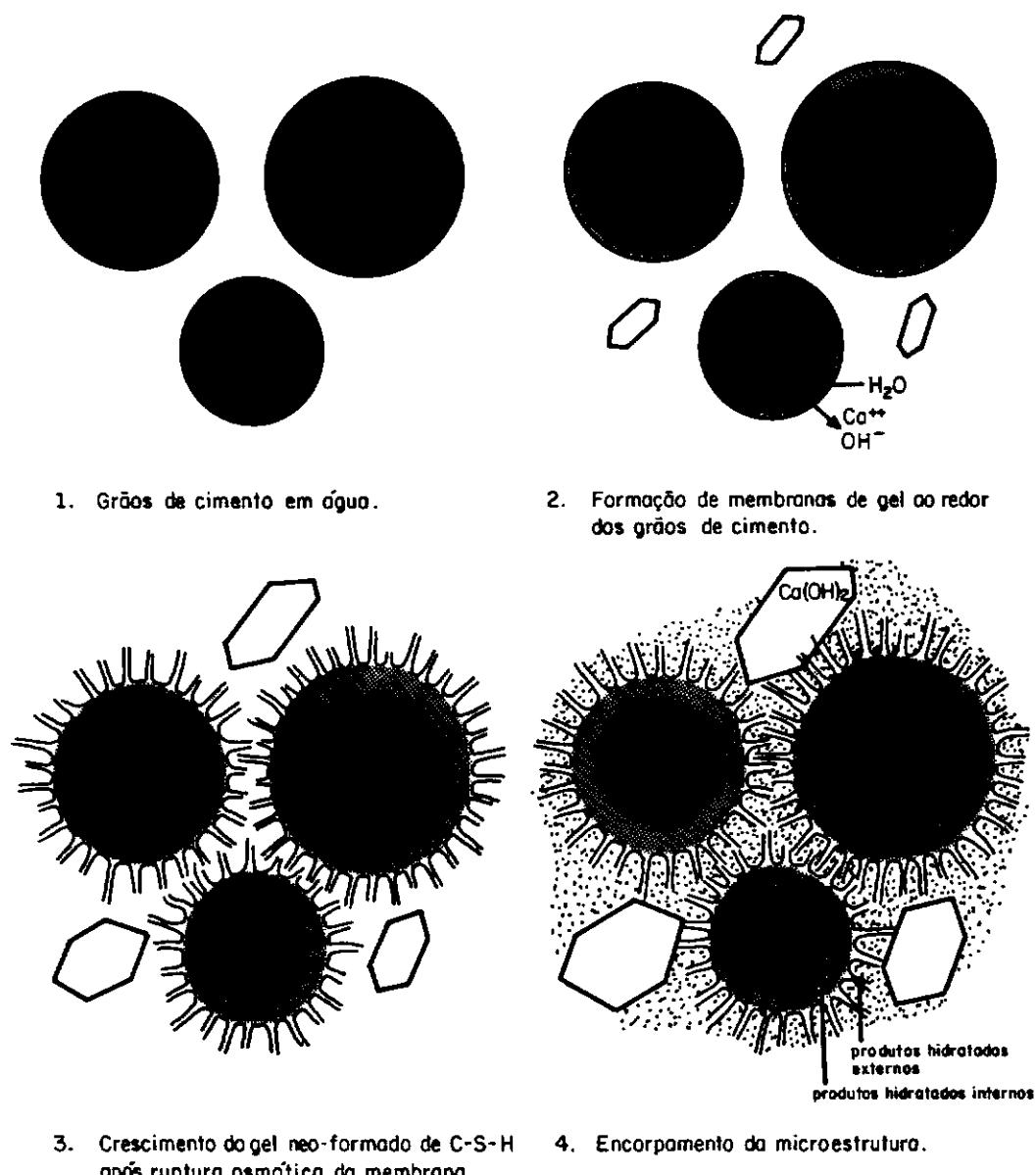


Fig. II.3 - Representação esquemática das etapas de hidratação do cimento Portland. (DOUBLE, 1980)

Levando-se em conta a superfície específica elevada dos minerais do cimento durante a hidratação, é importante o papel das cargas elétricas da superfície. O sistema cimento-água pode ser considerado um sistema coloidal com propriedades eletrocinéticas características.

De acordo com NAGELE (1986), para o cimento é válido um modelo modificado da dupla camada elétrica (Stern-Grahame) no qual ela é dividida em duas partes : a interna, ligada ao sólido, começando na superfície da partícula, isto é, na superfície do cimento ou dos produtos primários da hidratação, e a externa que é descrita como a dupla camada difusa de Gouy-Chapman. Segundo ZELWER (1980), o cimento durante a hidratação é considerado um sistema dinâmico pois a interface está sempre fora do equilíbrio iônico, a força iônica da fase líquida aumenta durante a hidratação, a transformação das novas fases hidratadas complica a heterogeneidade das fases sólidas e a superfícies dos grãos tem vários tipos de minerais. Para NAGELE (1987) o cimento hidratado está num estado de não-equilíbrio; não há íons adsorvidos mas somente íons determinantes de potencial – qualquer íon que passe pela dupla camada afeta a distribuição do potencial. Logo, há um grande número desse tipo de íon no cimento. O autor plotou o potencial zeta versus tempo e concluiu que na primeira fase da hidratação correspondente a reação intensa do ínicio, não existe potencial zeta; na segunda parte, começando 5 minutos após o contato do cimento com a água, dependendo da concentração do cimento, a teoria de não-equilíbrio para a dupla camada é aplicada

e as variações do potencial zeta são devido às reações químicas; na terceira fase estas variações dependem somente do aumento da força iônica na massa líquida.

STAROSELSKY, OLGINSKY e SPIRIN (1974) afirmam que as peculiaridades cristaloquímicas dos minerais do clínquer do cimento e seus produtos de hidratação causam mecanismos diferentes na formação da carga superficial que é capaz de interagir com as partículas carregadas do meio. O sinal e magnitude da carga do cimento como um todo é resultado da distribuição estatística dos compostos hidratados e do resto do cimento na interface da fase sólida com a líquida. Quando os hidratos silicatados são formados do C_3S e C_2S o sinal é negativo, enquanto a hidratação do C_3A e C_4AF provoca sinal positivo. O valor e o sinal do potencial zeta no cimento depende da intensidade dos processos de hidratação. A queda do potencial com o tempo é causada pelo decréscimo da velocidade de hidratação e preenchimento da superfície dos minerais do clínquer, por compostos de hidratação, cuja superfície é praticamente eletroneutra sob certas condições. Nos estágios iniciais prevalece processos de hidratação do C_3A (carga positiva) e nos estágios posteriores tem-se a hidratação do C_2S (carga negativa).

NAGELE (1986) também afirma que o potencial zeta diminui com a concentração do cimento, devido à compressão da dupla camada difusa causada pelo aumento da concentração do íon na suspensão da hidratação do cimento.

II.5 - Estabilização Alcalina de Solos

II.5.1 - Mecanismos

A estabilização alcalina é aplicável a todo tipo de solo com pelo menos 10% de argila e baixos teores de matéria orgânica, mica e sulfatos. É a interação físico-química do solo com a cal ou o cimento Portland fazendo-o adquirir resistência mecânica. Ela é vista por dois aspectos: o macroscópico, que consiste das etapas perceptíveis a olho nu (Ex: flocação, alteração na granulometria e ganho de resistência) e o microscópico, que engloba o conjunto de etapas que se processam a nível interparticular, molecular e atômico (Ex: troca catiônica, adsorção físico-química e reações químicas). O hidróxido de cálcio é o agente estabilizante mais eficaz em relação aos outros hidróxidos da família dos alcalinos terrosos (CASTRO, 1981).

A estabilização pode ser dividida em duas etapas: uma rápida que dura de minutos a horas, quando modifica-se as características plásticas do solo e que segundo PINTO (1962) é chamada de flocação e outra lenta denominada por ele como aglomeração que dura de semanas a anos, quando a coesão dos solos compactados é bastante aumentada. Para CASTRO (1981), na primeira fase ocorre uma agregação da argila por íons Ca^{2+} como consequência da neutralização das cargas elétricas das partículas por íons de carga oposta ou por outros colídes. Explicando melhor:

quando a cal é misturada a um solo argiloso juntamente com água, parte dela se dissolve por um mecanismo difusivo na água dos poros, fornecendo íons Ca^{2+} , CaOH^+ , OH^- . Se o solo é ácido os íons H^+ e Al^{3+} são neutralizados fornecendo água e hidróxidos de alumínio e ferro, podendo precipitar o aluminato de cálcio hidratado. Ao mesmo tempo, as hidroxilas são adsorvidas pelas superfícies das partículas argilosas por interação com os grupamentos silanol e aluminol presentes, e por uma transferência de carga formam pontes partícula-partícula, sendo a ligação feita pelos íons cálcio. A água que tinha sido utilizada na dissolução da cal é recuperada e o processo repetido até atingir um equilíbrio, que pode ser conseguido por compactação imediata da mistura e proteção contra a perda de umidade. Esses agregados, formados desta maneira, são resistentes quando imersos e agitados em meio aquoso, modificando assim a granulometria do solo de argilosa para siltosa. Nesse ponto a película de água adsorvida se torna menos espessa e mais rígida, adquirindo um elevado grau de orientação, aumentando assim a resistência ao cisalhamento. Quanto menor o tamanho do cátion e maior sua carga elétrica, mais ordenada é a camada de água adsorvida e maior também a resistência para cisalhar as partículas.

Resumidamente, o mecanismo da interação argila-cal, segundo CASTRO (1981) é o seguinte : quando a cal entra em contato com a argila, em suspensão aquosa, parte dela é imediatamente químico-adsorvida via transferência de carga, resultando na coagulação da argila. Os flocos formados

dessa maneira crescem em tamanho devido a colisão com outros cristais em solução e com outros flocos. Com este crescimento a adsorção de cal continua a ocorrer, passando assim a se acumular nas regiões mais acessíveis dos flocos, como pacotes ou multicamadas de hidróxido de cálcio, principalmente na superfície externa dos flocos.

A estabilização dos agregados ocorre através dessa cal adsorvida agindo como um cimento "amorfo" ou reagindo quimicamente com a SiO_2 e a Al_2O_3 da argila (Fig.II.4).

A segunda etapa da estabilização alcalina é constituída de acordo com PINTO (1962), de reações químicas pelas quais o cimento ou a cal aumentam a coesão das misturas, seja pela formação de géis ou cristais que abrangem as partículas, seja por reações com as próprias partículas. CASTRO (1981) denomina esta segunda etapa de fase pozolânica, cujo mecanismo consiste na dissolução das partículas argilosas, gerando silicatos e aluminatos, que em presença de cálcio livre precipitam como compostos razoavelmente hidratados - são os minerais de neo-formação: aluminato tricálcico hidratado (C_3AH_6 , C_4AH_{11}), os silicatos cálcicos hidratados (CSH-gel, CSH(I), CSH(II)), sílico-aluminato cálcico hidratado (C_2ASH_n), carboaluminato tetracálcico hidratado ($\text{C}_4\text{AH}_{11} \cdot \text{CaCO}_3$) e calcita (CaCO_3).

A dissolução é uma despolimerização da estrutura $(\text{SiO}_2)_n$ através da hidrólise das ligações Si-O-Si, pelo íon OH^- em meio alcalino e pelo íon F^- em pH ácido. O íon

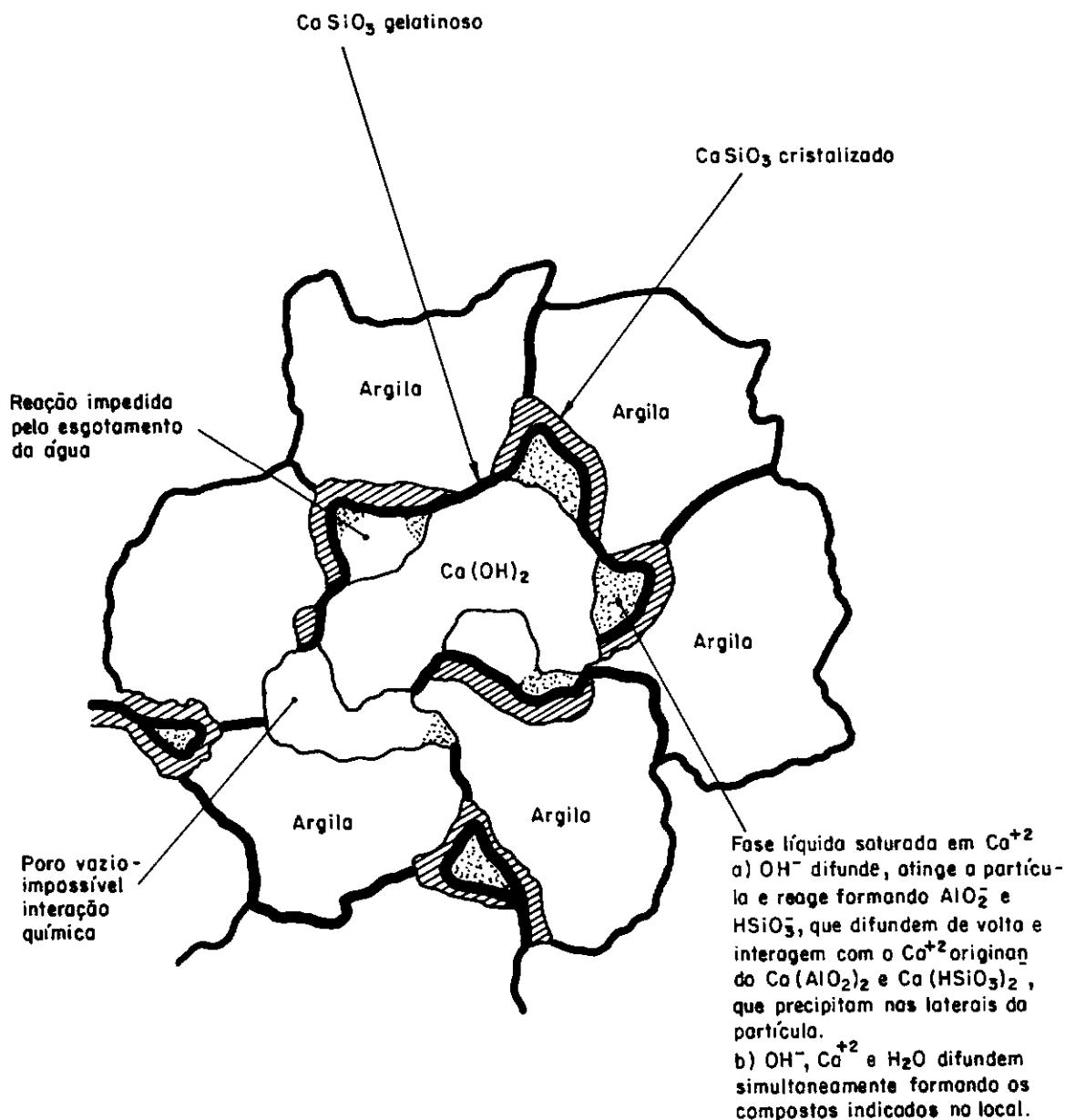


Fig. II.4 - Ataque da argila pela cal. (Inglés, 1970)

silicato formado é hidrolizado em pH abaixo de 11 obtendo a sílica solúvel, Si(OH)_4^- e OH^- , o que torna possível repetir o processo.

Considerando que as superfícies basais dos argilominerais tenham somente ligações siloxano (Si-O-Si) muito resistentes, o processo de dissolução da camada tetraédrica pode ser descrito como a seguir: a hidroxila apresenta um grande efeito polarizante sobre a ligação Si-O-Si, quebrando a ligação π e produzindo ligações não neutralizadas. O grupo OH^- então se liga ao ponto de quebra formando um grupo silanol. Como o Ca^{++} tem a capacidade de formar uma ligação doador/aceptador, é possível a combinação de dois radicais formados pela quebra da ligação Si-O-Si.

Já a dissolução da alumina (ou da camada octaédrica) é feita pela quebra das ligações Al-O-Al, através da hidroxila e da destruição da camada tetraédrica. Existe uma relação entre a quantidade de cal retirada da solução e a de hidrosilicatos de cálcio formados - a velocidade de precipitação é acelerada pelo aumento de cal em solução.

Os produtos gelatinosos são adsorvidos pelas superfícies, principalmente as prismáticas, efetuando sua cimentação com outras. Admite-se que as ligações gel-adsorvido/colóide argiloso são do tipo atrações de Van der Waals.

Outra observação de CASTRO (1981) é de que a formação dos produtos faça parcialmente por nucleação heterogênea,

quer dizer, formação a partir de núcleos relativamente cristalinos que aumentam de tamanho via transporte iônico por difusão superficial na interface sólido-líquido. A intensidade do fenômeno dissolução/precipitação é diretamente proporcional à superfície de contato com a água presente. Este processo ocorre em pH elevado (entre 12,0-12,5) e somente se as concentrações na fase aquosa forem mantidas em valores próximos à saturação.

Segundo HERZOG (1967) a resistência e a estabilidade da mistura argilo-cimento não podem ser explicadas pelo crescimento dos grãos superficiais, sugerindo a existência de processos que conduzem a mudanças estruturais fundamentais durante a formação do cimento-argila. Ele apresenta um modelo de estrutura de argila para solos coesivos contendo domínios de argila - esses consistindo de placas de argila orientadas paralelamente em pacotes fechados, comportando-se como unidades estruturais em argilas (Fig.II.5).

A resistência e a estabilidade do solo com esta estrutura são atribuídas ao contacto friccional entre os domínios. Na situação argila-cimento tem-se o material cimentício primário - o produto da hidratação - que fica como um gel contínuo ao redor do grão original ainda em hidratação. E o material secundário, formado por reações pozolânicas entre a cal liberada na hidratação do cimento e os componentes argilosos reativos, que pode se estabelecer nas superfícies das partículas argilosas

acessíveis a cal por difusão.

A estrutura desenvolvida numa mistura úmida de argila-cimento, considerando apenas um grão de cimento, é a seguinte:

(1) O contato da água dos poros com o grão do cimento produz um gel de cimento hidratado e a liberação de cal nessa água. Como o gel hidratado ocupa um volume maior, ele pode se encaixar em volta da massa floculada estabelecendo ligações fortes nas interfaces argila-cimento. Quer dizer, a partícula de cimento hidratado deve ser rodeada por uma camada de domínios de partículas argilosas encaixadas (Fig.II.6).

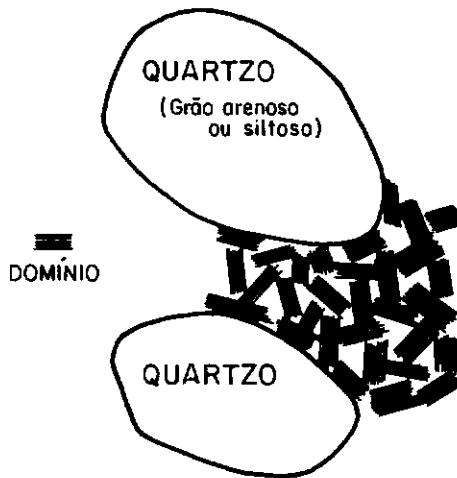


Fig. II.5 - Modelo de estrutura de argila. (HERZOG, 1967)

(2) As hidroxilas obtidas pela hidratação do cimento ataca os argilominerais e componentes amorfos das argilas. A sílica e a alumina dissolvidas combinam com os íons

cálcio da cal dissolvida na água dos poros e precipita como material cimentante secundário (cimento neo-formado). A deposição de material cimentante nas partículas de argilas deve ser mais intensa nas extremidades quebradas de energias de ativação alta, do que nos planos basais onde há rede cristalina balanceada. Logo, a cimentação ocorre principalmente em pontos de contacto de aresta com aresta e aresta com face, o que favorece a estabilização (Fig.II.7). Os ions cálcio e hidróxido devem avançar na massa argilosa preferencialmente nos macroporos interconectados entre domínios (cimentação "interdomínio") do que nos microporos dentro dos domínios (cimentação "intradomínios").

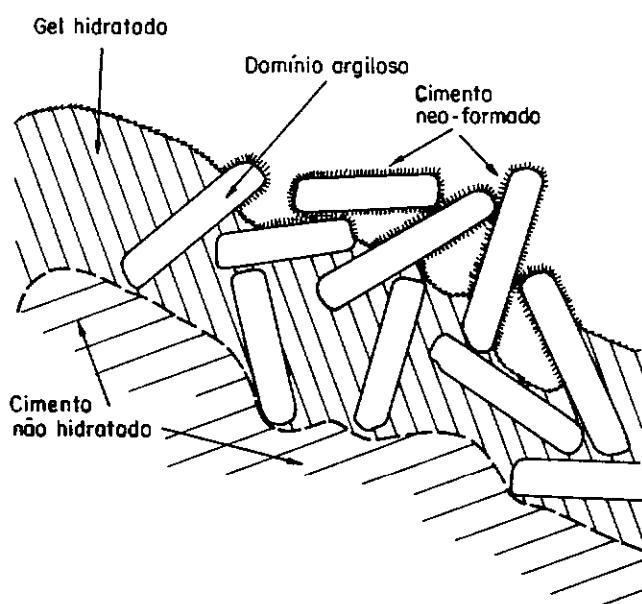


Fig.II.6 - Gel de cimento com domínios de partículas argilosas encaixadas. (HERZOG, 1967).

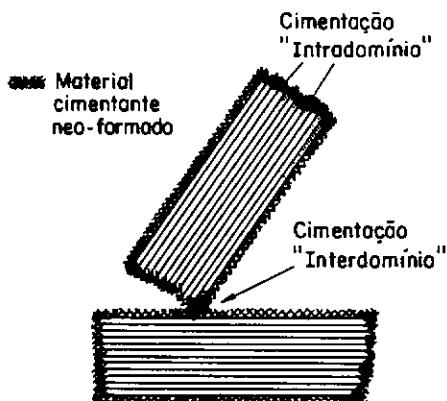


Fig. II.7 - Cimentação "interdomínio" e "intradomínio".
(HERZOG, 1967)

Herzog propõe um modelo de estrutura para o solo-cimento denominada matriz-esqueleto (Fig.II.8), que é descrito da seguinte maneira: numa argila, cuja estrutura é feita de domínios de tamanhos diferentes, existem vazios interconectados numa certa extensão. A hidratação do cimento e a ocorrência de reações secundárias formam um corpo como de um ouriço do mar, no qual o centro endurecido do cimento portland é rodeado por uma zona desses domínios argilosos que se unem por cimentação "interdomínio". Externamente a esta zona formam-se canais pelos macroporos interconectados dentro da massa argilosa. Eles podem ficar revestidos de cimento e se apresentam como ramificações relativamente fortes e reforçadas, estendendo-se do corpo à matriz inalterada. Se o conteúdo de cimento for muito baixo, tais unidades de esqueleto se comportam como partículas bem granulares e separadas, flutuando na matriz argilosa. Aumentando-se um pouco a

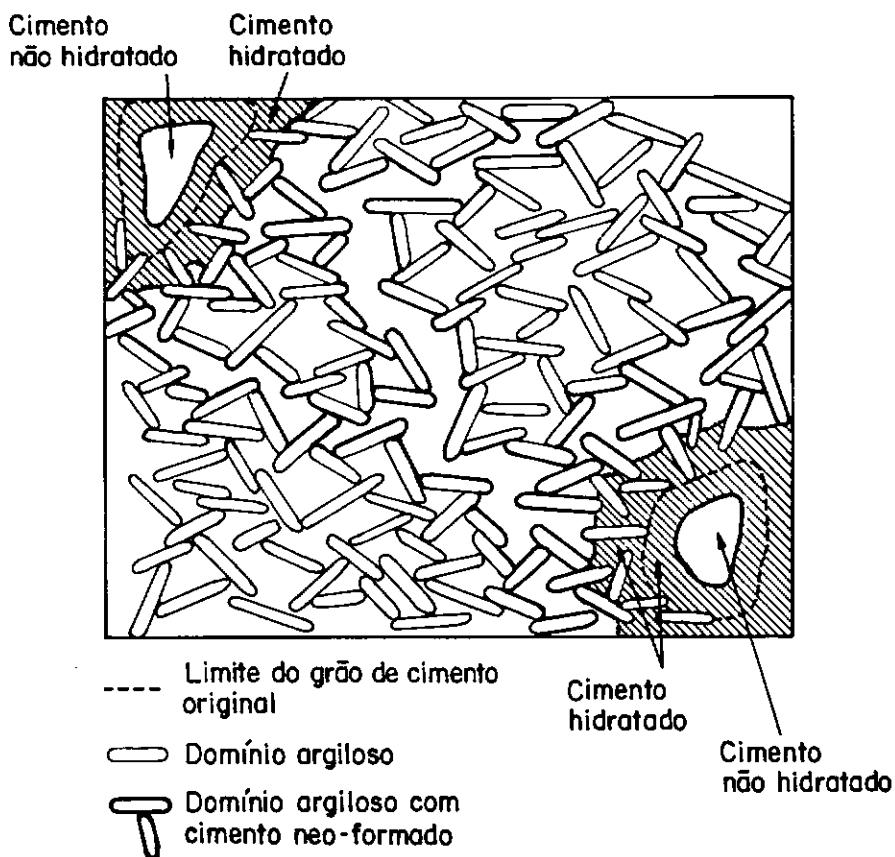


Fig. II.8 - Modelo da estrutura matriz - esqueleto no solo-cimento.
(HERZOG, 1967)

quantidade de cimento, as unidades do esqueleto ficam menos espaçadas porém não interconectadas. Já com um conteúdo maior, o espaço entre elas é mais reduzido e as ramificações tornam-se interligadas, aumentando a resistência e a estabilidade da matriz argilosa. Para quantidades de cimento ainda maiores (acima de 2,5% para montmorilonitas) não há produção de matriz, sugerindo a formação de um esqueleto rígido, completamente interconectada, tornando-se a maior fonte de resistência do sistema.

II.5.2 - Influência da Composição Mineralógica dos Solos na Estabilização

Os argilominerais participam ativamente na estabilização do solo com cimento, alguns com mais intensidade do que outros.

De acordo com KAWAMURA et alii (1970), os locais de reação (ou de troca catiônica) com a cal liberada pela hidratação do cimento são diferentes para os vários argilominerais. Na caulinita ocorrem nas ligações partidas, nas bordas, produzindo primeiramente o aluminato tetracálcico hidratado e o CSH (gel). Já na bentonita ou montmorilonita e na sericita, a troca catiônica se dá por substituição na rede, ocorrendo as reações preferencialmente no plano superficial basal. No caso da montmorilonita há produção dos dois compostos citados acima, sendo o CSH em maior quantidade. Já com a sericita não se produz o aluminato, a interação não é tão ativa.

Segundo CROFT (1967), na mistura caulinita/cimento o pH se mantém alto por muitas semanas enquanto que na mistura com montmorilonita ele decresce rapidamente com o tempo. A caulinita juntamente com a ilita são mais suscetíveis à estabilização com o cimento do que argilominerais expansivos (montmorilonita). Esses inibem a hidratação e o endurecimento do cimento, necessitando de grandes quantidades desse material para conseguirem se estabilizar.

gibbsita tem grande resposta à cal, podendo retardar a estabilização de certos solos lateríticos. A matéria orgânica, sais solúveis e sulfatos (típicos de solos de zona áridas) trazem problemas quando presentes em certas quantidades. A natureza do cátion ocupante das posições de troca nos argilominerais influencia o desenvolvimento da resistência: em solos com composição mineralógica adequada, os íons alcalinos podem promover endurecimento, enquanto que em meios ácidos, o desenvolvimento da resistência pode ser retardado pela neutralização da cal liberada e hidrólise dos produtos cimentantes. Segundo o autor, os resultados com solos podzólicos indicaram que a posição do solo no perfil é significante na determinação de sua resposta ao cimento - horizontes superficiais contendo argilominerais ativos e com reações ácidas são mais adequados à estabilização com cal, enquanto zonas mais baixas com ilita e caulinita como componentes principais respondem ao cimento. Conclui também que solos vermelho-marrom e pretos, caracterizados pelas reações neutras e alcalinas e geralmente sem argilominerais ativos nos horizontes mais altos, respondem bem ao cimento.

II.6 - Solo-cimento e os Métodos de dosagem

O solo-cimento pode ser definido como um material produzido pela combinação, compactação e cura de uma mistura de solo/agregado, cimento portland e água, com o objetivo de formar um material endurecido com propriedades específicas da engenharia. As partículas do solo/agregado são ligadas pela pasta de cimento diferentemente do concreto, pois a partícula individual não é completamente revestida por esta pasta.

A principal aplicação é como material de base em pavimentos, mas também é utilizado em construção de casas, em proteção de taludes de barragens e diques, revestimentos para canais, reservatórios e lagoas e na estabilização de fundações.

A maioria dos solos podem ser estabilizados com o cimento, com exceção dos solos orgânicos, argilas muito plásticas e solos arenosos pobremente reativos (ACI COMMITTEE 230, 1990). Segundo PINTO (1980), a água utilizada deve ser isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica, sendo a água do mar recomendável quando há quantidade prejudicial de matéria orgânica no solo.

As especificações para execução de base de solo-cimento levam em conta as seguintes observações para se ter um material resistente e durável: (a) quantidade de cimento a ser adicionada ao solo; (b) quantidade de água a ser incorporada à mistura; (c) densidade a ser conseguida na compactação. Os itens (b) e (c) são obtidos por ensaio

análogo ao Ensaio Normal de Compactação, ficando o item (a) como objetivo de um método de dosagem (PINTO,1980).

Métodos de dosagem do solo-cimento:

Com o objetivo de observar a permanência da coesão quando o solo-cimento é solicitado, tanto pela ação do tráfego, como pelos esforços devido às variações de temperatura e umidade, foram criados ensaios de durabilidade que determinam se o cimento, após a hidratação, mantém o solo-cimento na densidade máxima em que foi compactado, isto é, com a sua maior capacidade de suporte.

Em 1940, a ASTM deu inicio à elaboração em caráter tentativo do método de ensaio, que em 1944 veio a ser completado e aceito definitivamente. Em 1945 a AASHO também adotou tal metodologia. No Brasil, em 1941, a ABCP publicou métodos análogos (PINTO,1980).

a) Método Geral de Dosagem (ABCP,1977)

Resumidamente o método consiste em:

- 1) Identificação e classificação do solo.
- 2) Execução do Ensaio de Compactação do solo-cimento com o teor de cimento já escolhido.
- 3) Moldagem de corpo de prova para ensaios de durabilidade e de resistência à compressão, tendo já escolhidos os teores de cimento a serem utilizados.
- 4) Execução dos ensaios citados no item anterior.
- 5) Escolha do teor de cimento adequado em função dos

resultados obtidos.

Obs: a determinação do teor de cimento adequado é feita por tentativa, isto é, vários teores de cimento são utilizados, de modo que os resultados indiquem o menor que seja suficiente.

Objetivando diminuir o tempo e o trabalho requeridos pela norma geral, foram feitos estudos, até que em 1952 a PCA divulgou resultados de dosagem de aproximadamente 2500 solos arenosos, mostrando a correlação existente entre os teores de cimento adequados e três características da mistura: granulometria do solo, densidade aparente máxima e resistência à compressão aos 7 dias. Originou então a Norma Simplificada de Dosagem.

b) Norma Simplificada de Dosagem

A divulgação pela ABCP foi feita em 1954, reduzindo o trabalho de dosagem pela metade, devido as seguintes simplificações: adoção do teor de cimento em peso, realização de um único ensaio de compactação, execução de ensaio de compactação com pedregulho e modificação no cálculo do ensaio de durabilidade (PINTO, 1980).

De acordo com ABCP (1977) o fundamento do método é: "um solo arenoso com determinadas granulometria e densidade aparente máxima requererá, de acordo com o critério de perda de peso nos ensaios de durabilidade, o mesmo teor de cimento que outro, tendo a mesma granulometria e mesma densidade aparente máxima, desde que apresente uma resistência à compressão aos 7 dias superior

a um certo valor estabelecido. Colocados em ábacos os resultados dos dois milhares de solos ensaiados, ficou estabelecido o método".

Etapas: 1) Ensaios preliminares para a caracterização do solo

2) Ensaio de compactação do solo-cimento

3) Determinação do teor de cimento por meios de ábacos

4) Verificação do teor de cimento pelo ensaio de resistência à compressão

c) Método adotado atualmente

Recentemente, na 25^a Reunião Anual de Pavimentação (Outubro, 1991), foi divulgada a nova norma de dosagem do solo-cimento, cujo registro é NB-1336 e denominada Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento. A primeira modificação foi limitar o uso dos solos a serem empregados nas bases ou sub-bases de solo-cimento, restringindo-o aos tipos A₁, A₂, A₃ e A₄ que contenham 100% de material passando na peneira de abertura 76mm, e no máximo 45% de material retido na peneira de abertura 4,8mm. O solo deve ser caracterizado determinando limite de liquidez, plasticidade e análise granulométrica; nos grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm devem ser determinadas a massa específica, a massa específica aparente e a absorção de água e nos grãos que passam na peneira 4,8mm, a massa específica. Depois o material deve ser classificado de acordo com a norma ASTM D 3282 e feito

o ensaio de compactação utilizando o teor de cimento escolhido pelos dados da antiga norma geral. Com os valores de umidade ótima e de massa específica aparente são moldados corpos de prova para ensaios de compressão simples com teores de cimento sugeridos por gráficos da Norma Simplificada. Devem ser moldados corpos de prova com um ou mais teores de cimento, de forma que se determine aquele que forneça resultados de resistência à compressão simples de, no mínimo, 2,1 MPa aos 7 dias. Dentre os valores de resistência obtidos admite-se a interpolação dos dados para a determinação do teor de cimento que corresponda ao valor mínimo da resistência à compressão média especificado, sendo que a extrapolação de dados não é permitida.

O teor mínimo de cimento recomendado pela norma é de 5% em massa, podendo abrir precedente para uso até 3,5% em massa para solos do tipo A1-a, A1-b ou A2-4, desde que atinja a resistência de 2,1 MPa e que a mistura seja processada em usina.

Como foi visto acima, os métodos de dosagem de solo-cimento ainda necessitam uma grande quantidade de amostra, um tempo relativamente longo de execução, pessoal técnico especialmente treinado para fazer vários ensaios de caracterização do solo, moldagem de corpos de prova e ensaios de resistência à compressão.

d) Outras Metodologias

Outros métodos foram propostos como por exemplo o de

determinação da superfície específica do solo por meio da retenção em glicerol, mostrando uma boa correlação entre os valores determinados e os teores de cimento adequados. Segundo PINTO (1980), foi sugerido um método rápido de dosagem para solos plásticos por Diamond e Kinter, baseado nessa correlação, mas que não teve um bom número de solos ensaiados. No Brasil, a sua aplicabilidade não foi testada.

e) Método Físico-químico

Na tentativa de simplificar a dosagem do cimento, outra metodologia tem sido estudada, baseada na interação elétrica entre as partículas de cimento e as de argila. É o chamado Método Físico-químico de Dosagem do Solo-Cimento: em 1971, um pesquisador indiano (CHADDA, 1971) publicou um trabalho onde mostrava que a interação físico-química entre as partículas dos argilominerais e as do cimento em hidratação, podia ser utilizada para a dosagem do teor de cimento requerido pela argila ou pelo solo para sua estabilização, não obstante serem as condições de ensaio muito afastadas da realidade - relação H₂O/cimento muito grande e inexistência de compactação. O método foi inspirado naquele proposto por Diamond e Kinter em 1958 que se baseava na determinação da área superficial.

Princípio: a interação elétrica do cimento com as partículas argilosas contribui para mudanças físico-químicas complexas na mistura solo-cimento. As partículas de cimento se comportam na mistura como

carregadas eletricamente e sua presença no solo aumenta a condutividade elétrica da massa solo-cimento compactada. Esta interação com colóides negativamente carregados juntamente com a hidratação do cimento produz mudanças físico-químicas rápidas no sistema. Consequentemente há produção de variações volumétricas substanciais quando a mistura é suspensa em água. E são essas variações volumétricas durante o processo de interação do solo com o cimento, que proporcionam a determinação do teor de cimento que produz a mistura estável.

Metodologia: prepara-se as misturas com os diferentes percentuais de cimento em provetas de 250ml. O volume do sedimento solo-cimento é medido durante alguns dias após 2 horas em que a suspensão foi agitada. Nota-se que o volume cresce com a adição de cimento até um certo teor, quando então fica estável ou decresce, devido provavelmente a agregação das partículas argilosas. O ensaio termina quando as leituras se mantém constantes ou decrescem. Mede-se então a variação volumétrica percentual do sedimento em relação àquela do solo puro para os diversos teores de cimento. Os valores são colocados em gráfico %ΔV versus %Ci, notando-se o aparecimento de um máximo para a variação volumétrica. A tal máximo corresponde o teor de cimento mínimo requerido para estabilizar o solo.

Esse método começou a ser estudado na COPPE/UFRJ por Casanova e Ceratti em 1985, testando-o com argilominerais puros, oxihidróxidos de ferro e alumínio e solos sesquióxidicos e caoliníticos. O trabalho fez parte do

"Eighth International Soil Classification Workshop" (CASANOVA e CERATTI, 1986). Foram ensaiados trinta solos, confirmando as observações feitas por Chadda e obtendo resultados com os argilominerais puros já esperados: o menos reativo (caclinita) necessitou de 2% de cimento, seguido da ilita com 5% de cimento e do mais reativo, montmorilonita, com 15 a 20% de cimento, sendo que a montmorilonita já estava saturada com cálcio, o que descarta a troca catiônica como responsável pelo mecanismo das variações volumétricas.

Observaram também que os argilominerais tiveram uma variação volumétrica relativamente pequena em relação aos oxisolos que chegaram a obter 200% de ΔV . Alguns solos necessitaram de 12 a 15% de cimento, o que pode ter sido devido a ação dos sesquióxidos de ferro e alumínio (Fig.II.9 e Fig.II.10).

Continuando o estudo, CERATTI e CASANOVA (1988) ensaiaram 12 solos pelos métodos físico-químico e mecânico da ABCP, e realizaram ensaios de resistência à compressão simples nas misturas com teores de cimento definidos pelo método em estudo, concluindo que há razoável concordância entre os dois métodos de dosagem (Quadro II.1) e que a maioria dos solos alcançam uma boa resistência à compressão com o teor indicado pelo método físico-químico (Quadro II.2).

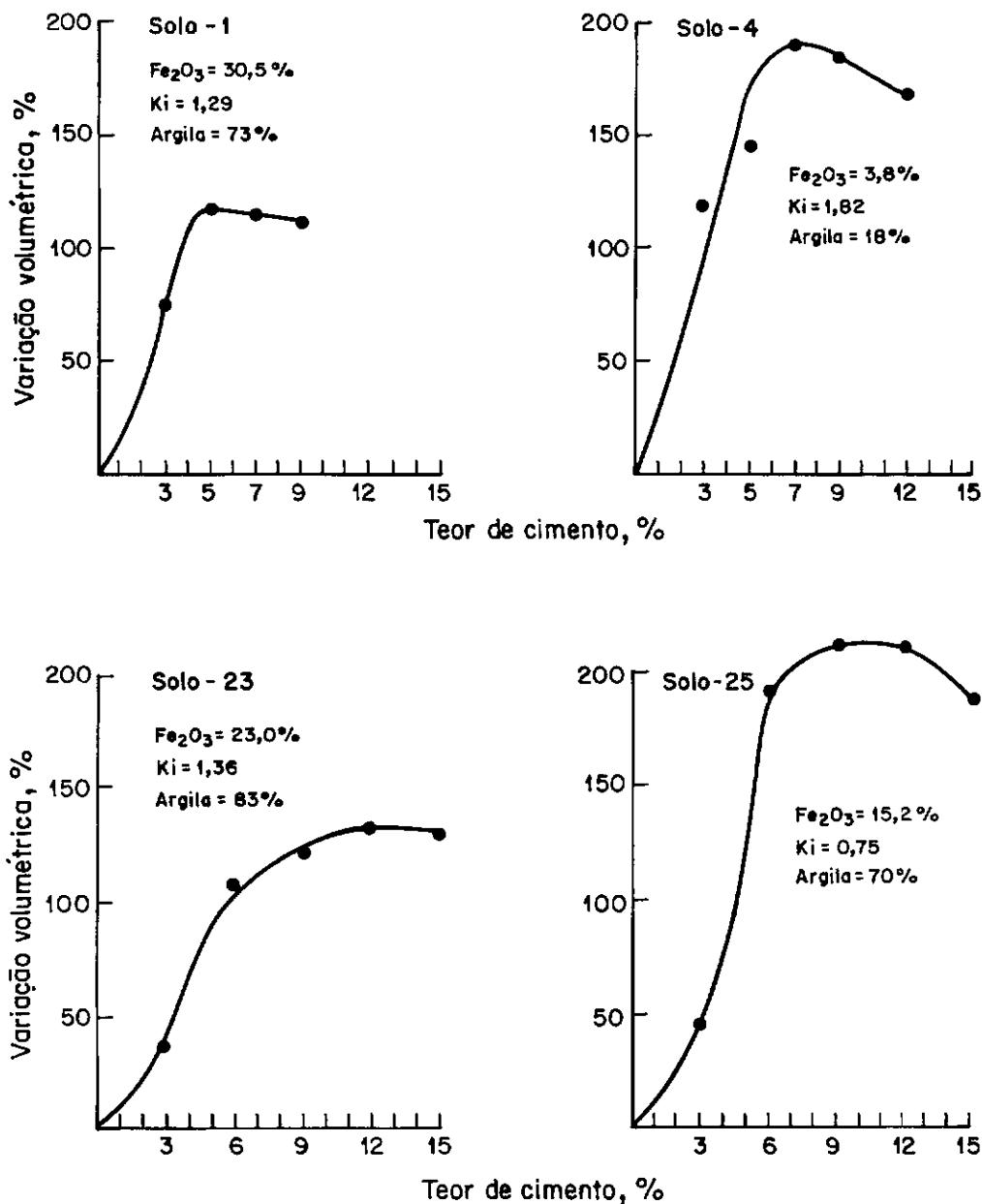


Fig. II.9 - Variações volumétricas dos sedimentos das misturas solo-cimento. (CASANOVA e CERATTI, 1986).

