

**MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM****Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à compressão simples**

Norma rodoviária

Método de Ensaio

DNER-ME 180/94

p. 01/11

**RESUMO**

Este documento, que é uma norma técnica, define o método a ser utilizado para determinação da resistência à compressão simples de solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada, a serem utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos.

**ABSTRACT**

This document presents the procedure for determination of compressive strength of soils stabilized with fly ash and hydrated lime suitable for pavement sub-base and base layers.

**SUMÁRIO**

- 0 Apresentação
- 1 Introdução
- 2 Objetivo
- 3 Referências
- 4 Definições
- 5 Aparelhagem
- 6 Operações preliminares
- 7 Determinação da resistência à compressão simples
- 8 Determinação das curvas de resistência à compressão simples

Anexo informativo

**0 APRESENTAÇÃO**

Esta Norma decorreu da necessidade de se adaptar, quanto à forma, a DNER-ME 180/87 à DNER-PRO 101/93, mantendo-se inalterável o seu conteúdo técnico.

**Macrodescriptores MT:** camada do pavimento, DNER, ensaio, método de ensaio, resistência dos materiais, cal hidratada

**Microdescriptores DNER:** camada de base, ensaio, ensaio de laboratório, ligante aéreo, pozolana, resistência dos materiais, sub-base

**Palavras-chave IRRD/IPR:** cal (4574), cinza em suspensão, volante (4580), ensaio (6255), estabilização do solo (3689), método de ensaio (6288), resistência (materiais) (5544), base (pavimento) (2961)

**Descriptores SINORTEC:** cal hidratada, cinzas, ensaio, ensaio de laboratório, normas, pavimentos de estradas, resistência dos materiais

Aprovada pelo Conselho de Administração em 23/02/87

Resolução nº 226/87, Sessão nº CA/ 06/87

Processo nº 20100022281/86-3

Autor: DNER/DrDTc (IPR)

Adaptação da DNER-ME 180/87 à DNER-PRO 101/93, aprovada pela DrDTc em 13/04/94

## 1 INTRODUÇÃO

Esta Norma resultou das experiências realizadas no âmbito do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e do Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina (DER - SC).

## 2 OBJETIVO

Esta Norma prescreve o método para avaliação do efeito cimentante de materiais pozolânicos na estabilização de solos, em função das correlações existentes entre a massa específica aparente seca "versus" teor de umidade da mistura e a resistência à compressão simples "versus" teor de umidade da mistura, em uma composição compactada e constituída de solo, cinza volante e cal hidratada, sendo utilizada a fração de solo que passa na peneira de 2,54 cm (1 pol).

## 3 REFERÊNCIAS

### 3.1 Norma complementar

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

ABNT MB-3, de 1974, registrada no SINMETRO como NBR-5739, designada Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.

### 3.2 Referências bibliográficas

No preparo desta Norma foram consultados os seguintes documentos:

- a) DNER-ME 180/87, designada Determinação da resistência à compressão simples de solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada;
- b) Nardi, José Vidal - Estudo do efeito de aditivos na estabilização de solo arenoso com cal e cinza volante, anais do 5º congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações, São Paulo, outubro de 1974;
- c) Nardi, José Vidal - Estabilização de areia com cinza volante e cal; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura, tese M.Sc, COPPE-UFRJ, dezembro de 1975;
- d) Nardi, José Vidal - Determinação da resistência à compressão simples de misturas de solo estabilizado com cinza volante e cal hidratada. Tentativa de Método de Ensaio. 14ª reunião anual de pavimentação da ABPv, João Pessoa-PB, setembro de 1978.

## 4 DEFINIÇÕES

Para os fins desta Norma são adotadas as seguintes definições:

### 4.1 Material pozolânico

Material silícico ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouco ou nenhum valor cimentante, porém em forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes.

### 4.2 Cinza volante

Rejeito industrial com características pozolânicas e proveniente da combustão do carvão vapor pulverizado utilizado em usinas termoelétricas.

#### 4.3 Aditivo(s)

Modificador(es) da qualidade de um material, para conferir-lhe as características adequadas ao objetivo de seu emprego.

#### 4.4 Cal hidratada (comercial)

Pó seco obtido pela hidratação adequada de cal virgem constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com pequena quantidade de impurezas (outros elementos).

#### 4.5 Efeito cimentante

Efeito de adição de cinza volante e cal a solo, expresso pelas resistências à compressão de corpos-de-prova confeccionados de acordo com esta Norma.