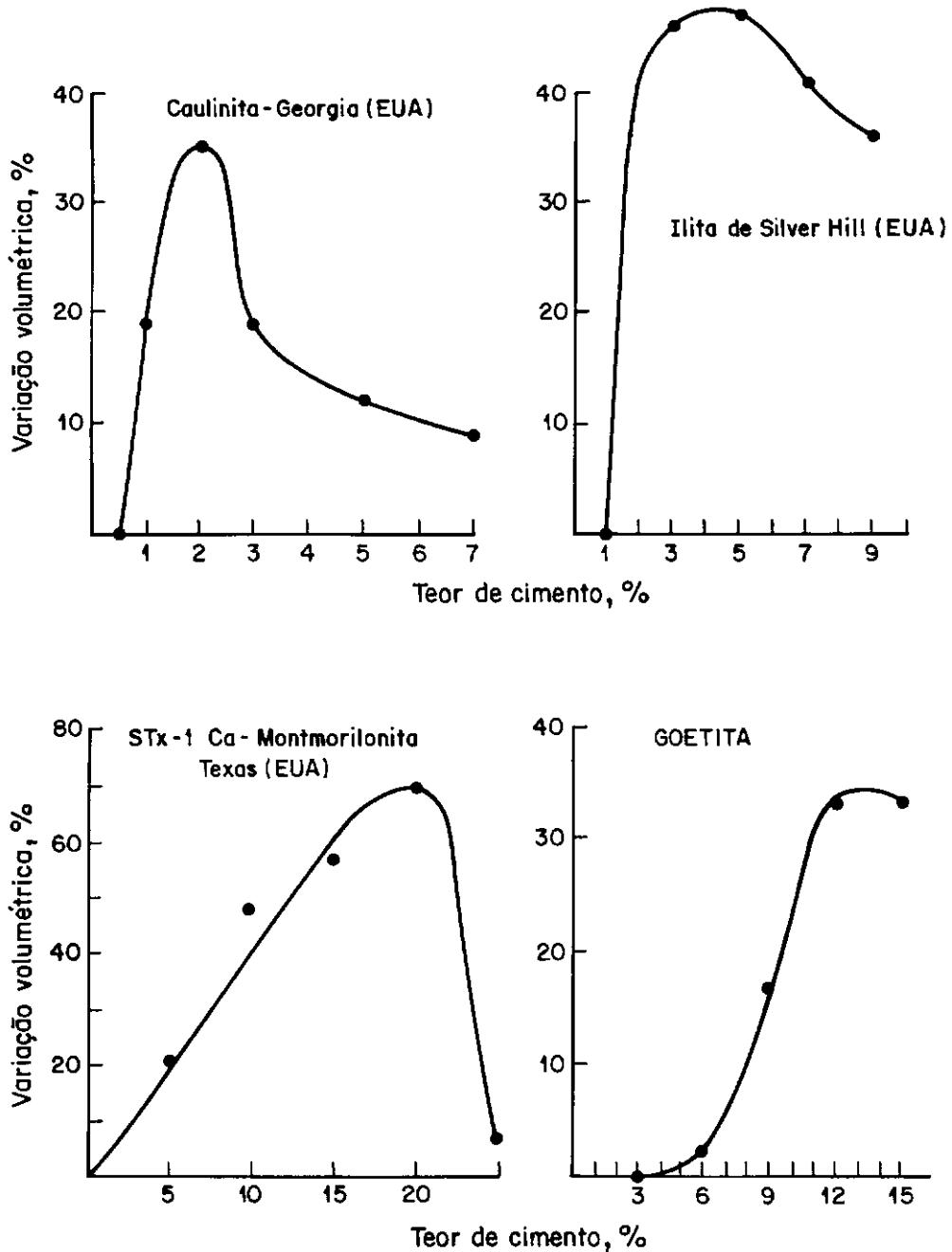


Fig. II.10 - Variações volumétricas dos sedimentos das misturas argilo mineral - cimento. (CASANOVA e CERATTI, 1986)

QUADRO II.1

Comparação de dosagens de cimento pelo Método da ABCP e pelo Método Físico-químico (CERATTI e CASANOVA, 1988).

Amostra	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
ABCP	10	9	6	6	11	16	12	13	10	10	9	11
MFQ	7	9	7	7	9	12	10	12	12	12	10	10

QUADRO II.2

Resistência à compressão simples (MPa) com 7 dias de cura. Amostras dosadas pelo Método Físico-químico (CERATTI e CASANOVA, 1988).

Amostra	Corpo de prova				Média
	01	02	03	04	
01	1.67	1.63	1.65	1.59	1.64
02	2.70	1.83	2.02		2.18
03	2.37	2.31	2.31		2.33
04	2.09	2.14	2.59		2.27
05	1.34	1.09	1.03		1.15
06	0.71	0.54	0.54	0.61	0.60
07	1.11	0.99	1.12	1.02	1.06
08	1.74	1.37	1.61	1.73	1.69
09	2.75	2.58	2.53		2.62
10	1.94	1.87	1.82		1.88
11	2.25	2.40	2.22		2.29
12	1.87	1.83	1.99		1.90

Segundo CASANOVA (1988), o processo de interação solo-cimento é tão complexo, que ao ser feita uma análise estatística onde a variável dependente foi a % de cimento (dosado pelo método físico-químico) e as variáveis independentes foram pH (solo), S (Σ bases), Al^{3+} trocável, H^+ trocável, T=CTC, Ki, Kr, % argila, $\%Fe_2O_3$ (livre), IP, LL, Matéria orgânica, não foi possível obter nenhuma correlação linear significante.

Outro estudo envolvendo este método foi realizado em uma tese na COPPE/UFRJ (ENAMORADO, 1990), onde foi comparado o método mecânico simplificado com métodos utilizando a dosagem físico-química, denominados de "método mecânico simplificado físico-químico" e "método físico-químico simplificado". O primeiro tratou-se em essência do método mecânico simplificado, usando o teor de cimento determinado pela dosagem físico-química . E o segundo consistiu em estimar a massa específica aparente máxima através dos ábacos da norma simplificada e o teor de cimento pela dosagem em estudo, moldar três corpos de prova para diferentes razões água/cimento (W/C) de acordo aos Procedimentos de Ensaios do Laboratório de Mecânica de Solos da COPPE/UFRJ e, com as resistências médias obtidas do Ensaio à Compressão para cada razão W/C, plotar a curva Resistência à Compressão Simples versus Razão W/C - sendo que o valor máximo desta curva determina a máxima resistência à Compressão simples e a razão ótima correspondente de água/cimento. Foi concluído que o método mecânico simplificado dosou o cimento para os três solos

ensaiados acima do necessário, enquanto que os métodos propostos não satisfizeram a resistência mínima prevista para solos com pouca argila e granulometria uniforme. Porém, os solos com maior quantidade de argila, alcançaram resistências bem acima da mínima ou próximas a ela com a metodologia pesquisada. Os resultados finais do trabalho se encontram na tabela II.1.

TABELA II.1 - RESULTADOS TESE ENAMORADO (1990)

Método Empregado	Resistência obtida aos 7 dias (kPa)			Resistência Mínima (kPa)		
	Solo A1	Solo A2	Solo A3	Solo A1	Solo A2	Solo A3
Mecânico Simplific.	2.474 (7% Ci)	4.124 (9% Ci)	2.980 (7% Ci)	1.820	1.920	2.030
Mecânico Simplific. Fís.-quím.	1.026 (3% Ci)	4.627 (11% Ci)	1.729 (3% Ci)	1.820	1.920	2.030
Proposta Fís.-quím. Simplific.	934 (3% Ci)	6.160 (11% Ci)	2.040 (3% Ci)	1.820	1.920	2.030

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - Solos

III.1.1 - Localização, classificação e características físicas

Foram utilizados 4 solos, escolhidos variando o grau de intemperismo (valor de K_i), a granulometria e quantidade de ferro e alumínio, cuja localização, classificação e características estão descritas a seguir.

Solo Cambuí: originário do Estado de São Paulo, coletado no entroncamento entre as rodovias SP-310 e SP-326, Cambuí. Encontra-se acima de uma linha de seixos, caracterizando com isto, ter sofrido processo de transporte (CERATTI, 1991). Este solo foi escolhido por já ter sido estudado em outras teses sobre solo-cimento na COPPE/UFRJ e pelo valor do índice de intemperismo (K_i) estar entre 1,0 e 1,7. Tem coloração vermelha e segundo sua granulometria é um solo arenoso fino, considerado pela pedologia como latossolo vermelho amarelo, fase arenosa.

Os dados de granulometria, limites de Atterberg e densidade dos grãos foram retirados de CERATTI (1991) e se encontram nas tabelas III.1 e III.2.

Segundo o sistema de classificação de solos da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation

Officials) é classificado como A-2-6 (O).

Solo VSMA: originário do Estado do Maranhão, da jazida Vila Sarney, localizada à margem direita da rodovia BR-135 à 6,5 km de São Luiz. Foi escolhido por ter sido objeto de estudos químico-mecânicos detalhados, ter o índice de intemperismo (K_i) entre 1,7 e 2,0 e pela facilidade de obtê-lo através do Grupo de Geotecnia da Universidade Federal da Paraíba, em Campina Grande.

A jazida, de onde o solo foi formado, é constituída principalmente de arenitos, nos quais intercalam-se leitos de folhelhos de cor cinza-esverdeada e vermelhos (NEVES et alii, 1988).

O solo é arenoso, de cor amarela e segundo a AASHTO é classificado como A-2-4 (O).

A granulometria e os limites de Atterberg foram retirados de LUCENA et alii (1986) e a densidade do grão de COSTA et alii (1986), apresentados nas tabelas III.1 e III.2.

Solo Euclidelândia: Sua origem é o Estado do Rio de Janeiro, localizado na estrada Cantagalo-Boa Sorte, a 3 km de Euclidelândia. Coletado a 2,15 m de profundidade (horizonte B2).

Foi cedido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Setor de Conservação de Solos e escolhido por ser um solo argiloso.

É classificado pedologicamente como um "Podzólico vermelho-escuro Tb Eutrófico A", moderado, textura

argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia e relevo ondulado. O Tb na classificação quer dizer, argila de baixa atividade.

A granulometria desse solo se encontra na tabela III.1 e foi feita seguindo a norma NBR 7181/84, no laboratório de Geotecnica da COPPE/UFRJ.

Os limites de Atterberg e a densidade específica dos grãos foram determinados pela Embrapa e estão na tabela III.2.

É classificado, segundo a AASHTO, de A-7-6 (13).

Solo Vista Chinesa: proveniente do Estado do Rio de Janeiro, situado na Estrada Dona Castorina, Vista Chinesa, cidade do Rio de Janeiro, na Trincheira 1 relativa ao trabalho de tese do mestrandoo João Carlos Santos da Rocha, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coletado em uma profundidade de 1,45m e cedido pelo orientador da referida tese, professor Franklin dos Santos Antunes. Escolheu-se esse solo por ter maior quantidade de gibbsita e ferro ($K_i < 1,0$).

Pedologicamente é classificado como um Latossolo Cambissólico desenvolvido de deposição coluvial. Tem cor amarela, textura argilo-arenosa e é classificado pela AASHTO como A-7-6 (6).

A granulometria, os limites de Atterberg e a densidade dos grãos foram realizados no Laboratório de Geologia de Engenharia/UFRJ e estão apresentados nas tabelas III.1 e III.2.

TABELA III.1 - GRANULOMETRIA

Solo	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Cambuí	---	---	12	58	10	20
VSMA	35	7	6	29	10	13
Euclidelândia	---	---	7	35	4	54
Vista Chinesa	5	16	20	10	7	42

Pedregulho (>4.8 mm); Areia Grossa (4.8-2.0 mm); Areia Média (2.0-0.42 mm); Areia Fina (0.42-0.05 mm); Silte (0.05-0.005 mm); Argila (<0.005 mm).

TABELA III.2- LIMITES DE ATTERBERG E DENSIDADE ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Solo	L. L. %	L. P. %	I. P. %	Densidade específica
Cambuí	29	18	11	2.82
VSMA	18	NP	NP	2.70
Euclidelândia	53	29	24	2.63
Vista Chinesa	46	27	19	2.77

L. L.(Limite de liquidez); L. P.(Limite de plasticidade); I. P.(Índice de plasticidade); NP (não plástico).

III.1.2 - Análises químicas

Foram realizadas segundo os métodos adotados pelo setor de Química e Mineralogia do Laboratório de Geotecnica

da COPPE/UFRJ, descritos a seguir:

pH: misturou-se 10g de terra fina seca ao ar (solo passado na peneira nº 10) com 25ml de H₂O deionizada e medido o pH após uma hora, através do medidor de pH marca Corning (pH meter model 10) com eletrodo de vidro combinado marca Analion modelo V-620A. As leituras foram também realizadas substituindo a água deionizada por solução de KCl (1N).

* SiO₂, * Fe₂O₃, * Al₂O₃, * TiO₂: pesou-se 1 a 2g de terra fina seca à 105°C em balança analítica que foram calcinadas à 600°C por 2 horas. Passou-se então para erlenmeyer de 250ml com auxílio de 25ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄ 1:1) e feito ataque a quente com condensador de refluxo durante uma hora. No filtrado (extrato sulfúrico) foram dosados o ferro, alumínio e titânio, e o resíduo foi fervido com NaOH 0.5N por 5 minutos e filtrado. Neste extrato alcalino foi determinada a sílica e o resíduo final foi calcinado à 1000°C determinando-se assim a quantidade de material não atacado (% Res.). É bom ressaltar que através desse tipo de tratamento somente os argilominerais são atacados.

O óxido de ferro foi determinado por complexometria pelo EDTA, utilizando o ácido salicílico e titulando com ZnSO₄.

Quantificou-se o óxido de alumínio por complexometria

pelo EDTA, após separação do ferro, e titulado com $ZnSO_4$, utilizando o xilenol orange como indicador.

O óxido de titânio foi dosado por colorimetria com água oxigenada no comprimento de onda $\lambda=430nm$, utilizando o Espectrofotômetro da Micronal (modelo: B342).

Determinou-se a porcentagem de sílica por método colorimétrico com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo, que absorve em $\lambda=410nm$.

Perda ao fogo (% ΔP): foi obtida pela diferença de peso do solo ao ser calcinado à $600^{\circ}C$ em relação ao solo seco a $105^{\circ}C$.

Matéria orgânica (%M.O.): em 1 a 2g de terra fina seca a $105^{\circ}C$, pesados em balança analítica, adicionou-se dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) como oxidante e Ag_2SO_4 como catalizador, e foram colocados para ferver sob refluxo durante 5 minutos. O $K_2Cr_2O_7$ não consumido na oxidação da matéria orgânica foi então dosado por titulação com o sulfato ferroso amoniacial, utilizando a difenilamina como indicador.

Índices de intemperismo (Ki e Kr): são calculados pelas relações moleculares sílica/alumina (Ki) e sílica/sesquióxidos (Kr), para situar o estágio de alteração geoquímica dos solos.

Apresenta-se na tabela III.3 os resultados das análises químicas efetuadas nos solos.

III.1.3 - Análise Mineralógica

Através da análise química pode-se, por alocação estequiométrica, estimar a quantidade dos minerais mais comuns presentes na fração atacada pelo ácido e do quartzo (ou mineral primário) que não foi atacado (CASTRO et alii, 1984). Os resultados desta análise mineralógica estão apresentados na tabela III.4.

Para se determinar qualitativamente os minerais presentes na fração argila, foram feitos difratogramas de raios-X, pelo Laboratório de Difração de raios-X do Departamento de Geologia de Engenharia da UFRJ nas seguintes condições de operação:

- Aparelho: Difratômetro de raios-X Rigaku Geigerflex
- Radiação: Tubo de cobre
- Voltagem: 40kV
- Corrente: 30mA
- Amplitude de Varredura (2θ): 2° à 30°
- Velocidade de Varredura: 2°/min
- Constante de tempo: 1 segundo
- Velocidade do papel: 40mm/min
- Taxa de contagem: 5K

A exceção é o solo Euclidélandia, cuja análise

difratométrica foi realizada pela EMBRAPA na fração argila desferrificada, nas seguintes condições de operação:

- Aparelho: Difratômetro de raios-X Rigaku Geigerflex D-Max II.A
- Radiação: Tubo de cobre
- Voltagem: 37,5kV
- Corrente: 27,5mA
- Amplitude de Varredura (2θ): 2° à 30°
- Velocidade de Varredura: 2°/min
- Taxa de contagem: 1000 ciclos/segundo
- Constante de tempo: 1 segundo
- Velocidade do papel: 10mm/min

Os resultados desses difratogramas estão no quadro III.1.

III.1.4 - Preparação dos solos

Devido à dificuldade de encontrar solos com diferentes características já conhecidas, conseguiu-se quantidade relativamente pequena de amostras (4 kg em média). Chegando ao Laboratório de Geotecnica da COPPE, foram secas ao ar, totalmente destorradas e passadas na peneira nº10 (abertura de 2,00 mm). Esta fração de cada solo, foi então bem misturada com auxílio de uma colher, ensacada e novamente homogeneizada através de movimentos com o saco plástico. Separou-se as amostras assim preparadas em 3 sacos menores com 500g cada, para

utilização pelos outros laboratórios. O restante foi utilizado nos ensaios realizados pela autora.

TABELA III.3 - ANÁLISE QUÍMICA DOS SOLOS

Solo	pH		ΔP (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	Res. (%)	M. O. (%)	Ki	Kr
	H_2O	KCl									
Camb.	7.3	7.4	4.96	7.6	10.6	4.9	1.44	69.7	0.33	1.22	0.94
VSMA	5.5	6.1	6.09	11.7	11.8	8.0	0.77	59.9	0.82	1.69	1.18
Eucl.	6.2	6.2	7,67	20.5	17.7	7.6	0.65	42.6	0.59	1.97	1.55
V. Ch.	3.7	4.6	10.89	10.1	19.2	10.4	1.20	45.6	0.61	0.89	0.66

TABELA III.4- ANÁLISE MINERALÓGICA COM OS DADOS
DA ANÁLISE QUÍMICA DOS SOLOS

Solo	Caulinita (%)	Gibbsita (%)	Goetita (%)	Quartzo (%)	TiO_2 (%)
Cambuí	16	6	6	70	1.44
VSMA	25	3	9	60	0.77
Euclidelândia	44	0.5	9	43	0.65
Vista Chinesa	22	16	12	46	1.20

QUADRO III.1
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DA FRAÇÃO ARGILA (R₃₀)

Solo	Constituinte Mineralógico
Cambuí	Caulinita e Gibbsita
VSMA	Caulinita
Euclidelândia	Caulinita e ocorrência de argilomineral 2:1
Vista Chinesa	Caulinita, Gibbsita, Goetita e traços de vermiculita

III.2 - Cimento

O cimento utilizado foi o Portland comum, CPE-32, produzido pela Companhia de Cimento Mauá, substituto na época da tese do CP-320. Durante a realização dos ensaios, foi armazenado em bombona e no laboratório, em menor quantidade, em dessecador. Ele é composto de aproximadamente 93% de clinquer e sulfato de cálcio e 7% de filer (calcário moído). Apesar de ser classificado como CPE, que segundo a norma ABNT(1988)-NBR 5732 é um cimento portland comum com adição de até 10% de escória, não tem escória, a qual é substituída pelo filer (informação do fabricante).

O quadro III.2 mostra as características do cimento (a análise química do clinquer e a composição mineralógica do cimento), cedidas pela Companhia de Cimento Mauá.

QUADRO III.2
CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO

Análise química do clinquer	%
Perda ao fogo	≈ 0
SiO ₂	22.0
Al ₂ O ₃	5.20
Fe ₂ O ₃	3.40
CaO	66.5
MgO	1.58
Na ₂ O	0.22
K ₂ O	0.30
SO ₃	0.86
K ₂ O solúvel	0.28
Na ₂ O solúvel	0.13
Cal livre	1.00
Composição	%
C ₂ S	15
C ₃ S	70
C ₃ A	8
C ₄ AF	10.3

III.3 - Descrição do Método Físico Químico de Dosagem do Solo-Cimento

- 1) Utiliza-se em média sete provetas de 250ml marcando-as com as porcentagens do cimento (ex: 0%, 3%, 5%,...).
- 2) Pesa-se 20g do solo, seco ao ar, destorrado e passado na peneira nº10, em cada proveta.
- 3) Adiciona-se as quantidades de cimento, em porcentagens por peso de solo, nas respectivas provetas.
- 4) Mistura-se o solo e o cimento ainda secos, agitando-se as provetas.
- 5) Coloca-se aproximadamente 50ml de água destilada e agita-se as provetas até que ocorra a homogeneização completa da mistura.
- 6) Completa-se o volume para 100ml, lavando as paredes das provetas, e coloca-se em repouso absoluto até o dia seguinte.

OBS:

- Em havendo dispersão do solo na água (proveta 0%), coloca-se algumas gotas de HCl (ácido clorídrico) antes de completar o volume, a fim de flocular a argila dispersa, permitindo assim, uma melhor definição da leitura.
- É necessário que o lugar de apoio das provetas não sofra qualquer tipo de vibração.

- 7) No dia seguinte, agita-se a mistura com auxílio de um bastão de metal até ficar bem homogênea.
- 8) Após no mínimo 2 horas faz-se a leitura do volume ocupado pelo sedimento.

- 9) No terceiro dia, agita-se novamente e faz-se a leitura após no mínimo 2 horas.
- 10) Repete-se esta operação todos os dias até obter-se leituras constantes ou decrescentes.
- 11) Monta-se uma tabela com as porcentagens de cimento e as leituras de cada dia.

Calcula-se a variação volumétrica percentual (%ΔV) do sedimento solo-cimento em relação àquela do solo puro (0%), para os diversos teores de cimento, escolhendo para o cálculo, o maior volume obtido para cada teor.

- 12) Faz-se um gráfico de $\Delta V(\%)$ versus %Ci. O ponto máximo de variação volumétrica corresponde ao teor mínimo de cimento requerido para a "satisfação" físico-química do solo.

III.4 - Ensaios realizados e equipamentos utilizados

Foram realizados com os quatro solos, ensaios de repetibilidade e reprodutibilidade, além de outros com aditivo e ultra-som como pré-tratamento. Dois dos solos também foram ensaiados em temperatura mais alta (60°C) para se observar o comportamento dos sedimentos.

III.4.1 - Ensaios de Repetibilidade

Cada solo foi ensaiado 10 vezes nas mesmas condições (operador, equipamento, amostras, cimento e ambiente).

Utilizou-se uma balança marca Sartorius, modelo E2000, além de provetas de 250ml, bastão de metal e água desionizada. Em três solos (VSMA, Euclidelândia e Vista Chinesa) houve a necessidade de colocar HCl nas provetas sem cimento. Realizou-se 6 leituras em cada ensaio. O laboratório utilizado foi o setor de Química e Mineralogia de Solos do Laboratório de Geotecnica da COPPE/UFRJ - Laboratório A.

III.4.2 - Ensaios de Reprodutibilidade

Os solos foram ensaiados por três laboratórios, relacionados abaixo:

1) Setor de Misturas Betuminosas do Laboratório de Geotecnica da COPPE/UFRJ - Laboratório B.

Utilizou-se duas balanças, uma menos sensível para pesar os solos (marca: Marte, modelo: A10K) e outra para a pesagem do cimento (marca: Marte modelo: A200).

2) Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFRJ - Laboratório C.

A balança utilizada foi da marca Sartorius, modelo E2000.

3) Laboratório de Química do Departamento de Geologia de Engenharia da UFRJ - Laboratório D.

Foi utilizada a balança marca Micronal, modelo B600.

Cada laboratório recebeu por escrito a metodologia, e as dúvidas foram sanadas pessoalmente, ao se acompanhar o

primeiro ensaio de adaptação. Enviou-se as amostras e o cimento devidamente acondicionados. Foram realizadas três repetições para cada solo.

III.4.3 - Influência de aditivo

Com os objetivos de: 1) saturar o solo com Ca^{2+} , para que a cal liberada pelo cimento não fosse consumida para esse fim, mas somente na reação de formação de neo-compostos e 2) acelerar a hidratação do cimento, foram realizados ensaios com a prévia adição de cloreto de cálcio ao solo. Utilizou-se para cada 20g de solo, 8 ml da solução do sal de concentração igual a 1 Normal, correspondendo a 8 meq, quantidade além do suficiente para saturar o solo.

Após essa mistura, colocou-se na proveta a quantidade de cimento com auxílio de água, o sistema foi novamente homogeneizado e o volume completado para 100ml.

O método foi então prosseguido como descrito, tendo sido desnecessária a adição de HCl nas provetas sem cimento, já que o cloreto de cálcio flocula o solo.

III.4.4 - Influência de pré-tratamento

A ultra-sonificação foi experimentada com o objetivo de verificar se o ensaio se definiria mais rápido. Para

isso utilizou-se o aparelho de ultra-som, marca Thorton-Inpec Eletrônica S.A. Os 20g de solo foram pesados num becher, misturados com 50ml de água e colocados no aparelho durante 2 minutos. Foram então, juntamente com a respectiva quantidade de cimento, introduzidos nas provetas com o auxílio de água, homogeneizados e o volume completado a 100ml. Necessitou-se colocar nas provetas sem cimento o ácido clorídrico. A partir desse ponto prosseguiu-se com o método normalmente.

III.4.5 - A influência da temperatura

Realizaram-se dois ensaios à temperatura de aproximadamente 60°C. As provetas permaneceram dentro de um banho com temperatura controlada (marca Quimis), sendo retiradas nos momentos de agitação e leitura. Foram utilizadas provetas com tampa para não haver evaporação da solução e assim não mudar sua concentração. Foi possível testar somente dois solos, o Cambuí e o Euclidélandia, devido a problemas de funcionamento do banho, sendo no entanto, suficiente para o objetivo do teste, que era o de observar o comportamento dos sedimentos a uma temperatura mais alta.

CAPITULO IV

RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados neste capítulo, separados de acordo com o tipo de ensaio.

IV.1 - Ensaios de Repetibilidade

Os ensaios realizados no solo Cambuí estão apresentados nas tabelas IV.1 a IV.10 e nas figuras respectivas.

Os do solo VSMA se encontram nas tabelas IV.11 a IV.20 e figuras IV.11 a IV.20.

Os resultados do solo Euclidelândia estão nas tabelas IV.21 a IV.30 e nas figuras correspondentes.

O solo Vista Chinesa tem seus resultados apresentados nas tabelas IV.31 a IV.40 e nas respectivas figuras.

Um resumo com os resultados dos teores de cimento para todos os solos é apresentado no quadro IV.1.

QUADRO IV.1

SOLO	Teores de cimento (%)									
	4	4	6	4	4	4	4	4	4	6
Cambuí	4	4	6	4	4	4	4	4	4	6
VSMA	11	11	9	11	11	9	13	11	11	9
Euclidelândia	5	7	5	7	5	7	11	7	5	5
Vista Chinesa	9	7	7	9	9	7	9	7	7	5

IV.2 - Ensaios de Reprodutibilidade

Os ensaios realizados pelo laboratório B têm seus resultados apresentados nas tabelas e figuras IV.41 a IV.43 (solo Cambuí), IV.44 a IV.46 (solo VSMA), IV.47 a IV.49 (solo Euclidelândia) e IV.50 a IV.52 (solo Vista Chinesa).

Os resultados do laboratório C se encontram nas tabelas IV.53 a IV.64 e respectivas figuras.

Os do laboratório D estão nas tabelas e figuras IV.65 a IV.76.

O resumo com os resultados dos teores de cimento para cada solo, encontrados por todos os laboratórios são apresentados no quadro IV.2. Foram incluídos neste quadro, os três primeiros ensaios realizados pelo laboratório A, pois esses resultados também serão utilizados no próximo capítulo, na avaliação da reprodutibilidade do método.

QUADRO IV.2

Teor de cimento (%)													
Solo Lab \	Cambuí			VSMA			Euclidelândia			Vista Chinesa			
A	4	4	6	11	11	9	5	7	5	9	7	7	
B	4	4	4	9	9	11	5	7	7	9	9	7	
C	4	4	6	9	11	9	7	9	9	7	5	7	
D	6	4	4	11	11	9	5	7	7	7	7	7	

V.3 - Influência do Aditivo

Os resultados dos ensaios com o cloreto de cálcio adicionado antes do cimento em cada solo, se encontram nas tabelas IV.77 a IV.80 e respectivas figuras.

IV.4 - Influência do Ultra-som

Os resultados são apresentados nas tabelas e figuras IV.81 a IV.84.

IV.5 - Influência da Temperatura

Os dois ensaios realizados têm seus resultados apresentados nas tabelas IV.85 e IV.86 e figuras correspondentes.

Tabela IV-1 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação Volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	39	46	49	50	49	48	150
4	44	51	53	54	53	53	170
6	46	51	52	52	52	52	160
8	40	46	45	44	43	43	130
10	38	41	42	42	41	40	110
12	37	40	40	42	41	40	110

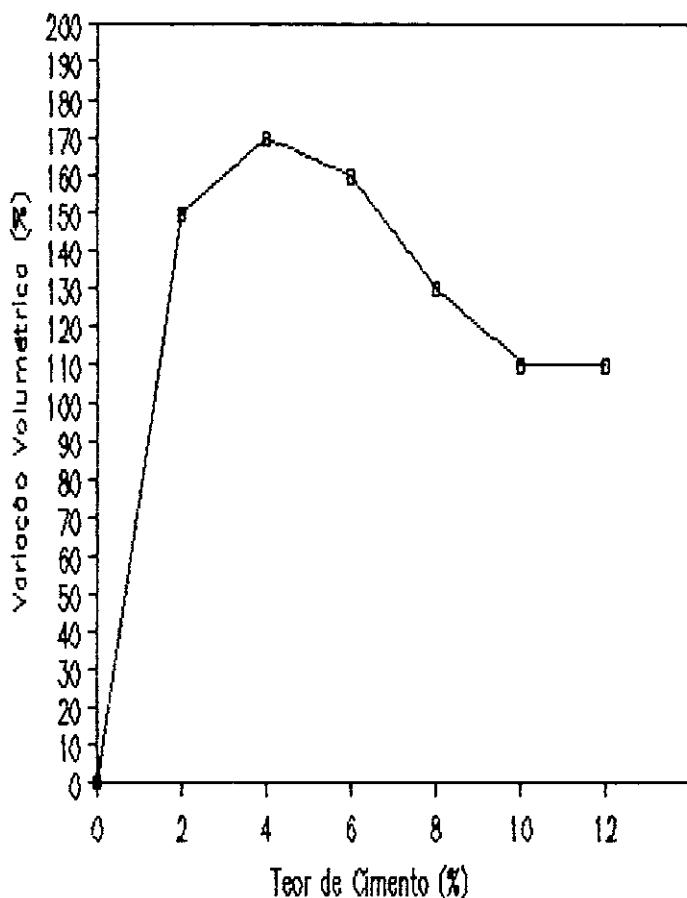


Fig. IV-1 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-2 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	40	47	47	44	46	45	135
4	44	53	53	53	52	52	165
6	44	53	52	51	52	52	165
8	38	47	44	43	42	41	135
10	38	48	45	44	44	43	140
12	36	46	44	44	44	43	130

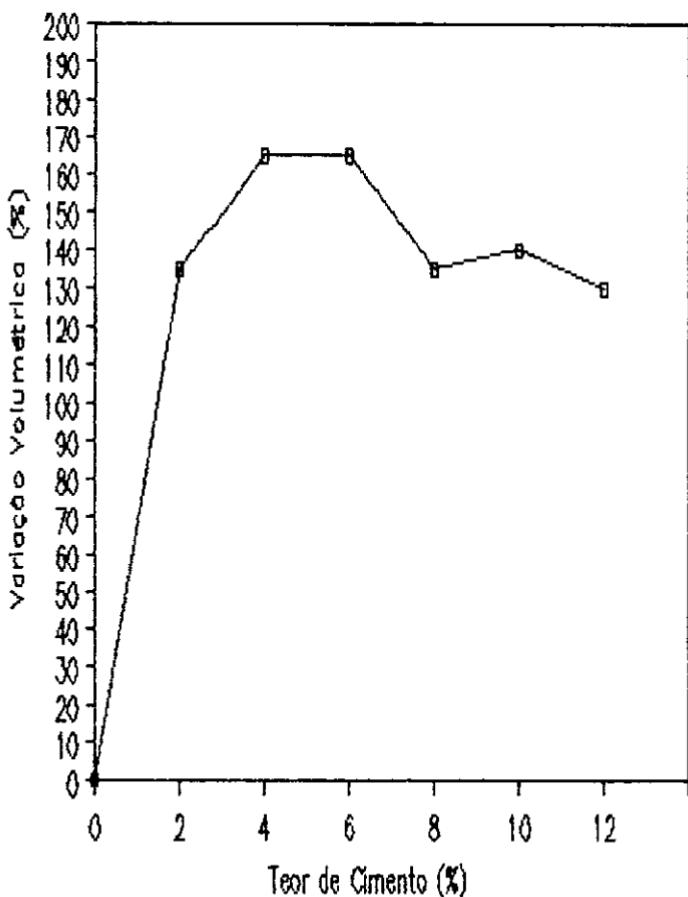


Fig. IV-2 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-3 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	33	44	46	46	46	45	130
4	44	61	62	62	63	62	166
6	45	55	52	54	54	54	175
8	43	52	51	50	49	49	160
10	43	52	50	49	48	47	160
12	40	52	49	48	47	46	160

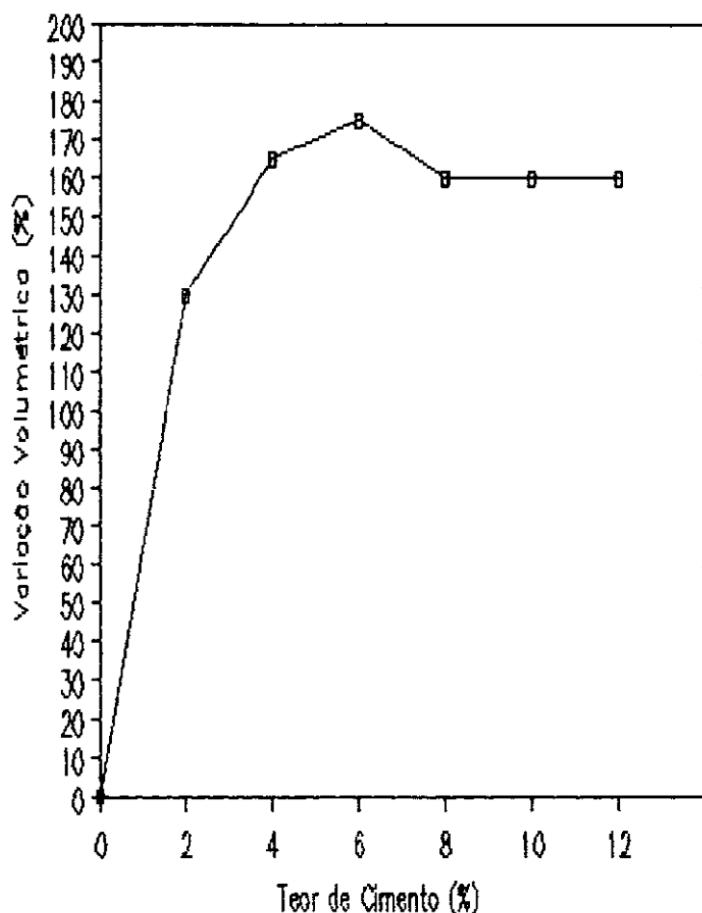


Fig. IV-3 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-4 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	42	48	48	48	48	48	140
4	43	50	52	52	52	52	160
6	44	49	48	48	49	49	145
8	39	46	44	44	43	43	130
10	38	42	41	40	40	40	110
12	36	39	40	40	41	40	105

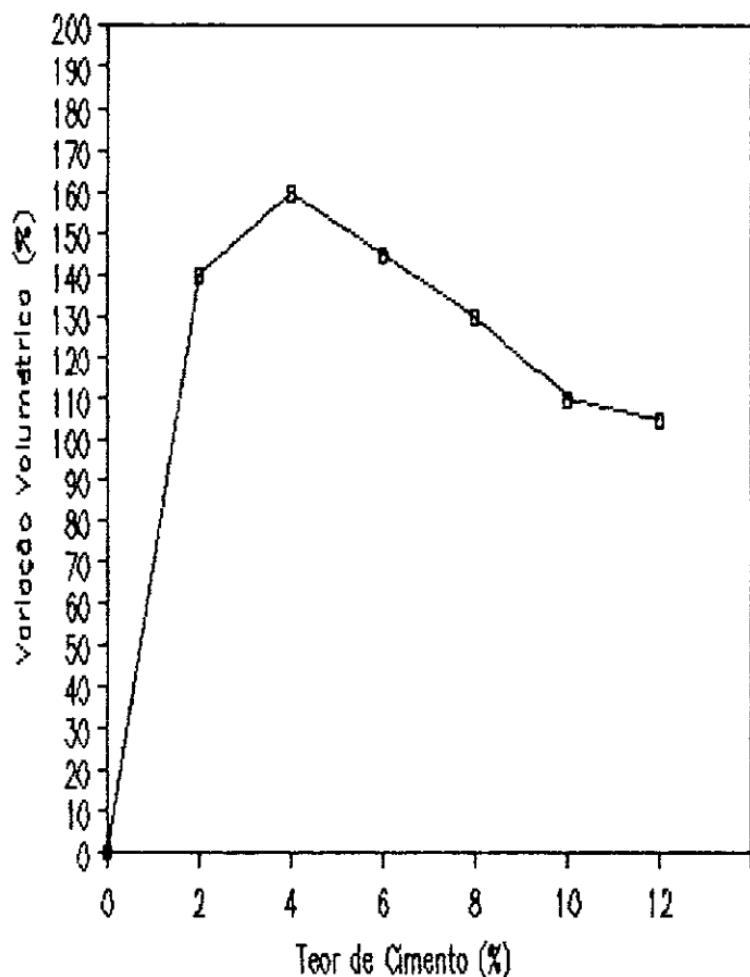


Fig. IV-4 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-5 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	39	48	50	49	48	48	150
4	44	52	54	53	53	53	170
6	42	50	49	49	48	49	150
8	38	46	44	43	43	43	130
10	38	46	44	44	44	44	130
12	36	43	42	42	42	42	115

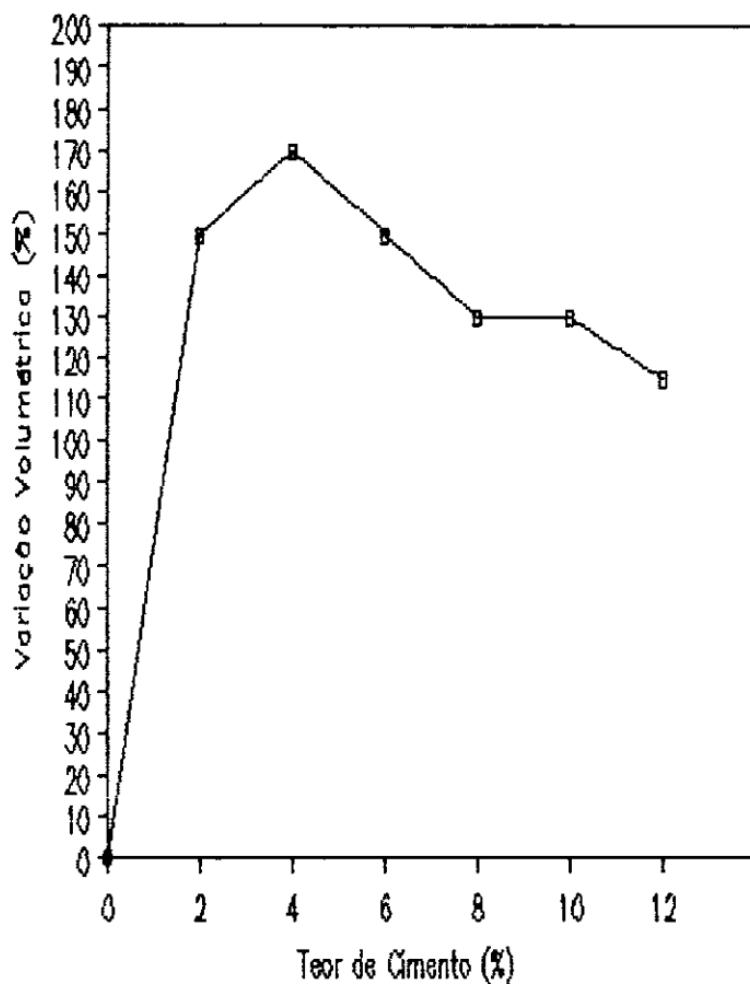


Fig. IV-5 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-6 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	37	48	49	49	48	48	145
4	49	58	66	67	68	68	190
6	50	56	57	56	57	57	185
8	45	54	52	52	52	52	170
10	45	52	51	51	51	51	160
12	43	51	50	50	50	50	155

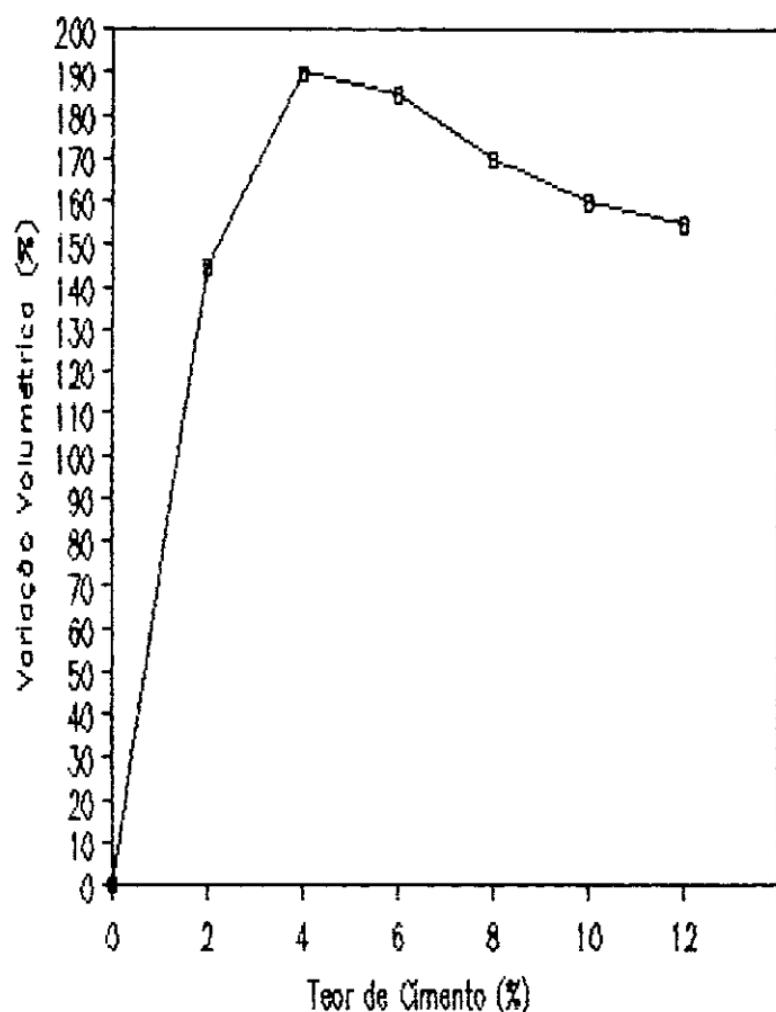


Fig. IV-6 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-7 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	43	50	53	52	53	51	165
4	48	58	60	61	60	58	200
6	46	51	52	51	51	50	160
8	38	43	43	42	41	40	115
10	38	43	43	42	42	41	115
12	36	40	40	40	40	40	100

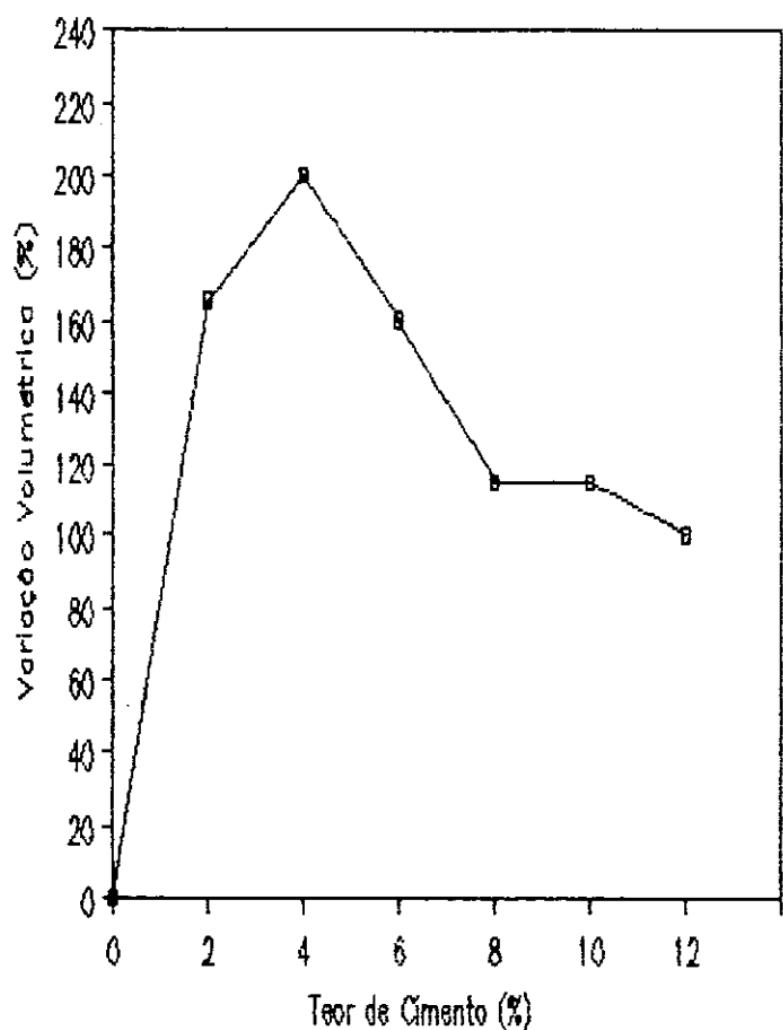


Fig. IV-7 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-8 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	41	50	52	51	51	51	160
4	48	68	68	69	69	69	195
6	49	58	58	58	58	58	190
8	40	50	49	49	49	49	150
10	40	46	46	46	47	47	135
12	36	44	43	44	44	44	120