### 5 APARELHAGEM

Para realização deste ensaio, deve-se dispor de:

- a) almofariz com capacidade de 5 l e mão de gral recoberta de borracha;
- b) balança com capacidade de 1,2 kg, sensível a 0,01 g;
- c) balança com capacidade de 10 kg, sensível a 0,1 g;
- d) balança com capacidade de 15 kg, sensível a 1 g;
- e) bisnaga de plástico com 1 l de capacidade;
- f) cápsula de alumínio com capacidade de 300 ml, tarada e numerada;
- g) colher de madeira para mistura a seco;
- h) colher de pedreiro nº 7 para mistura úmida;
- i) estufa elétrica com reostato capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;
- j) espátula de lâmina flexível, de cerca de 20 cm de comprimento e 3 cm de largura;
- k) luvas de borracha;
- l) máscara de proteção à respiração;
- m) molde cilíndrico metálico de paredes tripartidas, com 10,0 cm de diâmetro interno e 20,0 cm de altura, com um colarinho metálico a ele adaptado, com altura de, no mínimo, 8,0 cm;
- n) peneiras de malhas quadradas de aberturas nominais de 2,54 cm e 1,9 cm, de acordo com a especificação da ABNT EB-22, de 1988, registrada no SINMETRO como NBR 5734, designada Peneiras para ensaio;
- o) placa cerâmica vitrificada (azulejo), formato quadrado com 13 cm de lado;
- p) prensa com capacidade de 50 000 N (5 tf) ou mais, permitindo a aplicação de carga continuamente, com uma velocidade de 0,3 MPa a 0,8 MPa por segundo, até a ruptura do corpo-de-prova;

- q) recipiente de alumínio de, no mínimo, 6 litros de capacidade, para mistura a seco e úmida;
- r) régua de aço biselada de cerca de 30 cm de comprimento;
- s) repartidor de amostras com 2,5 cm de abertura;
- t) sacos plásticos de 20 litros de capacidade, com cerca de 40 cm de lado e 58 cm de altura;
- u) soquete cilíndrico de bronze ou latão, para compactação de face inferior plana, de altura de queda de 45,72 cm, com massa igual a 4,536 kg e 5,08 cm de diâmetro, tipo sem camisa externa;
- v) tabuleiro de chapa de ferro galvanizado, de 50 cm por 30 cm de base e 6 cm de altura (aproximadamente).

## 6 OPERAÇÕES PRELIMINARES

### 6.1 Preparo dos materiais

#### 6.1.1 Cinza volante

A amostra de cinza volante para mistura deve ser estocada em sacos plásticos e utilizada no seu estado natural seco, retirando-se apenas a quantidade a ser usada em cada ensaio.

#### 6.1.2 Cal hidratada (comercial)

A amostra de cal hidratada para mistura deve ser estocada em sacos plásticos e utilizada no seu estado natural seco, retirando-se apenas a quantidade a ser usada em cada ensaio.

#### 6.1.3 Solo

6.1.3.1 A amostra de solo para mistura deve ser completamente seca através do ar, de lâmpadas infravermelho ou estufa ( $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ), destorroada no almofariz pela mão de gral, homogeneizada e reduzida com o auxílio do repartidor de amostras ou por quarteamento, até se obter uma amostra representativa de 3 500 g, para solos siltosos ou argilosos, e 4 500 g para solos arenosos ou pedregulhosos.

6.1.3.2 Esta amostra representativa (ver item 6.1.3.1) deve ser passada na peneira de 2,54 cm (1 pol); havendo material retido nesta peneira deve-se proceder à substituição do mesmo por igual massa de material que passa na peneira de 2,54 cm (1 pol) e retido na peneira de 1,9 cm (3/4 pol), obtida de outra amostra representativa de conformidade com o item 6.1.3.1.

6.1.3.3 As operações referidas nos itens 6.1.3.1 e 6.1.3.2 devem ser repetidas tantas vezes quantos corpos-de-prova tiverem de ser moldados.

### 6.2 Pesagem dos materiais da mistura

6.2.1 Os materiais de mistura, a saber: solo, cinza volante e cal hidratada, praticamente secos, devem ser pesados de acordo com as proporções escolhidas para a mistura.

6.2.2 A umidade higroscópica dos materiais, na determinação das massas componentes da mistura, pode ser desprezada para os solos granulares.

6.2.3 As pesagens abaixo discriminadas devem ser realizadas com as sensibilidades a seguir indicadas:

- cilindro mais solo compactado, na sensibilidade de 1 g;
- cinza volante, cal hidratada e água, na sensibilidade de 0,1 g;
- aditivos, na sensibilidade de 0,01 g.

6.2.4 O aditivo quando utilizado não deve ser considerado como um dos componentes principais da mistura, e o percentual de sua massa referir-se-á à massa total da mistura seca de solo, cinza volante e cal hidratada, considerada como 100%.

6.2.5 Caso o solo utilizado seja uma mistura de dois ou mais solos ou um solo-brita, deve-se pesar, para cada corpo-de-prova a ser executado, as suas partes componentes separadamente.

6.2.6 O diâmetro máximo do agregado deve ser limitado a 2,54 cm (1 pol) o equivalente a 1/4 de diâmetro interno do cilindro.

6.3 Mistura dos materiais, a saber: solo, cinza volante e cal hidratada.

6.3.1 Mistura a seco

6.3.1.1 A primeira homogeneização, a seco, deve ser em recipiente de alumínio e com colher de madeira, até atingir coloração uniforme e constante. A mistura deve ser feita em etapas progressivas, iniciando-se com a cinza volante, cal hidratada e aditivo (se utilizado), prosseguindo-se com outros materiais em ordem crescente de granulometria.

6.3.1.2 Devem ser usadas máscara e luvas quando da mistura dos materiais.

6.3.2 Mistura úmida

Após mistura a seco deve-se proceder à molhagem e mistura do material contido no recipiente, por intermédio de uma bisnaga plástica (com uma quantidade de água pré-calculada) e colher de pedreiro. A distribuição de água deve ser gradativa e uniforme em toda a superfície da mistura, efetuando-se através de ciclos de molhagem e mistura manual. Terminada a operação de molhagem, a última mistura manual deve ser aplicada até a massa dos componentes atingir coloração e textura uniforme.

**Obs:** As operações de mistura podem ser efetuadas com equipamentos mecânicos.

6.4 Determinação de umidade da mistura

6.4.1 As amostras para o cálculo do teor de umidade devem ser retiradas do próprio recipiente de mistura, no início da compactação das 1ª e 2ª camadas e no final da última camada a ser compactada. As pesagens devem ser feitas com aproximação de 0,01 g.

6.4.2 Os teores de umidade devem ser calculados pela seguinte fórmula:

$$h = \frac{(P_h - P_s) \cdot 100}{P_s}$$

onde:

h - teor de umidade em percentagem;

P<sub>h</sub> - massa da mistura úmida;

P<sub>s</sub> - massa da mistura seca em estufa entre 105 °C e 110 °C.

## 6.5 Compactação da mistura

6.5.1 O material é compactado no molde cilíndrico (ver 5.m) em 5 (cinco) camadas iguais, de forma a ter-se uma altura total de solo de cerca de 21,5 cm após compactação; recebendo cada camada o número de golpes (n) calculado pela fórmula abaixo, em função da energia de compactação (E) escolhida, a seguir:

normal  $E = 0,59 \text{ MN.m por m}^3$  (60 412 kgf.m por  $\text{m}^3$  ou  $n = 9$  golpes), intermediária  $E = 1,29 \text{ MN.m por m}^3$  (131 813 kgf.m por  $\text{m}^3$  ou  $n = 20$  golpes) e modificada  $E = 2,69 \text{ MN.m por m}^3$  (274 610 kgf.m por  $\text{m}^3$  ou  $n = 41$  golpes).

A compactação é efetuada através de um soquete de massa igual a 4,536 kg caindo de uma altura de 45,72 cm, sendo esta energia distribuída uniformemente em toda a superfície de cada camada.

$$n = \frac{E.V}{9,8.P.H.N_c}$$

sendo:

n - número de golpes por camada;

E - energia de compactação (trabalho por unidade de volume) em N.m por  $\text{m}^3$ ;

V - volume do material compactado em  $\text{m}^3$ ;

P - massa do soquete em kg;

H - altura do soquete em m;

$N_c$  - número de camadas.

6.5.2 A seguir, destaca-se lentamente o colarinho, e retira-se o excesso de altura de material compactado do cilindro com ajuda inicialmente de uma espátula que rasa a parte periférica e depois com uma régua biselada, que rasa o material na altura do molde. A massa específica aparente do material úmido compactado ( $m'_s$ ) deve ser determinada por dedução da massa do cilindro. Essas operações devem ser repetidas para teores crescentes de umidade, tantas vezes quantas necessárias, para caracterizar a curva de compactação correspondente à energia de compactação adotada. Aconselha-se que tal curva seja formada no mínimo por 5 (cinco) pontos, sendo que 3 (três) no ramo seco e 2 (dois) no úmido. Cada ponto será visualizado pela média de 9 (nove) corpos tendo aproximadamente a mesma umidade, correspondendo a um total de 45 corpos-de-prova, os quais nos fornecerão as curvas de resistências para 7, 14 e 28 dias de cura.