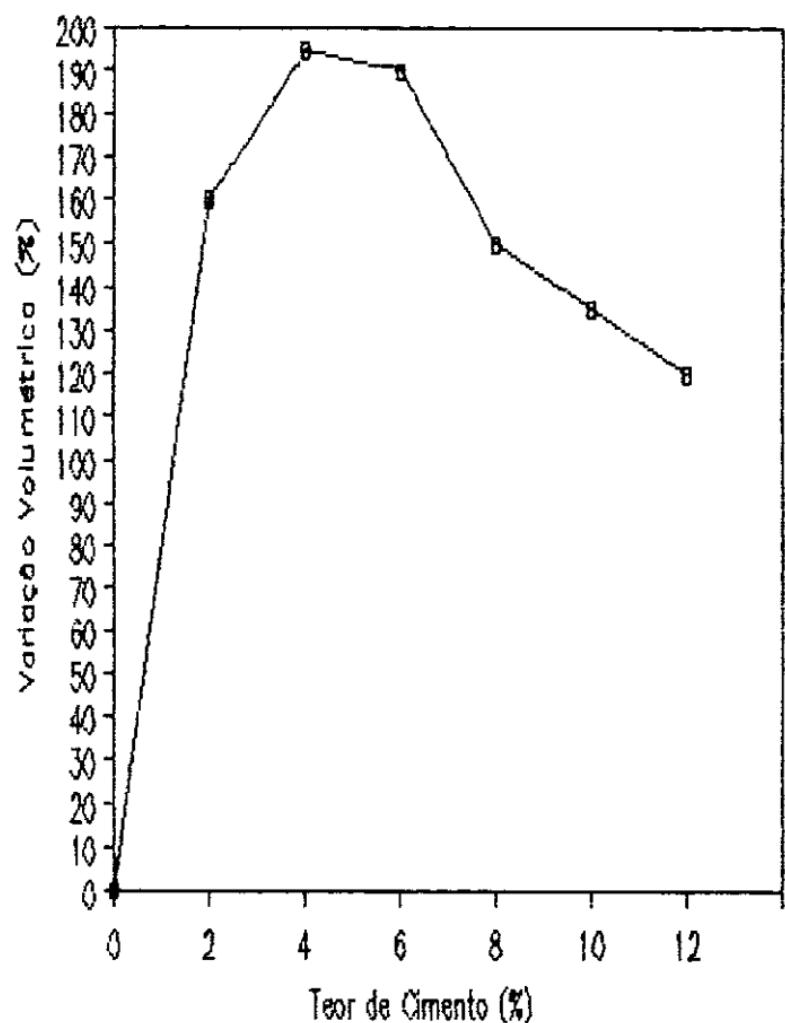


Fig. IV-8 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-9 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	35	46	49	48	47	46	145
4	48	57	59	59	59	58	195
6	51	58	58	57	58	58	190
8	47	52	52	52	52	53	165
10	46	55	54	54	54	55	175
12	44	50	49	50	50	52	160

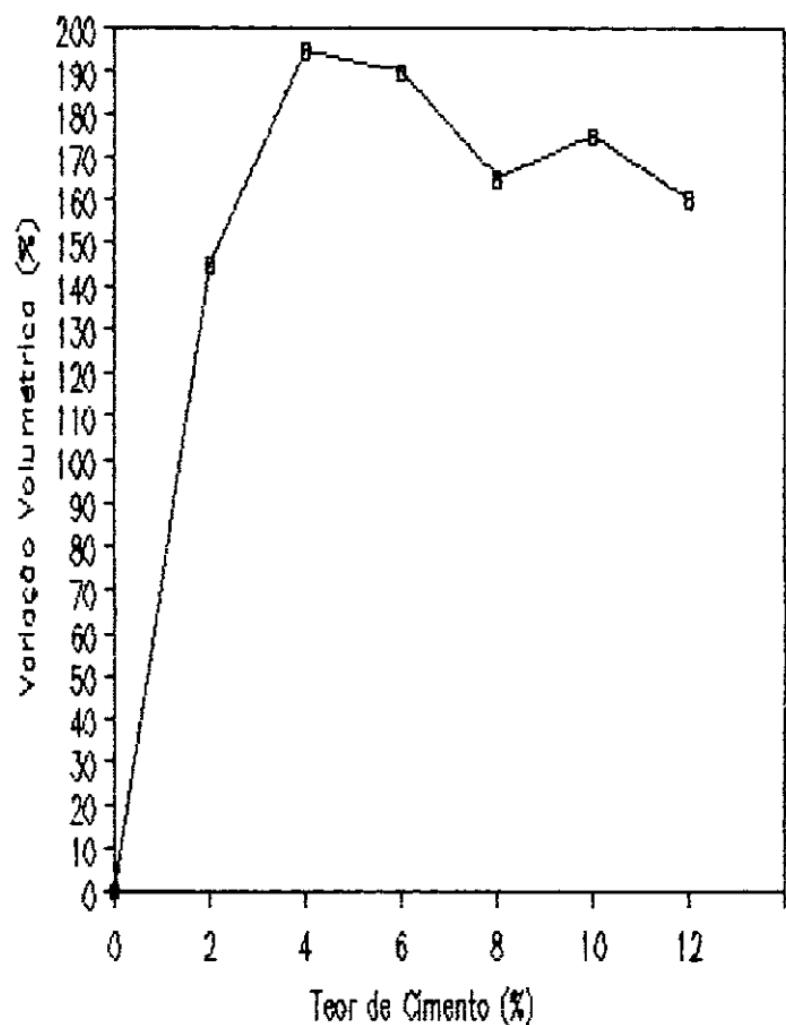


Fig. IV-9 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-10 - CAMBUÍ (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	34	45	46	46	46	45	130
4	46	61	58	58	60	58	205
6	51	62	60	60	59	61	210
8	47	60	58	59	58	60	200
10	48	59	57	58	58	59	195
12	42	50	48	49	50	50	150

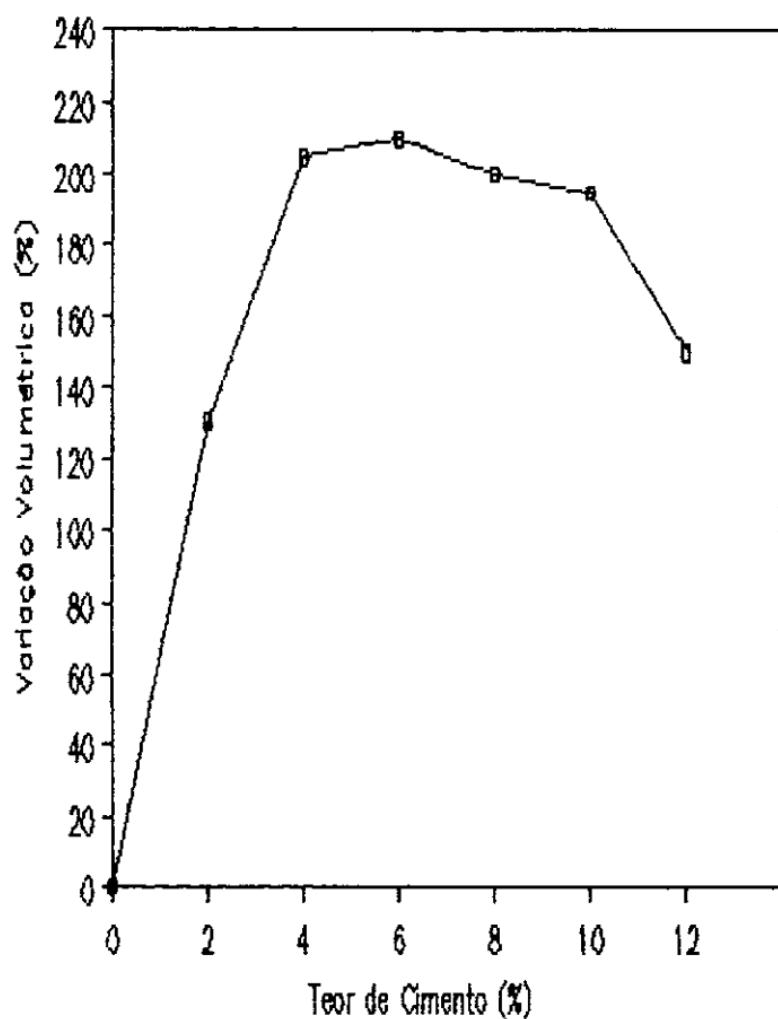


Fig. IV-10 - CAMBUÍ (lab. A)

Tabela IV-11 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	24	24	24	24	24	24	0
3	32	33	32	32	32	32	38
6	36	44	47	47	47	47	99
9	42	55	55	55	54	54	129
11	46	59	57	57	57	56	146
13	42	53	52	52	52	51	121
15	38	48	47	47	47	47	100

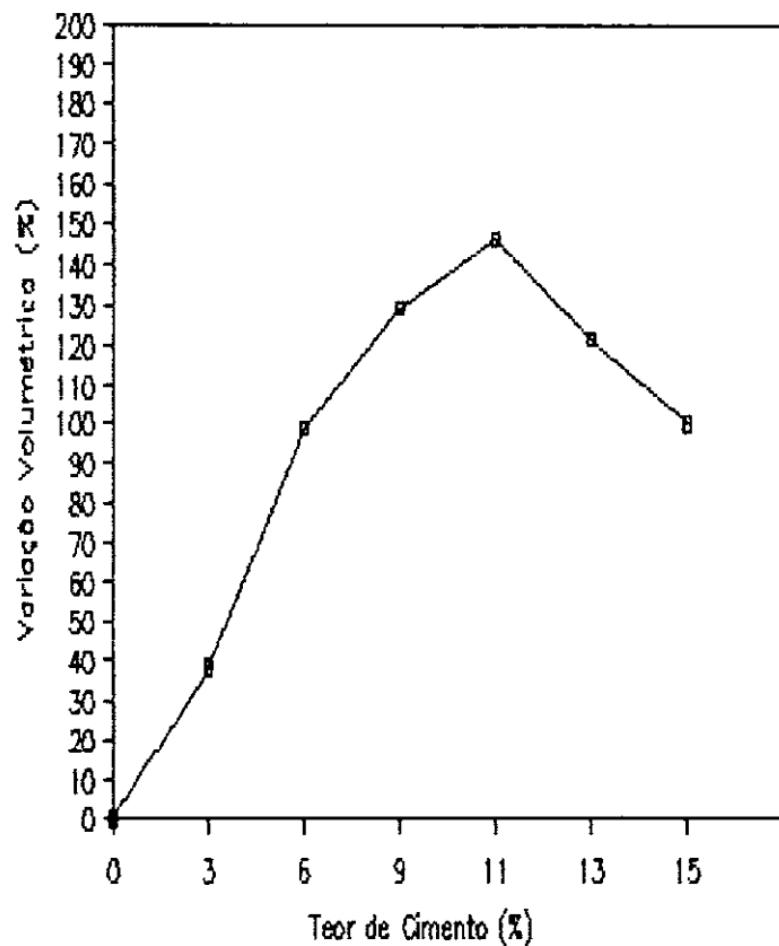


Fig. IV-11 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-12 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	23	23	23	23	23	0
3	29	32	31	31	30	30	39
6	36	52	58	57	56	56	152
9	40	61	65	63	62	62	183
11	42	62	66	64	63	63	187
13	40	56	61	60	60	59	165
15	35	48	54	52	52	52	135

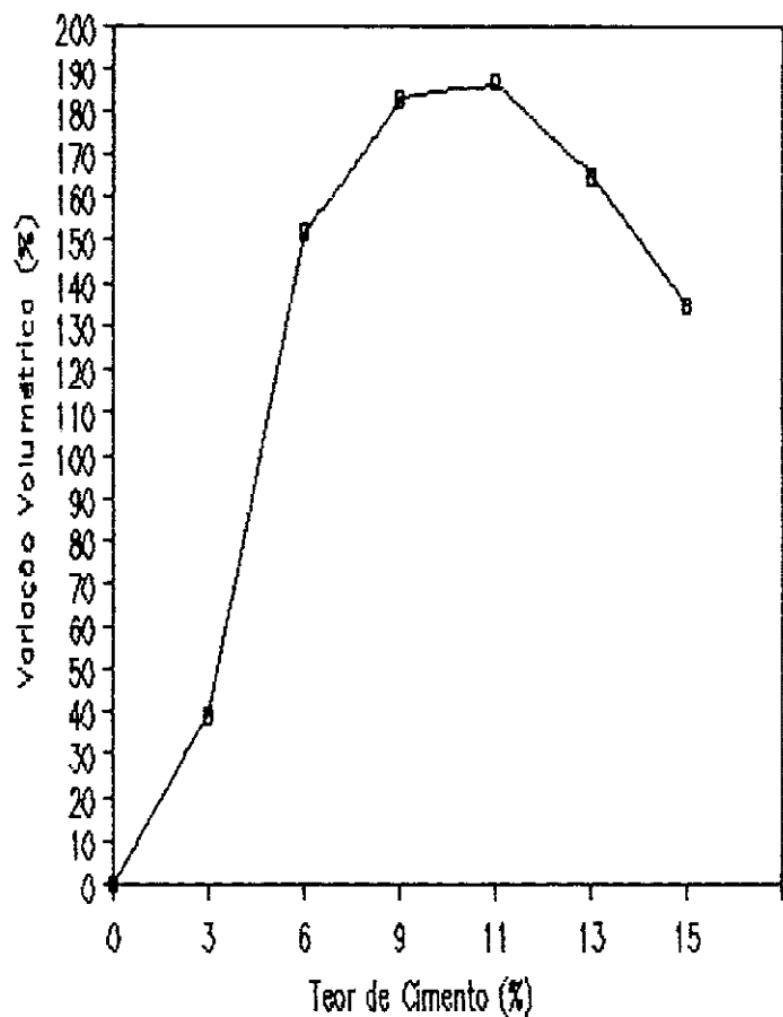


Fig. IV-12 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-13 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação Volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	23	24	24	24	24	0
3	27	28	29	28	28	28	21
6	36	50	59	59	58	57	146
9	46	62	63	61	61	60	163
11	39	55	61	58	57	57	154
13	39	51	52	52	51	51	117
15	38	50	53	52	52	52	121

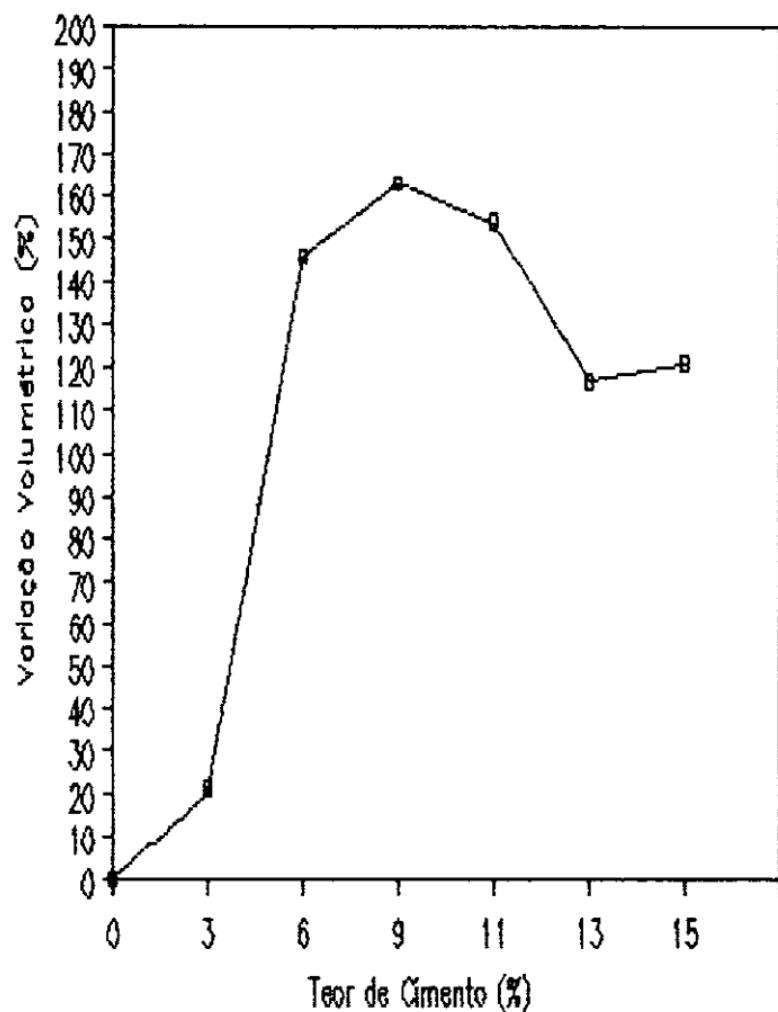


Fig. IV-13 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-14 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	24	24	24	24	24	0
3	26	26	26	26	26	26	8
6	36	48	56	54	54	53	129
9	42	56	58	57	57	56	142
11	44	58	59	58	58	57	146
13	43	56	56	56	55	55	133
15	40	53	54	53	53	53	125

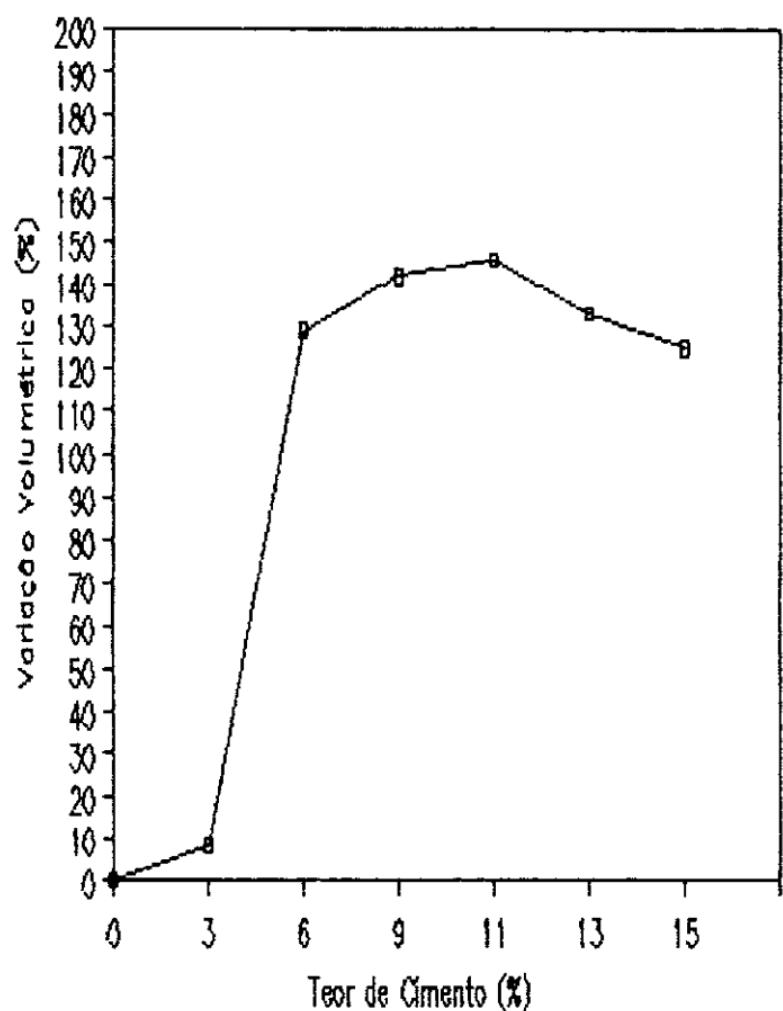


Fig. IV-14 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-15 – VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	23	24	24	24	24	0
3	26	26	26	26	26	26	8
6	37	52	58	58	56	56	142
9	44	58	61	60	59	58	154
11	46	63	64	62	62	61	167
13	47	64	64	63	62	62	167
15	46	60	60	59	58	58	154

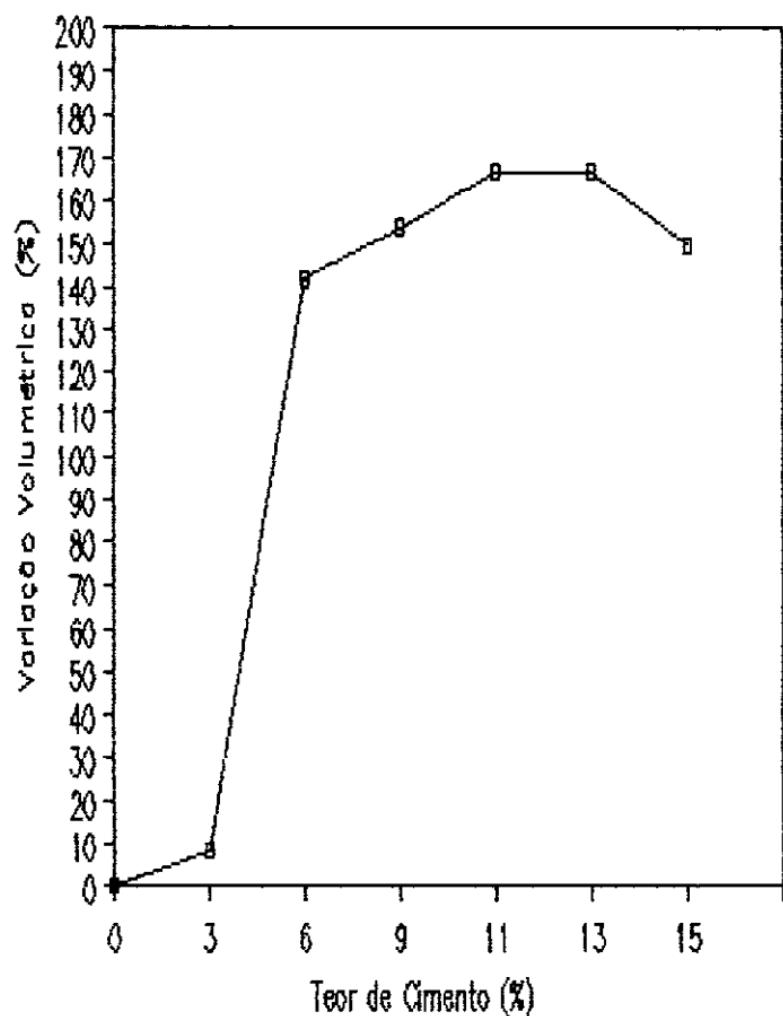


Fig. IV-15 – VSMA (lab.A)

Tabela IV-16 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	24	24	24	25	25	25	0
3	27	27	26	26	26	26	8
6	36	50	56	56	54	53	124
9	48	67	69	66	65	63	176
11	51	69	66	66	65	65	176
13	52	69	66	66	65	64	176
15	50	66	64	63	62	62	164

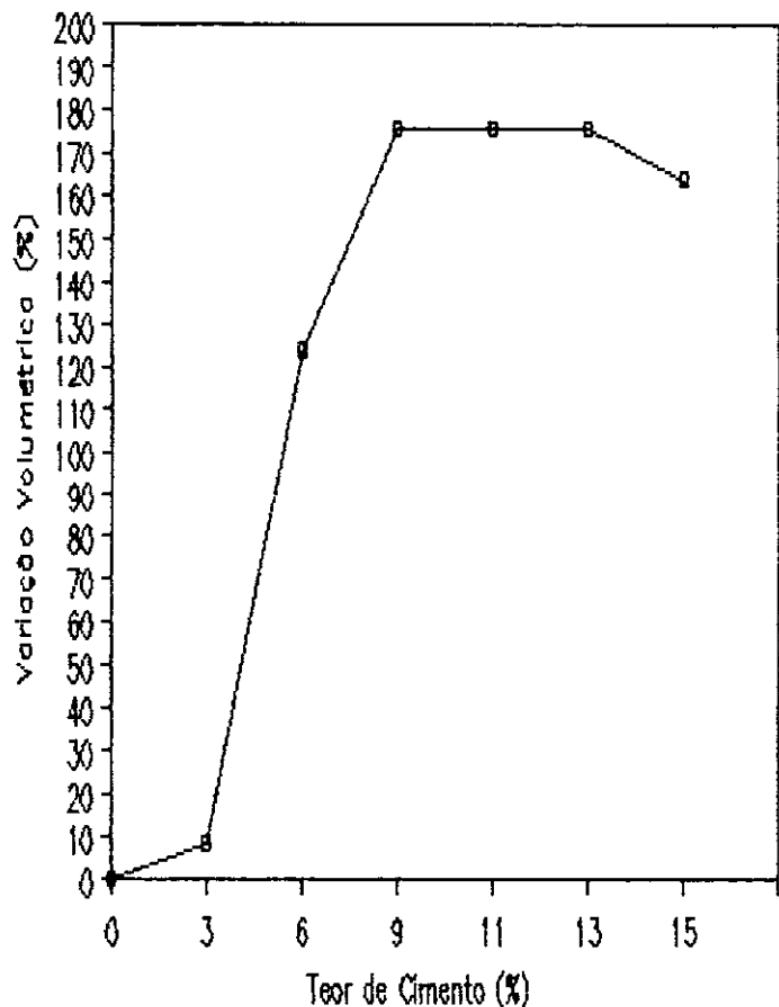


Fig. IV-16 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-17 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	22	22	22	22	22	0
3	26	28	30	30	30	30	30
6	34	47	56	57	57	56	148
9	39	54	58	57	57	56	152
11	40	55	61	59	58	57	165
13	39	52	62	60	60	58	170
15	39	50	54	52	52	52	135

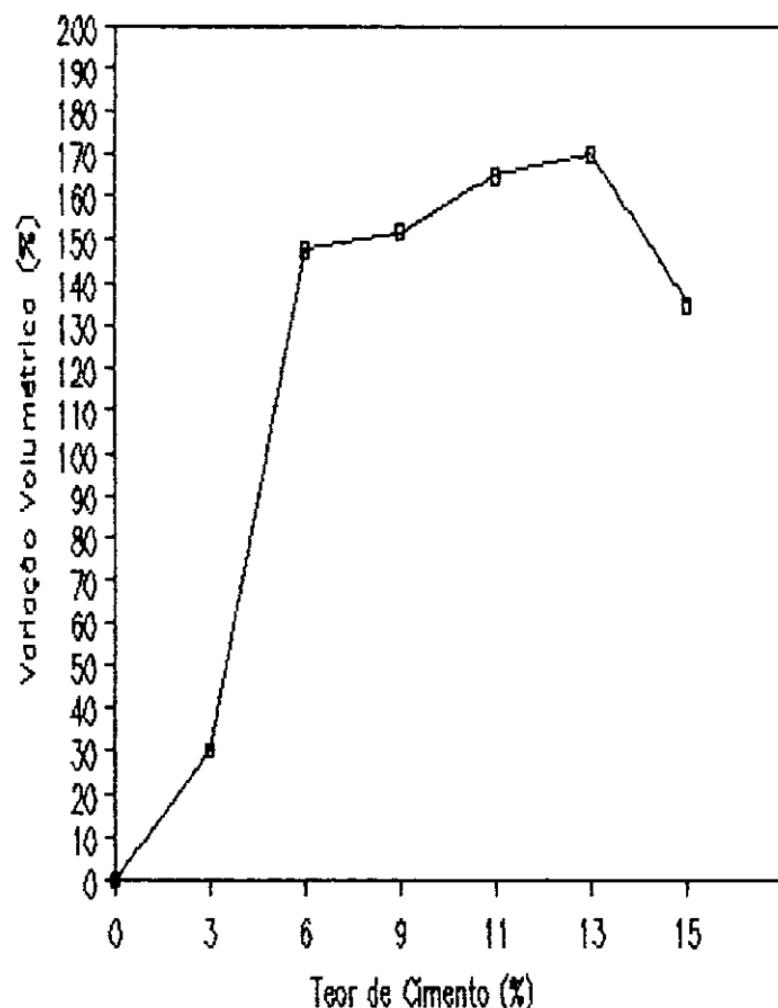


Fig. IV-17 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-18 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	22	22	22	22	0
3	28	30	31	32	32	32	46
6	33	46	55	56	56	56	155
9	40	56	58	58	58	57	164
11	40	54	59	58	58	57	168
13	40	54	58	57	56	56	164
15	40	54	54	53	53	52	146

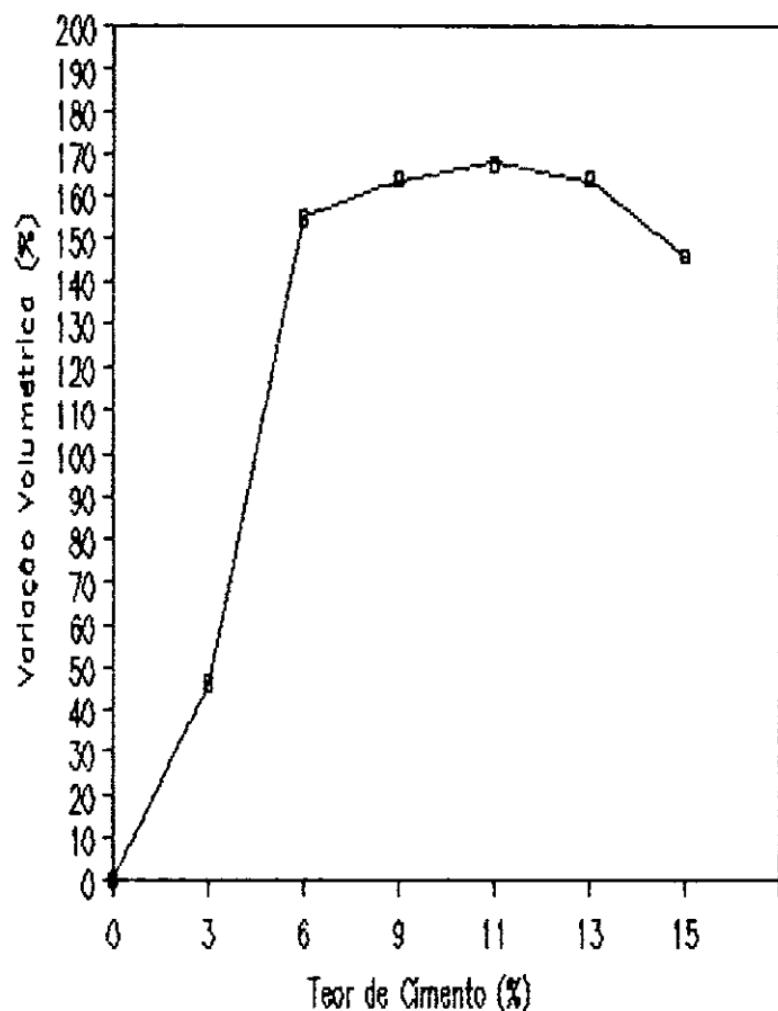


Fig. IV-18 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-19 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	22	22	22	22	0
3	28	30	31	31	32	32	46
6	33	47	56	58	58	57	164
9	38	52	59	57	57	56	168
11	40	56	60	59	58	58	173
13	39	52	56	55	55	54	155
15	38	55	58	56	56	56	142

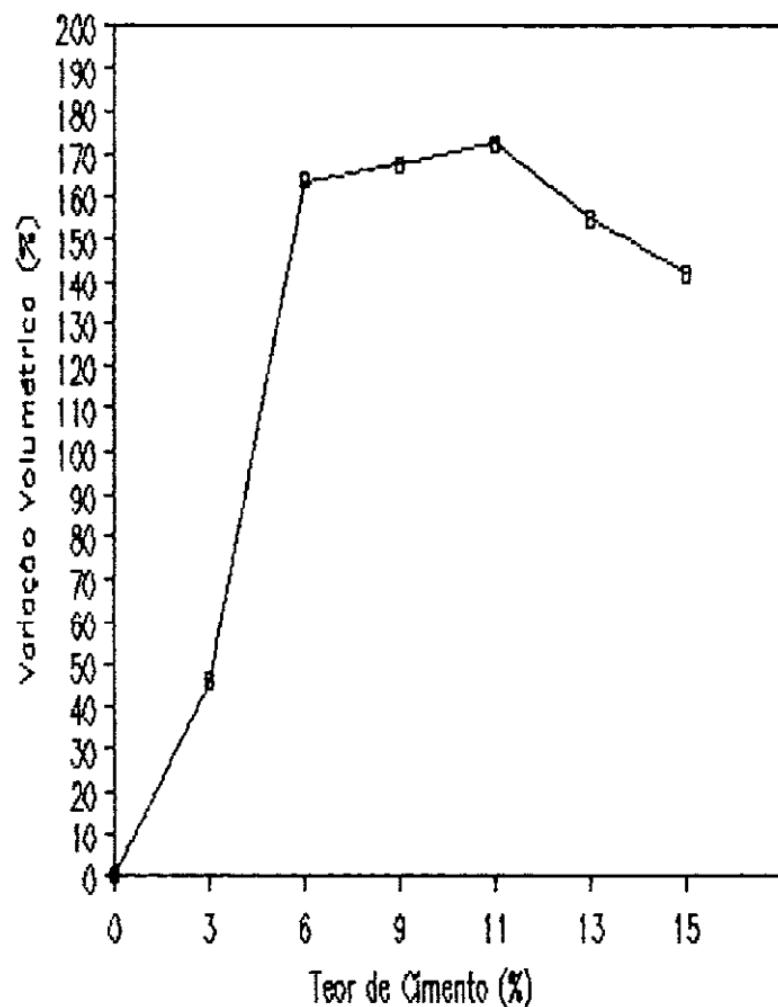


Fig. IV-19 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-20 - VSMA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	22	22	22	22	0
3	26	29	31	32	32	32	46
6	31	44	54	57	58	56	164
9	39	54	62	60	60	60	182
11	38	52	60	58	58	57	173
13	38	52	60	58	58	57	173
15	38	51	55	54	54	52	150

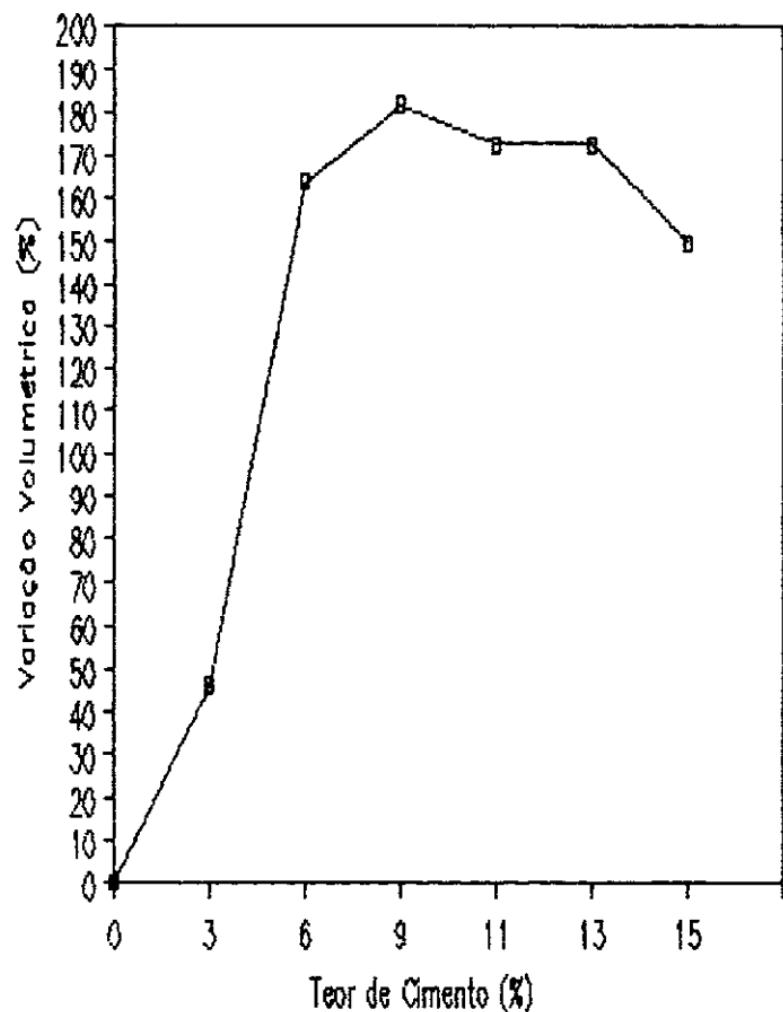


Fig. IV-20 - VSMA (lab.A)

Tabela IV-21 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	29	29	30	30	30	30	0
3	38	46	48	47	46	45	60
5	49	62	61	61	60	60	107
7	54	61	62	61	61	61	107
9	51	57	58	57	58	58	93
11	52	58	58	58	59	59	97
13	50	57	56	57	58	58	93

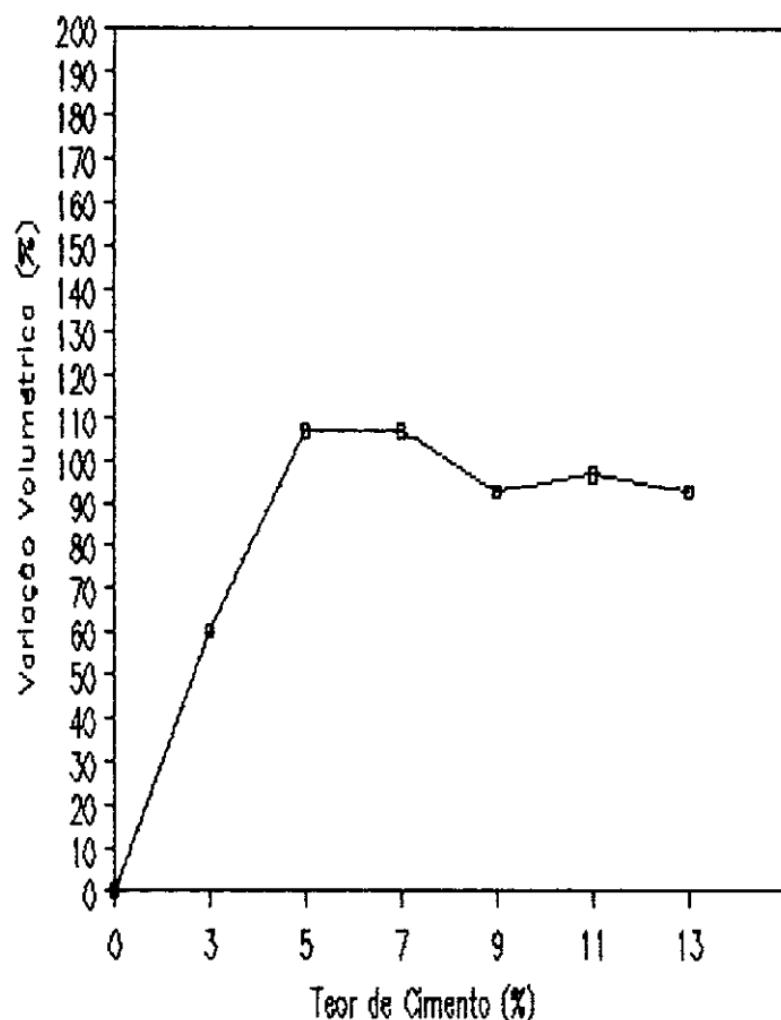


Fig. IV-21 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-22 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	30	30	31	31	31	0
3	38	47	49	48	47	46	58
5	49	58	58	57	56	56	87
7	54	60	61	59	59	60	97
9	53	56	56	57	57	57	84
11	55	58	58	58	59	60	94
13	54	60	60	60	60	60	94

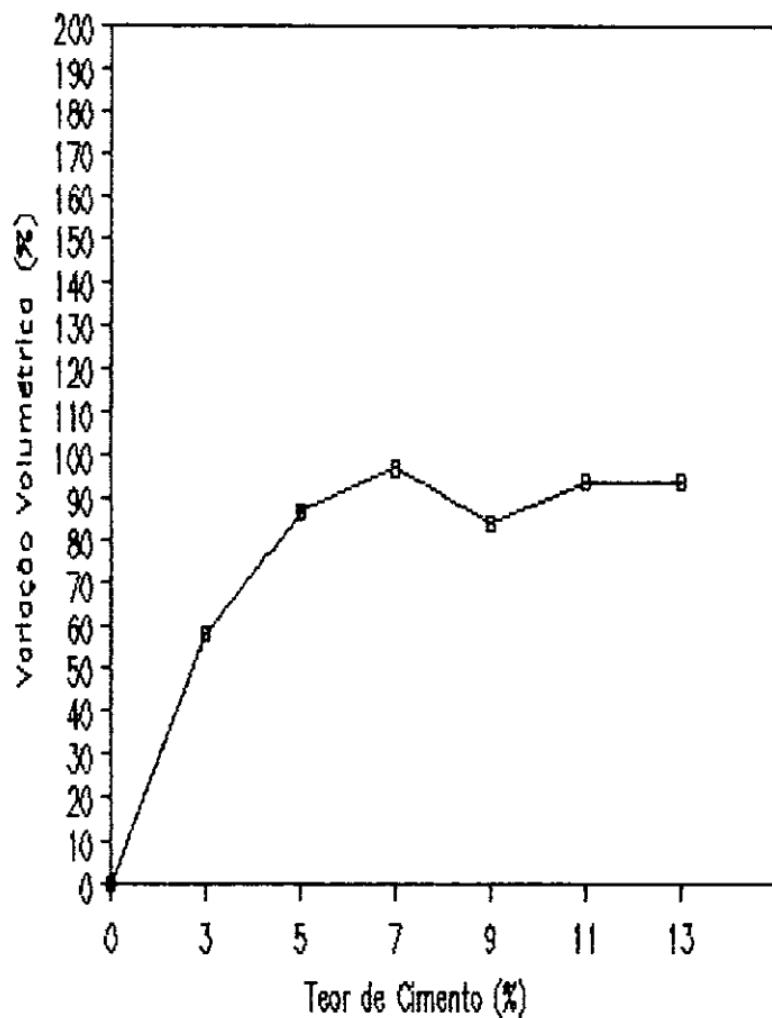


Fig. IV-22 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-23 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	30	30	30	30	30	0
3	36	44	46	46	45	44	53
5	47	60	58	57	58	56	100
7	54	60	60	60	60	59	100
9	53	60	60	60	61	60	103
11	57	59	60	60	61	61	103
13	56	64	63	63	63	63	113

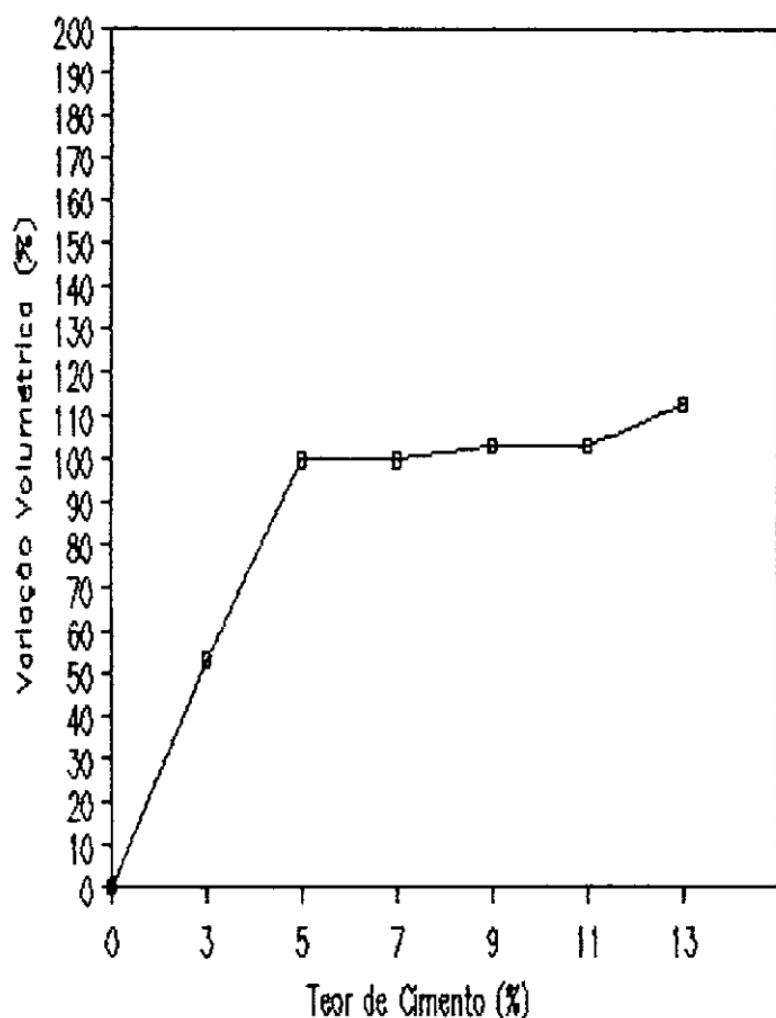


Fig. IV-23 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-24 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	31	32	32	32	32	0
3	39	48	49	48	48	47	53
5	50	63	62	60	60	57	97
7	56	64	62	62	61	62	100
9	54	62	61	61	60	60	94
11	57	61	62	62	62	62	94
13	56	65	64	64	64	64	103

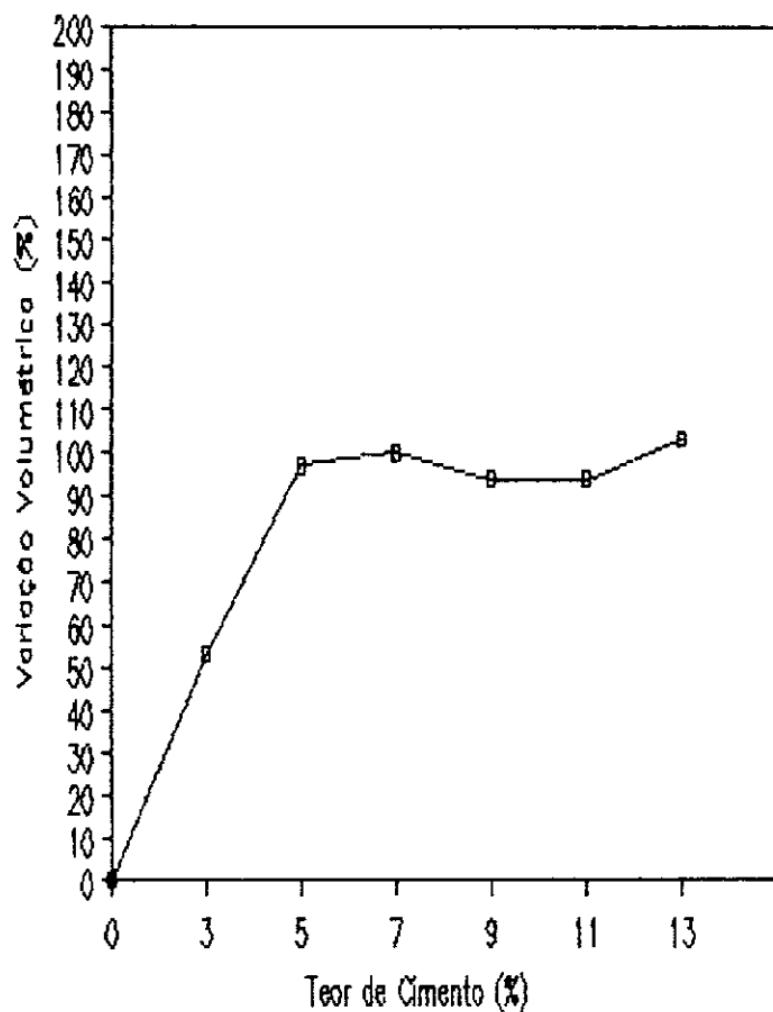


Fig. IV-24 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-25 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	30	31	31	32	32	0
3	38	46	47	46	46	44	47
5	51	64	62	61	60	59	100
7	55	64	62	62	62	61	100
9	52	62	60	60	61	61	94
11	52	59	59	59	59	59	84
13	52	62	60	60	60	61	94

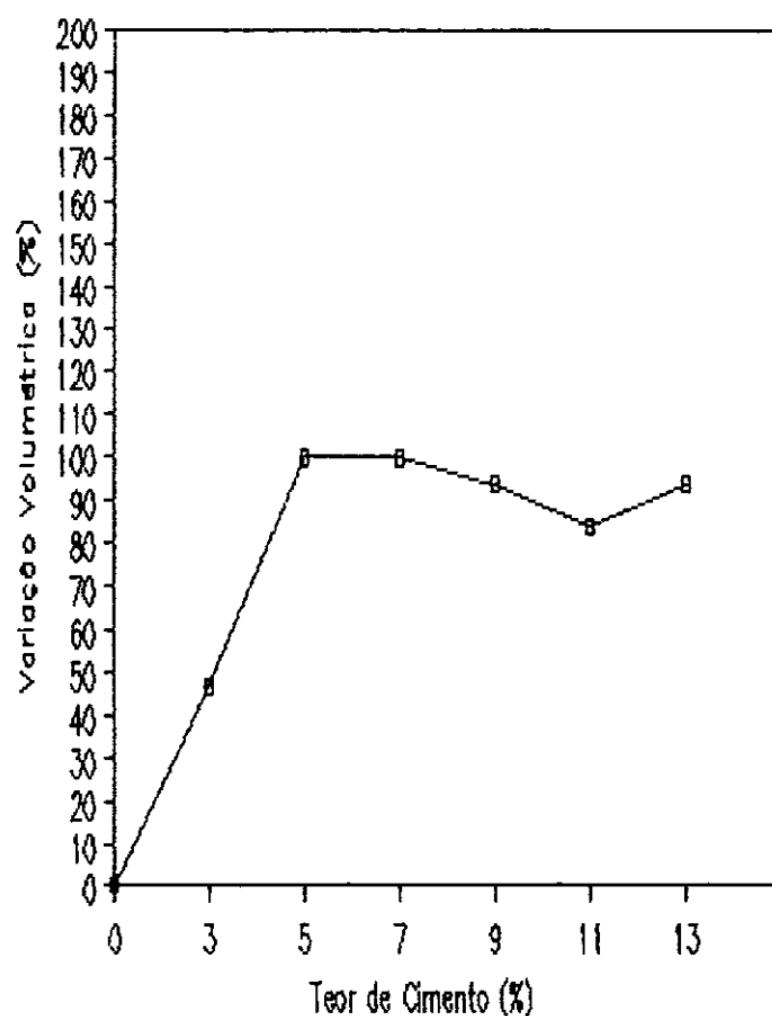


Fig. IV-25 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-26 – EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	31	32	32	32	32	0
3	40	46	48	47	46	46	50
5	48	60	60	59	58	58	88
7	56	61	61	61	60	62	91
9	52	60	60	60	60	60	88
11	53	59	59	60	60	61	88
13	52	58	58	60	60	61	88

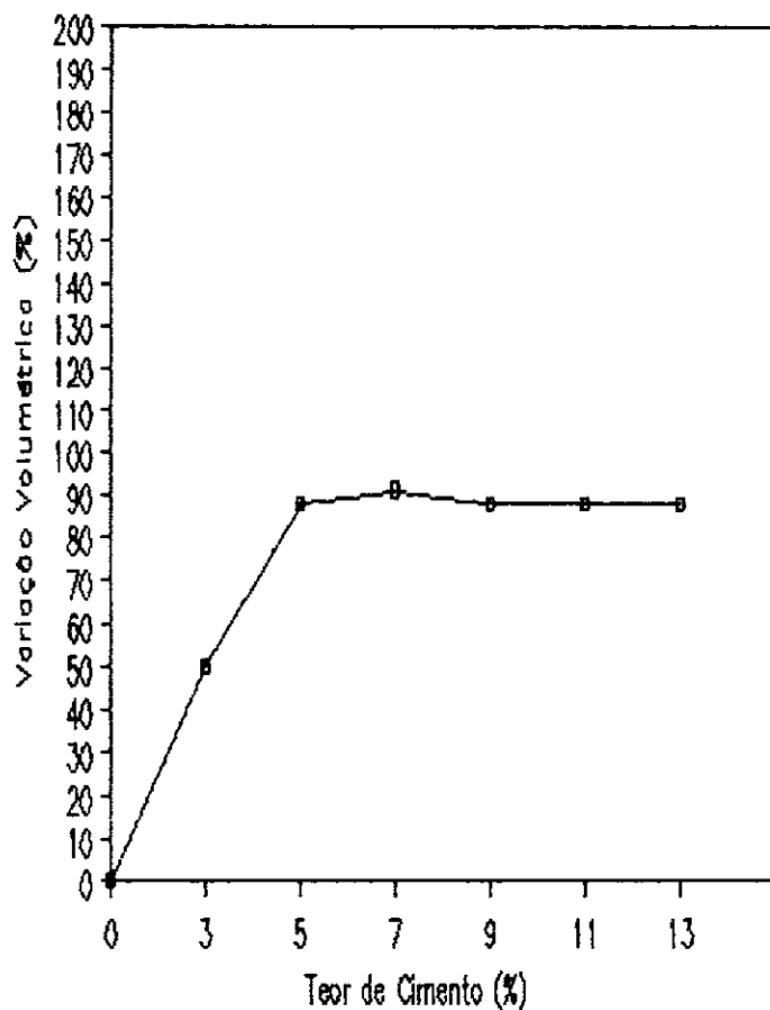


Fig. IV-26 – EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-27 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	28	29	29	30	30	30	0
3	36	45	47	47	46	45	57
5	48	60	58	58	58	56	100
7	54	62	61	61	62	61	107
9	52	60	60	59	62	60	107
11	52	64	62	62	62	62	113
13	50	58	58	58	59	59	97

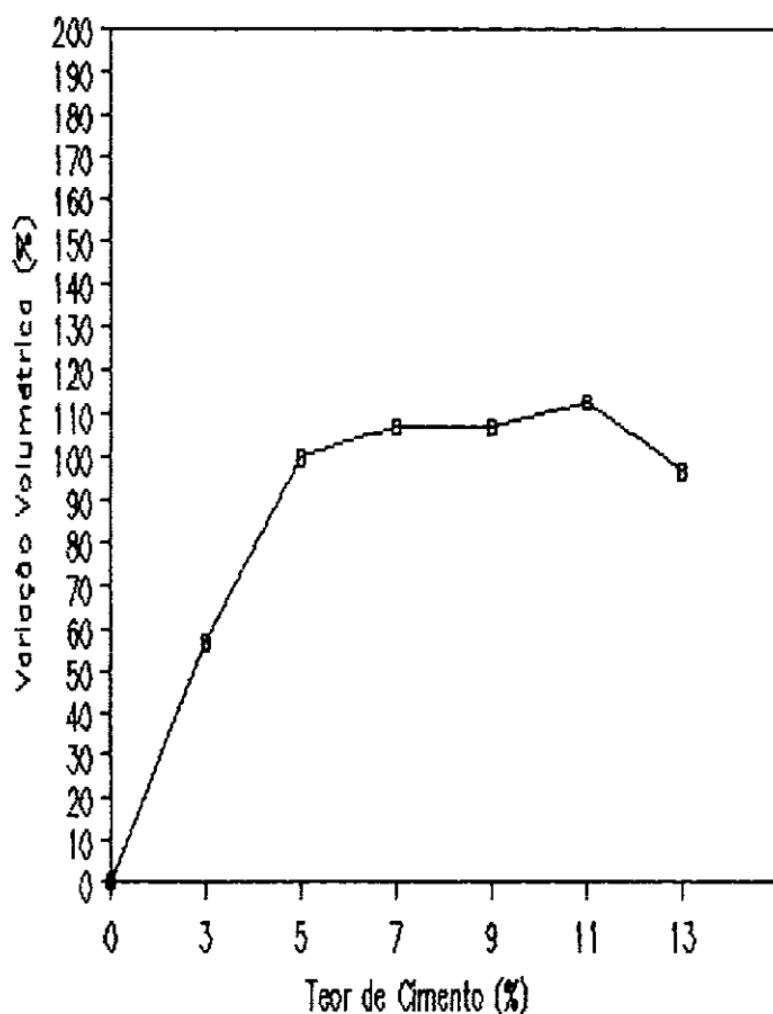


Fig. IV-27 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-28 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	31	31	32	32	32	32	0
3	36	46	46	47	46	46	47
5	49	63	62	61	61	60	97
7	54	65	64	63	63	63	103
9	52	60	59	60	60	60	88
11	54	62	61	62	62	63	97
13	52	60	59	59	60	60	88

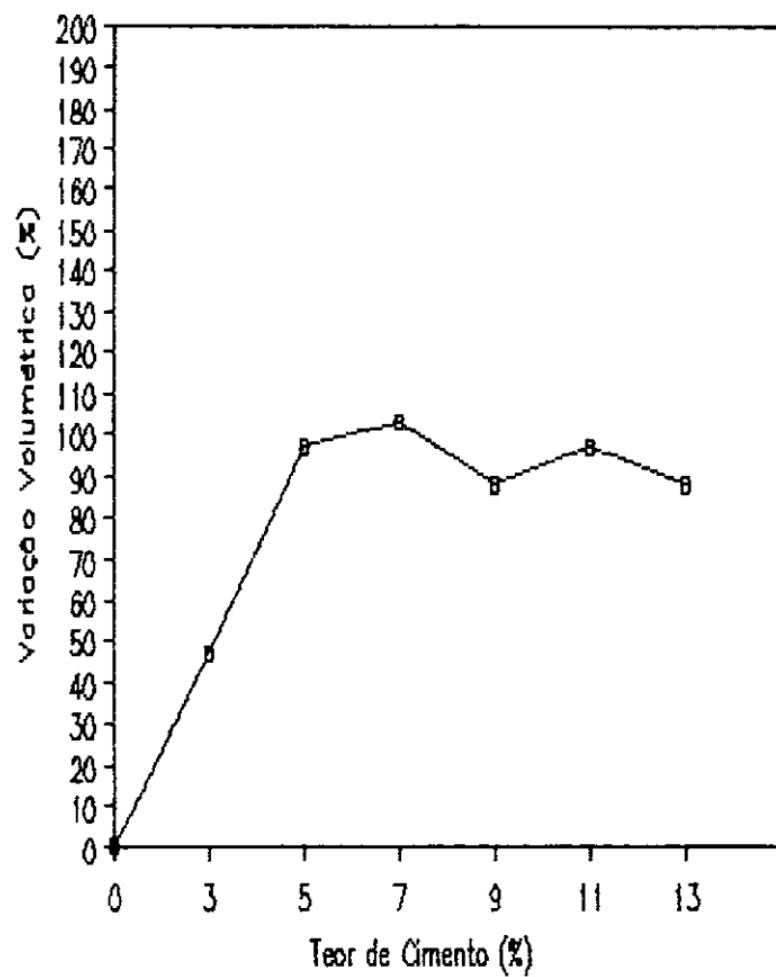


Fig. IV-28 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-29 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	30	30	31	32	32	0
3	37	46	48	47	46	45	50
5	53	62	61	60	60	60	94
7	54	60	60	60	59	59	88
9	52	55	56	56	56	56	75
11	54	58	58	58	58	59	84
13	54	56	57	58	58	58	81

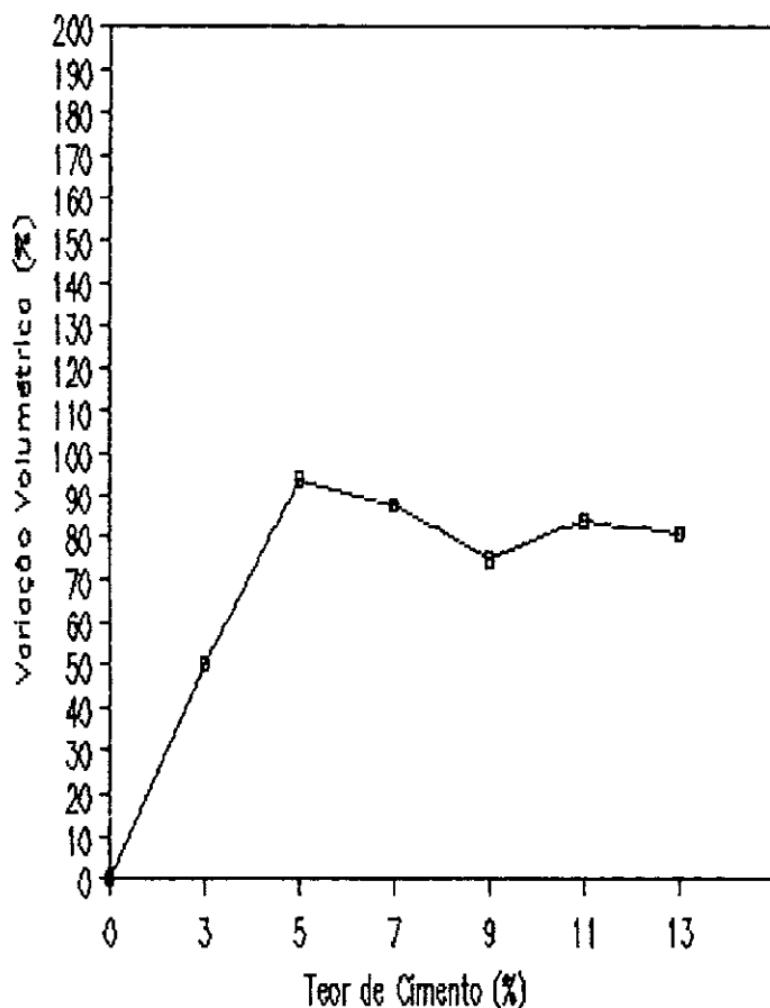


Fig. IV-29 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-30 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	31	32	32	32	32	0
3	40	48	50	49	49	48	56
6	63	61	61	60	60	59	91
7	56	58	60	60	60	59	88
9	50	54	54	55	56	55	75
11	52	55	56	56	57	57	78
13	50	58	57	58	58	58	81

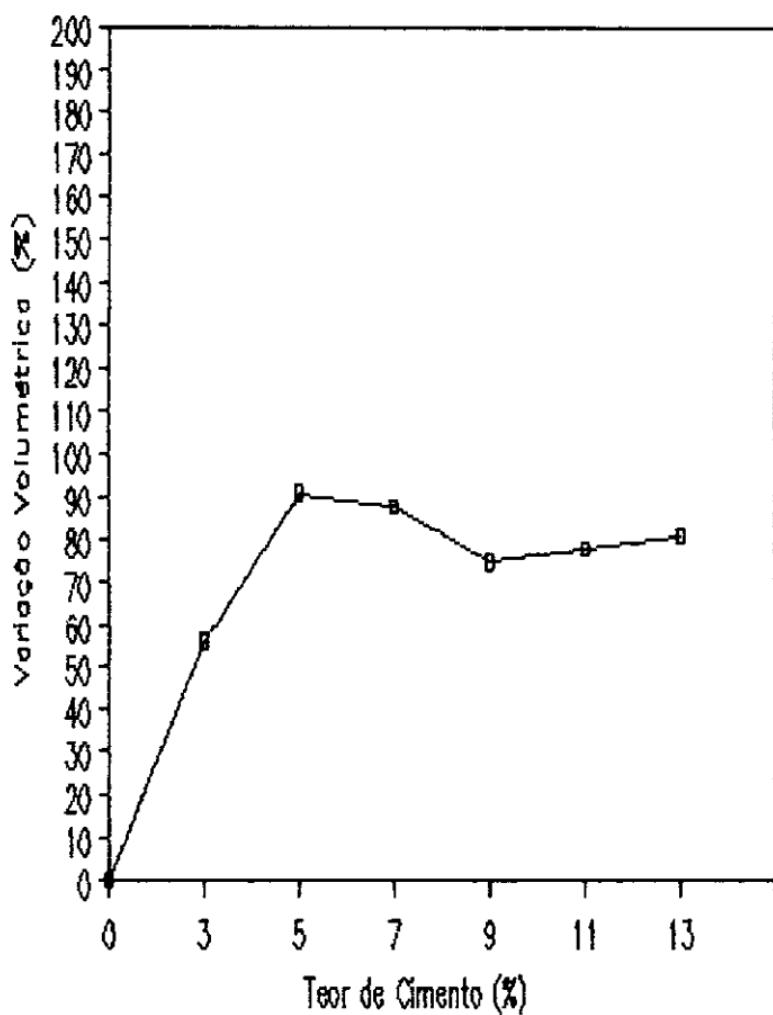


Fig. IV-30 - EUCLIDELANDIA (lab. A)

Tabela IV-31 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	
0	21	21	21	22	22	22	0
3	36	48	49	50	49	48	127
5	48	68	69	67	65	65	214
7	55	76	71	71	71	71	246
9	59	77	72	73	73	73	250
11	54	71	68	68	68	68	223
13	55	65	63	63	63	63	196

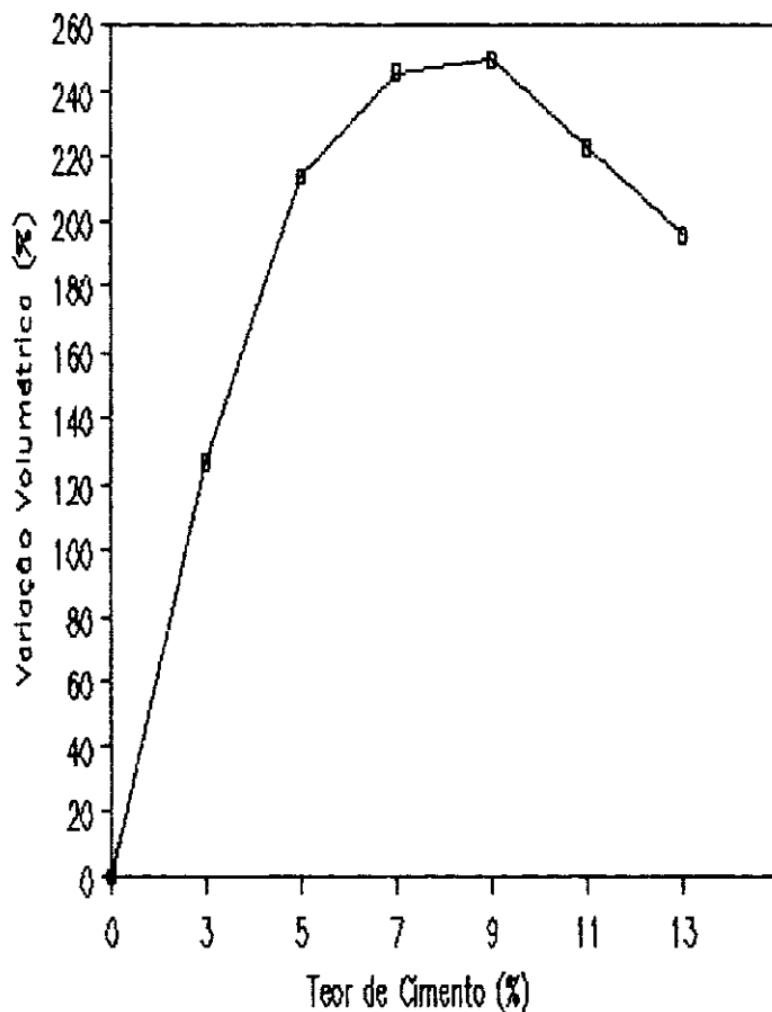


Fig. IV-31 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-32 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	21	22	22	23	23	23	0
3	40	52	53	52	52	52	130
5	49	66	61	61	60	59	187
7	53	69	65	65	66	55	200
9	54	62	60	60	61	60	170
11	50	69	64	64	65	65	200
13	51	66	60	61	61	61	187

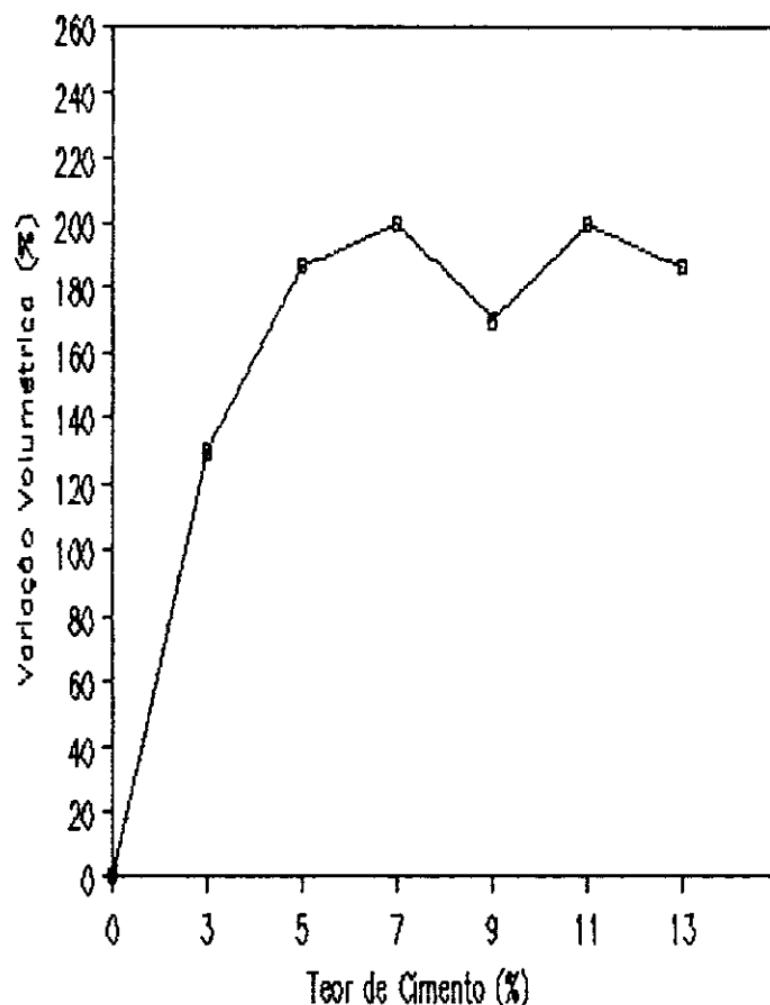


Fig. IV-32 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-33 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	24	24	24	24	0
3	39	52	54	54	53	52	125
5	45	67	67	66	66	63	179
7	55	75	72	71	72	71	213
9	52	72	68	69	70	69	200
11	50	70	66	66	66	66	192
13	50	70	65	64	64	64	192

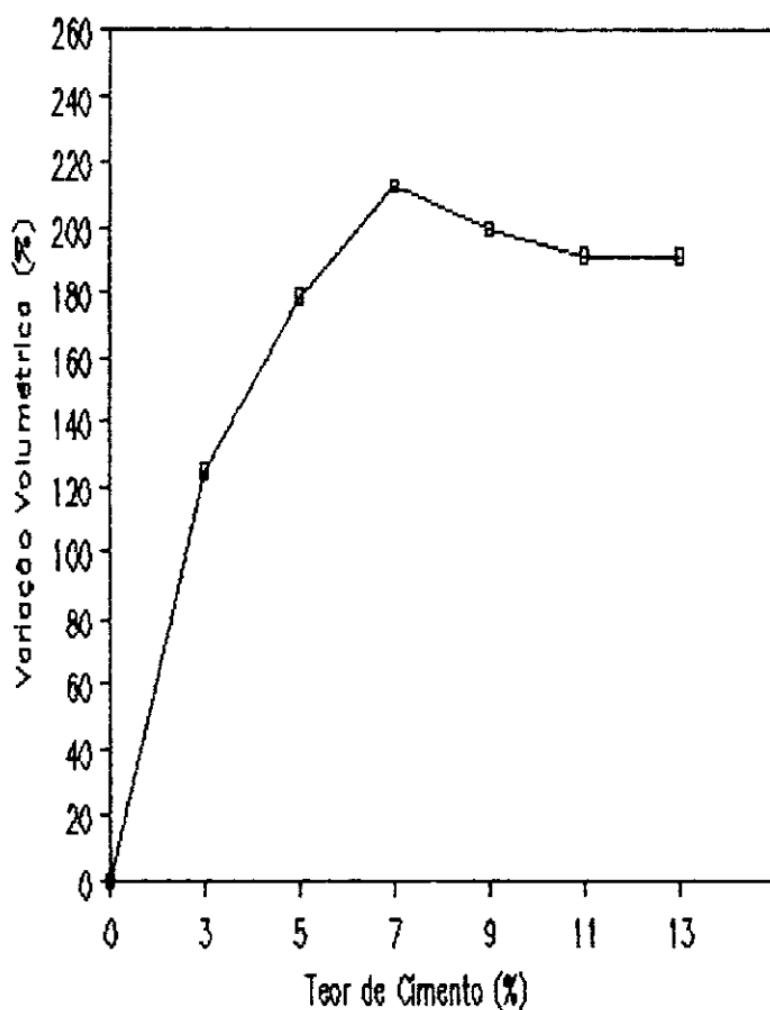


Fig. IV-33 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-34 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	23	24	24	24	0
3	39	53	56	56	54	54	133
6	48	67	69	61	61	60	179
7	53	71	67	66	65	65	196
9	52	72	69	69	68	69	200
11	52	69	67	67	67	66	188
13	50	65	59	60	60	60	171

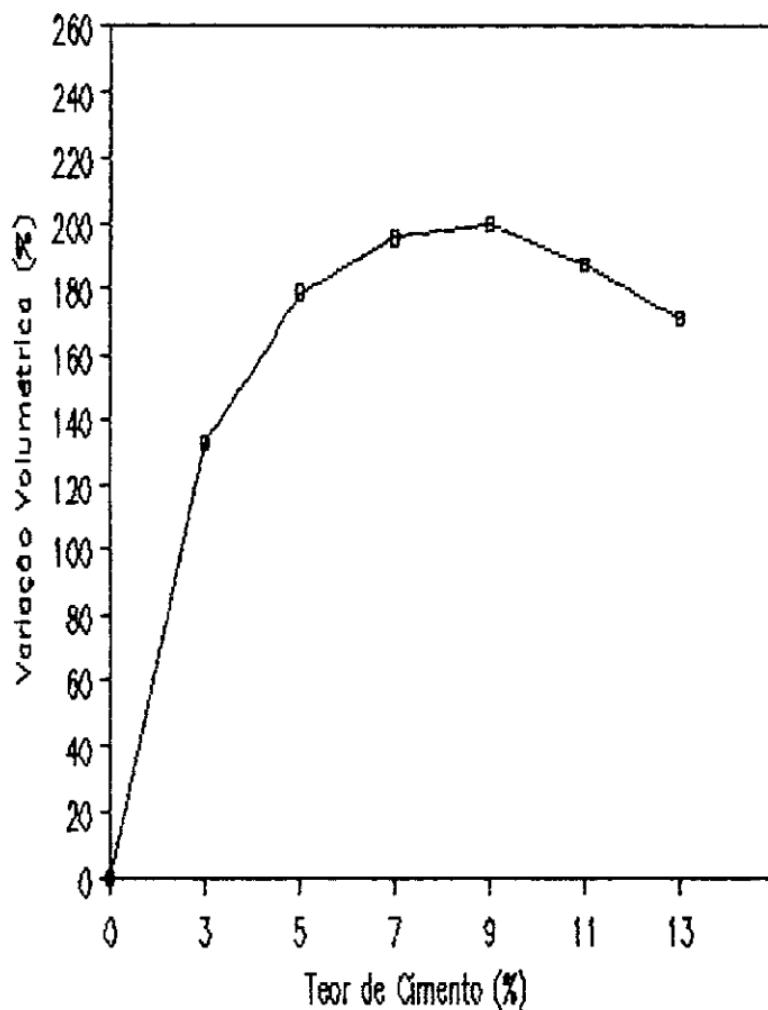


Fig. IV-34 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-35 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	23	24	24	24	0
3	40	51	54	54	54	53	125
5	46	66	62	62	62	61	175
7	53	70	66	67	66	66	192
9	54	71	69	69	69	69	196
11	50	67	63	63	69	64	179
13	51	67	61	62	61	61	179

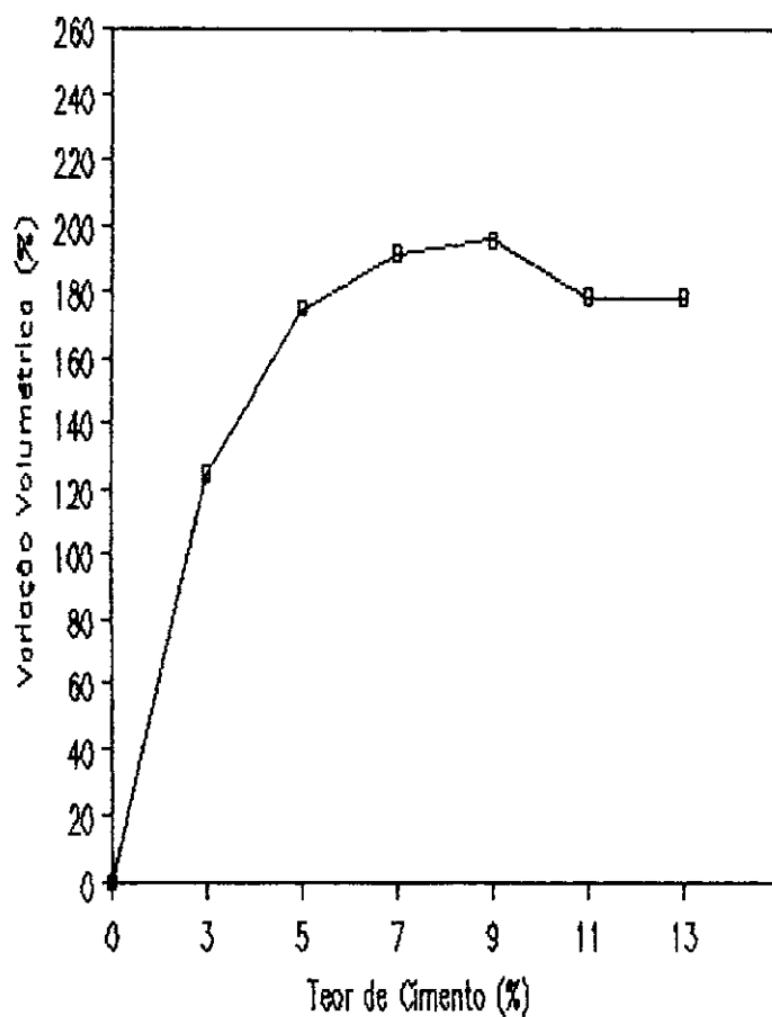


Fig. IV-35 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-36 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	23	23	23	23	0
3	40	54	56	56	55	54	144
6	60	67	66	69	63	61	191
7	54	70	68	67	67	67	204
9	54	69	66	67	68	68	200
11	50	62	59	59	59	60	170
13	48	57	55	55	55	55	148

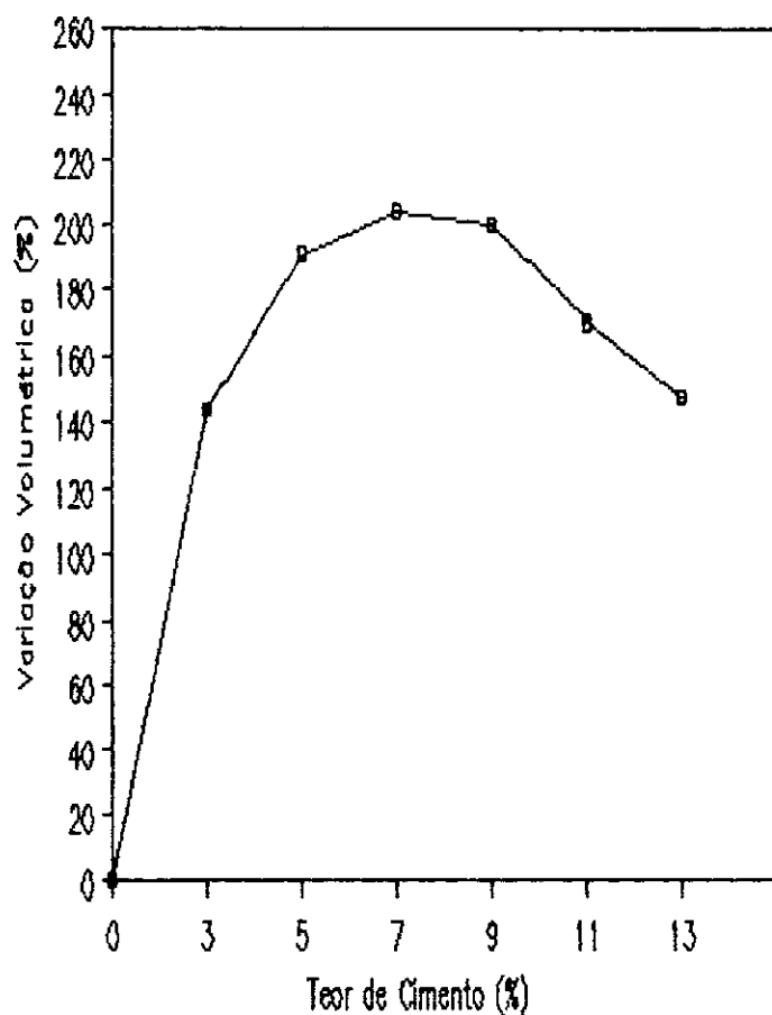


Fig. IV-36 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-37 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	23	24	24	24	0
3	38	51	54	54	54	52	125
5	46	66	63	62	60	60	175
7	52	68	65	65	67	65	183
9	53	70	65	66	70	69	192
11	52	67	62	62	65	64	179
13	45	61	57	57	57	57	154

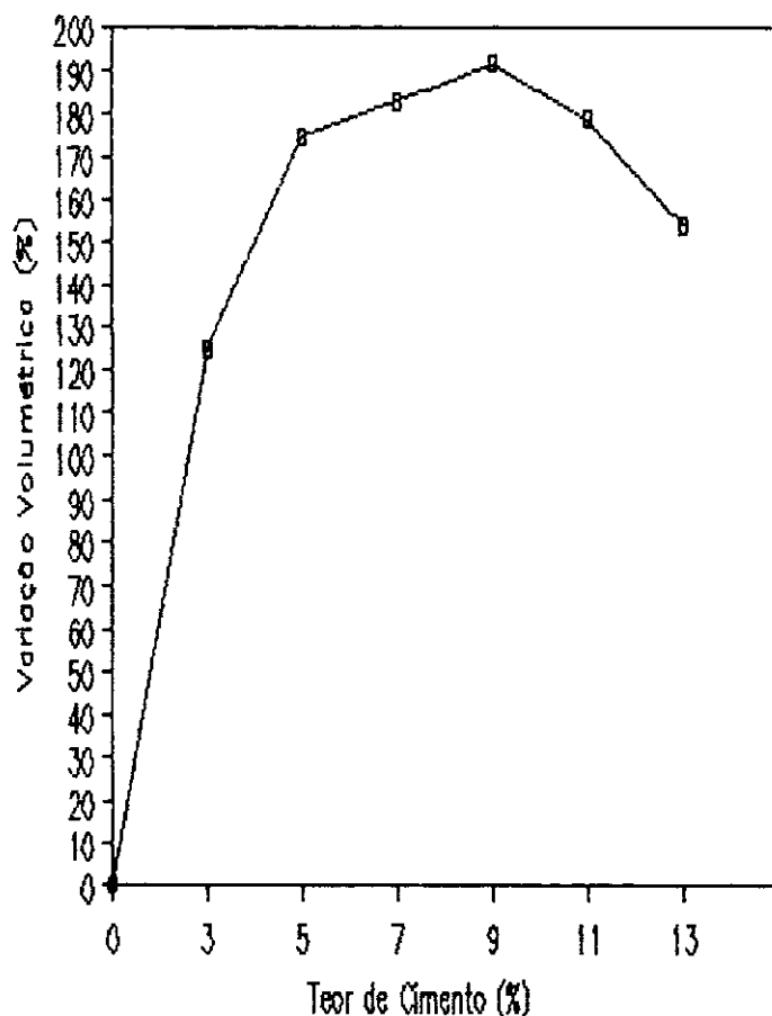


Fig. IV-37 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-38 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	23	23	23	23	0
3	36	50	54	54	54	53	135
5	47	70	68	65	64	63	204
7	54	76	71	70	69	70	231
9	52	72	67	67	69	69	213
11	52	72	66	67	67	66	213
13	49	67	62	62	62	62	191

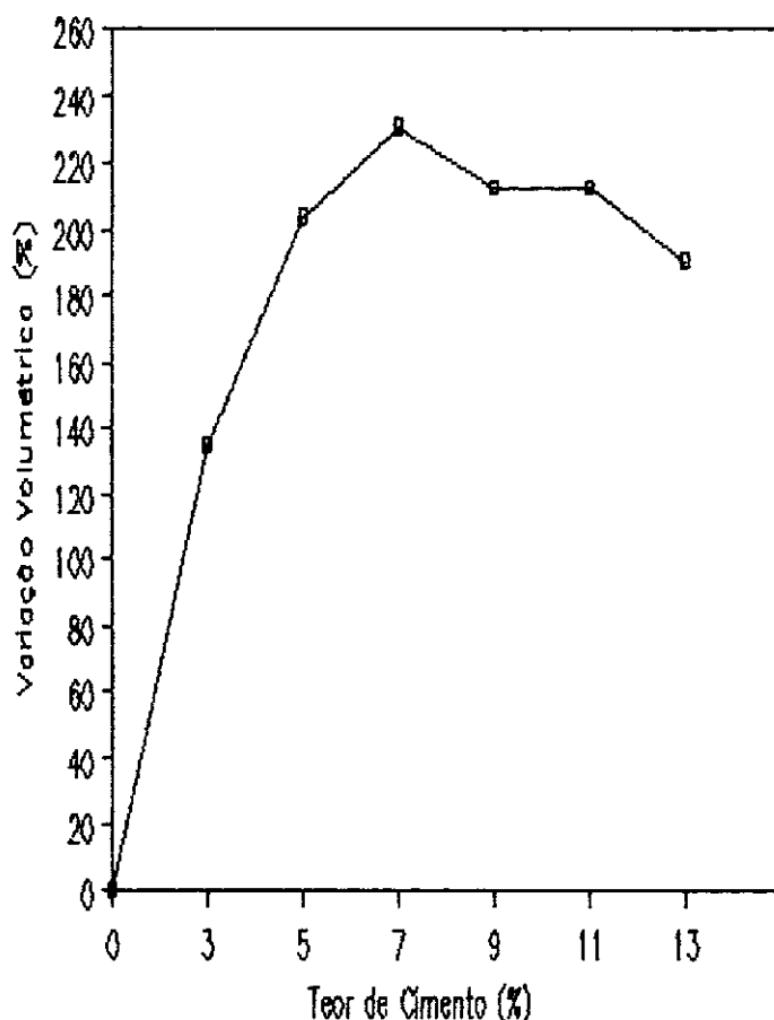


Fig. IV-38 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-39 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	24	24	24	24	24	0
3	40	52	55	55	54	54	129
6	47	69	67	67	66	63	188
7	54	72	67	68	67	67	200
9	54	68	64	65	65	65	183
11	50	66	61	62	62	62	175
13	48	56	54	54	54	54	133

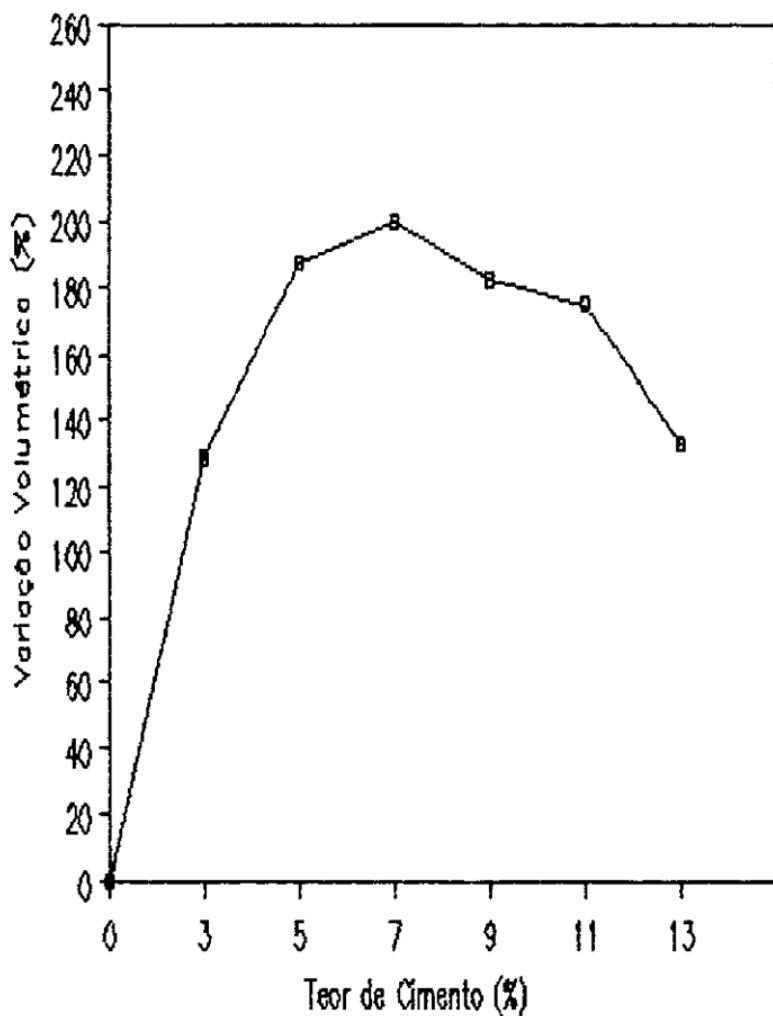


Fig. IV-39 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-40 - VISTA CHINESA (lab. A)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	23	24	24	24	0
3	38	50	53	53	52	52	121
5	47	67	66	65	63	62	179
7	53	65	63	64	64	64	171
9	54	65	62	61	64	64	171
11	51	65	61	61	62	62	171
13	50	66	62	62	62	62	175

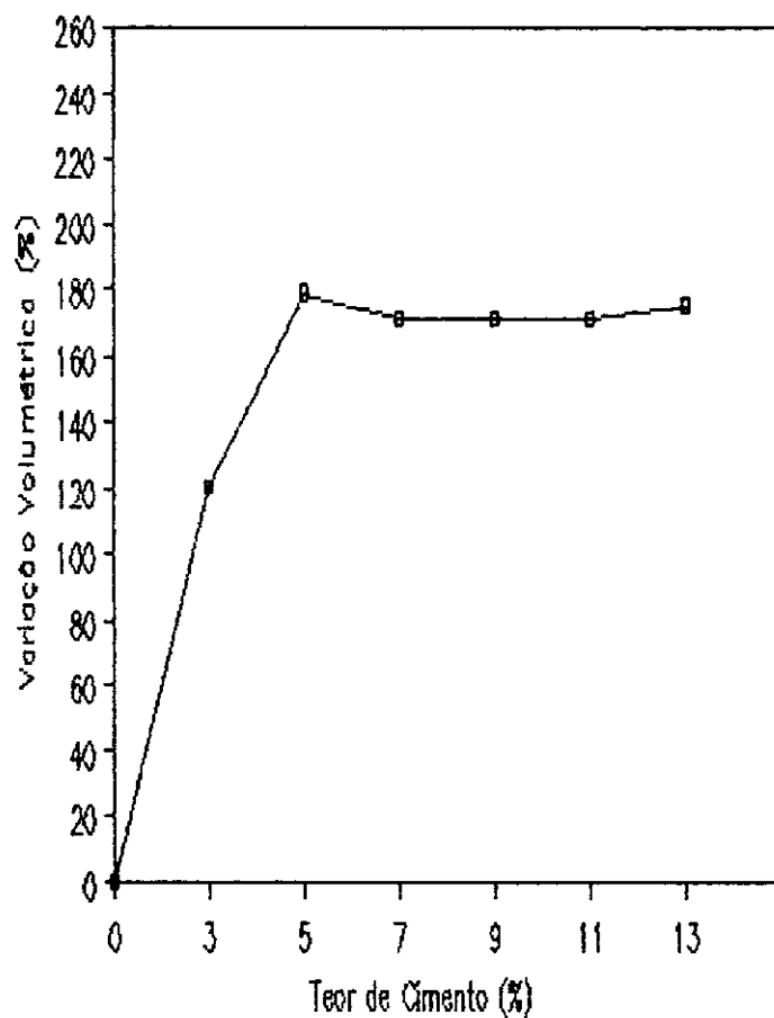


Fig. IV-40 - VISTA CHINESA (lab. A)

Tabela IV-41 - CAMBUÍ (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	22	23	23	23	0
2	36	40	31	40	39	39	74
4	43	50	51	50	50	49	122
6	37	41	40	40	40	39	78
8	36	38	38	37	37	37	65
10	34	37	37	37	37	37	61
12	35	37	37	38	37	38	65

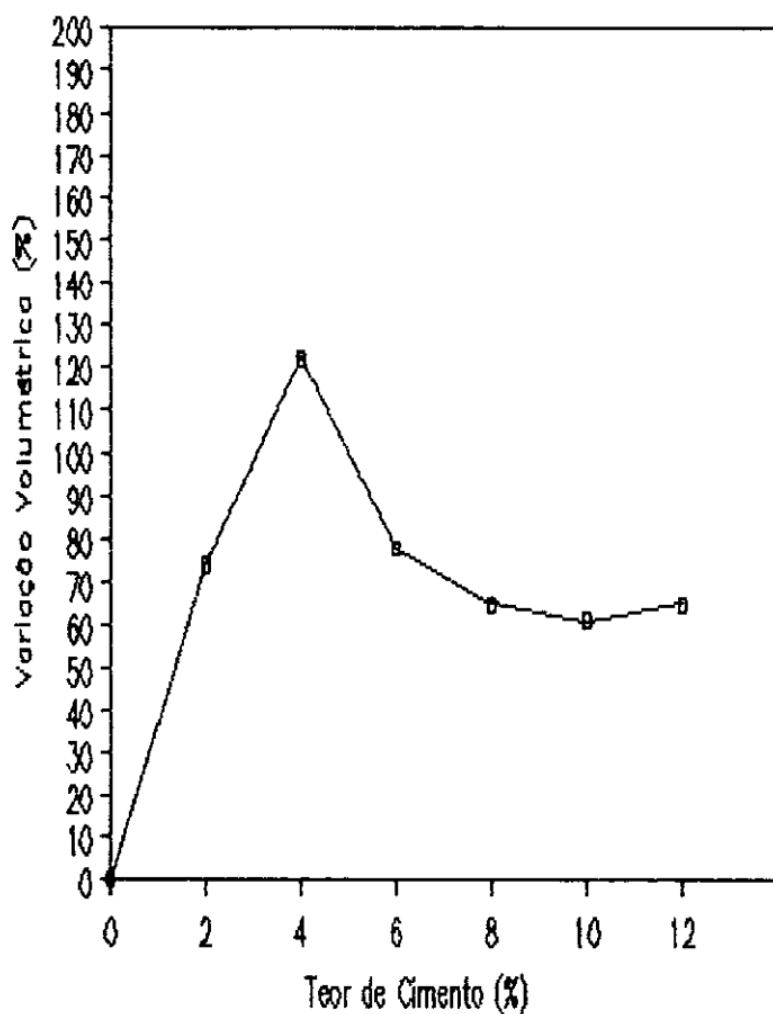


Fig. IV-41 - CAMBUÍ (lab. B)

Tabela IV-42 - CAMBUÍ (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	
0	21	22	22	22	23	23	0
2	39	46	44	44	42	41	100
4	37	44	46	47	51	51	122
6	39	44	45	46	50	50	117
8	40	45	44	42	41	41	96
10	38	42	42	44	47	47	104
12	37	43	41	41	41	40	87

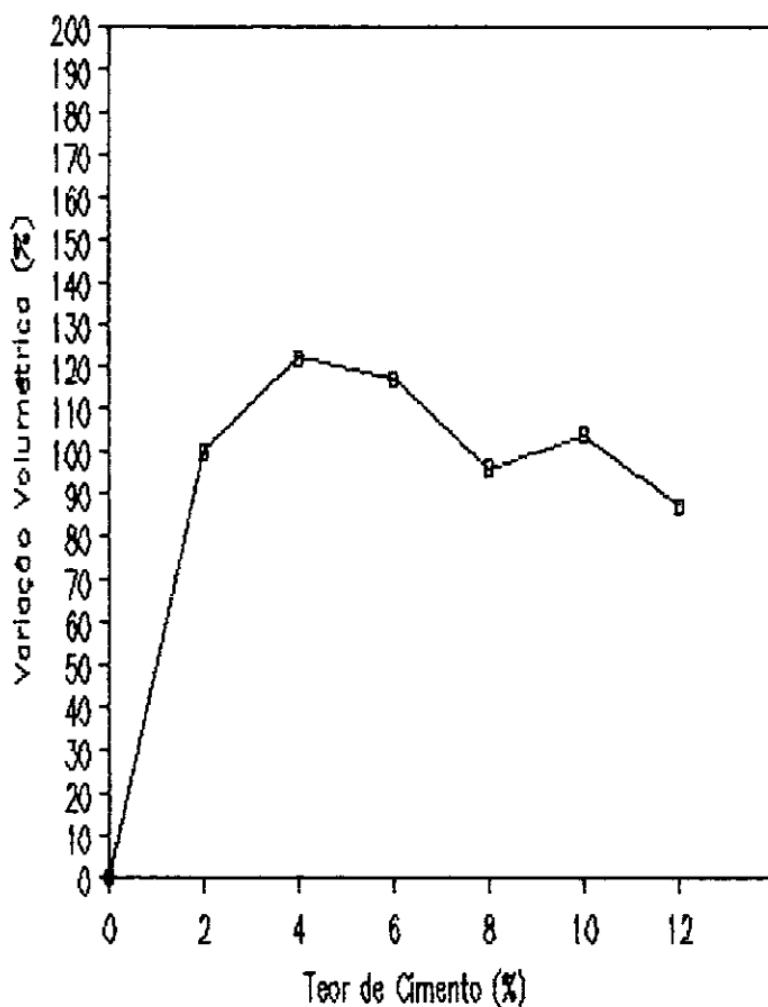


Fig. IV-42 - CAMBUÍ (lab. B)

Tabela IV-43 - CAMBUÍ (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	21	22	22	23	23	23	0
2	40	42	38	37	38	35	83
4	40	44	44	44	44	42	91
6	41	44	43	43	43	42	87
8	42	42	39	38	37	37	83
10	38	40	37	36	35	35	74
12	38	40	38	37	36	36	74

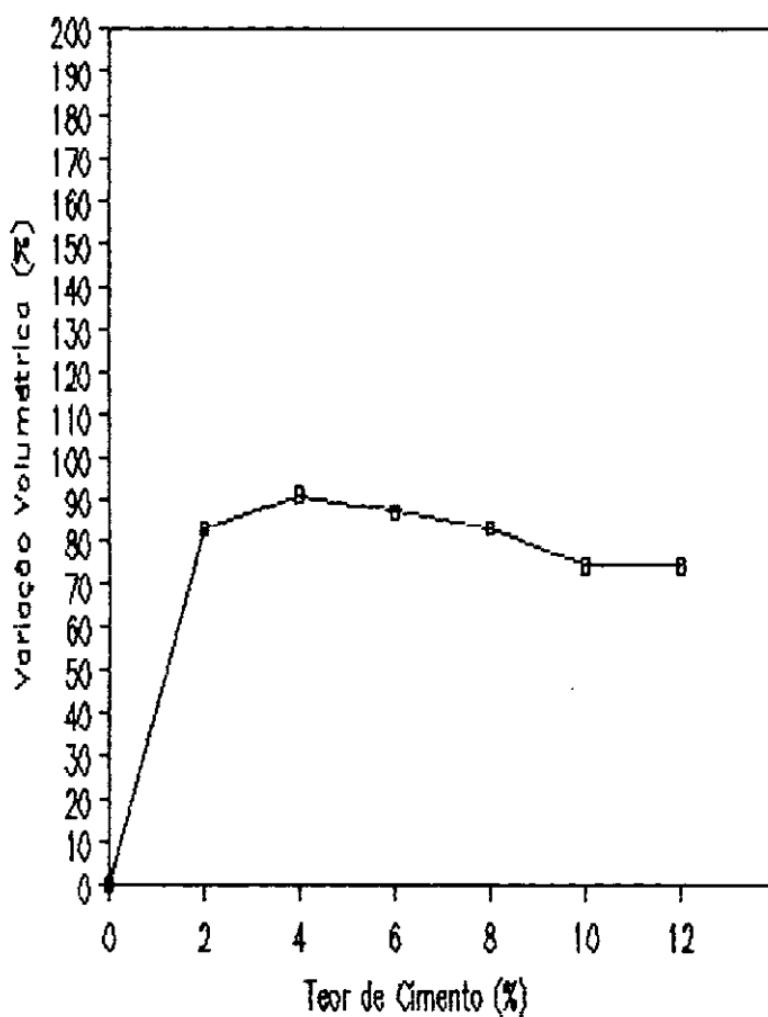


Fig. IV-43 - CAMBUÍ (lab. B)

Tabela IV-44 - VSMA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	21	22	21	22	22	22	0
3	29	32	32	32	32	32	46
6	31	40	45	46	46	46	109
9	36	50	54	52	52	51	146
11	38	52	54	53	52	51	146
13	38	52	54	53	52	51	146
15	40	55	55	54	54	53	150

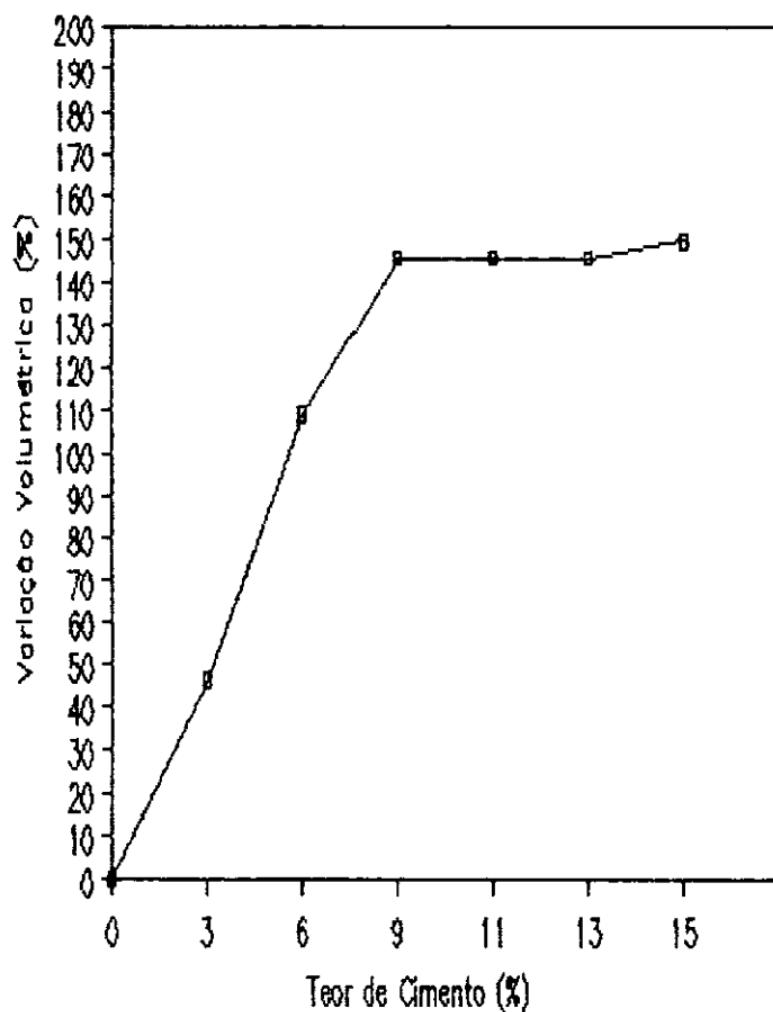


Fig. IV-44 - VSMA (lab.B)

Tabela IV-45 - VSMA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	21	21	21	21	0
3	26	28	29	29	30	46	43
6	30	40	45	46	46	46	119
9	36	48	55	54	54	53	162
11	36	49	54	52	52	51	157
13	34	46	53	51	51	49	152
15	32	46	52	50	50	49	148

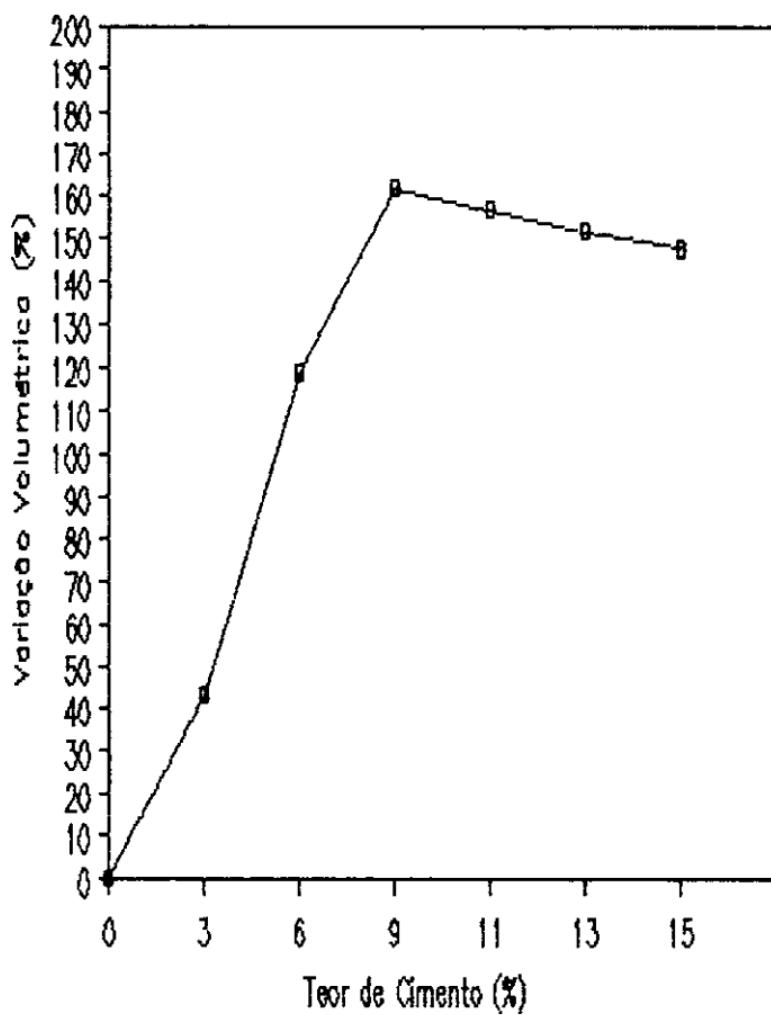


Fig. IV-45 - VSMA (lab.B)

Tabela IV-46 - VSMA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	24	24	24	24	24	24	0
3	26	26	25	25	25	24	8
6	33	42	46	47	46	46	96
9	37	51	54	54	53	52	125
11	40	56	58	57	56	56	142
13	39	52	53	54	53	52	125
15	42	54	54	54	53	53	125

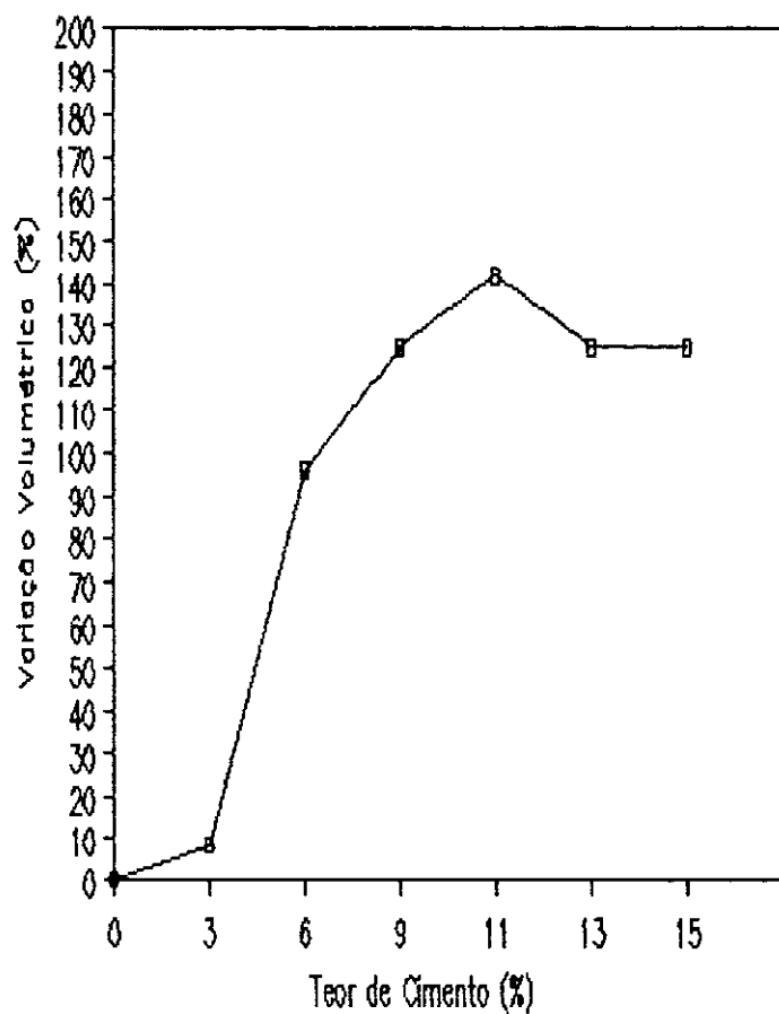


Fig. IV-46 - VSMA (lab. B)

Tabela IV-47 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	29	30	30	33	33	33	0
3	38	49	51	50	49	48	55
5	48	67	58	58	58	58	76
7	52	55	56	57	57	57	73
9	48	53	54	54	56	56	70
11	50	52	52	53	56	56	70
13	49	50	52	52	56	56	70

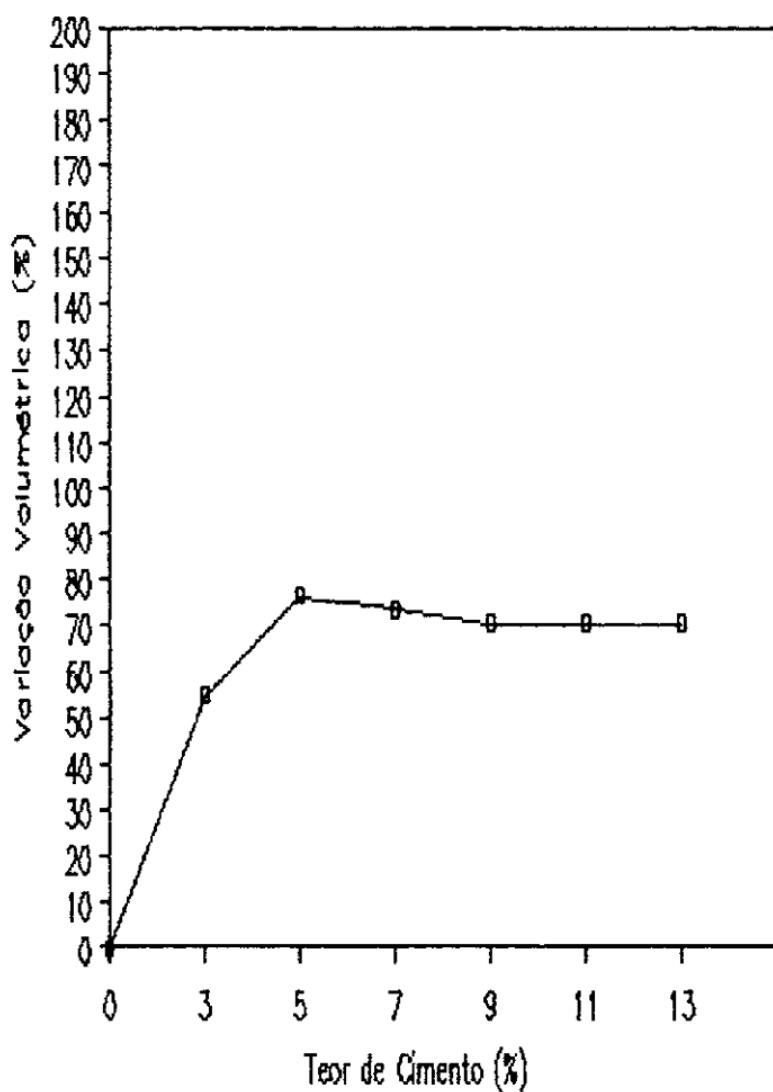


Fig. IV-47 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Tabela IV-48 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	31	32	32	33	33	33	0
3	38	44	46	45	44	43	39
5	48	56	56	56	58	56	76
7	54	59	58	59	61	60	85
9	54	56	57	57	60	60	82
11	54	56	56	56	59	58	79
13	56	56	57	56	59	59	79

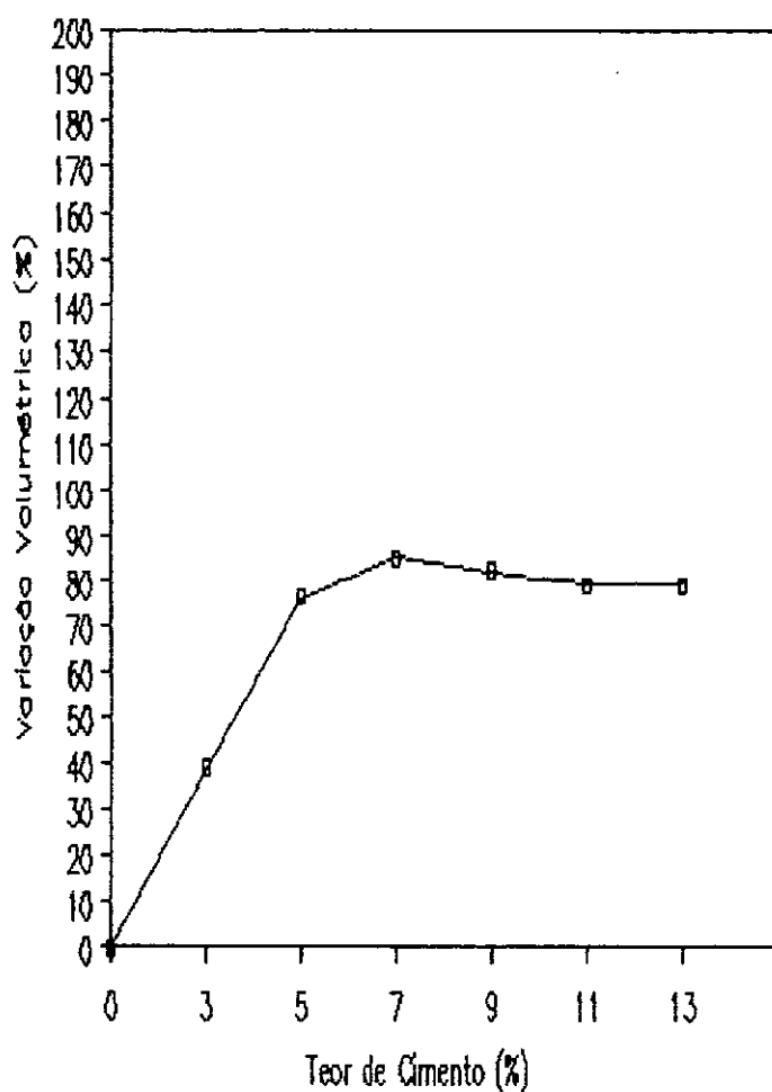


Fig. IV-48 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Tabela IV-49 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)							Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	
0	28	30	29	29	31	31	30	0
3	37	43	44	43	43	42	42	42
6	42	49	49	49	50	50	49	61
7	42	56	57	57	58	59	59	90
9	42	55	56	56	58	59	58	90
11	42	52	53	53	56	57	57	84
13	42	53	54	54	56	57	57	84

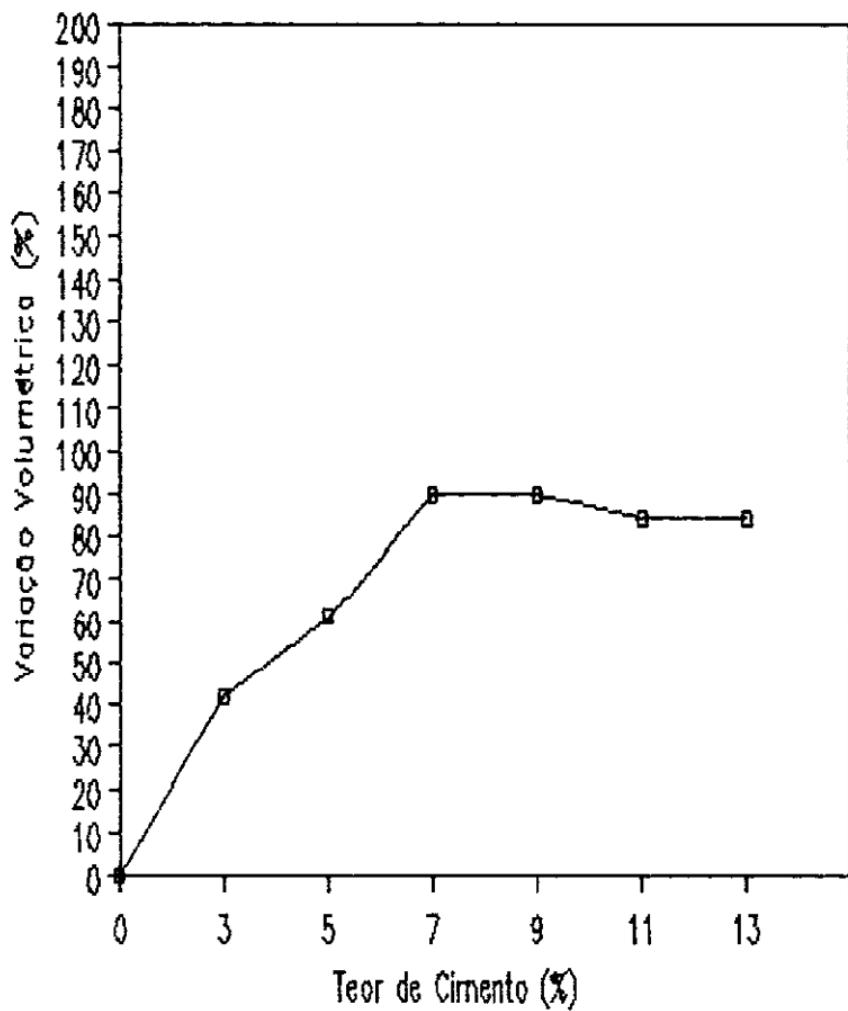


Fig. IV-49 - EUCLIDELANDIA (lab. B)

Tabela IV-50 - VISTA CHINESA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	23	25	25	26	26	26	0
3	38	46	46	45	45	44	77
5	48	58	56	55	54	54	123
7	49	58	56	56	56	56	123
9	49	60	56	57	61	60	135
11	48	56	54	54	56	56	115
13	48	50	50	51	52	52	100

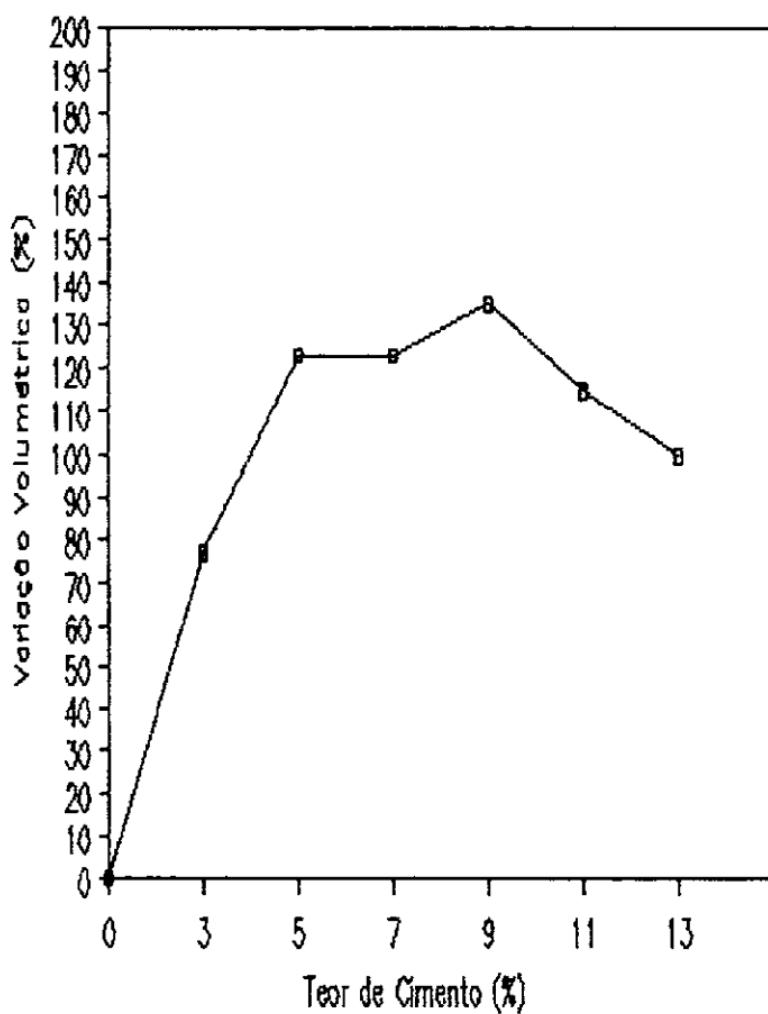


Fig. IV-50 - VISTA CHINESA (lab. B)

Tabela IV-51 – VISTA CHINESA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	24	26	26	26	0
3	38	50	52	52	51	51	100
5	42	56	64	54	64	62	115
7	48	56	54	54	54	54	115
9	48	58	55	55	56	56	123
11	46	51	50	50	51	51	96
13	42	45	46	46	46	46	77

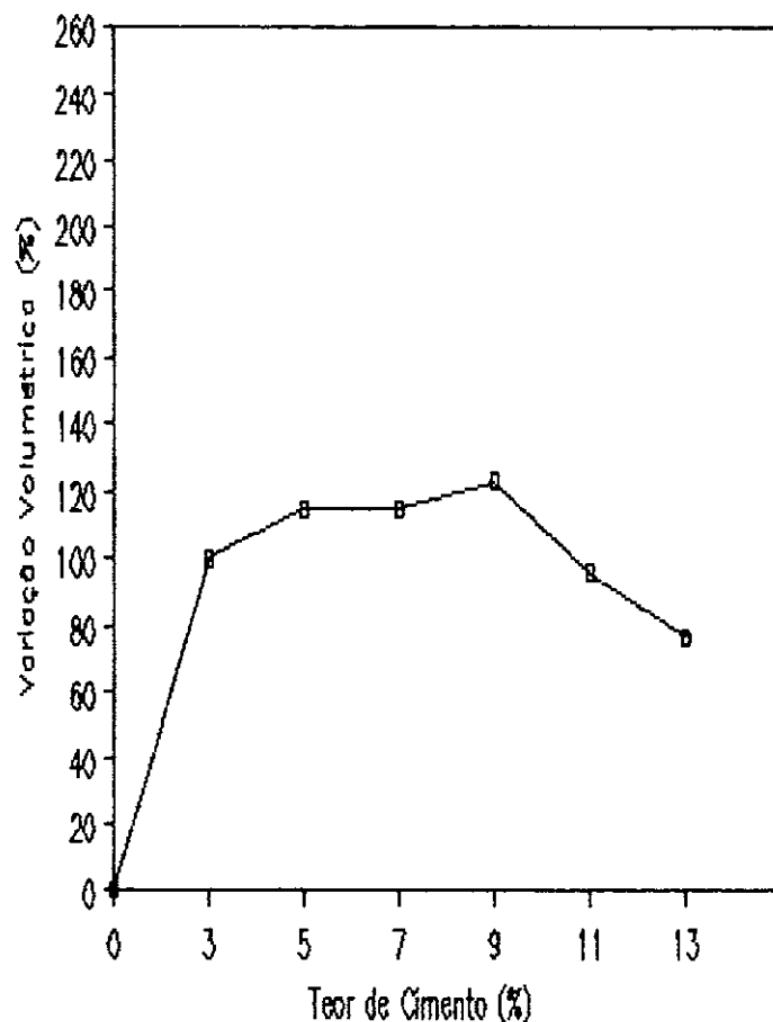


Fig. IV-51 – VISTA CHINESA (lab. B)

Tabela IV-52 - VISTA CHINESA (lab. B)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	24	25	26	26	0
3	36	46	48	48	48	46	85
5	44	60	58	56	46	56	131
7	48	63	60	60	62	61	142
9	46	58	54	54	57	56	123
11	44	58	54	54	56	56	123
13	46	56	54	53	54	52	115

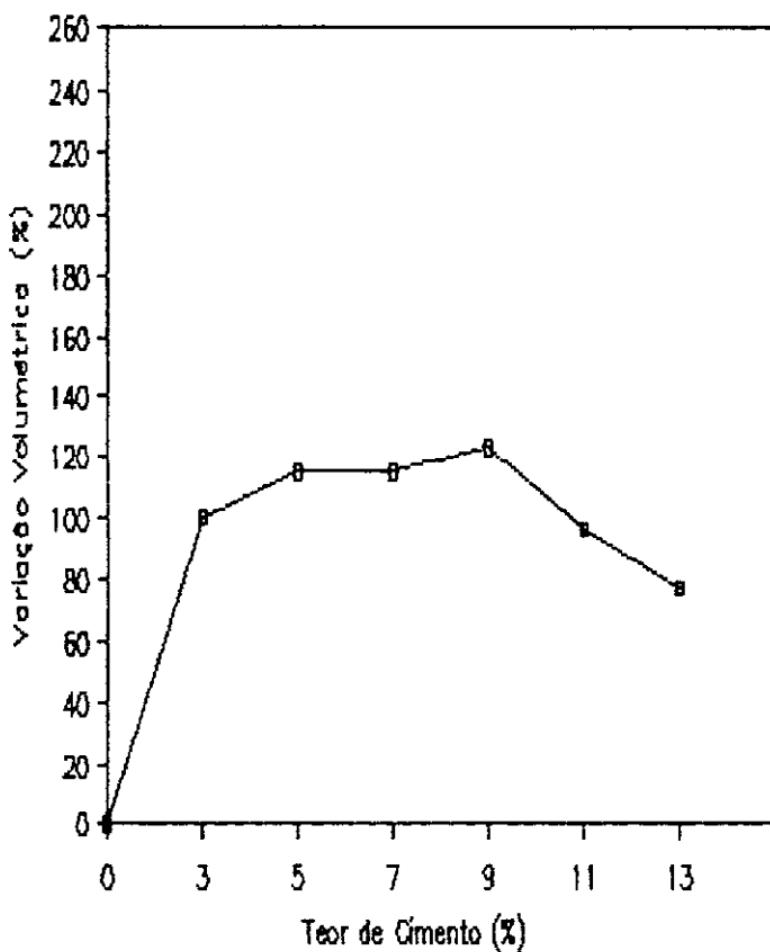


Fig. IV-52 - VISTA CHINESA (lab. B)

Tabela IV-53 - CAMBUÍ (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	
0	20	20	21	22	22	21	0
2	32	40	41	41	40	40	86
4	42	48	50	49	48	46	127
6	42	50	49	48	48	48	127
8	38	44	44	43	42	42	100
10	36	42	42	40	39	38	91
12	38	46	44	44	42	40	109

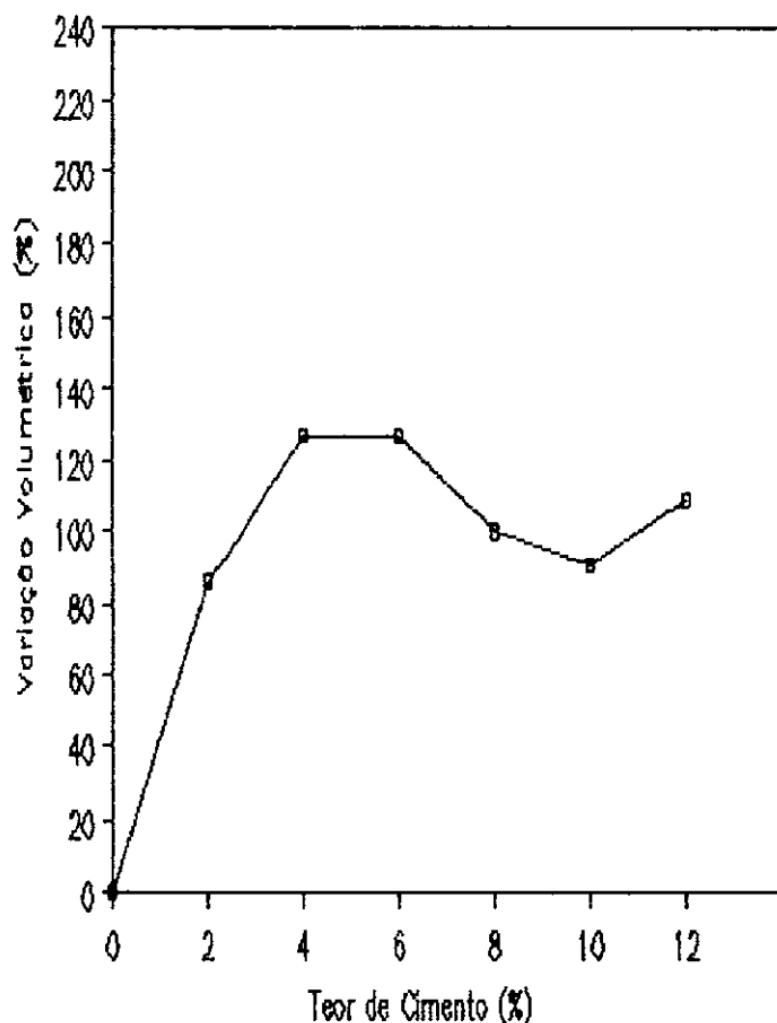


Fig. IV-53 - CAMBUÍ (lab. C)

Tabela IV-54 - CAMBUÍ (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	21	21	21	21	0
2	32	39	40	40	42	40	100
4	42	48	49	48	48	48	133
6	40	44	46	44	44	44	119
8	38	44	42	40	40	40	110
10	36	42	40	38	38	38	100
12	32	38	40	36	36	36	91

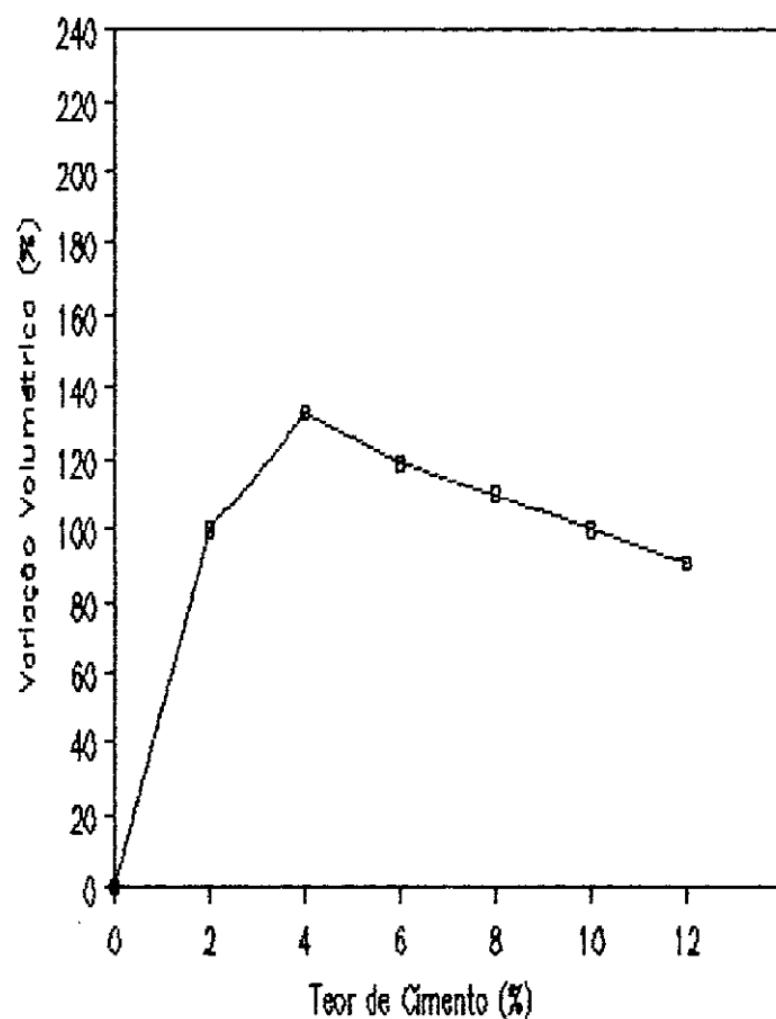


Fig. IV-54 - CAMBUÍ (lab. C)

Tabela IV-55 - CAMBUÍ (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	23	24	25	25	25	0
2	30	36	38	38	38	36	52
4	39	47	46	46	46	44	88
6	42	50	48	48	48	48	100
8	42	48	46	44	44	44	92
10	42	46	44	42	42	40	84
12	38	44	42	41	42	40	76

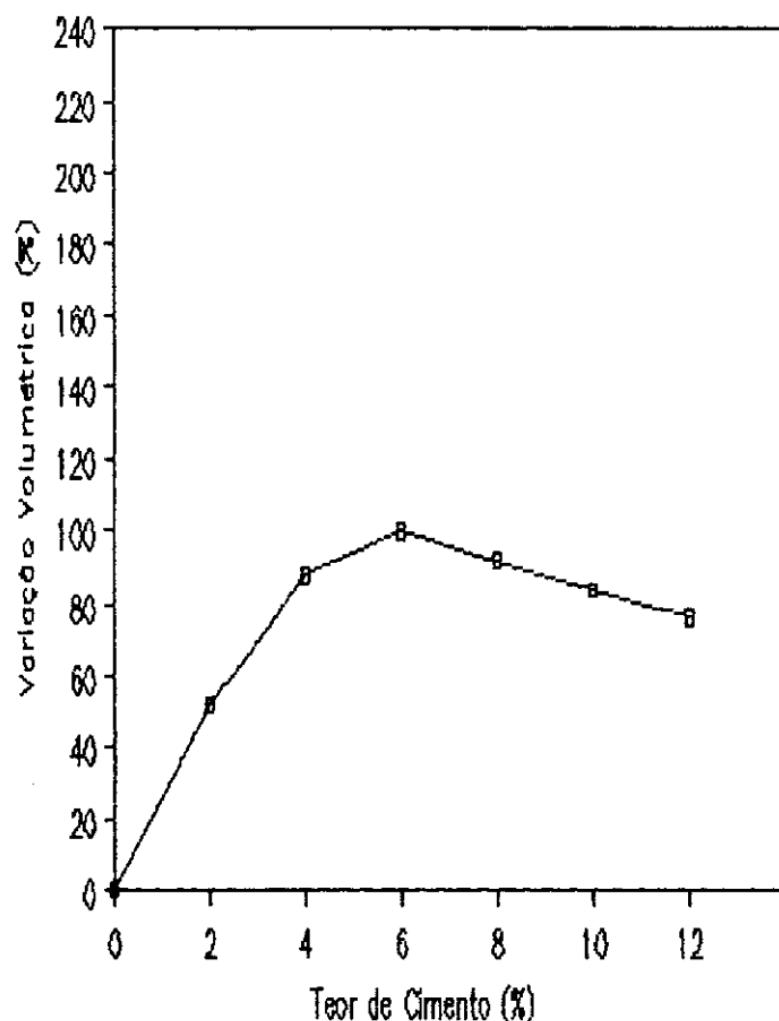


Fig. IV-55 - CAMBUÍ (lab. C)

Tabela IV-56 - VSMA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	22	22	24	24	24	0
3	26	27	27	26	26	26	13
6	31	40	42	44'	44	43	83
9	42	52	51	50	49	48	117
11	40	52	50	50	48	48	117
13	40	47	44	44	44	44	96
15	36	41	40	40	39	39	71

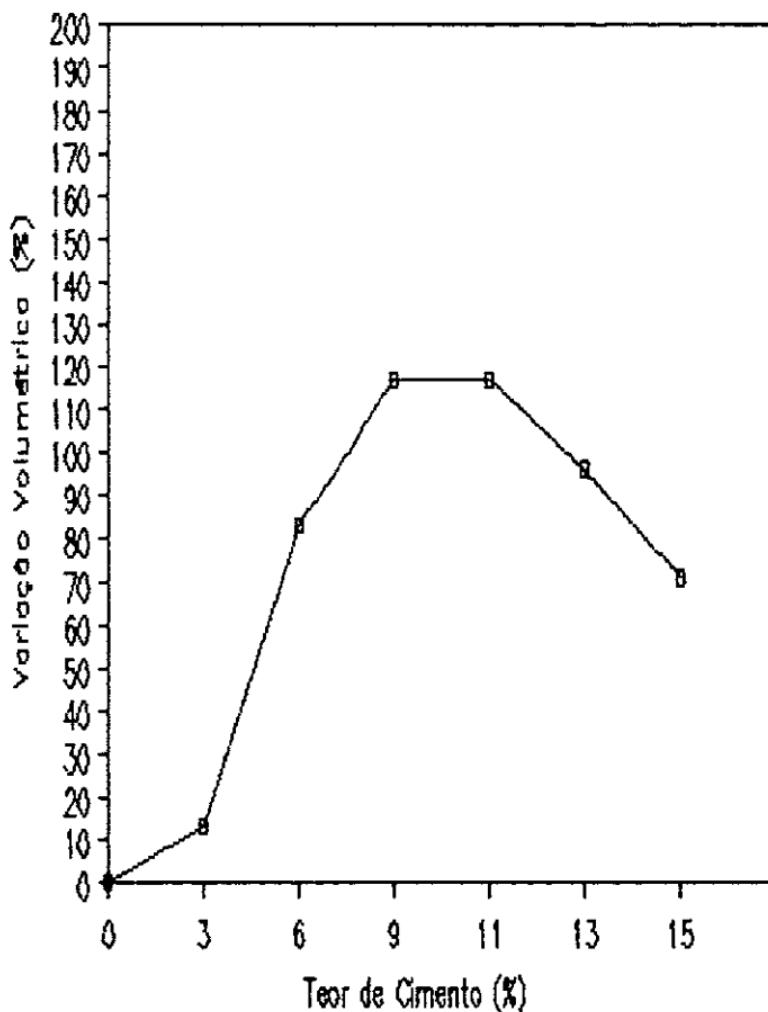


Fig. IV-56 - VSMA (lab. C)

Tabela IV-57 - VSMA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	22	22	22	22	22	0
3	24	24	24	24	24	24	9
6	28	37	46	48	48	46	118
9	36	49	56	54	53	53	155
11	38	54	60	58	58	57	173
13	24	52	58	55	56	54	164
15	34	48	56	54	54	54	155

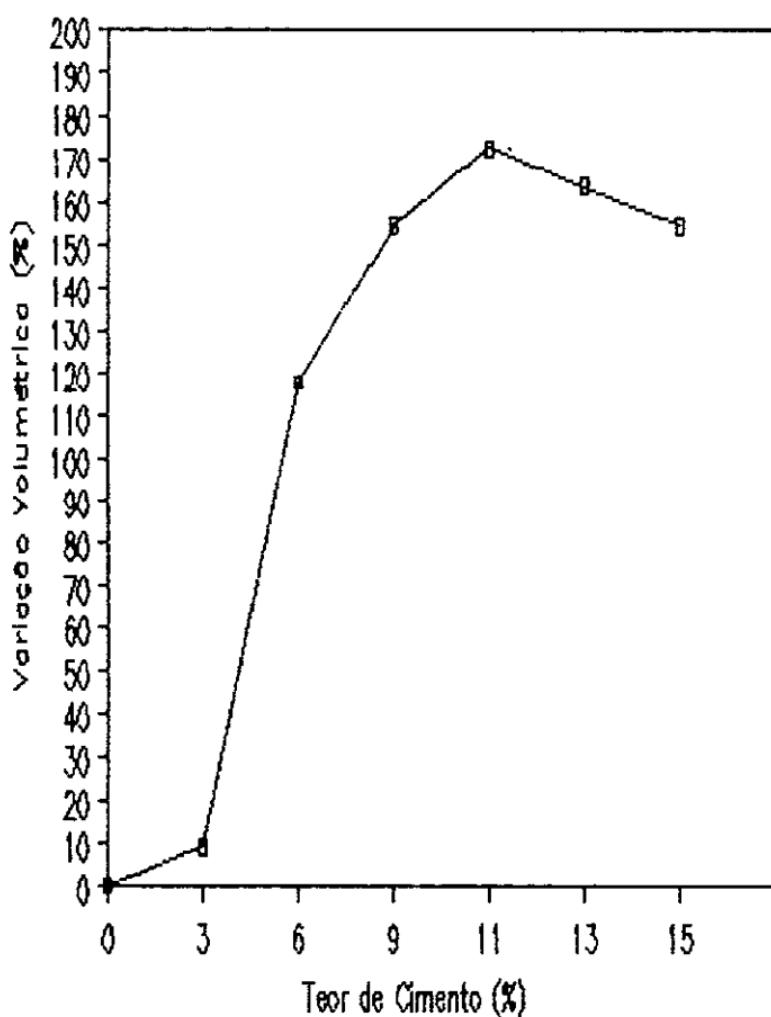


Fig. IV-57 - VSMA (lab. C)

Tabela IV-58 - VSMA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	22	22	21	22	22	0
3	26	27	27	27	27	27	23
6	30	34	38	38	39	38	77
9	35	44	48	48	48	48	118
11	33	42	44	42	43	42	100
13	30	40	48	46	48	46	118
15	31	40	42	41	42	41	91

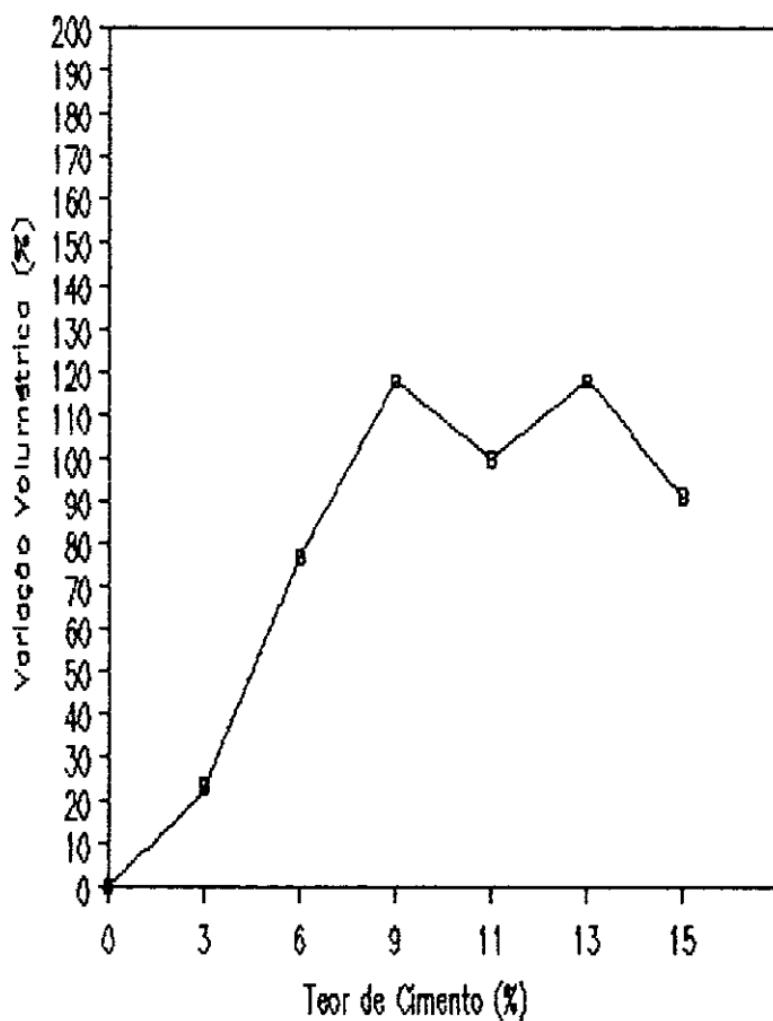


Fig. IV-58 - VSMA (lab. C)

Tabela IV-59 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	29	28	28	28	28	0
3	26	38	49	49	51	51	86
5	24	46	48	48	58	57	107
7	24	50	50	50	60	59	114
9	26	52	60	60	60	60	114
11	25	50	58	58	58	58	107
13	25	50	56	56	56	56	100

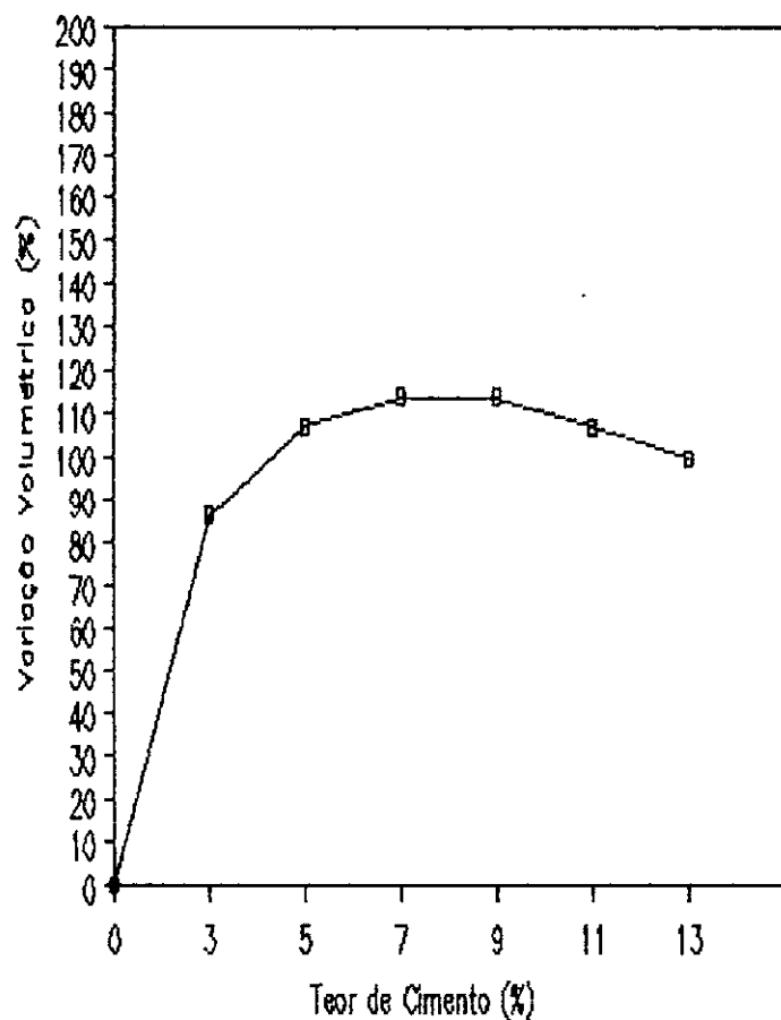


Fig. IV-59 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Tabela IV-60 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)							Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	
0	32	33	34	35	35	35	35	0
3	34	37	38	38	38	37	35	9
5	40	44	44	46	46	46	46	31
7	48	52	54	56	54	58	56	66
9	49	54	56	56	59	58	58	69
11	49	54	54	54	58	57	56	66
13	48	50	51	52	55	56	56	60

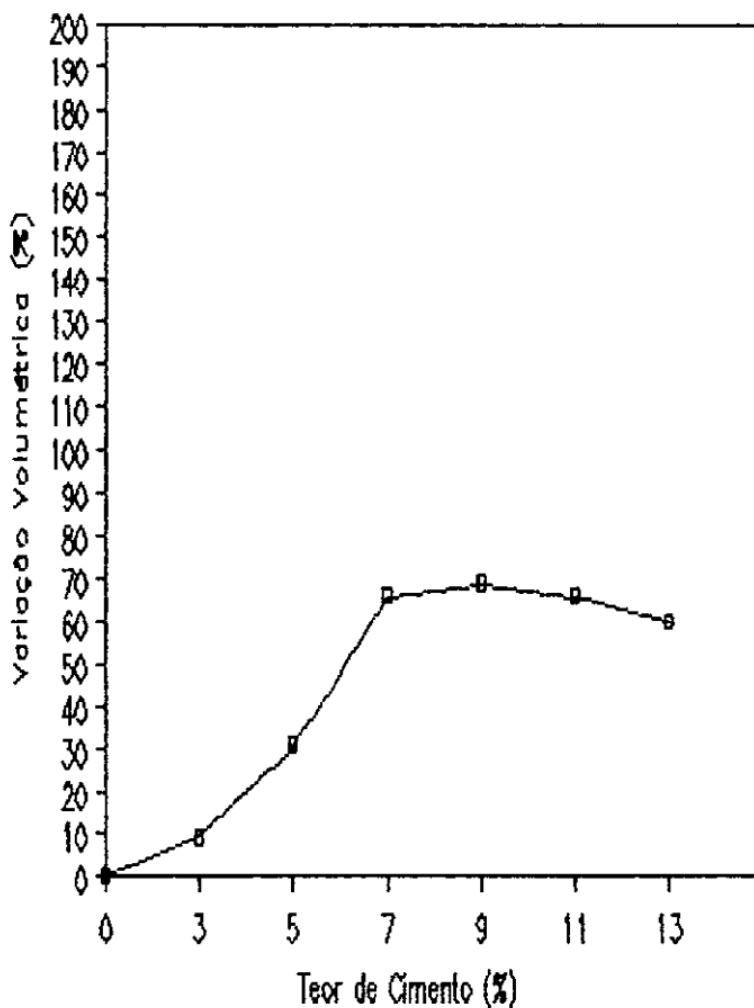


Fig. IV-60 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Tabela IV-61 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	32	34	34	34	34	34	0
3	28	32	35	40	37	37	18
5	38	45	46	46	48	47	41
7	46	50	52	54	54	53	59
9	54	58	58	60	62	61	82
11	49	53	56	56	62	62	82
13	50	54	55	56	61	62	82

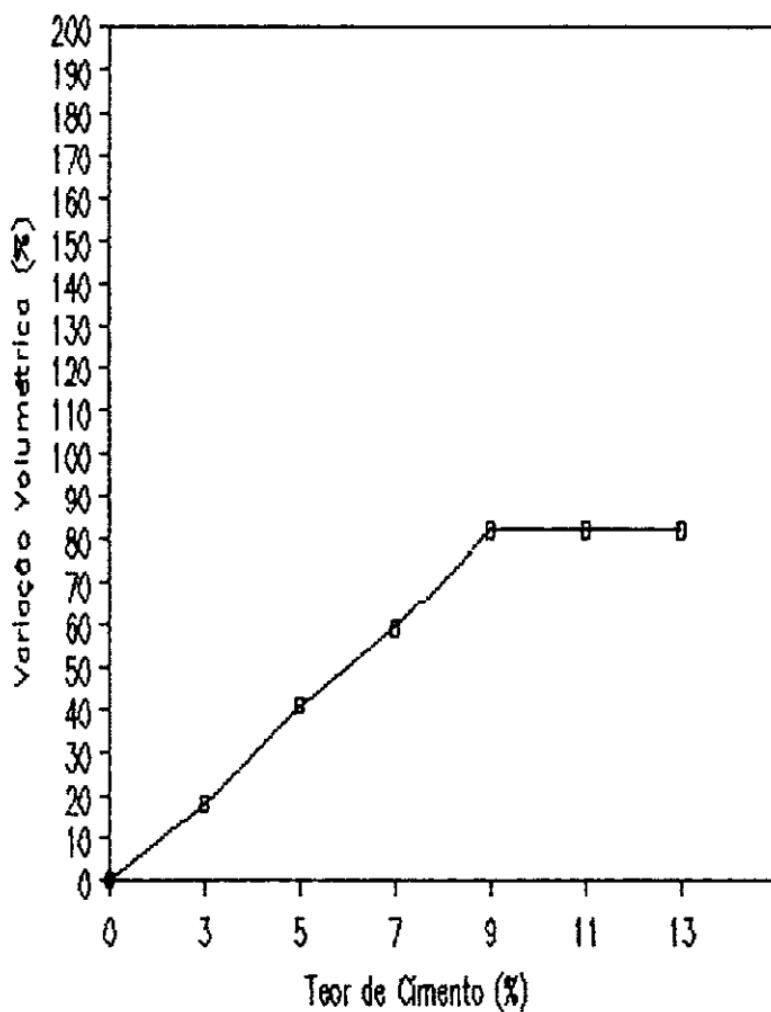


Fig. IV-61 - EUCLIDELANDIA (lab. C)

Tabela IV-62 - VISTA CHINESA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	24	24	24	24	25	25	0
3	34	42	43	44	43	42	76
5	44	56	54	54	53	52	124
7	46	58	56	56	56	56	132
9	46	54	52	53	53	52	116
11	44	56	54	55	54	54	124
13	44	58	56	56	54	53	132

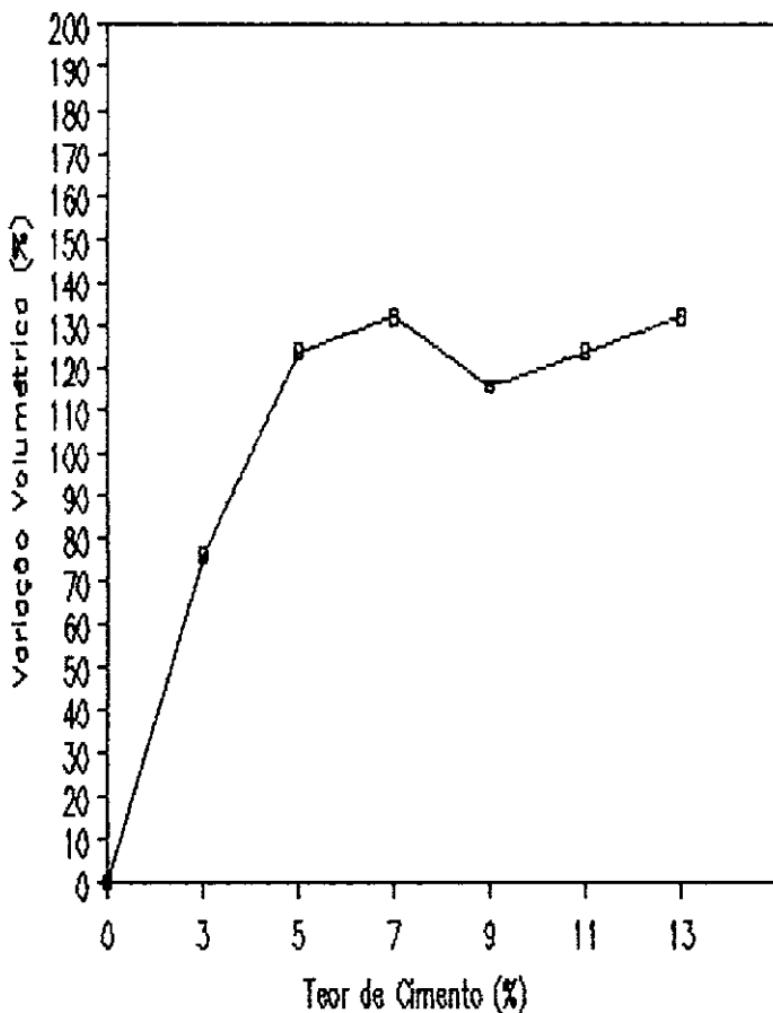


Fig. IV-62 - VISTA CHINESA (lab. C)

Tabela IV-63 - VISTA CHINESA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	22	24	24	26	26	26	0
3	38	42	43	42	42	41	65
5	48	52	50	50	51	48	100
7	46	50	48	48	50	50	92
9	44	48	48	48	52	50	100
11	40	43	43	43	48	46	85
13	48	40	41	41	43	42	65

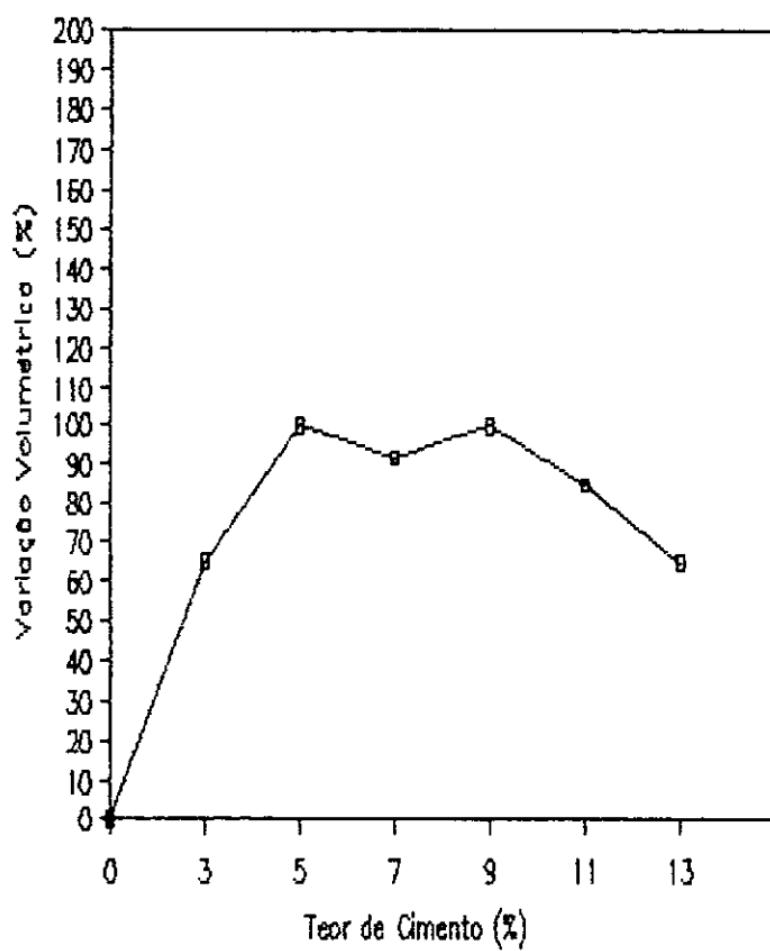


Fig. IV-63 - VISTA CHINESA (lab. C)

Tabela IV-64 - VISTA CHINESA (lab. C)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	26	28	29	29	29	29	0
3	33	40	40	40	40	38	38
5	44	58	56	54	52	52	100
7	50	64	58	56	58	56	121
9	51	64	60	58	64	62	121
11	45	62	58	58	60	59	114
13	46	62	58	58	58	58	114

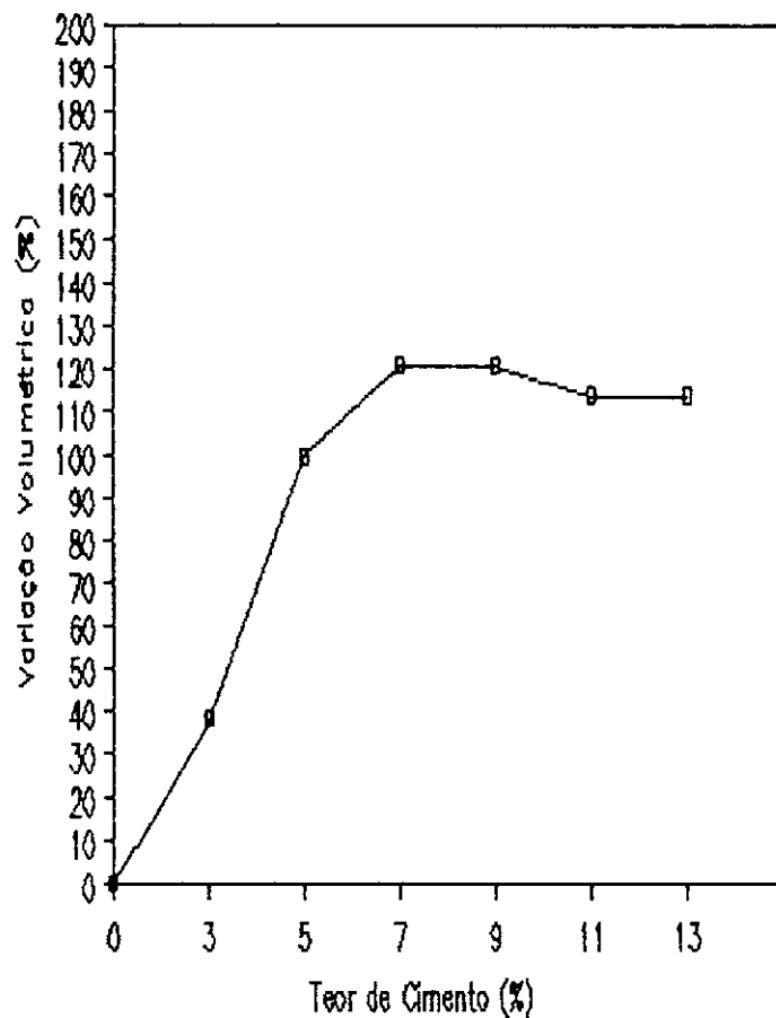


Fig. IV-64 - VISTA CHINESA (lab. C)

Tabela IV-65 - CAMBUÍ (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	33	44	48	50	48	48	150
4	43	58	59	60	60	59	200
6	46	59	60	61	60	60	205
8	42	54	54	55	55	54	175
10	37	48	47	48	48	47	140
12	36	45	44	45	44	44	125

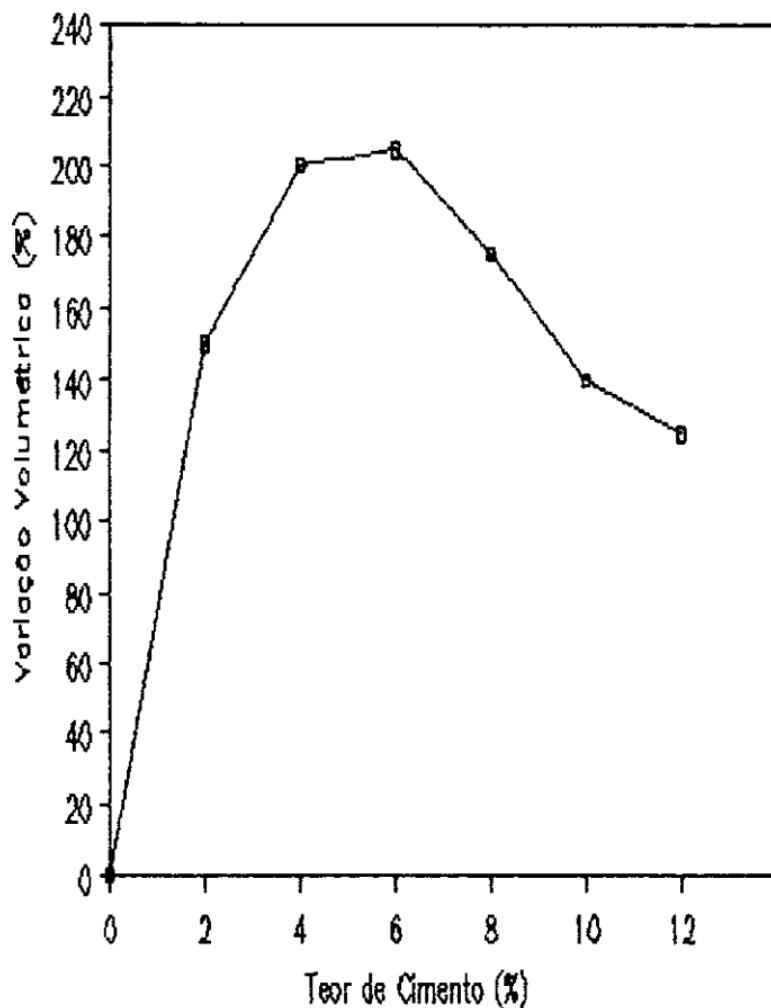


Fig. IV-65 - CAMBUÍ (lab. D)

Tabela IV-66 - CAMBUÍ (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	34	44	49	51	51	52	160
4	42	54	57	56	62	56	210
6	44	56	56	58	50	52	190
8	38	50	50	52	52	50	160
10	36	44	46	46	47	46	135
12	44	42	44	42	42	44	120

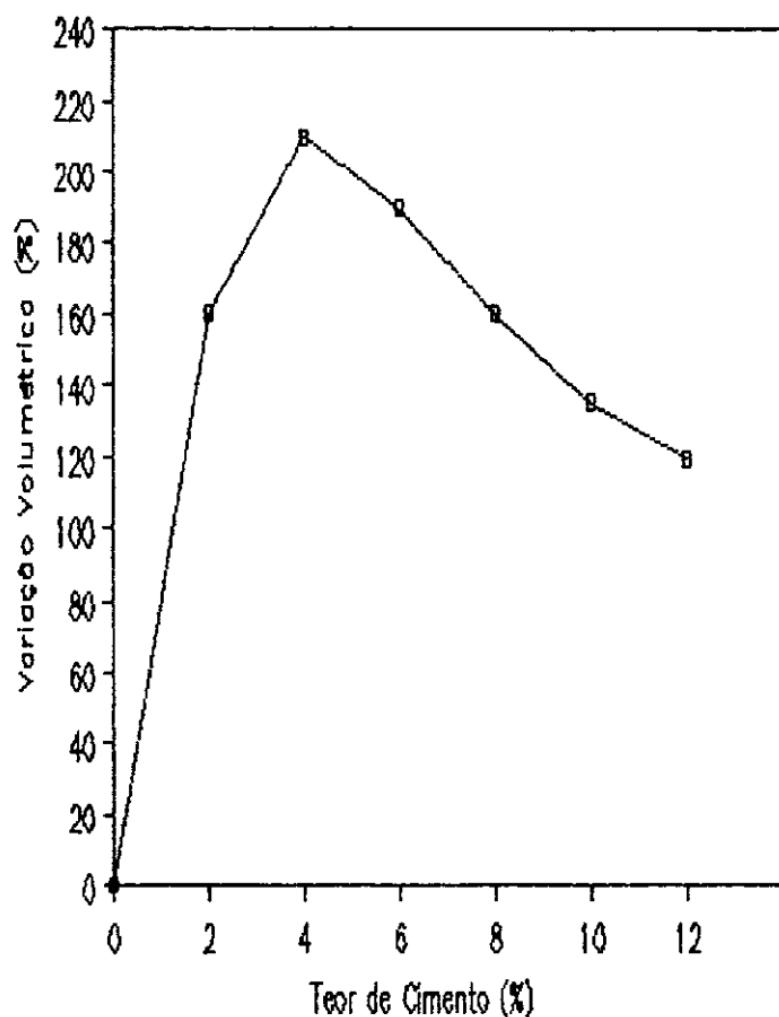


Fig. IV-66 - CAMBUÍ (lab. D)

Tabela IV-67 - CAMBUÍ (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	18	20	20	18	18	18	0
2	34	44	50	50	54	54	170
4	40	54	56	56	60	60	200
6	42	56	56	56	58	58	190
8	36	50	50	46	48	47	150
10	34	44	46	46	46	44	130
12	32	42	44	43	44	43	120

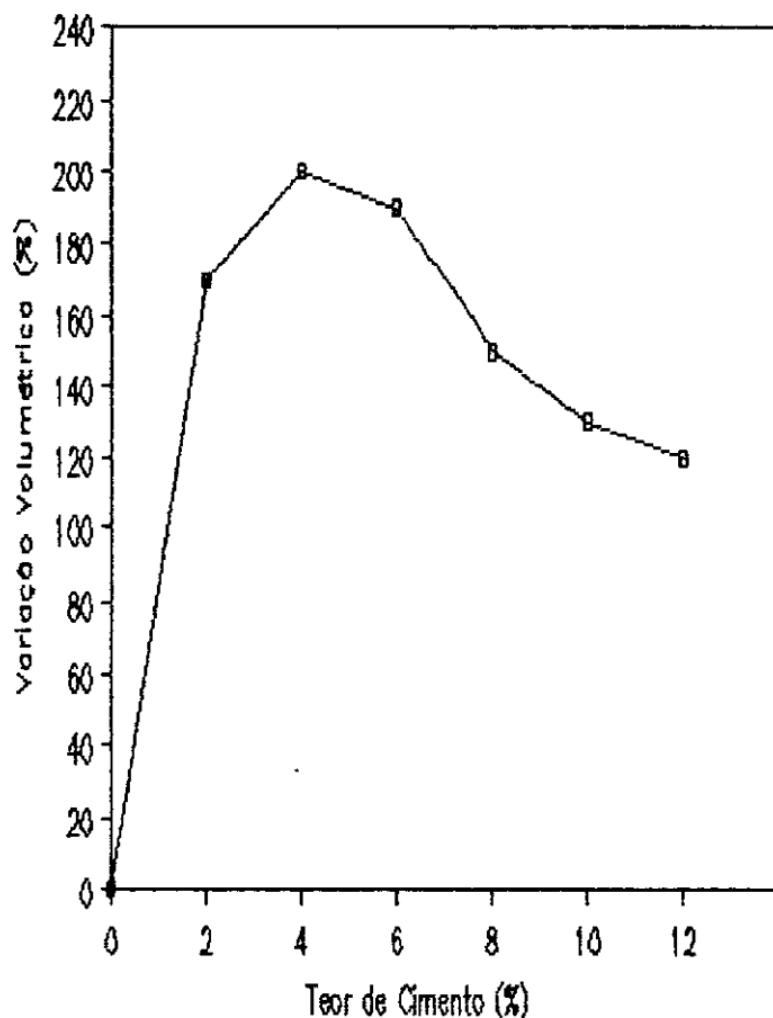


Fig. IV-67 - CAMBUÍ (lab. D)

Tabela IV-68 - VSMA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	19	20	20	21	20	21	0
3	24	24	24	24	24	24	14
6	30	40	56	54	54	54	162
9	31	45	58	56	55	56	176
11	35	49	66	64	64	63	214
13	32	44	57	56	56	56	171
15	36	48	56	55	55	56	167

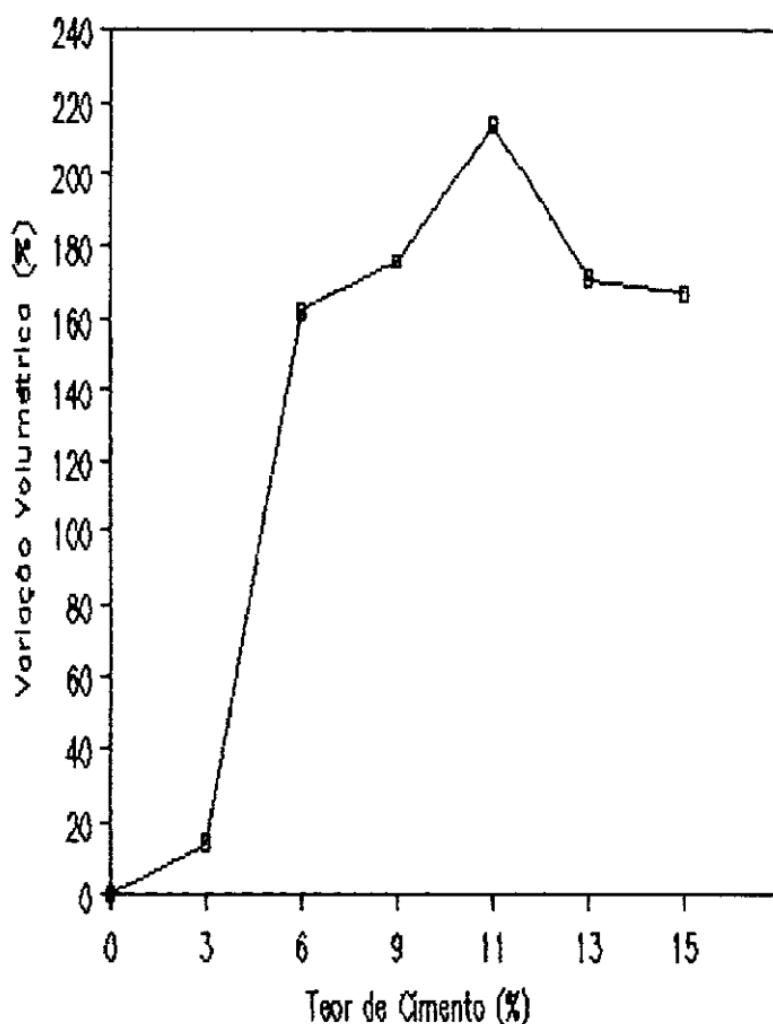


Fig. IV-68 - VSMA (lab. D)

Tabela IV-69 - VSMA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
3	23	24	24	26	26	26	30
6	30	40	54	52	52	54	170
9	32	44	58	64	62	62	220
11	34	48	66	64	57	59	230
13	34	44	58	56	58	60	200
15	36	48	56	54	54	56	180

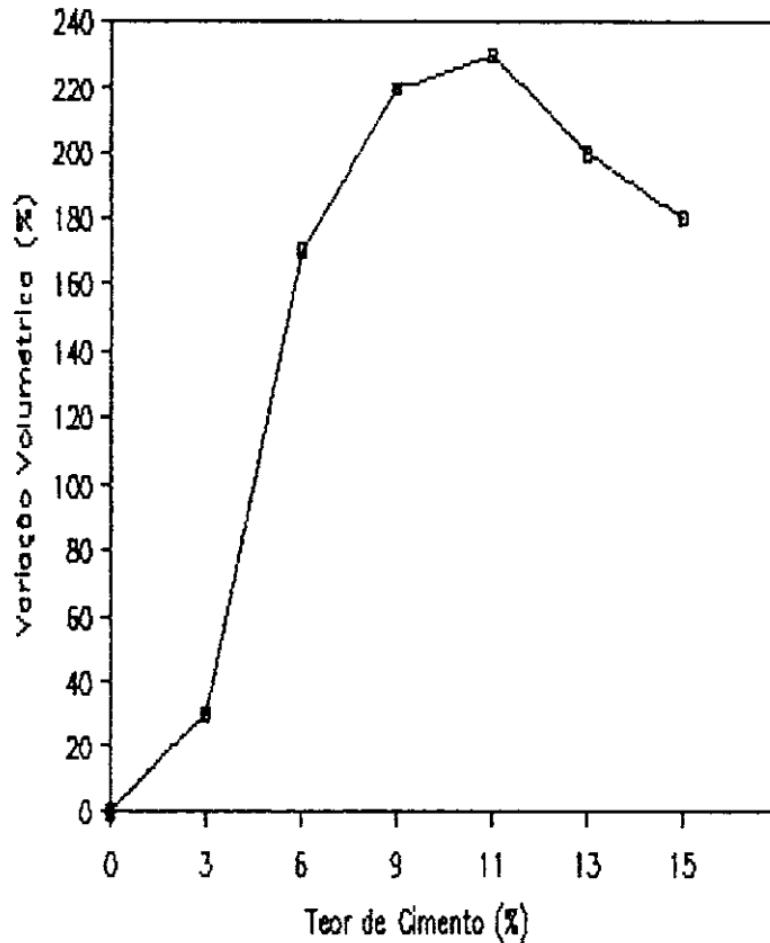


Fig. IV-69 - VSMA (lab. D)

Tabela IV-70 - VSMA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
3	22	22	22	22	22	21	10
6	27	34	42	45	46	46	130
9	28	40	52	56	55	53	180
11	32	42	52	54	52	52	170
13	34	44	52	54	54	52	170
15	34	42	50	54	54	52	170

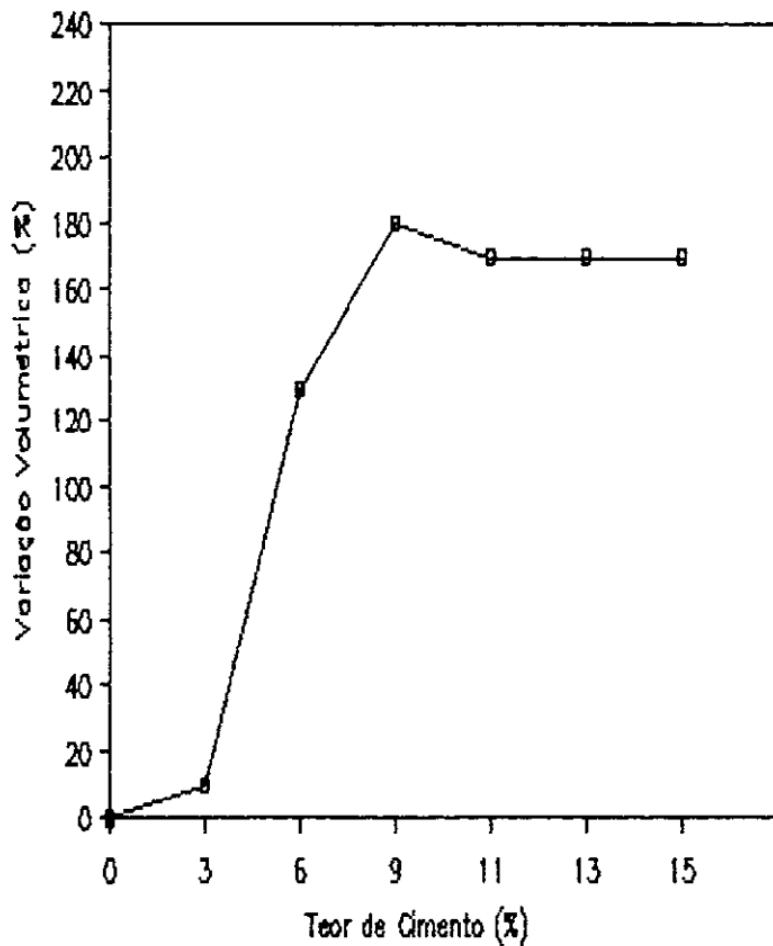


Fig. IV-70 - VSMA (lab. D)

Tabela IV-71 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	26	26	26	26	26	26	0
3	36	45	47	46	45	46	81
5	48	64	66	66	65	66	154
7	48	60	64	65	66	64	154
9	47	59	64	64	64	64	146
11	46	56	60	59	60	59	131
13	44	56	61	60	61	60	135

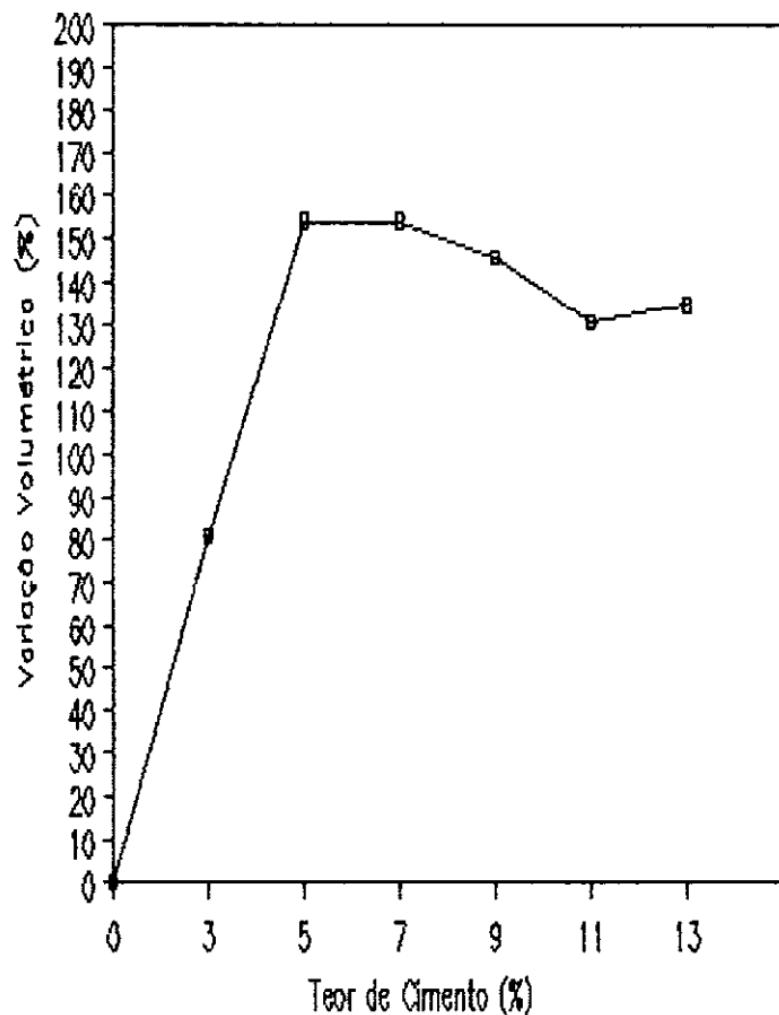


Fig. IV-71 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Tabela IV-72 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	25	26	26	25	25	24	0
3	36	45	48	50	53	52	104
6	44	64	66	62	66	66	154
7	48	60	64	64	67	66	158
9	45	59	65	60	63	63	150
11	47	56	62	60	62	62	139
13	44	56	62	60	59	58	139

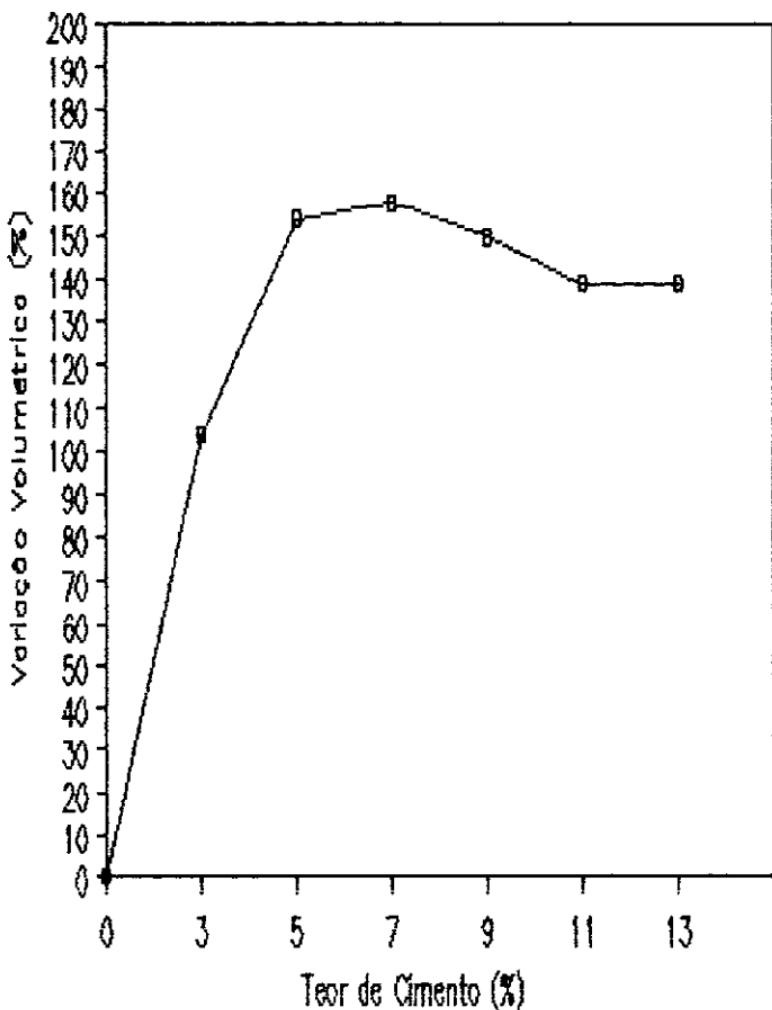


Fig. IV-72 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Tabela IV-73 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	26	26	26	25	26	25	0
3	34	45	49	48	48	45	89
5	44	58	63	62	63	62	142
7	48	62	63	64	66	65	154
9	46	58	62	60	62	62	139
11	46	58	59	60	62	61	139
13	46	56	56	56	58	58	123

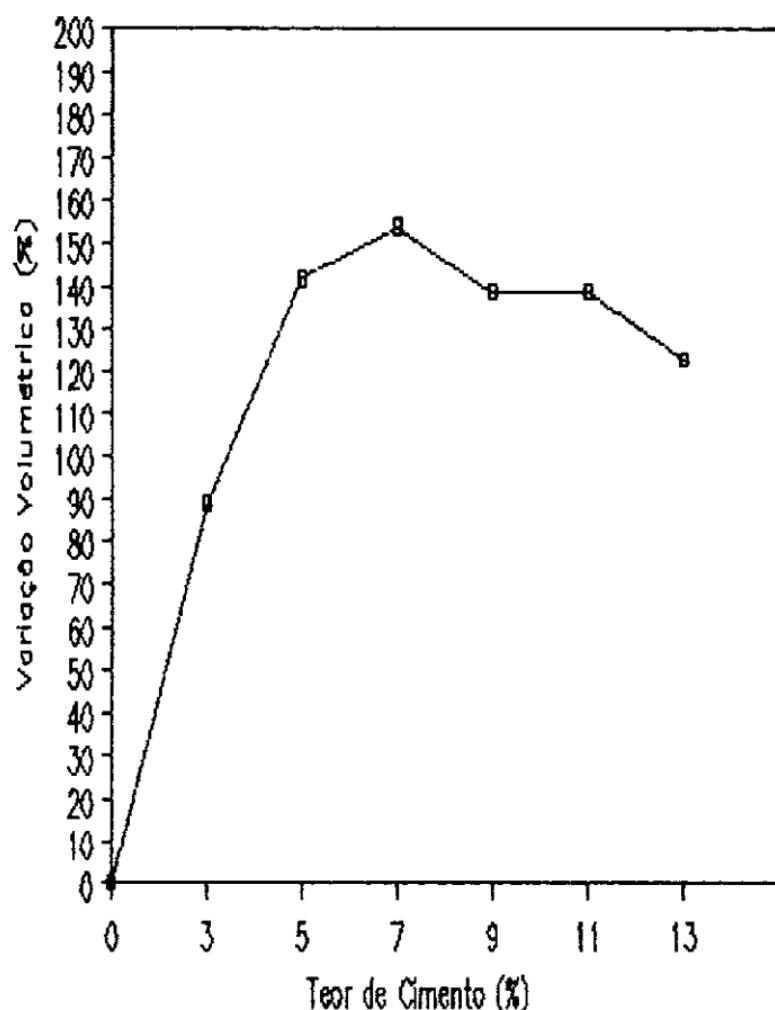


Fig. IV-73 - EUCLIDELANDIA (lab. D)

Tabela IV-74 - VISTA CHINESA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	21	22	23	24	24	0
3	35	46	47	47	46	45	95
5	38	62	60	60	58	58	158
7	38	63	62	62	61	60	163
9	36	61	59	60	60	60	154
11	36	58	58	58	56	56	142
13	34	54	56	52	51	51	133

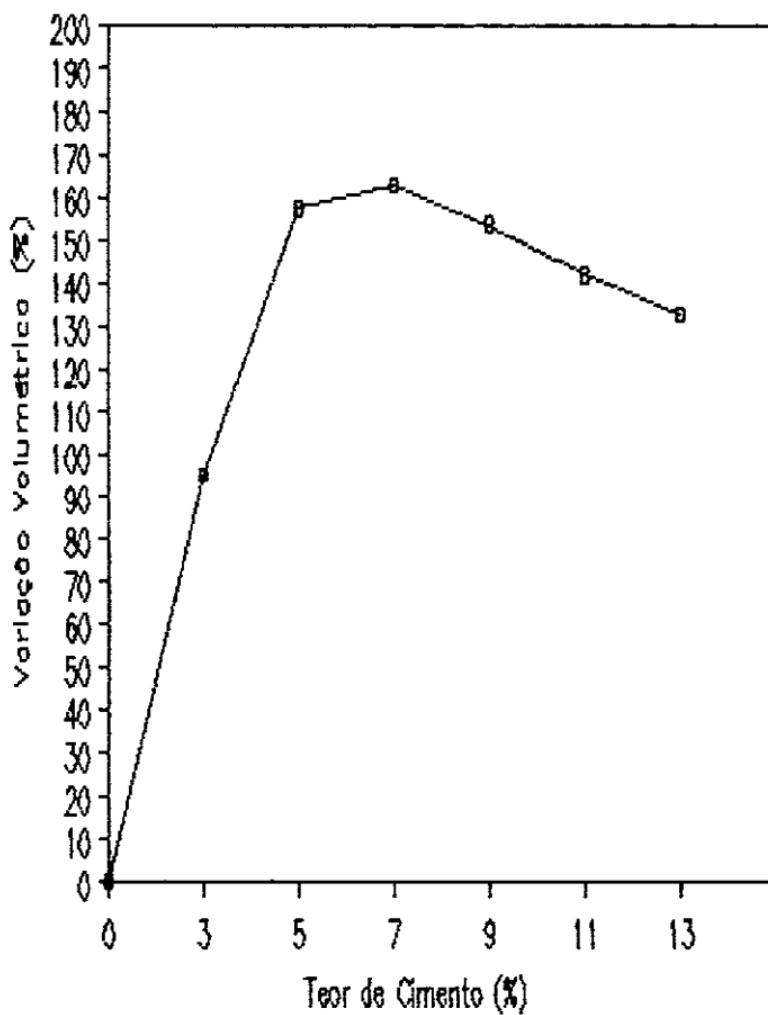


Fig. IV-74 - VISTA CHINESA (lab. D)

Tabela IV-75 - VISTA CHINESA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	18	19	20	22	21	21	0
3	34	42	44	44	38	40	100
5	40	58	62	62	64	62	191
7	40	64	64	66	66	64	200
9	38	66	62	64	66	66	200
11	40	58	60	60	62	62	182
13	38	54	58	56	56	54	164

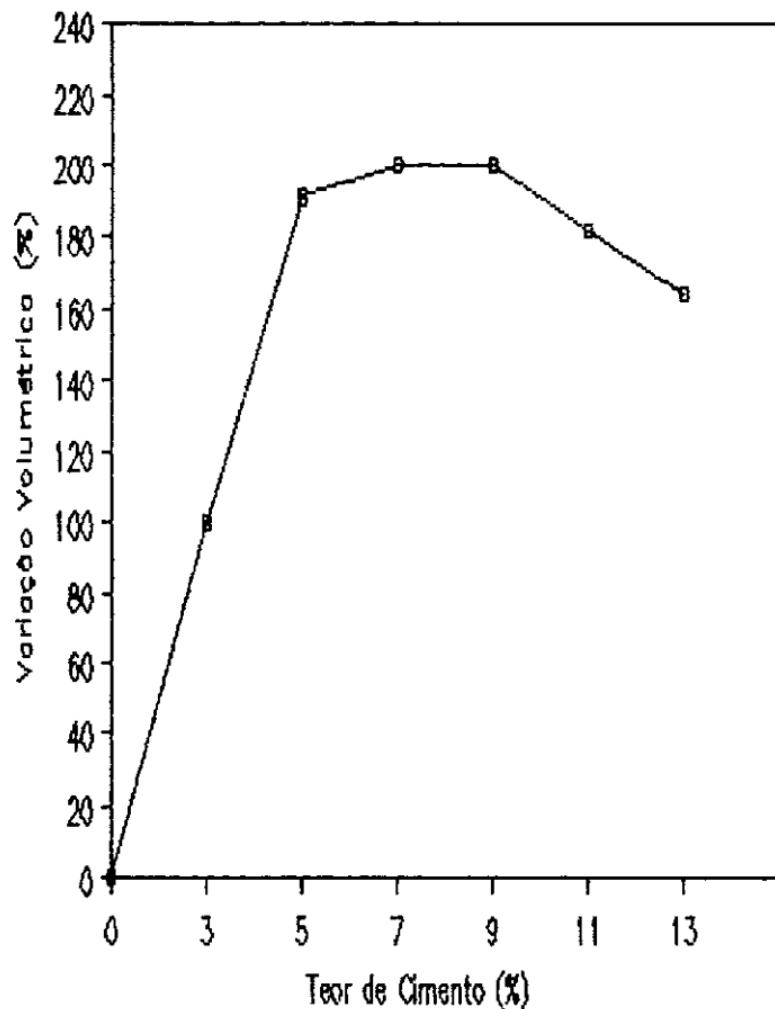


Fig. IV-75 - VISTA CHINESA (lab. D)

Tabela IV-76 - VISTA CHINESA (lab. D)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	21	22	20	22	22	0
3	30	36	38	37	36	36	73
5	36	54	62	61	60	58	182
7	46	66	73	72	72	70	232
9	40	52	54	52	52	52	146
11	42	58	66	64	66	65	200
13	44	58	60	58	60	58	173

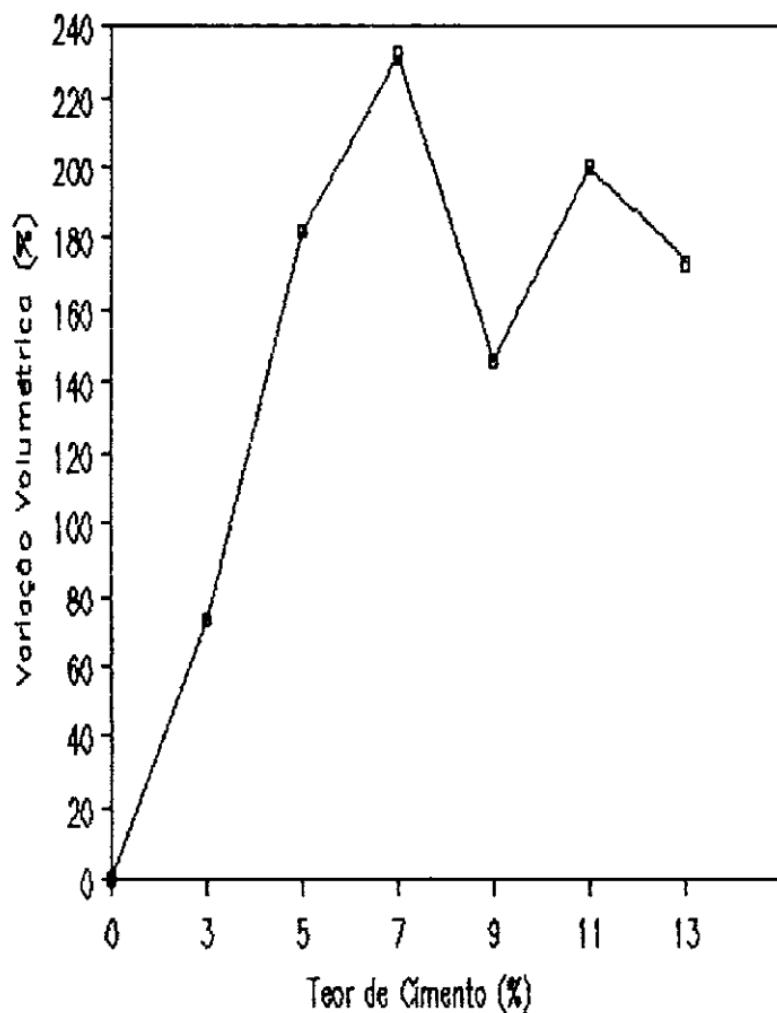


Fig. IV-76 - VISTA CHINESA (lab. D)

Tabela IV-77 - CAMBUÍ (CaCl₂)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
2	38	48	50	48	49	48	150
4	41	51	56	56	56	56	190
6	42	52	54	54	56	55	180
8	38	46	50	50	51	50	155
10	36	48	50	51	52	52	160
12	36	44	46	46	48	48	140

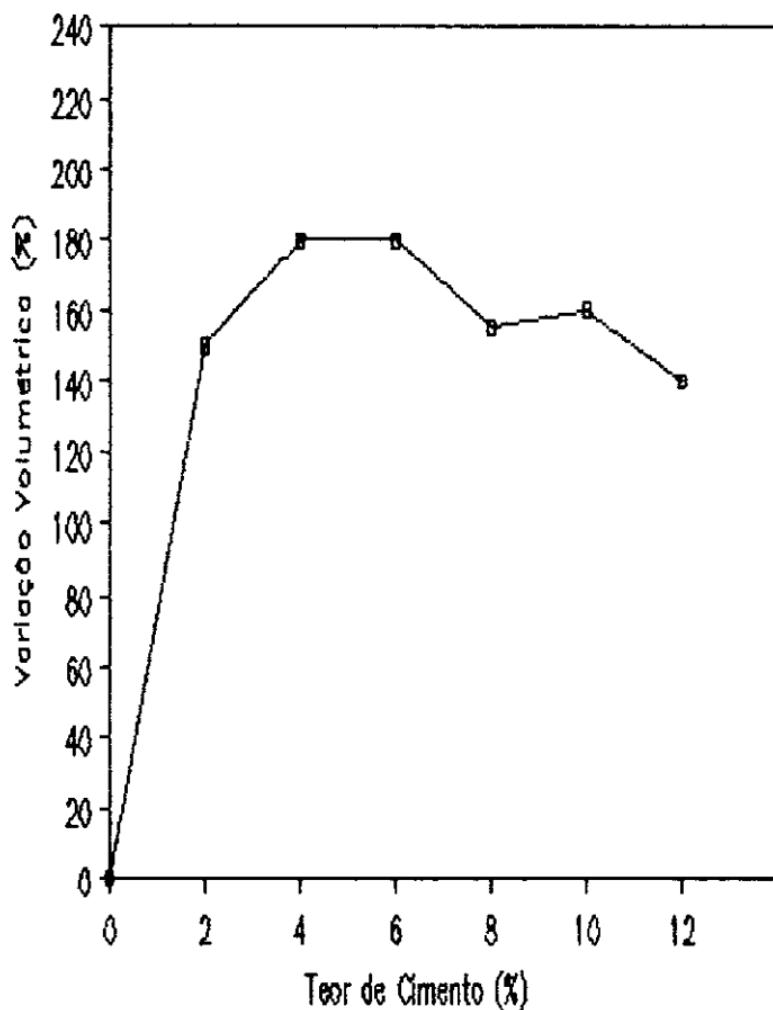
Fig. IV-77 - CAMBUÍ (CaCl₂)

Tabela IV-78 - VSMA (CaCl₂)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	20	20	20	20	20	20	0
3	26	28	28	28	27	26	40
6	34	46	52	52	52	50	160
9	37	52	62	62	62	60	210
11	39	54	61	62	61	60	210
13	36	49	59	60	60	59	200
15	42	61	70	66	65	62	250

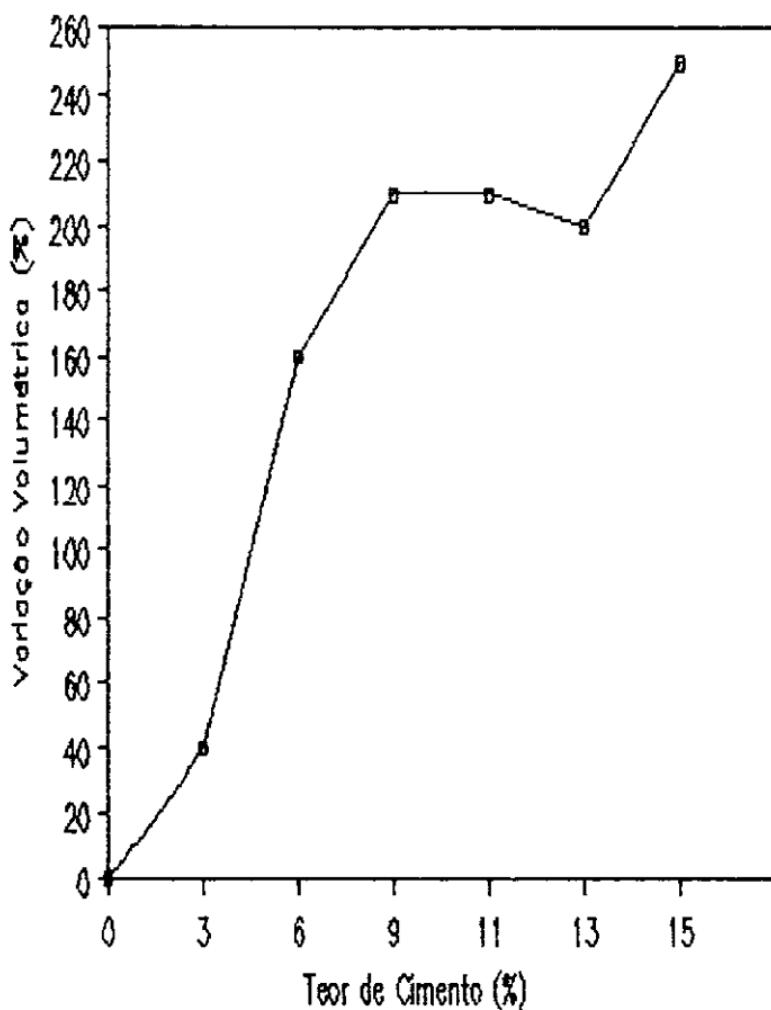
Fig. IV-78 - VSMA (CaCl₂)

Tabela IV-79 - EUCLIDELANDIA (CaCl₂)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	31	31	32	32	32	32	0
3	42	52	55	55	53	53	72
5	48	61	62	61	61	60	94
7	49	60	60	60	60	60	88
9	48	57	59	59	59	59	84
11	47	56	57	57	57	57	78
13	46	55	55	56	56	56	75

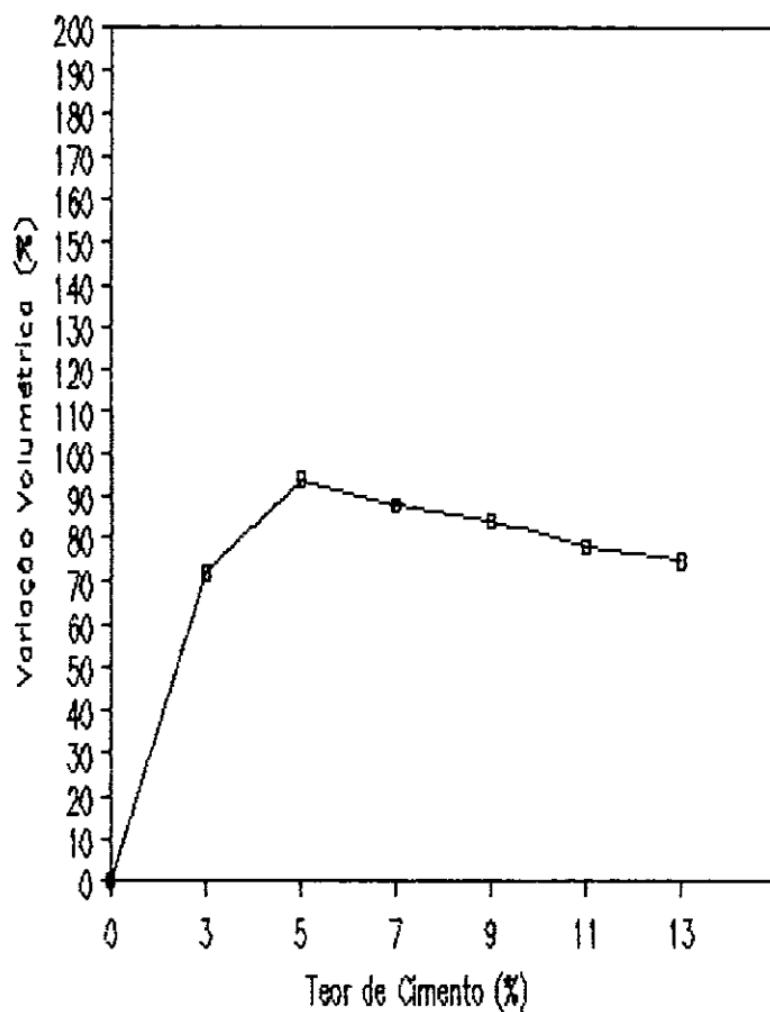
Fig. IV-79 - EUCLIDELANDIA (CaCl₂)

Tabela IV-80 - VISTA CHINESA (CaCl₂)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	21	22	22	22	22	22	0
3	36	52	58	57	56	56	164
5	46	60	60	58	58	56	173
7	48	61	60	60	60	60	177
9	42	51	52	52	52	52	136
11	40	51	52	52	52	52	136
13	42	52	54	54	54	54	146

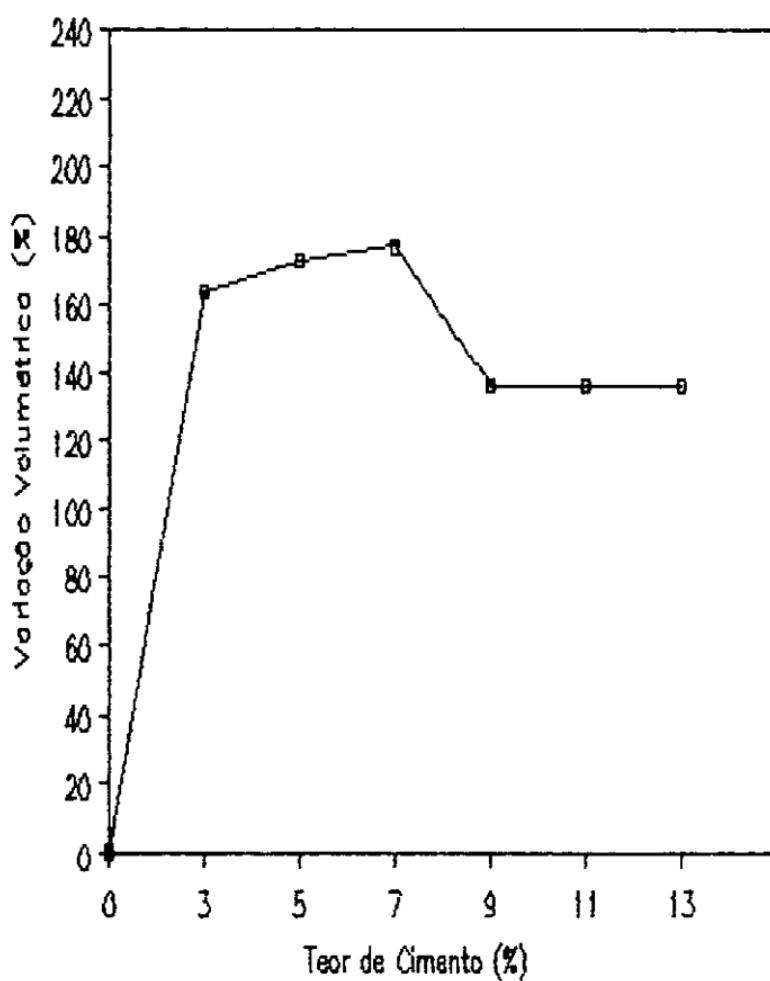
Fig. IV-80 - VISTA CHINESA (CaCl₂)

Tabela IV-81 - CAMBUÍ (ULTRA-SOM)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	28	28	27	27	27	27	0
2	52	60	63	60	59	59	125
4	77	82	81	78	78	78	193
6	75	83	80	76	76	77	196
8	72	79	76	73	71	72	182
10	62	66	66	66	64	62	136
12	75	72	71	71	67	64	168

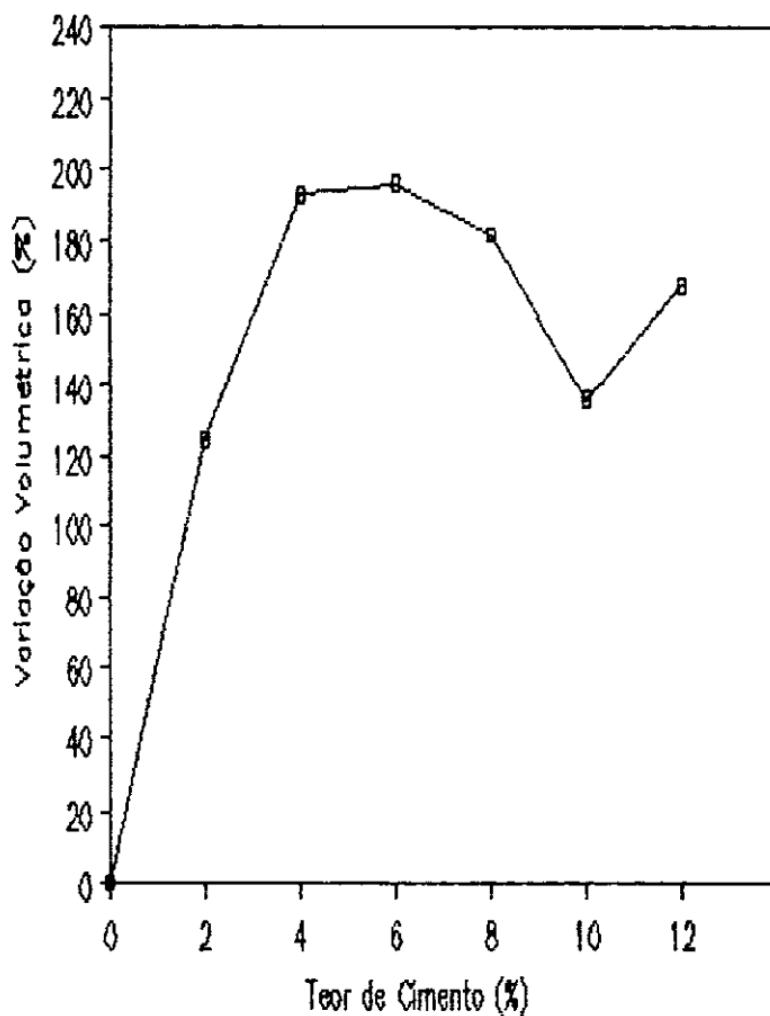


Fig. IV-81 - CAMBUÍ (ULTRA-SOM)

Tabela IV-82 - VSMA (ULTRA-SOM)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	27	33	33	34	34	34	0
3	62	66	64	62	62	61	39
6	90	91	89	88	86	86	143
9	79	76	75	75	74	74	175
11	72	68	67	67	68	68	182
13	73	72	72	72	72	71	175
15	74	76	75	75	74	75	179

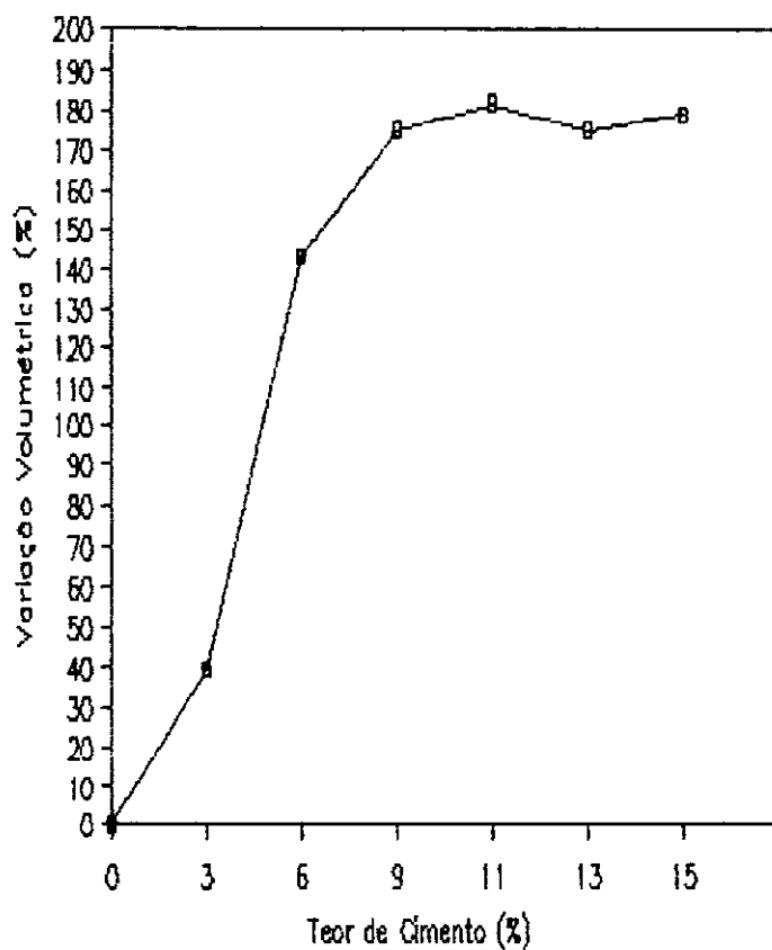


Fig. IV-82 - VSMA (ULTRA-SOM)

Tabela IV-83 - EUCLIDELANDIA (ULTRA-SOM)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	33	33	33	34	34	34	0
3	62	66	64	62	62	61	94
5	90	91	89	88	86	86	168
7	79	76	75	75	74	74	132
9	72	68	67	67	68	68	112
11	73	72	72	72	72	71	115
13	74	76	75	75	74	75	124

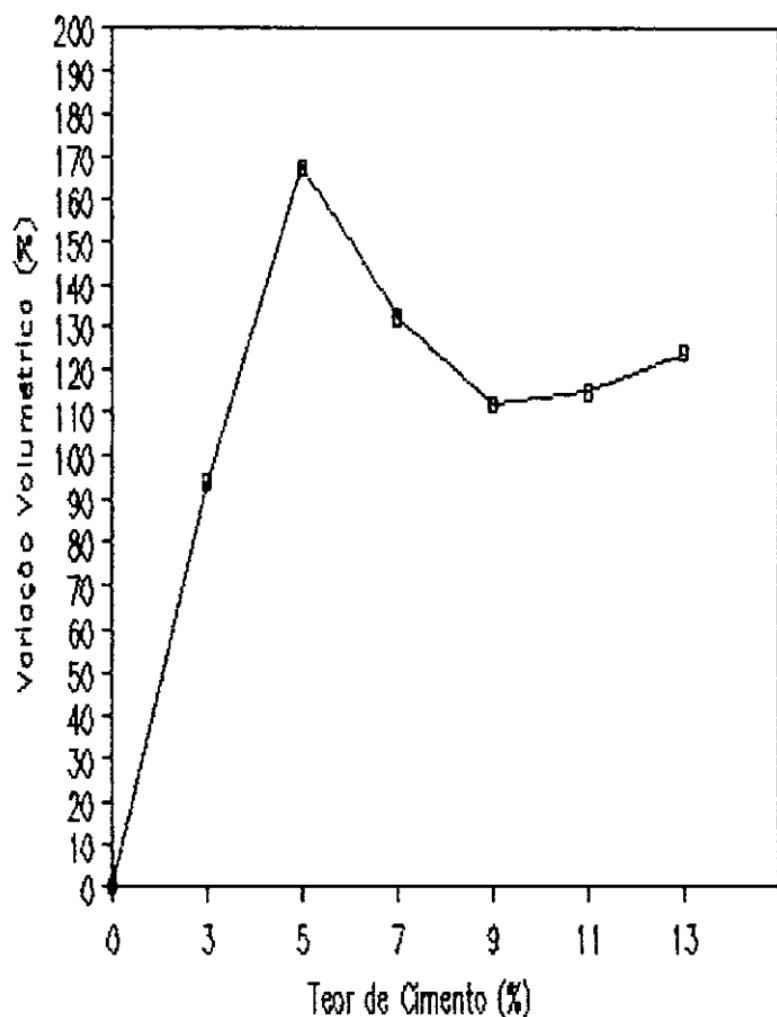


Fig. IV-83 - EUCLIDELANDIA (ULTRA-SOM)

Tabela IV-84 - VISTA CHINESA (ULTRA-SOM)

Cimento %	Leituras (cm ³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	26	26	26	27	27	27	0
3	48	53	52	52	50	50	96
6	67	77	72	69	67	67	186
7	68	77	72	70	68	67	185
9	77	79	76	75	73	73	193
11	75	76	74	73	71	70	182
13	70	76	74	72	70	70	182

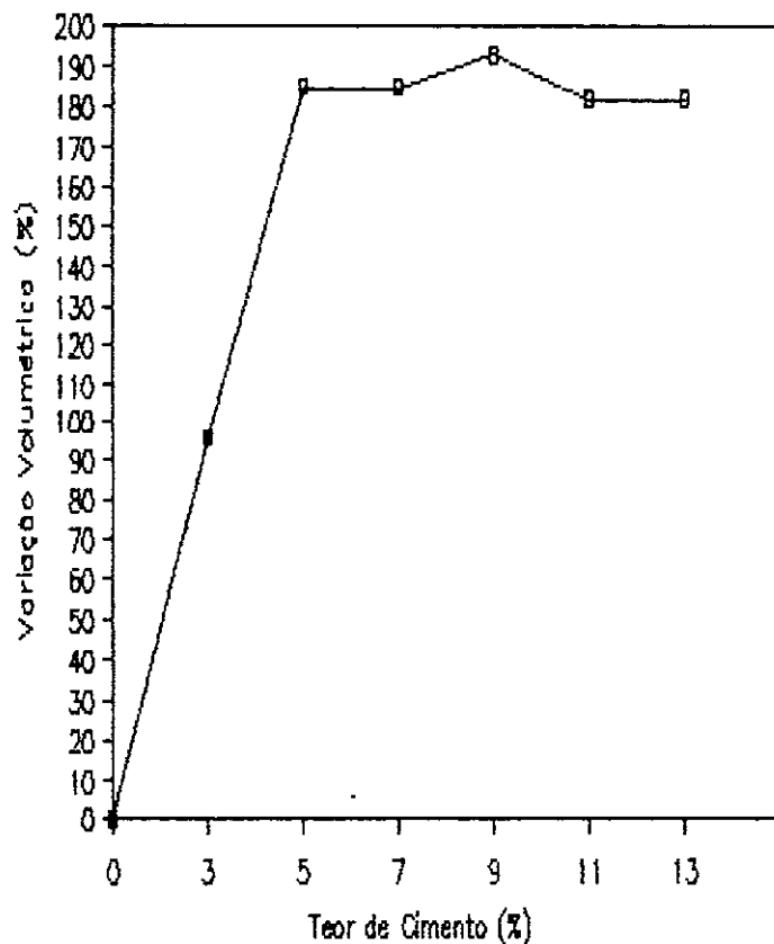


Fig. IV-84 - VISTA CHINESA (ULTRA-SOM)

Tabela IV-85 - CAMBUÍ (60°C)

Cimento %	Leituras (cm³)							Variação volumétrica %
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	
0	21	21	21	22	22	22	23	0
2	25	26	30	30	31	32	32	46
4	32	36	38	39	40	40	40	82
6	35	39	40	41	41	41	41	86
8	34	40	42	44	43	43	43	100
10	36	42	44	44	44	44	45	105
12	36	43	45	46	46	45	46	109

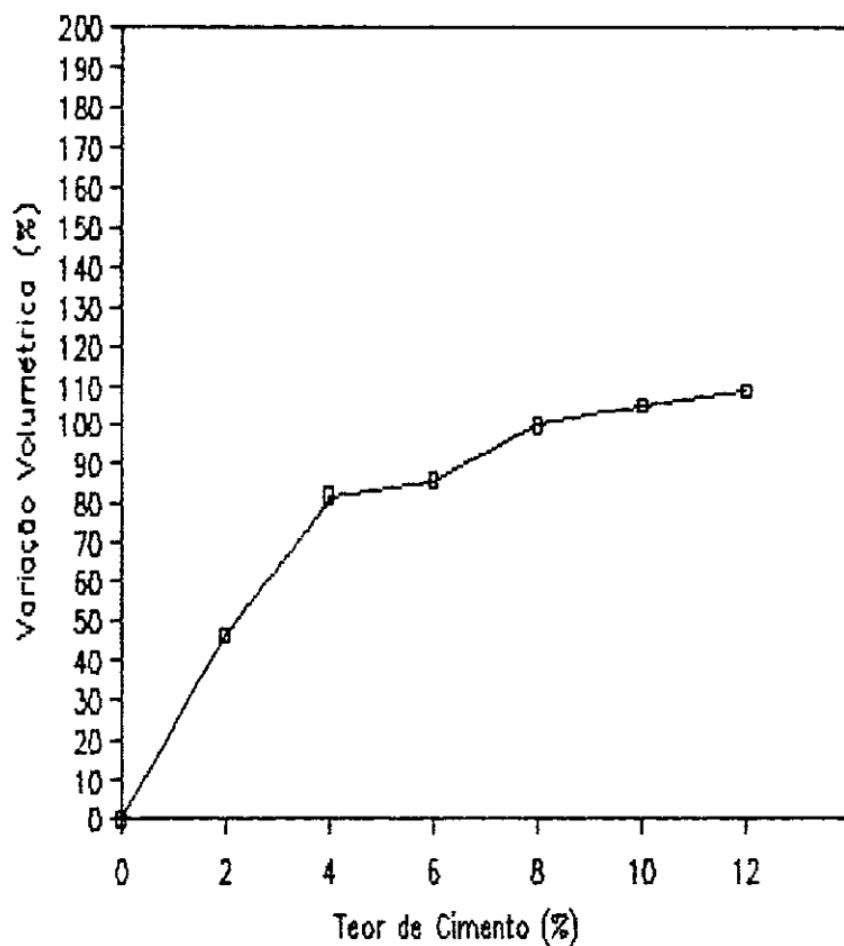


Fig. IV-85 - CAMBUÍ (60°C)

Tabela IV-86 - EUCLIDELANDIA (60°C)

Cimento %	Leituras (cm³)						Variação volumétrica %
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
0	30	30	31	33	33	*	0
3	34	34	34	34	34	*	3
5	38	42	43	43	44	*	33
7	41	48	52	52	55	*	67
9	46	52	54	54	57	*	73
11	48	56	56	58	60	*	82
13	52	58	59	60	62	*	88

* pane no banho-maria

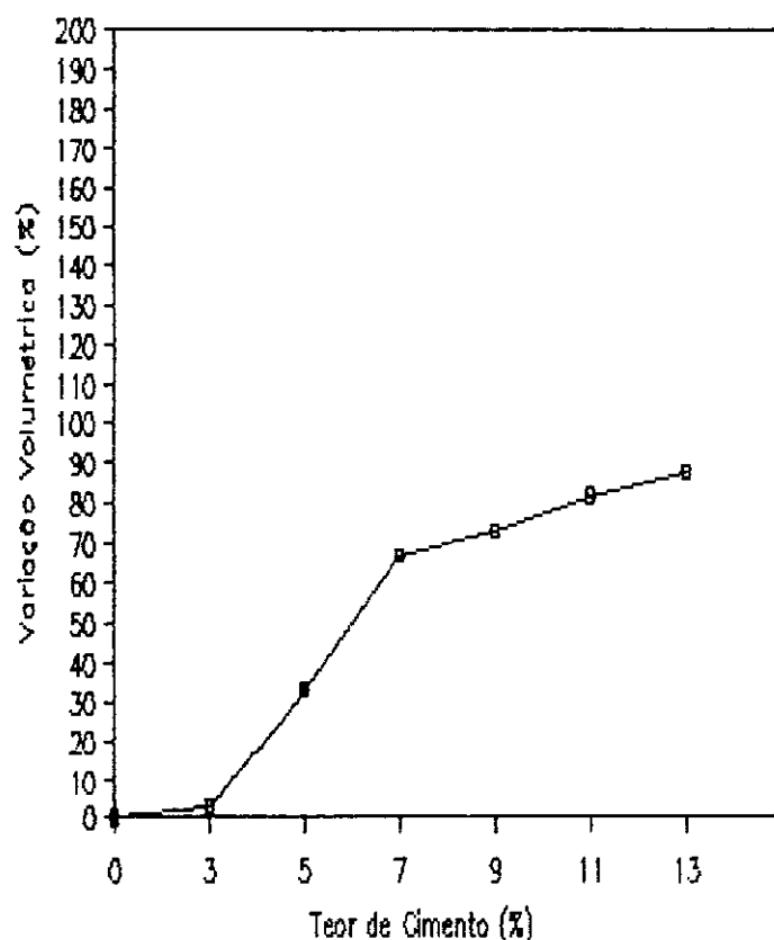


Fig. IV-86 - EUCLIDELANDIA (60°C)

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

V.1 - Ensaios de Repetibilidade

Através dos dez ensaios realizados pelo mesmo operador, foi possível fazer algumas observações sobre o comportamento dos solos. Em geral, para o mesmo solo, curvas com diferentes formas são obtidas, como pode ser observado pelo exame dos gráficos, sem contudo afetar os resultados finais para a porcentagem de cimento. Isto deve ser causado por fatores aleatórios imprevisíveis e de difícil controle, os quais dão origem à variabilidade observada.

O solo Euclidelândia foi o que apresentou a menor variação volumétrica (90-110%), enquanto o Vista Chinesa a maior (250%); talvez devido a este conter bastante gibbsita, mineral cuja resposta ao hidróxido de cálcio é acentuada.

Em geral, os ensaios se definiram entre as 2^{as} e 5^{as} leituras, isto é, de 3 a 6 dias de ensaio, sendo que nos solos VSMA, Euclidelândia e Vista Chinesa houve pequeno aumento do volume, com o tempo, do sistema solo-água sem cimento (proveta de 0%). Somente no solo Cambuí, as variações volumétricas para 0% de cimento não sofreram alteração com o tempo.

Quanto à forma das curvas, com exceção do solo VSMA cuja variação volumétrica com 3% de cimento foi muito pequena, mas sofreu um aumento abrupto a partir daí, os outros solos tiveram elevadas variações volumétricas desde as primeiras percentagens de cimento, havendo após o pico, um decréscimo ou permanecendo constante em alguns.

De acordo com CUNHAC(1992) a repetibilidade de um método pode ser obtida pela simples repetição de determinações por um mesmo analista, usando o mesmo equipamento ou através de um Plano Inter ou Intralaboratorial. Já a reprodutibilidade, somente pode ser obtida através de um desses planos. Logo, com os dez valores de porcentagem de cimento encontrados pelo laboratório A, pôde-se calcular a repetibilidade do método para cada solo, como definido no Apêndice I.

Primeiramente aplicou-se o teste de Dixon para a rejeição de valores dispersos (Apêndice I). De acordo com o teste, somente o valor 11% do solo Euclidelândia foi rejeitado.

Calculou-se então, com os resultados válidos, a repetibilidade (r) através da equação devida, utilizando-se os fatores $t=2.26$ (9 graus de liberdade) para os solos Cambuí, VSMA e Vista Chinesa e $t=2.31$ (8 graus de liberdade) para o solo Euclidelândia.

Na tabela V.1 encontram-se os teores de cimento utilizados nos cálculos, os índices de repetibilidade para cada solo, juntamente com outros indicadores estatísticos.

TABELA V.1 - INDICADORES ESTATÍSTICOS

Solo	Resultados (%Ci)	\bar{x} %Ci	s %Ci	$s_{\bar{x}}$ %Ci	E_r %	CV %	r %Ci
Camb.	4 4 6 4 4 4 4 4 4 6	4.4	0.8 ₄	0.2 ₇	6	19	2.7
VSMA	11 11 9 11 11 9 13 11 11 9	10.6	1.2 ₇	0.4 ₀	4	12	4.4
Eucl.	5 7 5 7 5 7 7 5 5	5.9	1.0 ₅	0.3 ₅	6	18	3.4
V. Ch.	9 7 7 9 9 7 9 7 7 5	7.6	1.3 ₅	0.4 ₉	6	18	4.3

$$\bar{x} \text{ (média aritmética)} = \sum_i x_i / n$$

$$s \text{ (desvio padrão)} = \left[\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / (n-1) \right]^{1/2}$$

$$s_{\bar{x}} \text{ (erro padrão da média)} = s / \sqrt{n}$$

$$E_r \text{ (erro relativo percentual)} = 100 s_{\bar{x}} / \bar{x}$$

$$CV \text{ (coeficiente de variação)} = 100 s / \bar{x}$$

$$r \text{ (repetibilidade)} = t s \sqrt{2}$$

O valor de r indica a máxima diferença permitida entre dois resultados obtidos para um solo, pelo mesmo operador e mesmo equipamento, num período o mais curto possível. Isto quer dizer que, se alguém fizer 2 ensaios no solo Cambuí, por exemplo, e encontrar uma diferença nos resultados maior do que aproximadamente 3 unidades de medida, seus ensaios não estão precisos e portanto deverá repeti-lo pelo menos mais uma vez.

Pelos valores de repetibilidade encontrados, observa-se uma variação dependente dos solos, mostrando que a precisão do método varia com o tipo de solo ensaiado.

Na prática, esses valores podem ser considerados como

números inteiros, desde que não se utiliza números fracionados no ensaio (0%, 3%, 5%,...). Assim, é possível dizer que a repetibilidade variou de aproximadamente 3 a 4 unidades. Geralmente nos procedimentos normalizados, esse índice é dado pela faixa de variação da característica medida. No caso em estudo, então, seria possível limitar as faixas de acordo com o seguinte: para solos que necessitam teores de cimento abaixo de 7% tem-se um r próximo de 3 unidades e acima de 7% tem-se r aproximadamente igual a 4 unidades. No entanto, seria necessário ensaiar uma quantidade maior de solos para confirmar essa afirmação.

V.2 - Ensaios de Reprodutibilidade

Com os ensaios realizados por outros laboratórios, em condições diferentes, pôde-se avaliar as variações do método para cada laboratório, em relação aos ensaios anteriores de repetibilidade e calcular melhor os índices de precisão. Segundo WAENY(1980b), são mais informativos os resultados de dez laboratórios do que dez resultados de um único laboratório.

Além das curvas de um mesmo laboratório terem variado, como ocorrido anteriormente, houve diferenças ainda maiores quando comparadas com as do laboratório A. Por exemplo: os volumes dos sedimentos do laboratório B cresceram muito menos, atingindo para o solo Vista Chinesa, no máximo 140% de variação volumétrica, enquanto

nos gráficos dos ensaios de repetibilidade houve um máximo de até 250%. Os obtidos pelo laboratório C também cresceram menos, observando-se todavia os maiores aumentos nos do laboratório D, onde o solo Euclidelândia atingiu até 160% de variação volumétrica enquanto que os outros tiveram no máximo 110%. Provavelmente essa variação esteja ligada a maneira e energia de agitação da mistura. Porém, não pareceram afetar os resultados finais da porcentagem de cimento requerida pelo solo.

As variações volumétricas nas provetas sem cimento permaneceram estáveis somente no laboratório D, com exceção do Solo Vista Chinesa que aumentou um pouco com o tempo. A maioria dos ensaios se definiu entre as 2^{as} e 5^{as} leituras (3 a 6 dias).

Com esse tipo de programa experimental, chamado de Programa Interlaboratorial (caso multiamostral, multilaboratorial e repetitivo) foi possível através de uma "análise da variância", descrita no Apêndice I, calcular os índices de repetibilidade (r') e reprodutibilidade (R) do método, levando-se em conta todas as causas das variações: entre laboratórios, entre amostras, entre repetições e interação laboratórios-amostras.

A seguir apresenta-se o quadro da subdivisão da variância, calculada com os resultados do quadro IV.2.

QUADRO V.1 - SUBDIVISÃO DA VARIÂNCIA

Origem da variância	SQ	g.1.	MQ	relação	$F_{crit.}$
Entre laboratórios (L)	0.25	3	0.08	0.04	≈ 4
Entre amostras (A)	184.92	3	61.64	---	--
Interação (LA)	20.75	9	2.1	1.97	≈ 2
Entre repetições (O)	37.33	32	1.17	---	--
TOTAL	243.25	47	---	---	--

As relações da penúltima coluna foram comparadas com os valores da distribuição F (F crítico) e como foram menores, pôde-se prosseguir com os cálculos. Calculou-se então, as variâncias generalizadas: $s_r = 1.08$ e $s_R = 1.17$, que multiplicadas pelo fator 2.77, indicado no Apêndice I, resultaram nos índices de repetibilidade e reproduzibilidade do método, isto é, $r' = 3.0\text{ (%CI)}$ e $R = 3.2\text{ (%CI)}$ respectivamente.

Esses números indicam que a diferença máxima que se pode encontrar entre dois resultados de um mesmo operador, em condições de repetibilidade do método em questão, é de 3.0 unidades. E que para operadores e/ou laboratórios diferentes, essa diferença não pode ultrapassar 3.2 unidades. É importante enfatizar, que esses índices são válidos para comparação entre 2 resultados de um mesmo operador ou entre resultados de 2 laboratórios e/ou 2 operadores. Isto é, tendo maior número de resultados de um mesmo operador ou de laboratórios, a diferença entre o valor maior e o menor, ou seja, a amplitude dos

resultados, tem que ser no máximo a repetibilidade ou a reprodutibilidade do método, multiplicadas por um fator. Esse fator é tabelado (NORMA AFNOR, 1970). Por exemplo, os 10 resultados obtidos pelo laboratório A para o solo VSMA são confiáveis, pois a diferença entre o maior valor e o menor ($13-9=4$) é menor que a repetibilidade do método multiplicada pelo fator tabelado para 10 determinações ($3.0 \times 1.61 = 4.8$).

Geralmente o índice R é maior que o r' , já que há mais variações entre medições de operadores diferentes do que de um único operador. No entanto, segundo a Norma ISO/DP 4259-2, a razão R/r não deve ser muito grande. No presente estudo, foram encontrados valores de r' e R praticamente iguais, o que possivelmente se modificaria se o número de laboratórios participantes fosse maior.

Observando os dados do Quadro V.1, nota-se que as variâncias (MQs) entre laboratórios, de interação laboratório-amostra e entre repetições são bem pequenas, principalmente a primeira. No entanto, entre amostras, a variância é elevada, confirmando assim a dependência da precisão do método com o tipo de solo.

Os valores encontrados de r' e R são altos, pois essa análise de variância utilizada nos cálculos, leva em conta a diversificação de amostras, que no caso é grande. Decidiu-se estudar o método com vários tipos de solo, isto é, abrangendo diferentes mineralogias, granulometrias e

composições químicas, devido ao teor de cimento ser dependente de muitas dessas características.

V.3 - Intervalos de confiança para os teores de cimento obtidos através dos ensaios de repetibilidade

De acordo com a "International Organization for Standardization", através da Norma ISO/DP 4259-2 pode-se estabelecer limites de confiança para a repetibilidade e reproduutibilidade de um método.

Quando um único operador, trabalhando dentro dos limites de precisão, quer dizer, dentro da repetibilidade e reproduutibilidade do método, obtém uma série de k resultados dando uma média \bar{x} , pode-se assumir com 95% de confiança que o valor verdadeiro μ da característica medida esteja dentro dos seguintes limites:

$$\mu = \bar{x} \pm R_1 / \sqrt{2}$$

$$\text{onde } R_1 = \left(R^2 - r^2 (1 - 1/k) \right)^{1/2}$$

sendo: R a reproduutibilidade do método
r a repetibilidade do método

Da mesma maneira, quando N laboratórios obtêm 1 ou mais resultados em condições de repetibilidade e reproduutibilidade, dando uma média das médias dos laboratórios \bar{x} , pode-se assumir com 95% de confiança que o

valor verdadeiro μ da característica medida esteja nos seguintes limites:

$$\mu = \bar{x} \pm R_4 / \sqrt{2N}$$

onde:

$$R_4 = \left[R^2 - (r'^2/N - 1) (N - 1 - 1/k_1 - 1/k_2 - \dots - 1/k_{n-1}) \right]^{1/2}$$

Considerando os índices do método em estudo como $r' = 3.0\%$ de cimento e $R = 3.2\%$ de cimento, calculou-se os limites de confiança para os dez resultados encontrados pelo laboratório A para cada solo.

Para os solos Cambuí, VSMA e Vista Chinesa foram utilizados os dez resultados, logo o valor calculado de R_4 foi 1.03; já para o Euclidelândia, cujo resultado de um ensaio foi rejeitado, R_4 foi igual a 1.06. Os limites são os seguintes:

$$\text{Cambuí: } \mu = 4.4 \pm 1.03 \quad \therefore 3.4 \leq \mu \leq 5.4 (\%Ci)$$

$$\text{VSMA: } \mu = 10.6 \pm 1.03 \quad \therefore 9.6 \leq \mu \leq 11.6 (\%Ci)$$

$$\text{Euclidelândia: } \mu = 5.9 \pm 1.06 \quad \therefore 4.8 \leq \mu \leq 7.0 (\%Ci)$$

$$\text{Vista Chinesa: } \mu = 7.6 \pm 1.03 \quad \therefore 6.6 \leq \mu \leq 8.6 (\%Ci)$$

De um modo prático, de acordo com os índices de precisão obtidos, pode-se reescrever os limites de confiança como a seguir:

$$\text{Cambuí: } 3 \leq \mu \leq 5 (\%Ci)$$

$$\text{VSMA: } 10 \leq \mu \leq 12 (\%Ci)$$

$$\text{Euclidelândia: } 5 \leq \mu \leq 7 (\%Ci)$$

$$\text{Vista Chinesa: } 7 \leq \mu \leq 9 (\%Ci)$$

Esse cálculo demonstrou ser importante, pois corrobora a validade do método, já que o intervalo dentro do qual se encontra o valor verdadeiro da característica analisada (teor de cimento) é de 2 unidades, em decorrência dos valores encontrados de r' e R .

V.4 - Proposta de alteração do critério de dosagem do solo-cimento pelo método estudado

Verifica-se que em determinados casos da dosagem físico-química do solo-cimento (veja gráficos e tabelas IV.10, IV.12, IV.24, IV.31, por exemplo), existe pequena ou nenhuma diferença entre os valores da variação volumétrica para o pico e o ponto imediatamente anterior. Em virtude dos resultados da repetibilidade e da reprodutibilidade, bem como do fator econômico, pode-se então concluir que é justificável a decisão de se tomar para a porcentagem de cimento, o valor correspondente ao ponto imediatamente anterior ao pico. Óbviamente o acerto da decisão deve ser corroborado pelo ensaio mecânico.

O exame atento dos resultados levou à determinação de um novo critério para a definição do teor de cimento através do método Físico-químico, que é o seguinte:

1º) Calcula-se a diferença percentual entre as variações volumétricas no pico e no ponto imediatamente anterior:

$$Df(\%) = \frac{\% \Delta V_{\text{pico}} - \% \Delta V_{\text{menor}}}{\% \Delta V_{\text{pico}}} \times 100$$

2º) Para $\Delta V_{\text{pico}} \geq 200\%$: escolhe-se o teor de cimento da ΔV_{menor} se a $D_f \leq 5\%$.

Para $100\% < \Delta V_{\text{pico}} < 200\%$:

se $D_f \leq 5\% \rightarrow$ escolhe-se o teor de cimento relativo a ΔV_{menor} .

se $5\% < D_f \leq 10\% \rightarrow$ escolhe-se a média entre o pico e o anterior.

Para $\Delta V_{\text{pico}} \leq 100\%$: escolhe-se o teor de cimento da ΔV_{menor} se a $D_f \leq 10\%$.

Com esse novo critério foram novamente definidos os teores de cimento para todos os ensaios realizados. Calculou-se também os índices de repetibilidade e reprodutibilidade para cada solo e para o método em geral. Os resultados dessa nova análise estão na tabela V.2; no caso do solo Euclidelândia foi rejeitado o valor 10% pelo teste de Dixon, restando somente 9 determinações válidas.

TABELA V.2 - RESULTADOS PELO NOVO CRITERIO

Solo	Resultados (%Ci)	\bar{x} %Ci	s %Ci	$s_{\bar{x}}$ %Ci	E_r %	CV %	r %Ci
Camb.	4 4 5 4 4 4 4 4 4 4	4.1	0.3 ₂	0.1 ₀	2	8	1.0
VSMA	11 9 9 9 10 9 11 9 9 9	9.5	0.8 ₅	0.2 ₇	3	9	2.7
Eucl.	5 5 5 5 5 5 6 5 5	5.1	0.3 ₃	0.1 ₁	2	7	1.1
V. Ch.	7 7 7 7 7 7 7 7 7 5	6.8	0.6 ₃	0.2 ₀	3	9	2.0

Na tabela V.3 se encontram os resultados dos ensaios dos vários laboratórios, utilizados na análise de

variância para o cálculo de r' e R para o método. O quadro V.2 refere-se a subdivisão da variância com os novos dados.

TABELA V.3 - RESULTADOS DE TODOS OS LABORATÓRIOS

Solo Lab.	Teor de cimento (%)											
	Cambuí			VSMA			Euclidelândia			Vista Chinesa		
A	4	4	5	11	9	9	5	5	5	7	7	7
B	4	4	2	9	9	11	5	7	7	8	8	6
C	4	4	6	9	11	9	6	7	9	6	5	7
D	4	4	4	11	9	9	5	5	6	5	5	7

QUADRO V.2

Origem da variância	SQ	g.1.	MQ	Relação	F _{crit.}
Entre laboratórios (L)	3.56	3	1.19	0.019	~ 4
Entre amostras (A)	193.23	3	64.41	---	--
Interação (LA)	15.02	9	1.67	1.67	~ 2
Entre repetições (O)	32	32	1	---	--
TOTAL	243.81	47	---	---	--

Calculou-se então as variâncias generalizadas $s_e^2 = 1$ e $s_R^2 = 1.09$ que multiplicadas pelo fator 2.77, resultaram nos índices $r' = 2.8$ e $R = 3.0$ (% de cimento).

Nos casos dos dez ensaios realizados pelo laboratório A para cada solo, observa-se que os índices de repetibilidade diminuiram consideravelmente. No entanto a

repetibilidade e a reproducibilidade do método permaneceram praticamente as mesmas, em torno de 3 unidades de medida.

Fica evidente que para o mesmo operador, o método com o critério modificado fornece resultados mais consistentes e que no caso de operadores distintos, a mudança de critério não levou a alteração dos valores de r' e R para o método. Neste ponto cabe uma consideração: comparando o Quadro II.2, nota-se que a resistência média obtida pela dosagem físico-química só atinge o valor mínimo requerido de 2,1 MPa, quando o teor físico-químico é maior ou igual ao da ABCP. Em vista disso, não se deve aplicar o novo critério em pavimentação. Contudo para outras aplicações do solo-cimento, onde a durabilidade do material é mais importante (tijolos, paredes monolíticas, estabilização de encostas, etc...) há indicações (LUCENA et alii, 1986) de que o novo critério pode ser utilizado.

V.5 - Estudo das correlações entre a variação volumétrica e as características dos solos

Foi utilizado o programa "PECS - ESTATÍSTICA EM MICROCOMPUTADORES", para obter algumas correlações, com o objetivo de esclarecer melhor o mecanismo físico-químico do método.

Procurou-se primeiramente, correlacionar as percentagens de cimento com as características dos solos, não se obtendo resultados satisfatórios. Somente com a matéria orgânica obteve-se um coeficiente de correlação de

0.9106, significando que o teor de cimento requerido pelo solo é fortemente influenciado pela quantidade de matéria orgânica.

Tentou-se então, correlações entre as características físicas e químicas e as variações volumétricas, utilizando-se as médias das percentagens de variações volumétricas obtidas nos 10 ensaios de cada solo. Houve correlação significativa a 1% com K_i , K_r e o teor de silica, sendo os coeficientes iguais a -0.9157, -0.9695 e -0.9220 respectivamente, significando que a variação volumétrica aumenta inversamente com essas características.

Obteve-se também correlações de significância elevada entre a variação volumétrica e as quantidades de gibbsita e caulinita (0.8195 e -0.9135 respectivamente). Os valores indicam que quanto mais gibbsita existir no solo, maior deve ser o volume de solo-cimento, acontecendo o inverso com a porcentagem de caulinita.

V.6 - Influência de aditivo

Tentou-se, com a adição de cloreto de cálcio, observar alguma mudança no método, tanto no tempo de duração quanto na variação volumétrica. Este acelera a hidrólise do cimento e consequentemente a velocidade de formação do hidróxido de cálcio. No entanto, não se verificou nenhuma alteração significativa nos resultados. Os máximos para cada porcentagem de cimento foram atingidos no mesmo tempo que nos ensaios sem o aditivo, e

para as variações volumétricas nota-se que a curva do solo VSMA, apresenta um pico mais elevado que nos ensaios normais, ocorrendo o inverso com o solo Vista Chinesa. Novos estudos são necessários para esclarecer melhor este ponto.

V.7 - Influência de pré-tratamento

Com o objetivo de observar se ultra-sonificando o solo em suspensão aquosa, isto é, desagregando-o, o método se definiria mais rápido, verificou-se que realmente os máximos para cada porcentagem de cimento foram obtidos logo nas 1^{as} e 2^{as} leituras.

O ultra-som faz com que os microagregados do solo se desfaçam e as suas partículas fiquem com maior superfície de contato disponível para reagir com o cimento. Enquanto que sem esse tratamento, esses microagregados são desfeitos aos poucos, cada vez que se agita a suspensão, liberando gradualmente as superfícies para o ataque do hidróxido de cálcio e assim consumindo um tempo maior para o término do ensaio.

Observando o gráfico do solo Euclidélandia, nota-se que as variações volumétricas foram bem maiores que as sem tratamento, atingindo 176%, e que a curva ficou melhor definida. Fica claro então, que esse solo deve ser constituído de elevada porcentagem de microagregados e que o pré-tratamento é bastante útil e eficaz.

Os resultados finais de teor de cimento ficaram dentro dos obtidos sem esse tratamento, confirmando a peneira nº 10 como satisfatória para a realização do método.

V.8 - Influência da temperatura

Apesar de terem sido ensaiados apenas dois solos, o Cambuí e o Euclidelândia, foi possível observar, que à temperatura mais alta, no caso aproximadamente 60°C, as curvas não se definiram no tempo normal de ensaio. Os volumes cresceram bem menos do que à temperatura ambiente, provavelmente devido à menor reação com o hidróxido de cálcio, que nesta temperatura está menos disponível, já que sua solubilidade decresce com o aumento de temperatura.

Supõe-se que nesta temperatura, sendo a hidrólise do cimento rápida, a etapa de reações pozolânicas seja atingida antes da satisfação do solo pela cal, pouco solúvel, obtendo assim as curvas crescentes.

Pelos ensaios ficou claro que o método não funciona em temperaturas mais altas.

CAPITULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse capítulo apresenta-se um resumo das principais contribuições do trabalho ao estudo do "Método Físico-químico de dosagem do solo-cimento" e coloca-se algumas sugestões para futuras pesquisas visando o aperfeiçoamento nas medidas dos índices de precisão e o esclarecimento do seu mecanismo.

- Escolheu-se para esse estudo, os índices de repetibilidade e reproduzibilidade para definir a precisão do método, por serem atualmente, os parâmetros estatísticos correntemente utilizados para tal fim.
- Através dos dez resultados para cada solo, obtidos pelo Laboratório A, usando o método tal como foi estabelecido, verificou-se que a precisão do método varia com o tipo de solo ensaiado, ficando a diferença máxima entre dois resultados de um mesmo operador, entre 3 e 4% de cimento.
- Calculando-se os índices pelo Programa Interlaboratorial, realizado com 4 laboratórios, 4 solos e 3 repetições, foram obtidos valores para a repetibilidade e reproduzibilidade iguais a aproximadamente 3% de cimento.

Os resultados assim obtidos são mais informativos estatisticamente que os encontrados por um mesmo operador.

- Os resultados dos índices de repetibilidade e reprodutibilidade foram relativamente altos, pela variabilidade de características das amostras. Para poder estudar o comportamento do método diante de várias situações, optou-se por trabalhar com diferentes tipos de solo, já que se desconhece qual a característica que comanda o teor de cimento que "satisfaz" o solo.

- Com os valores encontrados de r' e R para o método, foi possível definir um intervalo de confiança para os dez resultados de cada solo obtidos pelo Laboratório A: o intervalo no qual está o verdadeiro teor de cimento requerido pelo solo é de 2%. Para o solo Cambuí está entre 3 e 5%, para o VSMA entre 10 e 12%, para o Euclidelândia entre 5 e 7% e para o Vista Chinesa de 7 a 9% de cimento.

- Tentou-se obter correlações lineares das características dos solos com o teor de cimento (%Ci), conseguindo-se somente resultado positivo com a matéria orgânica. Contudo, foram obtidas correlações significativas de algumas características com a variação volumétrica percentual (%ΔV), sendo elas: Ki, Kr, teor de sílica, gibbsita e caulinita.

- Nos ensaios com aditivo, verificou-se não ocorrer nenhuma alteração significativa no teor de cimento obtido.

Quanto aos ensaios com pré-tratamento, observou-se que o ultra-som acelera-os, sendo mais eficaz em solos com uma elevada porcentagem de microagregados.

No que se refere aos realizados numa temperatura mais alta, detectou-se um comportamento anômalo que necessita de maiores estudos para o seu esclarecimento.

- Foi proposto um novo critério para a escolha do teor de cimento, justificado pelos índices altos de repetibilidade e reprodutibilidade e ainda por razões econômicas. Dependendo da diferença entre a variação volumétrica percentual do pico da curva e do ponto anterior, escolhe-se o teor de cimento relativo a um ou a outro. Quando a diferença for pequena, recomenda-se que, em princípio, seja testado mecanicamente o teor de cimento menor, como medida de economia.

O critério não afetou consideravelmente os índices r' e R obtidos pelo Programa Interlaboratorial, tendo somente influenciado os dez ensaios realizados pelo Laboratório A, os quais tiveram seus índices de repetibilidade diminuídos.

- No tocante aos solos ditos laterizados, os resultados mostraram que o Método Físico-químico é perfeitamente aplicável, já que a interação química entre suas assembleias mineralógicas e o cimento é vigorosa e rápida. A prova são as elevadas variações volumétricas resultantes dessa interação.

SUGESTÕES

- Após a realização do presente estudo, concluiu-se que necessário se faz a aplicação de um Programa Interlaboratorial mais extenso, com a participação de pelo menos mais um laboratório e, principalmente, com maior número de amostras.
- É importante ainda, salientar a necessidade de comparação do Método Físico-químico com o Mecânico, utilizando-se uma variedade maior de solos.
- Seria interessante um estudo sobre as estruturas formadas durante todo o processo, em cada região da curva (variação volumétrica percentual versus porcentagem de cimento). Isto é, as estruturas da parte ascendente da curva, do pico e posterior a ele.

REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI MATERIALS JOURNAL, COMMITTEE 230 (1980), "State-of-the-art Report on Soil-Cement", July/August.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (1977), "Normas de Dosagem e Métodos de Ensaios de Solo-Cimento", São Paulo.

BUCKMAN, H. D. e BRADY, N. C. (1974), Natureza e Propriedades dos Solos, 3^a edição em Português, Livraria Freitas Bastos S/A, Rio de Janeiro.

CASANOVA, F. J. (1988), "O estado atual dos estudos sobre a dosagem fisico-química do solo-cimento", Relatório curso COC-802, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CASANOVA, F. J. e CERATTI, J. A. (1986), "The Assessment of Cement Requirement of Oxisols by a Physico-Chemical Method", 8th International Soil Classification Workshop, part 1, pp 243, Brazil.

CASTRO, F. J. C. O. (1981), "Um estudo físico-químico-matemático da estabilização alcalina de solos argilosos", Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CASTRO, F. J. C. O., ANTUNES, F. S., POLIVANOV, H., SANTOS, R. D. e GAMA, J. R. N. F. (1984), "Perspectivas do uso do

ataque sulfúrico (H_2SO_4 1:1) e da dissolução alcalina (NaOH 0.5N) para a análise mineralógica expedita de solos com B textural e B latossólico", EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, Boletim de Pesquisa, nº 34.

CAULCUTT, R. e BODDY, R. (1983), Statistics for Analytical Chemists, Chapman and Hall Ltda, New York.

CERATTI, J. A. P. (1991), "Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos", Tese D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CERATTI, J. A. P. e CASANOVA, F. J. (1988), "Um método físico-químico para a dosagem de solo-cimento", Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em Geotecnia, vol.1, pp 191, Rio de Janeiro.

CHADDA, L. R. (1971), "A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils", Indian Concrete Journal, 45(7), pg 298-314.

COMPANION, A. L. (1970), Ligaçāo Química, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.

CONCHA, L. M. C. (1986), "Estudo da Fadiga de duas misturas de solo-cimento", Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

COSTA, J. B. (1973), Caracterização e Constituição do Solo, Fundação Colouste Gulbenkian, 2^a edição, Lisboa.

COSTA, C. R. V., LUCENA, F. B., QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., LIMA, R. C. e DINIZ, A. A. (1986), "Estudo de Solos Lateríticos: Estabilização com cal", 21^a Reunião Anual de Pavimentação, Salvador/Bahia.

CROFT, J. B. (1967), "The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization", Géotechnique, vol 17, pp 119-135.

CUNHA, M. F. P. (1992), "Programa Interlaboratorial", Apostila Curso de Qualidade em Laboratórios, IBP, Rio de Janeiro.

DOUBLE, D. D. (1980), "Studies of the hydration of Portland Cement", International Congress on Admixtures (CI80), London.

ENAMORADO, M. A. (1990), "Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-químico para dosagem de solo-cimento", Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

HERZOG, A. (1967), "Evidence for a Skeleton-Matriz Structure in clays stabilized with Portland Cement", 5th Australia-New Zealand Conference on SMFE.

INGLES, O. G. (1970), "Mechanisms of Clay Stabilization with

inorganic acids and alkalis", Aust. J. Soil., 8(81).

KAWAMURA, M., HASABA, S., NAKANO, H. & SUGIURA, S. (1970), "A Role of the interaction of the clay minerals with Portland Cement in Soil-Cement mixtures", Transactions of JSCE, vol.1, part 2.

LOBO, I. (1986), "Eletroquímica de Latossolos: efeito da adsorção de cátions e ânions", parte da Revisão Bibliográfica de Tese de M.Sc., Departamento de Solos, UFRRJ, Rio de Janeiro.

LUCENA, F.B., QUEIROZ DE CARVALHO, J.B., DINIZ, A.A., COSTA, C.R.V. e LIMA, R.C. (1986), "Estudo dos Solos Lateríticos: Propriedades de Solos Lateríticos estabilizados com cimento", 21^ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador/Bahia.

MANDEL, J. (1971), "Repeatability and Reproducibility", Materials Research and Standards, MTRSA, vol.11, n°8, pp. 8.

MILLER, J.C. e MILLER, J.N. (1986), Statistics for Analytical Chemistry, Ellis Horwood Limited, England.

MITCHELL, J.K. (1976), Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, USA.

NAGELE, E. (1986), "The zeta potential of Cement", part.II,

Cement and Concrete Research, vol.16, pp 853-863, USA.

NAGELE, E. (1987), "The zeta potential of Cement", part.III,
Cement and Concrete Research, vol.17, pp 573-580, USA.

NASCIMENTO, A.A.P. e JÚNIOR, F.A. (1991), "Solo-Cimento: A
nova norma de dosagem", 25^a Reunião Anual de
Pavimentação, São Paulo.

NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. e LUCENA, F.B. (1988), "Estudos
de Correlações entre a área específica e a atividade
pozolânica de solos lateríticos da Região Norte e
Nordeste do Brasil", 23^a Reunião Anual de
Pavimentação, Florianópolis.

PINTO, C.S. (1962), "Estudo das propriedades estabilizadoras
do Cimento Portland e da cal hidratada",
3^a Reunião Anual de Pavimentação, Associação
Brasileira de Pavimentação.

PINTO, C.S. (1980), "Evolução das Pesquisas de Laboratório
sobre solo-cimento", ABCP, São Paulo.

SANTOS, P.S. (1975), Tecnologia de Argilas, vol.1, Editora
Edgard Blücher, São Paulo.

SIENKO, M.J. e PLANE, R.A. (1972), Química, Companhia
Editora Nacional, 4^a edição, São Paulo.

STAROSELSKY, A. A., OLGINSKY, A. G. e SPIRIN, Yu.A. (1974), "Electrokinetic Properties of Cement Stone", The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow.

STEOPOE, A. (1958), "Suspensões aquosas de cimento", Tradução Jorge Santos Basilio, Revue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics (Edition C), n° 508, pp. 1-9.

UPENDRA, S. e UEHARA, G. (1986), "Electrochemistry of the Double-Layer: Principles and Applications to Soils", Soil Physical Chemistry, Cap. 1, Ed. Donald L. Sparks, USA.

VAN RAIJ, B. (1988), "Propriedades Eletroquímicas de Solos", Seminário Avançado de Química e Fertilidade do Solo, Ed. Fundação Cargill, Piracicaba (SP).

VIEIRA, L. S. (1975), Manual da Ciência do Solo, Editora Agronômica Ceres, São Paulo.

WAENY, J. C. C. (1980a), "Repetitividade e Reprodutividade I", Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Programa de Aferição Metrológica Interna, série ACM-18, São Paulo.

WAENY, J. C. C. (1980b), "Programas Interlabororiais - Introdução à Metodologia e Análise dos Resultados", Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São

Paulo S/A, série: Técnicas e Métodos 7.

ZELWER, A. (1980), "Propriétés Électrocinétiques à la surface des minéraux du Ciment Portland", 7th International Congress on the Chemistry of Cement, vol.II, Paris.

NORMAS:

ISO/DP 4259.2 (1989), "Petroleum Products - Determination and application of precision data in relation to methods of test", International Organization for Standardization.

AFNOR-NF-X-06- 041 (1970), "Applications de la Statistique - Fidélité d'une Méthode d'Essai", Guide pour les Essais Interlaboratoires.

APÊNDICE I

REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Um procedimento analítico pode ser afetado por três tipos de erros : o aleatório, o sistemático e o grosseiro. Este último é facilmente identificado. O erro sistemático conduz ao aparecimento de um resultado tendencioso, isto é, faz com que o resultado obtido se distancie do verdadeiro de um valor constante e em uma só direção definida. Já os aleatórios são irregulares, imprevisíveis e estão presentes em todas as medidas; nas determinações repetidas se manifestam em variabilidade, sendo quantificados calculando-se o desvio padrão das determinações.

A precisão de um método é definida como a dispersão observada nos resultados fornecidos pelo seu emprego e é afetada pelos erros aleatórios. Sua determinação pode ser feita através dos índices de repetibilidade e reproducibilidade, conceituados abaixo:

Repetibilidade: é a menor variabilidade entre resultados repetidos, obtidos num mesmo material por um único laboratório (MANDEL, 1971). Segundo CAULCUTT and BODDY (1983), é o valor abaixo do qual a diferença absoluta entre dois resultados de testes obtidos nas mesmas condições deve ser esperada, para ficar com uma

probabilidade especificada, usualmente igual a 95%. Considera-se como mesmas condições: o mesmo operador, mesmo equipamento e mesmo ambiente.

Para seu cálculo é necessário uma estimativa da variabilidade das determinações repetidas (calcula-se o desvio padrão) e aplica-se a fórmula: $r = t \sqrt{2} s$, onde r é repetibilidade, s é o desvio padrão, e t é tabelado (distribuição t-student) para 95% de confiança, entrando na tabela com o número de repetições menos 1, isto é, o grau de liberdade.

Reprodutibilidade: refere-se, segundo MANDEL(1971), a menor variabilidade entre os resultados obtidos num mesmo material por laboratórios diferentes, isto é, por operadores e aparelhagens diferentes, com 95% de confiança.

Nesse caso, a variação de resultados tem origem em duas causas: a variação intrínseca, que é a interna específica de um laboratório, e a variação extrínseca, causada pela multiplicidade de laboratórios. No caso de várias amostras, não iguais, há um efeito adicional, causado pela interação entre laboratórios e amostras.

Com resultados de vários laboratórios em várias amostras, pode-se calcular os índices de repetibilidade (r) e reproducibilidade (R) através de uma análise de

variância, cujo processo está resumido a seguir (WAENY, 1980a):

1º) Os resultados devem ser dispostos em células, num arranjo matricial onde X_{ijk} é um resultado na célula ij que contém R repetições. Há no total AL células, correspondendo a A amostras e L laboratórios. As amostras correspondem a colunas, "i", e os laboratórios a linhas "j".

2º) Para analisar os resultados é necessário calcular primeiramente as várias somas quadráticas, isto é, as SQs:

$$SQ_T = \left(\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} \right)^2 / RLA \text{ (quadrado da soma de todos os resultados) } / R \times L \times A$$

$$SQ_L = \sum_j \left(\sum_i \sum_k X_{ijk} \right)^2 / RA \text{ (soma dos quadrados da soma dos resultados de cada laboratório-linha no caso) } / R \times A$$

$$SQ_A = \sum_i \left(\sum_j \sum_k X_{ijk} \right)^2 / RL \text{ (soma do quadrado da soma dos resultados de cada amostra-coluna no caso) } / R \times L$$

$$SQ_R = \sum_i \sum_j \left(\sum_k X_{ijk} \right)^2 / R \text{ (soma dos quadrados da soma dos resultados de cada laboratório em cada amostra-célula no caso) } / R$$

$$SQ_O = \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}^2 \text{ (soma dos quadrados de todos os resultados)}$$

3º) Calcula-se então as variâncias (MQs), que são os resultados da divisão de combinações de várias SQs, pelos

respectivos valores de graus de liberdade (g.1).

Organiza-se um quadro como o seguinte:

QUADRO DA SUBDIVISÃO DA VARIÂNCIA				
Origem da variância	Valor de SQ	g.1.	Valor de MQ	Relação
Entre labs. (L)	$SQ_L - SQ_T$	L-1	MQ_L	MQ_L / MQ_A
Entre amostras (A)	$SQ_A - SQ_T$	A-1	MQ_A	---
Interação (LA)	$SQ_R - SQ_L - SQ_A + SQ_T$	(L-1)(A-1)	MQ_{LA}	MQ_{LA} / MQ_O
Entre repetições(O)	$SQ_O - SQ_R$	AL(R-1)	MQ_O	---
TOTAL	$SQ_O - SQ_T$	RLA-1	---	---

As relações, dadas na última coluna, devem ser comparadas com os valores da distribuição F, dados em tabelas. Se o valor da relação exceder o valor dado na tabela, há fatores não aleatórios, que devem ser eliminados antes de calcular os valores dos índices (tabela III de WAENY, 1980a).

4º) Calcula-se as variâncias generalizadas, s_R^2 e s_r^2 :

$$MQ_L = s_O^2 + R s_{LA}^2 + A R s_L^2$$

$$MQ_{LA} = s_O^2 + R s_{LA}^2$$

$$MQ_O = s_O^2$$

Para o caso de várias amostras com repetições (caso multilaboratorial, multiamostral, repetitivo):

$$s_R^2 = s_L^2 + s_{LA}^2 + s_O^2 \quad \text{e} \quad s_r^2 = s_O^2$$

5º) Os valores de R e r são obtidos por aplicação de fatores numéricos a s_R e s_r . Considerando um nível de confiança igual a 95%, uma diferença entre dois valores e distribuição normal, o fator utilizado é $1.96 \sqrt{2} = 2.77$.

Rejeição de Dispersos

(Teste de Dixon)

O resultado de alguns testes, em uma série de observações ou proveniente de laboratórios diferentes, pode apresentar valores dispersos tão diferentes dos demais que aparentemente nem pertencem ao conjunto. Para saber se o resultado deve ser rejeitado ou não, é feito um teste simples cuja aplicação é bastante ampla e recomendada por várias instituições técnicas (WAENY, 1980b). É o teste de Dixon, que só deve ser aplicado quando não houver erro grosseiro visível na sequência de observações. A confiança ou nível de significação a 1% ou 5% é um valor arbitrariamente escolhido, sendo normalmente o de 5% o mais utilizado.

Procedimento: arranja-se os resultados em ordem crescente e aplica-se as fórmulas indicadas na tabela a seguir. Compara-se o Q calculado com o tabelado e se o primeiro for maior, o resultado deve ser rejeitado.

VALORES CRÍTICOS PARA O TESTE DE DIXON

Fórmulas	H (nº de result.)	valor crítico 5%
$Q_{10} = \frac{z(z) - z(1)}{z(H) - z(1)}$ ou $Q_{10} = \frac{z(H) - z(H-1)}{z(H) - z(1)}$ para o menor ou maior respectivamente	3	0.970
	4	0.829
	5	0.710
	6	0.628
	7	0.569
$Q_{11} = \frac{z(z) - z(1)}{z(H-1) - z(1)}$ ou $Q_{11} = \frac{z(H) - z(H-1)}{z(H) - z(z)}$ para o menor ou maior respectivamente	8	0.608
	9	0.564
	10	0.530
	11	0.502
	12	0.479
	13	0.611
	14	0.586
	15	0.565
	16	0.546
$Q_{22} = \frac{z(a) - z(1)}{z(H-2) - z(1)}$ ou $Q_{22} = \frac{z(H) - z(H-2)}{z(H) - z(a)}$ para o menor ou maior respectivamente	17	0.529
	18	0.514
	19	0.501
	20	0.489
	21	0.478
	22	0.468
	23	0.459
	24	0.451

VALORES CRÍTICOS PARA O TESTE DE DIXON (cont.)

Fórmulas	H C n° de result.)	valor crítico 5%
	25	0.443
	26	0.436
	27	0.429
	28	0.426
	29	0.417
	30	0.412

R. S. Gardner in Crow, E. L., Davis, F. A. and Maxfield, M. W.
 Statistical Manual, Dover Publications, 1960 : Table 16(8).