6.5.3 A curva de compactação resulta das massas específicas aparentes secas ( $m_s$ ) marcadas nas ordenadas de um gráfico de dois eixos ortogonais e os correspondentes teores de umidade ( $h\%$ ) nas abscissas.

6.5.4 O valor da ordenada máxima da curva de compactação correspondente à massa específica aparente seca máxima ( $m_{s\text{máx}}$ ) e a abscissa correspondente identifica a umidade ótima ( $h_{\text{ót}}\%$ ).

6.5.5 Massa específica aparente seca da mistura compactada.

A massa específica aparente seca da mistura compactada ( $m_s$ ) é calculada pela seguinte fórmula:

$$m_s = \frac{100.m'_s}{(100 + h\%) . V}$$

sendo:

$m_s$  - massa específica aparente em  $g/cm^3$ ;

$m's$  - massa específica aparente da mistura compactada em g;

$h\%$  - teor de umidade;

$V$  - volume da mistura compactada (capacidade do molde) em  $cm^3$ .

## 6.6 Cura do corpo-de-prova

6.6.1 Após compactação deve-se proceder à desmoldagem do corpo-de-prova sobre uma placa cerâmica vitrificada (azulejo).

6.6.2 Uma vez fora do molde, o corpo-de-prova e a placa cerâmica devem ser inseridos e fechados em 2 (dois) sacos plásticos, evitando assim a perda de umidade e a carbonatação do hidróxido de cálcio pelo gás carbônico ( $CO_2$ ) contido no ar.

6.6.3 Devem ser adotados, no mínimo, três tempos de cura, a saber 7, 14 e 28 dias após compactação.

6.6.4 A cura deve ser efetuada em câmara úmida ou em local onde a variação de temperatura possa ser minimizada.

## 6.7 Imersão do corpo-de-prova

Tão logo terminado o tempo de cura, o corpo-de-prova deve ser imerso em água durante 24 horas, para posterior ruptura.

## 7 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

7.1 Os corpos-de-prova provenientes da mistura, moldados de acordo com o prescrito no item 6 para a energia de compactação escolhida (normal, intermediária ou modificada) devem ser levados imediatamente para rompimento segundo o disposto na norma MB-3 de 1974 (ver item 3.1) com uma velocidade de 0,3 MPa a 0,8 MPa por segundo nas idades de 7, 14 e 28 dias de cura. As dimensões do corpo-de-prova devem ser determinadas com precisão de  $\pm 1$  mm, pela média de duas leituras para cada medida.

7.2 Para cada período de cura (7, 14 e 28 dias) devem ser obtidas as resistências à compressão simples ( $R_{cs}$ ) em função dos teores de umidade ( $n\%$ ). Cada resistência calculada resulta da média das resistências de 3 corpos-de-prova correspondentes a cada uma das 5 umidades adotadas. Na resistência à compressão simples deve ser excluído o resultado que variar de  $\pm 10\%$  da média dos três corpos-de-prova.

7.3 A resistência à compressão simples (tensão de ruptura) é obtida dividindo a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova submetido a ensaio, devendo o resultado ser expresso com a aproximação de 0,1 MPa.

## 8 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

8.1 Curvas de resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ ), respectivamente para 7, 14 e 28 dias de cura.

Marcam-se nas ordenadas, para cada período de cura, as resistências à compressão simples ( $R_{cs}$ ) relativas à energia de compactação escolhida e, nas abscissas, os teores de umidade ( $h\%$ ) correspondentes.

8.2 Resistências à compressão simples máximas para 7, 14 e 28 dias de cura ( $R_{cs\ máx}$ ).

Correspondem aos valores das ordenadas máximas das curvas de resistência para 7, 14 e 28 dias de cura, mencionadas em 8.1.

Anexo informativo - Exemplo de aplicação do Método de Ensaio DNER-ME 180/94.

A.1 Mistura a ser ensaiada

cinza volante (disponível)	13 %
cal hidratada (disponível)	4 %
solo arenoso tipo A-3 (dado)	53 %
pedra britada (9,5mm a 19,0mm)	30 %

Total	100 %
-------	-------

cimento Portland (disponível)	1 %
-------------------------------	-----

A.2 Quantidade de corpos-de-prova (CP)

Desejando-se obter (ver Figura) 3 (três) curvas de resistência à compressão (aos 7, 14 e 28 dias), formadas, cada uma, por 5 (cinco) pontos e devendo cada ponto corresponder a 3 corpos-de-prova, resulta a necessidade de se confeccionar, ao todo, 45 corpos-de-prova.

Os mesmos 45 corpos-de-prova servem também para definir a curva de compactação (ver Figura) formada por 5 (cinco) pontos, cada ponto correspondendo a 9 corpos-de-prova confeccionados praticamente, na mesma umidade.

**Obs.:** O conjunto "Curvas de compactação e resistência" expressa de forma clara as características da mistura a ser ensaiada.

A.3 Massas dos componentes da mistura requerida para confecção de cada corpo-de-prova

Tratando-se de solo granular (solo arenoso e pedra britada), a soma das massas dos componentes deve ser igual a 4 500 g, resultando, em consequência, os valores das massas constantes da Tabela 1.

**Tabela 1 - Massas dos componentes (1 CP)**

Componentes	%	Massa g
cinza volante	13	704,80
cal hidratada	4	216,90
solo arenoso	53	2 873,00
pedra britada	30	1 627,00
Total	100	5 421,70
cimento	1	54,22

A quantidade d'água é adicionada à mistura segundo a percentagem determinada pelo operador, conforme 6.3.2.

A.4 Determinação da umidade (item 6.4)

Devido a perda de umidade por evaporação durante os processos de mistura e compactação, o teor de umidade é obtido com uso de estufa (107,5 °C ± 2,5 °C).

A.5 Compactação da mistura (item 6.5)



Adota-se a energia modificada, cada camada recebendo 41 golpes do soquete.

A.6 Curva de compactação (item 6.5.3)

Para cada conjunto de 9 (nove) corpos-de-prova confeccionados praticamente com a mesma umidade, é determinada a média das massas específicas aparentes secas, resultando a possibilidade do traçado da curva de compactação constante da Figura deste Anexo.

A.7 Cura (item 6.6)

Procede-se a cura (7, 14 e 28 dias) mantendo-se a temperatura a mais uniforme possível.

A.8 Imersão (item 6.7)

Todos os corpos-de-prova são imersos em água por 24 horas, após a cura imediatamente antes da ruptura.

A.9 Ruptura (item 7)

Obtem-se os resultados consignados na Tabela 2, para resistência à compressão.

A.10 Curvas de resistência à compressão (item 8)

As curvas de resistência aos 7, 14 e 28 dias, são traçadas com base nos valores da Tabela 2.

A.11 Comentário

A figura evidencia todos os fenômenos que ocorrem entre o teor de umidade, massa específica aparente seca e resistência à compressão simples, para a mistura ensaiada (A.1).

TABELA 2 - RESILIÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( R<sub>cs</sub> )

UMIDADE (%)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA (g/cm <sup>3</sup> )	R <sub>cs</sub> 7 (MPa)	R <sub>cs</sub> 14 (MPa)	R <sub>cs</sub> 28 (MPa)
4,02	2,128	3,86	6,00	8,04
5,06	2,146	3,92	6,21	8,84
5,96	2,152	3,01	5,32	9,29
7,05	2,127	2,17	3,76	7,12
8,11	2,099	1,52	3,05	5,59
9,05	2,080	-	-	-
UMIDADE ÓTIMA (%)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA (g/cm <sup>3</sup> )	R <sub>cs</sub> 7 (MPa)	R <sub>cs</sub> 14 (MPa)	R <sub>cs</sub> 28 (MPa)
5,80	2,153	4,10	6,21	9,30

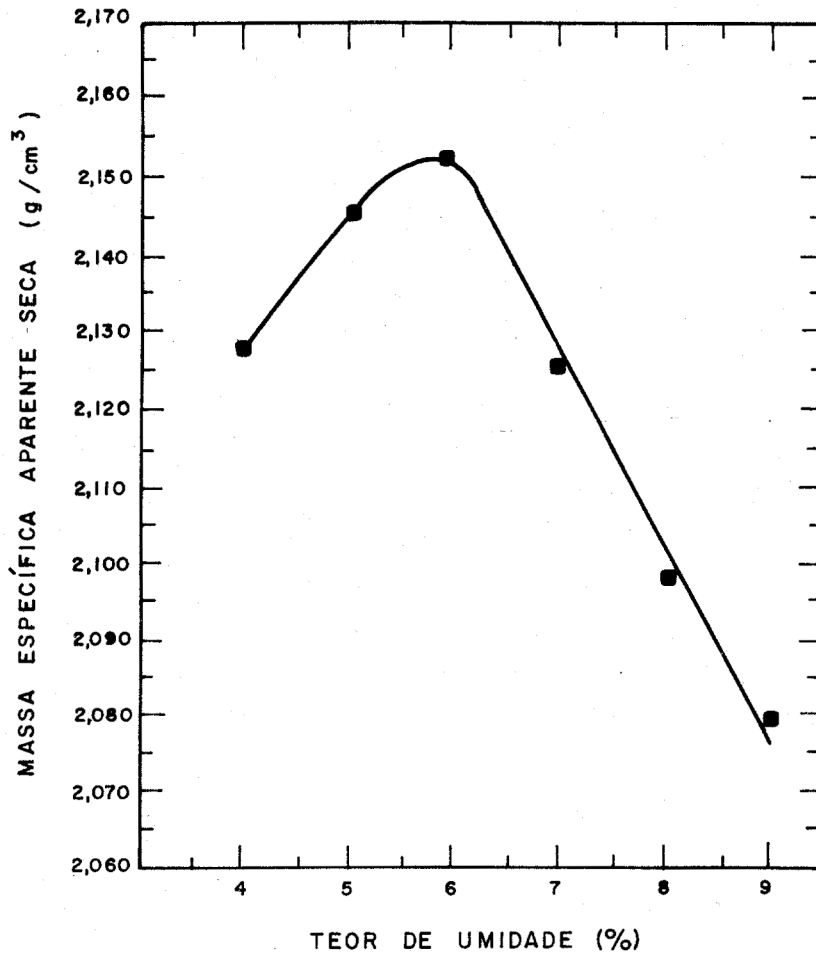
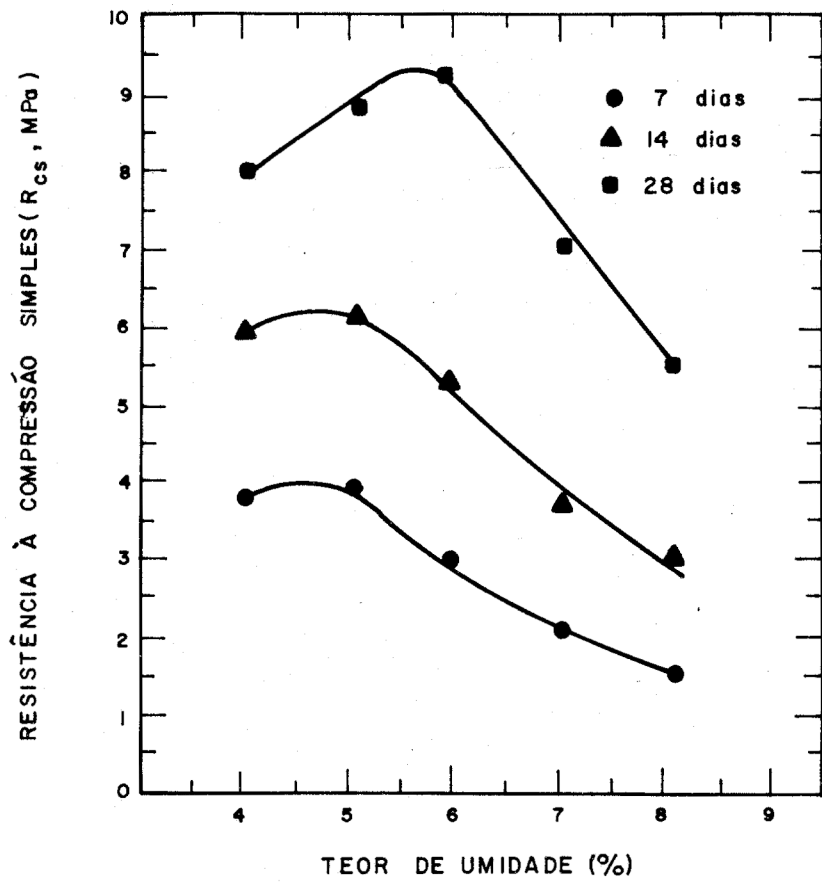


FIGURA - CURVA DE COMPACTAÇÃO E CURVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES