

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES RESILIENTES DE  
TRÊS BRITAS GRADUADAS UTILIZADAS EM  
PAVIMENTOS NO SUL DO BRASIL**

**HARIANE MACHADO MARMITT**

Porto Alegre

dezembro 2002

**HARIANE MACHADO MARMITT**

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES RESILIENTES DE  
TRÊS BRITAS GRADUADAS UTILIZADAS EM  
PAVIMENTOS NO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

dezembro 2002

MARMITT, Hariane Machado

Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil / Hariane Machado Marmitt , - Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004

126 p.

Dissertação de Mestardo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientador: Jorge Augusto Ceratti.

1. Módulo de Resiliência

CCAA2

**HARIANE MACHADO MARMITT**

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES  
RESILIENTES DE TRÊS BRITAS GRADUADAS UTILIZADAS  
EM PAVIMENTOS NO SUL DO BRASIL**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Porto Alegre, 18 de dezembro de 2002.**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti**

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

**Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal**

Coordenador do PPGEC

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Antônio Thomé, D.Sc. (UPF)**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Cezar Augusto Burkert Bastos, D.Sc. (FURG)**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Washington Perez Núñez, D.Sc. (UFRGS)**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Aos meus avós,  
Altino e Antônia Machado,  
dedico este momento em especial.

## **AGRADECIMENTO ESPECIAL**

Aos meus pais,  
Harri e Elaine Marmitt,  
por mais uma vez terem sonhado comigo,  
investido no meu ideal,  
e confiado no meu potencial.  
AMO VOCÊS!

## AGRADECIMENTOS

Para mim, esta página é muito pessoal e certamente não dirá todo meu sentimento de agradecimento a todos que acreditaram em mim. Talvez seja a página mais difícil de toda a dissertação, a maior preocupação é conseguir lembrar de todos os amigos, parentes, professores, colegas de trabalho, colegas de aula, de graduação e de pós-graduação que, em algum momento deste trabalho e do meu dia-a-dia, tiveram uma enorme importância para que o desempenho deste fosse realizado. Não quero esquecer de ninguém, mas com certeza, se estas folhas falharem, o meu subconsciente algum dia os lembrará.

Agradeço ao meu Tio Arnaldo pela boa vontade e perspectiva em mim depositada, acolhendome em seu apartamento.

Agradeço aos meus colegas de graduação que até hoje pensam que uma pós-graduação é perda de tempo e fuga de começar a trabalhar logo após a conquista do diploma. A eles, muito obrigada, pois acredito que um dia cruzaremos o mesmo caminho ...

Agradeço também àqueles outros colegas de graduação, que ao perceberem que o mercado exige maior conhecimento e especialização, tiveram a percepção de continuar estudando e aperfeiçoando seus conhecimentos profissionais.

Agradeço aos colegas e amigos de mestrado pelo companheirismo nas aulas alegres e divertidas, sem falar nos momentos de descontração em restaurantes e bares de Porto Alegre.

Agradeço aos professores da UFRGS que acreditaram que alunos de universidades particulares possuem um grande potencial e merecem uma bolsa de estudos.

Agradeço ao Unibanco AIG Previdência por terem acreditado no meu potencial e despertado em mim a confiança de começar uma nova profissão.

Agradeço à nova amiga Vera, pelos e-mails e mensagens de carinho durante este trabalho.

Agradeço à Michéle, pelas horas de estudo, choro, apoio, alegria. Agradável companheira de apartamento nos dois primeiros anos de Porto Alegre.

Agradeço ao Ivan, pela disposição e paciência para com o meu trabalho. Além dos conselhos e dicas que muito importaram para o meu bem estar.

Agradeço ao Croaci pela dedicação e excelente bom humor.

Agradeço à Ane Lise pela pessoa maravilhosa que é, exemplo de pessoa segura, autêntica e, sobretudo, ser humano. Além da amiga admirável que se tornou para mim. Agradeço a dedicação e orientação.

Agradeço aos meus padrinhos Milton e Elci por sempre demonstrarem o amor que sentem por mim.

Agradeço aos meus irmãos Harrisson e Leonardo pelo carinho que têm comigo, amo vocês.

Agradeço ao Seu Rainir e Dona Maria Inez pelo carinho.

Agradeço ao Rodrigo, meu noivo, pela paciência, segurança e apoio em todos os momentos de minha vida, sem você eu não estaria aqui.

Agradeço aos meus pais, por mais uma vez depositarem confiança e esperança no meu futuro.  
A VOCÊS O MEU MUITO OBRIGADA.



“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência,  
e para chegar onde quer que seja,  
aprendi que não é preciso dominar a força,  
mas a razão.  
É preciso antes de mais nada,  
querer.”

*(Amyr Klink)*

## RESUMO

MARMITT, H.M. **Caracterização de Propriedades Resilientes de Três Britas Graduadas Utilizadas em Pavimentos no Sul do Brasil**. 2004. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Foram analisadas, na presente pesquisa, as características resilientes de um granito de Santa Catarina e de dois tipos de basaltos do Rio Grande do Sul, utilizados como base e sub-base em pavimentos na região sul do país. Os valores de Módulo de Resiliência foram obtidos em laboratório por ensaios triaxiais de carga repetida, com aplicação da norma americana de determinação do módulo de resiliência para materiais granulares (AASHTO TP46-94). Foi analisado seu comportamento resiliente através da variação da umidade de compactação e da variação do grau de compactação das amostras. A influência da umidade foi estudada variando-se a umidade de compactação em relação à umidade ótima relativa à energia modificada, num intervalo correspondente a 2% acima e abaixo da mesma. Apenas o granito foi ensaiado nas três umidades desejadas. Os dois tipos de basalto não foram ensaiados na umidade 2% acima da ótima, por apresentarem uma umidade ótima elevada, dificultando a moldagem. Outro fator estudado foi a influência da densidade no módulo de resiliência, onde o grau de compactação das amostras foi variado em 100%, 98%, 95% e 93%. Os resultados mostraram que a umidade exerce uma influência no módulo de resiliência, influência esta constatada nas amostras de granito. Para este material, o Módulo de Resiliência diminui com o aumento da umidade. Nos três materiais estudados, não foi obtida correlação entre o módulo de resiliência e o grau de compactação, de acordo com a variação considerada.

**Palavras chave:** módulo de resiliência; ensaios triaxiais de cargas repetidas.

## ABSTRACT

MARMITT, H.M. **Caracterização de Propriedades Resilientes de Três Britas Graduadas Utilizadas em Pavimentos no Sul do Brasil**. 2004. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **Characterization of the Resilient Properties of the Three Kinds of Graduates Used in Pavements in South of Brazil**

In this present research, were analyzed the resilient characteristic of a granite of ‘Santa Catarina’ and two kinds of basalts of ‘Rio Grande do Sul’ which are commonly used in south of Brazil as the subbase or base materials of roadway pavements. The resilient modulus was obtained in laboratory by repeated load triaxial test, using the American specification method (AASHTO TP46-94). Were analyzed the resilient characteristic between the wet and compaction degree. The three moisture contents selected are optimum moisture content, 2 percent below, and 2 percent above. Only the granite would be analysed in the three wets, the others two types of basalts did not molded to the 2% above because they had elevated moisture content, hindering the molding. Other fact study was the influence of density in the  $M_R$ , were the compaction degree of the sample was varied at 100%, 98%, 95% and 93%. The results indicate that the moisture content exercises an influence in the  $M_R$ , these influence was verify on the granite samples that were molded in the three studied wets. For these materials, the  $M_R$  decrease with the increase wet. The three materials studied, did not attained a relationship between the resilient modulus and the compaction degree, like considerate variation.

**Key-words:** resilient modulus; repeat load triaxial test.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS.....   | 12        |
| LISTA DE TABELAS.....   | 14        |
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>17</b> |
| 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....  | 17        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....  | 18        |
| 1.3 OBJETIVO GERAL .....  | 18        |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 19        |
| 1.5 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA .....   | 19        |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>21</b> |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....  | 21        |
| 2.2 GEOLOGIA DOS MATERIAIS ESTUDADOS.....   | 21        |
| 2.2.1 <i>Granitos</i> .....   | 22        |
| 2.2.2 <i>Basaltos</i> .....   | 24        |
| 2.3 PAVIMENTO x RUPTURA .....   | 27        |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (cont.).....</b>   | <b>31</b> |
| 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....  | 31        |
| 3.2 CONCEITO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....  | 31        |
| 3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE<br>RESILIÊNCIA DE MATERIAIS GRANULARES ..... | 34        |
| 3.3.1 <i>Influência das Tensões</i> .....   | 34        |
| 3.3.2 <i>Influência do Grau de Compactação</i> .....  | 34        |
| 3.3.3 <i>Influência da Granulometria</i> .....  | 35        |
| 3.3.4 <i>Influência da Umidade</i> .....  | 37        |
| 3.3.5 <i>Influência do Tipo do Agregado e o Formato das Partículas</i> .....                      | 39        |
| 3.3.6 <i>Influência da História das Tensões e do Número de Cargas Repetidas</i> .....             | 39        |

|   |   |                               |
|---|---|-------------------------------|
| 3.3.7                                   | <i>Influência da Duração da Carga, Freqüência e Seqüência de Cargas</i> ..... | 40                            |
| 3.4                                     | COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS GRANULARES .....                       | 40                            |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....                 |   | <b>45</b>                     |
| <b>4</b>                                | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>45</b>                     |
| 4.1                                     | CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....  | 45                            |
| 4.2                                     | DADOS GEOTÉCNICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....                              | 45                            |
| 4.3                                     | EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO .....  | 49                            |
| 4.3.1                                   | <i>Causas de Erros</i> .....  | 50                            |
| 4.3.2                                   | <i>Limitações do Equipamento</i> .....  | 53                            |
| 4.4                                     | PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....  | 54                            |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....                 |   | <b>58</b>                     |
| <b>5</b>                                | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....                            | <b>58</b>                     |
| 5.3.1                                   | <i>Efeito da Umidade</i> .....  | 64                            |
| 5.3.2                                   | <i>Efeito da Densidade</i> .....  | 67                            |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....                 |   | <b>75</b>                     |
| <b>6</b>                                | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | <b>75</b>                     |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> ..... |   | <b>77</b>                     |
| <b>APÊNDICES</b> .....                  |   | Erro! Indicador não definido. |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Localização da Bacia do Paraná e Cinturões de Granito .....   | 23 |
| Figura 2: Esquema de erupção fissural.....  | 25 |
| Figura 3: Localização das rochas vulcânicas ácidas e básicas no RS .....  | 27 |
| Figura 4: Formação de trincas num pavimento .....   | 29 |
| Figura 5: Deformação elástica e permanente em ciclos de carga e descarga de um solo num ensaio triaxial de carga repetida ..... | 32 |
| Figura 6: Deformação de um corpo de prova submetido a um carregamento cíclico .....   | 33 |
| Figura 7 : Modelos de comportamento resiliente de solos (observados no Brasil).....   | 41 |
| Figura 8 : Resumo dos resultados de $k_1$ e $k_2$ , para materiais granulares segundo modelo $k-\sigma_3$ .....                 | 42 |
| Figura 9: Resumo dos resultados de $k_1'$ e $k_2'$ , para materiais granulares segundo modelo $k-\theta$ . .....                | 43 |
| Figura 10: Localização das pedreiras onde foram extraídas as três britas graduadas na região sul do Brasil.....                 | 46 |
| Figura 11: Curva de compactação do Basalto 01 e Basalto 02 .....  | 48 |
| Figura 12: Curvas granulométrica dos materiais estudados .....  | 48 |
| Figura 13: Esquema do equipamento triaxial de cargas repetidas.....   | 51 |
| Figura 14: Equipamento triaxial de cargas repetidas, LAPAV - UFRGS.....   | 52 |
| Figura 15: Demonstrativo da quantidade de CPs executados.....   | 55 |
| Figura 16: Valores de $k_1$ para os três materiais estudados na umidade ótima.....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 17: Valores de $k_1$ para os três materiais estudados na umidade abaixo da ótima ..... | 63 |
| Figura 18: Módulo de resiliência do Granito nas três umidades estudadas .....                 | 65 |
| Figura 19: Módulo de resiliência do Basalto 01 .....  | 66 |
| Figura 20: Módulo de resiliência do Basalto 02 .....  | 67 |
| (a) Granito na umidade ótima .....  | 68 |
| (b) Granito na umidade abaixo da ótima .....  | 69 |
| (c) Granito na umidade acima da ótima .....   | 70 |
| Figura 21: Módulo de resiliência do Granito em relação à densidade .....                      | 70 |
| (a) Basalto 01 na umidade ótima .....   | 71 |
| (b) Basalto 01 na umidade abaixo da ótima .....   | 72 |
| Figura 22: Módulo de resiliência do Basalto 01 em relação à densidade .....                   | 72 |
| (a) Basalto 02 na umidade ótima .....   | 73 |
| (b) Basalto 02 na umidade abaixo da umidade ótima .....                                       | 74 |
| Figura 23: Módulo de resiliência do Basalto 02 .....  | 74 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Características dos materiais estudados.....  | 47 |
| Tabela 2: Sequência das cargas imposta pela AASHTO n° TP 46-94 (1996) .....   | 56 |
| Tabela 3: Resumo das constantes $k_1$ , $k_2$ , $k_1'$ e $k_2'$ dos modelos K- $\sigma_3$ e modelo K- $\theta$ em MPa do Granito .....    | 59 |
| Tabela 4: Resumo das constantes $k_1$ , $k_2$ , $k_1'$ e $k_2'$ dos modelos K- $\sigma_3$ e modelo K- $\theta$ em MPa do Basalto 01 ..... | 60 |
| Tabela 5: Resumo das constantes $k_1$ , $k_2$ , $k_1'$ e $k_2'$ dos modelos K- $\sigma_3$ e modelo K- $\theta$ em MPa do Basalto 02 ..... | 60 |
| Tabela 6: Resumo dos valores de $k_1$ e $k_2$ , $k_1'$ e $k_2'$ obtidos pela regressão linear dos dois modelos estudados.....             | 61 |



## **SIGLAS**

AASHO : American Association of State Highway and Officials

AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT : Associação Brasileira de Normas Técnicas

DNER : Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EPUSP : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

FWD : Falling Weight Deflectometer

LAPAV / UFRGS : Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LVDT : Linear Variable Differential Transformer

NBR : Norma Brasileira

SASW : Spectral Analysis of Surface Wave

TRR : Transportation Research RECORD

## SÍMBOLOS

$M_R$  : Módulo de Resiliência

$W_{ot}$  : Umidade Ótima

$k_1, k_2$  : propriedade do material (coeficiente de regressão para o modelo matemático  $k-\sigma_3$ )

$k_1', k_2'$  : propriedade do material (coeficiente de regressão para o modelo matemático  $k-\theta$ )

$\sigma_v$  : Tensão Vertical Máxima

$\varepsilon_t$  : Deformação de Tração Máxima

$\varepsilon_r$  : Deformação Recuperada / ou Deformação Resiliente / ou Deformação Elástica

$\varepsilon_p$  : Deformação Não Recuperável / ou Deformação Permanente / ou Deformação Plástica

$\sigma_1$  : Tensão Principal Maior

$\sigma_3$  : Tensão Principal Menor

$\sigma_d$  : Tensão Desvio

$\sigma_{d \max}$  : Tensão Desvio Máxima

$\theta$  : Invariante de Tensões / ou Somatório de Tensões

$R^2$  : Coeficiente de Correlação

$\sigma_1 / \sigma_3$  : Razão de Tensões Principais

CP : Corpo de Prova

GC : Grau de Compactação

Basalto 01 : Basalto Originário de Frederico Wetsphalen

Basalto 02 : Basalto Originário de Estância Velha

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O usuário, ao usufruir a estrada, automaticamente faz uma avaliação subjetiva da qualidade da rodovia e consegue perceber nela vários defeitos, o que não propiciam a ele conforto e segurança. Do ponto de vista do usuário, os problemas de um pavimento são apenas defeitos superficiais da camada de rolamento. Porém, técnicos e engenheiros sabem que estes defeitos refletem o mau comportamento da estrutura do pavimento, causados pela combinação de uma série de fatores tais como clima, tráfego, processos construtivos e características físicas do material.

Os defeitos estruturais estão associados a deformações permanentes e deformações elásticas que o pavimento sofre ao suportar as cargas impostas pelo tráfego, originando a perda da capacidade de suporte da estrutura e a sua deterioração.

Os defeitos mais comuns encontrados na superfície dos pavimentos são as fissuras. As fissuras - ou trincas - se formam e crescem na camada de revestimento asfáltico devido, principalmente, à fadiga das camadas subjacentes provocada pela repetição das cargas do tráfego, e está associada à deformabilidade elástica da estrutura do pavimento.

Os materiais granulares que compõem as camadas de base e sub-base são os que mais contribuem percentualmente na deformação da estrutura. Para que sua contribuição seja menor, estes devem ser bem graduados, de partículas resistentes a abrasão, apresentando elevada capacidade de suporte de cargas.

Além de permitirem a drenagem das águas que infiltram no pavimento, as camadas de britas graduadas são responsáveis pela redução da magnitude das tensões verticais que as cargas de roda induzem na camada de fundação, reduzindo sua deformação.

É de grande importância a caracterização da deformabilidade elástica das britas graduadas, pois com ela pode-se dimensionar estruturas de pavimentos que apresentam comportamento mecânico condizente com as características da via a ser implantada.

A caracterização da deformabilidade elástica das britas graduadas vem sendo estudada, por muitos pesquisadores, em ensaios de campo e de laboratório. Os ensaios *in situ* avaliam a deformação elástica do conjunto estrutural de um pavimento, determinando por retroanálise os módulos de rigidez elástica médio dos materiais das diferentes camadas. Já os ensaios de laboratório determinam o módulo de rigidez elástica de cada camada da estrutura do pavimento, simulando tensões semelhantes às que o material é submetido com o movimento intenso do tráfego em uma rodovia.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Como a fadiga no revestimento asfáltico está associada principalmente à deformação elástica das camadas de base e sub-base do pavimento, tem importância o estudo do comportamento resiliente dos materiais que compõem estas camadas. Neste trabalho é estudada a deformabilidade elástica de materiais granulares, através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, sob diferentes condições de umidade e grau de compactação.

Conhecendo as características resilientes de cada material, pode-se melhor adequá-lo nos dimensionamentos estruturais de um pavimento, prolongando sua serventia.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo conhecer as características resilientes dos materiais granulares através de ensaios de laboratório, analisando seu comportamento pela variação da umidade de compactação e pela variação do grau de compactação das amostras ensaiadas.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tendo em vista o objetivo geral citado, o presente trabalho irá identificar as características resilientes quanto à influência da porcentagem de água no valor de módulo de resiliência e a influência do grau de compactação no valor do módulo de resiliência para três materiais granulares (um granito de Santa Catarina e dois Basaltos do Rio Grande do Sul) utilizados como base e sub-base nos pavimentos da região sul do país.

## 1.5 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos conforme resumido a seguir:

O Capítulo 1, de introdução, apresenta as argumentações da escolha do tema, assim como a justificativa e objetivo da pesquisa.

A revisão bibliográfica está dividida em dois capítulos, no Capítulo 2 é descrita a origem geológica das rochas ígneas, ou seja, a origem e formação os materiais estudados (basalto e granito). Analisa-se, também, o surgimento de trincas por fadiga nos pavimentos.

O Capítulo 3, continuação do capítulo anterior de revisão bibliográfica, apresenta o conceito de módulo de resiliência, resultados de pesquisas já realizadas - em campo e em laboratório - que relatam a influência de alguns fatores no módulo de resiliência de materiais granulares; finalizando, a apresentação de modelos matemáticos usados para descrever as características resilientes dos materiais granulares.

O Capítulo 4, de metodologia, caracteriza os materiais estudados. Descreve o equipamento de ensaio triaxial de cargas repetidas, assim como causas de erro e suas limitações. Relata também o procedimento do ensaio e as etapas de preparação dos corpos de prova.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de ensaios e análise dos materiais granulares estudados. Apresenta análise dos fatores umidade, densidade e os coeficientes de resiliência ( $k_1$  e  $k_2$ ) obtidos para os materiais estudados.

E por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas e trabalhos futuros.

Os apêndices A, B e C seguem posteriormente ao Capítulo 6, e apresentam graficamente os valores de módulo de resiliência obtidos para cada amostra ensaiada para cada tipo de material.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Este capítulo é o primeiro - dentre dois - de revisão bibliográfica. A primeira parte revisará a origem e localização dos materiais utilizados na presente pesquisa, granito e basalto. Abordará também o surgimento e a formação de diversas trincas nos pavimentos.

#### **2.2 GEOLOGIA DOS MATERIAIS ESTUDADOS**

Foram estudados três tipos de materiais granulares, dois tipos de basalto e um granito. Para analisar estes materiais granulares é necessário que sejam conhecidas a composição, origem e formação de tais materiais, para maior entendimento do comportamento mecânico daqueles. Optou-se por estudar os materiais granulares originários das rochas ígneas por estes serem os materiais mais resistentes, mais utilizados na construção de rodovias e estarem em maior abundância na região sul do país. Tanto o basalto como o granito são rochas ígneas.

As rochas ígneas constituem aproximadamente 80% da crosta da terrestre, tanto nos continentes quanto nas bacias oceânicas. Estas rochas resultam da solidificação de uma fusão de silicatos denominado magma, que se origina em grande profundidade no interior da Terra (ERNST, 1969).

Há dois tipos de rochas ígneas: extrusivas e intrusivas. As extrusivas (ou vulcânicas) são rochas formadas na superfície terrestre, ou nas suas proximidades, pelo extravasamento explosivo, ou não, da lava - material ígneo que alcança a superfície da Terra – por conduto

vulcânico. Resulta em material vítreo ou cristalino, de textura fina – ex: **Basalto**. As rochas intrusivas (ou plutônicas) são formadas em profundidade, no interior da crosta terrestre, pelos lentos processos de resfriamento e solidificação do magma, resultando em material cristalino geralmente de textura grossa – ex: **Granito**. Geralmente sofrem resfriamento mais lento que as extrusivas equivalentes e retêm mais seus constituintes voláteis dissolvidos. Em consequência destes fatos, as rochas intrusivas têm textura maior e maior proporção de fases hidratadas que as rochas extrusivas de textura fina (ERNST, 1969; MACIEL, 1997; ABGE, 1998; TEIXEIRA et al, 2001).

Conforme Maciel (1997), as rochas ígneas são as que apresentam, em geral, melhor comportamento geomecânico e são as mais utilizadas em construção civil, no Brasil. As rochas ígneas **vulcânicas** apresentam maiores resistências mecânicas que as rochas ígneas **plutônicas**, que por sua vez, também apresentam resistência mecânica muito alta.

### 2.2.1 Granitos

Os granitos são rochas ácidas plutônicas, que formam a maior parte dos batólitos<sup>1</sup> em núcleos de cadeias montanhosas. São trazidas à superfície por processos de cavalgamento em regime tectônico dúctil, que lhes conferiu suficiente plasticidade, de modo a deformá-las sem ruptura (ABGE, 1998, p. 59).

São muito abundantes no Brasil, principalmente nas regiões de Escudo (Guianas, Brasil Central e Atlântico), como pode ser verificado na Figura 1.

---

<sup>1</sup> massa ígnea de grande volume, abrangendo áreas de afloramento em superfície superior de 100 km<sup>2</sup>



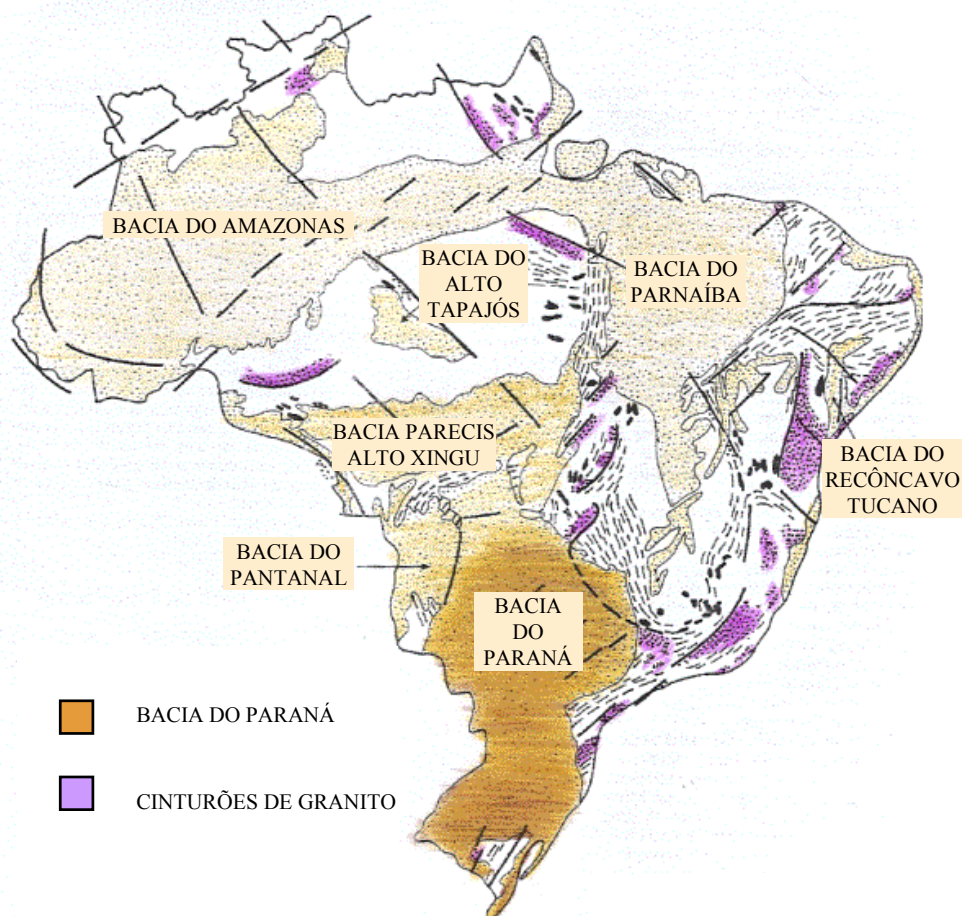


Figura 1: Localização da Bacia do Paraná e Cinturões de Granito  
(fonte: Hasui<sup>2</sup>, 1990 (apud, ABGE, 1998, p. 58))

As rochas ígneas plutônicas são compostas de quartzo (20 – 30%), feldspato (50-70%): feldspato potássico – principalmente microclínico – e plagioclásio, geralmente oligoclásico, e minerais ferromagnesianos (5-25%). Apresentam textura grossa e tendem a ter cor rosa a avermelhada quando predominam os feldspatos potássicos e cinza quando predominam os plagioclásios (ABGE, 1998 p. 28).

---

<sup>2</sup> Hasui, Y.; Haralyi, N. L. E. e Costa, J. B. S. 1993a. **Megaestruturação pré-cambriana do território brasileiro baseada em dados geofísicos e geológicos**. Geociências, Rio Claro, v. 12, n.1, p. 7-31.

### 2.2.2 Basaltos

O basalto é uma rocha ígnea vulcânica de estrutura maciça, composta de minerais escuros e claros, de textura fina a muito fina, classificada como rocha básica (predominam piroxênio, olivina, também chamada peridoto, e serpentina). Os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes. Sua maior ocorrência é na forma de derrames, e, no Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde totalizam mais de 90% das rochas vulcânicas já existentes (ABGE, 1998 p. 31).

As rochas ígneas vulcânicas localizadas no sul do país constituem a Bacia do Paraná. Conforme Teixeira et al. (2001, p. 365), nesse tipo de vulcanismo não há a formação de um cone vulcânico e sim o extravasamento da lava por erupções fissurais conhecidas por *rift*, na crosta, permitindo a ascensão do magma. Este processo inicia-se com o surgimento pontual do fluxo térmico do manto, que irá causar o soerguimento e abaulamento da crosta continental sobre este ponto, provocando, eventualmente, o fraturamento e extrusão da lava.

A Figura 2 ilustra o esquema de erupção fissural, condicionado às ascensões de magmas muito fluídos por fissuras profundas na crosta, com a formação de camadas sucessivas de lava.

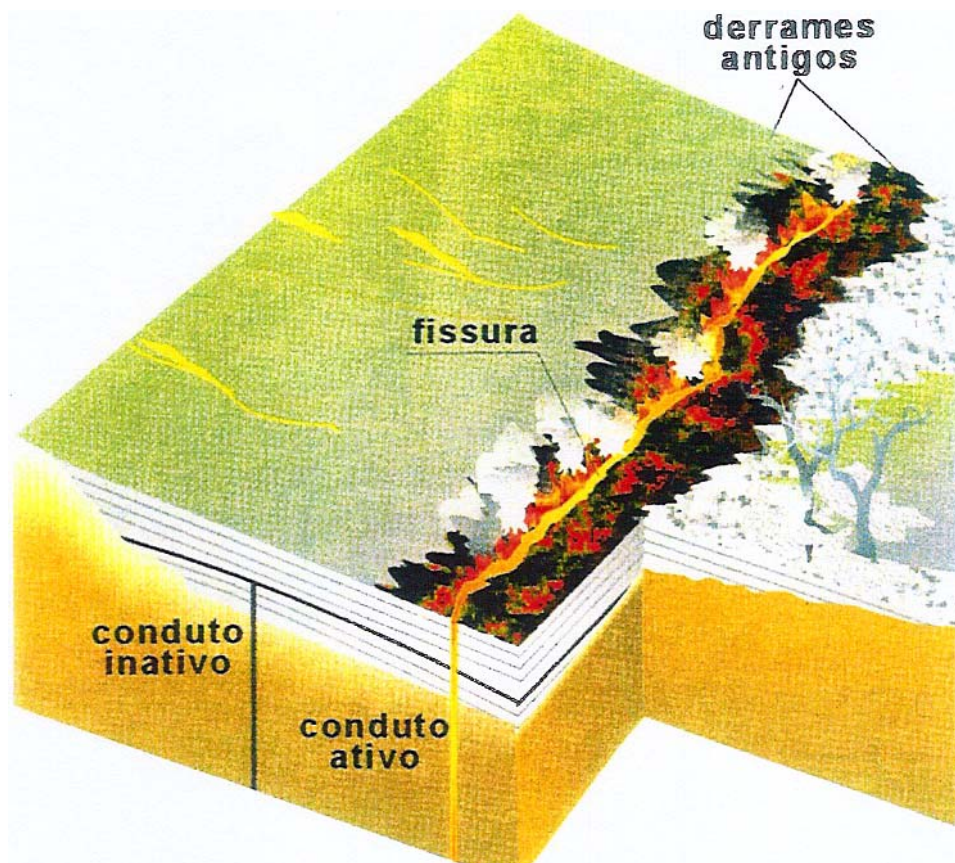


Figura 2: Esquema de erupção fissural  
(fonte: Teixeira et al., 2001)

Os derrames da Formação da Serra Geral da Bacia do Paraná representam um dos mais volumosos vulcanismos continentais do planeta e datam de 120 a 130 milhões de anos atrás. A Bacia do Paraná possui uma superfície total de 1.600.00 km<sup>2</sup>, dos quais pouco mais de 60% situa-se em território brasileiro. Abrange regiões como Paraguai, Uruguai (100.000 km<sup>2</sup>), Argentina (400.000 km<sup>2</sup>), e no Brasil, a maior parte dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, além de boa parte do Mato Grosso do Sul, e uma pequena parte do Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais (ARNOLD, 1990; ABGE, 1998; TEIXEIRA et al., 2001).

A localização da Bacia do Paraná no Brasil é mostrada na Figura 1, apresentada anteriormente, abrangendo quase a totalidade dos estados do sul e boa parte do oeste brasileiro.

A Bacia do Paraná está dividida em duas porções: a Seqüência Ácida e a Seqüência Básica. A seqüência Básica predomina em área e volume sobre a seqüência ácida e originou-se, fundamentalmente, de um magma básico. A seqüência ácida corresponde a áreas de relevo menos dissecado e menos arrasado.

Os derrames basálticos de características ácidas cobrem cerca de 80.000 km<sup>2</sup> no Rio Grande do Sul e 20.000 km<sup>2</sup> em Santa Catarina. Sua espessura no Rio Grande do Sul é maior que em Santa Catarina, como é relatado, pelo Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM (1984, p. 186) a seguir:

O vulcanismo de filiação ácida compreende uma extensa área no Rio Grande do Sul, onde mostra suas maiores exposições, cobrindo cerca de 80.000 km<sup>2</sup>, somente neste estado desde a borda nordeste até Santiago, numa distância longitudinal aproximada de 500 quilômetros. As espessuras máximas registradas são da ordem de 350 metros na região oriental do estado, com até 4 espasmos supostos, enquanto na parte ocidental restringe-se a pouco mais de 40 metros, com uma única corrida de lava. [...] Em Santa Catarina, a situação alcançada pelos derrames ácidos é semelhante, estando as melhores exposições na região Curitibanos-Campos Novos. Entretanto, as espessuras são bem menores, não ultrapassando a marca de 200 metros, restringindo-se a pouco mais de 30 metros em São Joaquim, localidade em que uma corrida de lavas vítreas é verificada. A área global deste estado é da ordem de 20.000 km<sup>2</sup>.

A delimitação das cidades gaúchas onde ocorreram os derrames basálticos ácidos e básicos, e são apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (1986, p. 273), como segue:

As rochas ácidas encontram-se em maior distribuição nas Regiões de Bom Jesus, São Francisco de Paula, Cambará do Sul, Caxias do Sul e Soledade, no Rio Grande do Sul, abrangendo uma faixa que, contornando a borda do Planalto das Araucárias, estende-se até Santiago. São ainda encontradas ótimas exposições desta seqüência na borda leste do Planalto das Araucárias, as quais podem ser constatadas ao longo dos perfis de Terra de Areia, Tainhas, Timbé do Sul e São José dos Ausentes. [...] As rochas básicas, não apresentam continuidade física, mas mostram ampla distribuição em área, registrando-se suas maiores ocorrências a Norte e Nordeste da cidade de Santana do Livramento, Uruguaiana, Quaraí, Alegrete e Itaqui, São Borja, Santo Ângelo, Júlio de Castilhos.

A citação acima localiza a ocorrência de rochas vulcânicas ácidas e básicas no Rio Grande do Sul, e pode-se dizer que as rochas vulcânicas ácidas estão distribuídas em grande parte nas regiões da serra; numa pequena parte no nordeste e região leste próximo a Porto Alegre se estendendo até Santiago. As rochas vulcânicas básicas abrangem uma área mais ampla e são encontradas na região norte e oeste do estado. A Figura 3 apresenta o mapa de localização dos derrames basálticos das seqüências ácidas e básicas no Rio Grande do Sul.

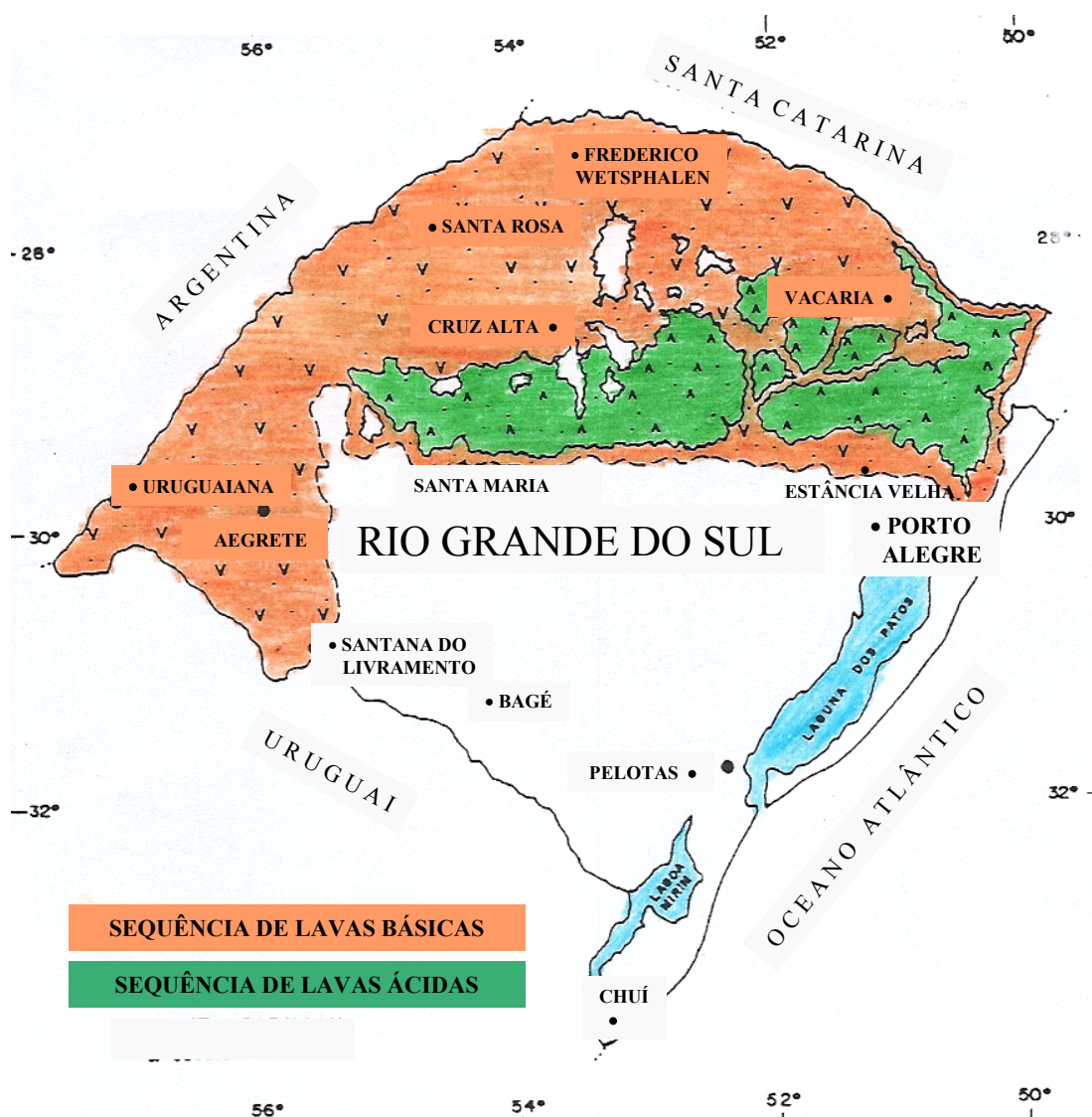


Figura 3: Localização das rochas vulcânicas ácidas e básicas no RS  
(fonte: Arnold, 1993)

### 2.3 PAVIMENTO x RUPTURA

A atual norma brasileira de pavimentação, NBR – 7207/82 da ABNT, conceitua o pavimento como sendo:

Uma estrutura construída após terraplanagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a: a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; b) melhorar as condições de rolamento quanto à

comodidade e segurança; c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais duráveis a superfície de rolamento.

De outra forma, a Mecânica dos Pavimentos considera o pavimento como sendo um sistema de camadas elásticas, sendo cada camada constituída de materiais diferentes, com funções diferentes. Destas camadas, as constituídas de materiais mais rígidos situam-se mais próximo da superfície, com o objetivo de distribuir melhor e de maneira mais uniforme os esforços aplicados pelo tráfego, diminuindo, assim, as tensões e deflexões no subleito (MEDINA, 1997).

A estrutura de um pavimento flexível é constituída de camada asfáltica (revestimento), camada granular (base e sub-base) e camada de fundação (subleito).

A primeira camada de uma estrutura de pavimento é chamada de revestimento asfáltico ou betuminoso. É geralmente de pouca espessura e constituída de material do tipo betume e agregados, responsável pela impermeabilização da estrutura e capaz de atribuir atrito entre a camada e o pneu dos veículos, tornando mais durável e segura a superfície do pavimento.

Em seguida, tem-se as camadas granulares que podem ser estruturadas, conforme a resistência do material de fundação, em base e sub-base. A sub-base é uma camada corretiva do subleito, ela vem a completar a camada de base. A camada de base se destina a distribuir e a resistir os esforços verticais aplicados por cargas externas. As camadas granulares são responsáveis em reduzir as tensões verticais que são aplicadas à camada de fundação.

Estas camadas são construídas sobre a fundação ou subleito. O subleito é o terreno de fundação da estrutura do pavimento e sofre deformações e deflexões quando o pavimento é submetido às cargas impostas pelo tráfego.

A formação das trincas por fadiga se deve à deformação das camadas de base e sub-base do pavimento. A propagação das trincas é gradativa e contínua ao longo do tempo. São decorrentes da fadiga que o pavimento sofre ao suportar a aplicação repetida das cargas.

A carga e descarga de sucessivas repetições do tráfego faz com que o revestimento asfáltico ou a camada cimentada rompam por fadiga, conforme esquematizado na Figura 4. O trincamento inicia na face inferior do revestimento, onde ocorrem as maiores tensões e deformações, e se propaga para a superfície (MEDINA, 1997).

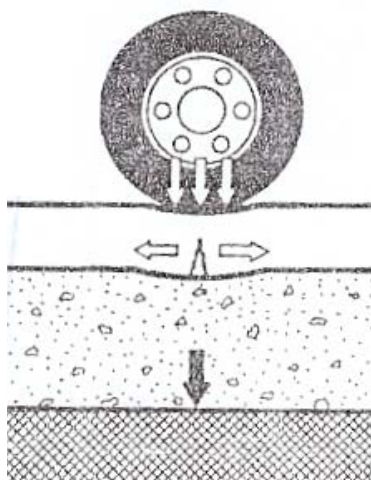


Figura 4: Formação de trincas num pavimento

(fonte: Medina, 1997)

A combinação de várias trincas origina as “panelas”, cavidades no revestimento, comumente encontradas nas rodovias após grandes chuvas. Com o tempo, afetam estruturalmente o pavimento porque permitem a passagem de águas superficiais ao interior da estrutura, podendo trazer conseqüências graves, como o colapso da estrutura ou acidentes com os usuários.

Os métodos de dimensionamentos de pavimentos têm a finalidade de projetar estruturas duráveis e resistentes à combinação da ação das intempéries e à ação das cargas dos veículos em que o pavimento está sujeito rotineiramente.

Com o passar dos anos, a capacidade de suporte de cargas da estrutura é prejudicada e tende a acelerar a degradação do pavimento, pois a evolução do tráfego é variada quanto ao tipo de veículo e de cargas transportadas. (CERATTI, 1999).

Portanto, o conhecimento da magnitude tensões que atuam em um pavimento é vital para o dimensionamento e avaliação estrutural de uma rodovia. A viabilidade e o projeto econômico de pavimentos se baseiam na verificação da capacidade de suporte do pavimento e no conhecimento das características de resistência e deformabilidade dos materiais empregados no mesmo (ROCHA FILHO, 1996).

Como a verificação destas características sob condições reais em campo são, em muitos casos, impraticáveis, a avaliação dos materiais por ensaios de laboratório se transforma em parte importante no projeto.

O ensaio triaxial de cargas repetidas é um ensaio de laboratório que submete o material a condições de cargas similares às aquelas a que os pavimentos são submetidos, reproduzindo os estados de tensões atuantes no mesmo.



## **CAPÍTULO 3**

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (cont.)**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A segunda parte da revisão bibliográfica abrange o embasamento teórico do conceito de módulo de resiliência, apresenta os fatores já estudados que influenciam na obtenção do módulo de resiliência de materiais granulares relatado em diversas pesquisas nacionais e internacionais, e apresenta, também, o comportamento resiliente dos materiais granulares pela obtenção de modelos matemáticos.

#### **3.2 CONCEITO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

Para melhor entender o conceito de módulo de resiliência é inevitável entender o termo resiliência. O termo resiliência expressa a resposta dos materiais submetidos à carregamentos repetidos, na sua componente elástica.

Para Hveem, o pioneiro a estudar a deformabilidade de pavimentos flexíveis em 1938, resiliência é a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação. Hveem preferiu usar a terminologia deformação resiliente ou (elástica) sob o argumento de que as deformações verificadas nos pavimentos são muito maiores do que as obtidas no concreto e aço, além de sofrerem deformações repetidas quanto à intensidade, duração e frequência comparadas com outras estruturas (MEDINA, 1997).

A deformação elástica dos materiais granulares utilizados como base e sub-base das camadas de um pavimento é determinada no ensaio triaxial de cargas repetidas.

Define-se módulo de resiliência ( $M_R$ ) de um solo como a relação entre a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada repetidamente em uma amostra de solo em ensaio triaxial e a correspondente deformação específica recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ). Conforme é mostrado na equação 1. (DNER-ME 131/94; AASHTO TP 46-94).

$$M_R = \sigma_d / \epsilon \quad (\text{equação 1})$$

Na equação 1,  $\sigma_d$  é a tensão desvio cíclica ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), aplicada repetidamente. Já  $\epsilon_r$  é a deformação resiliente (vertical), correspondente a um certo número de aplicações de  $\sigma_d$ .

A Figura 5 apresenta as deformações elásticas e plásticas para ciclos de carga e descarga de um solo num ensaio triaxial.

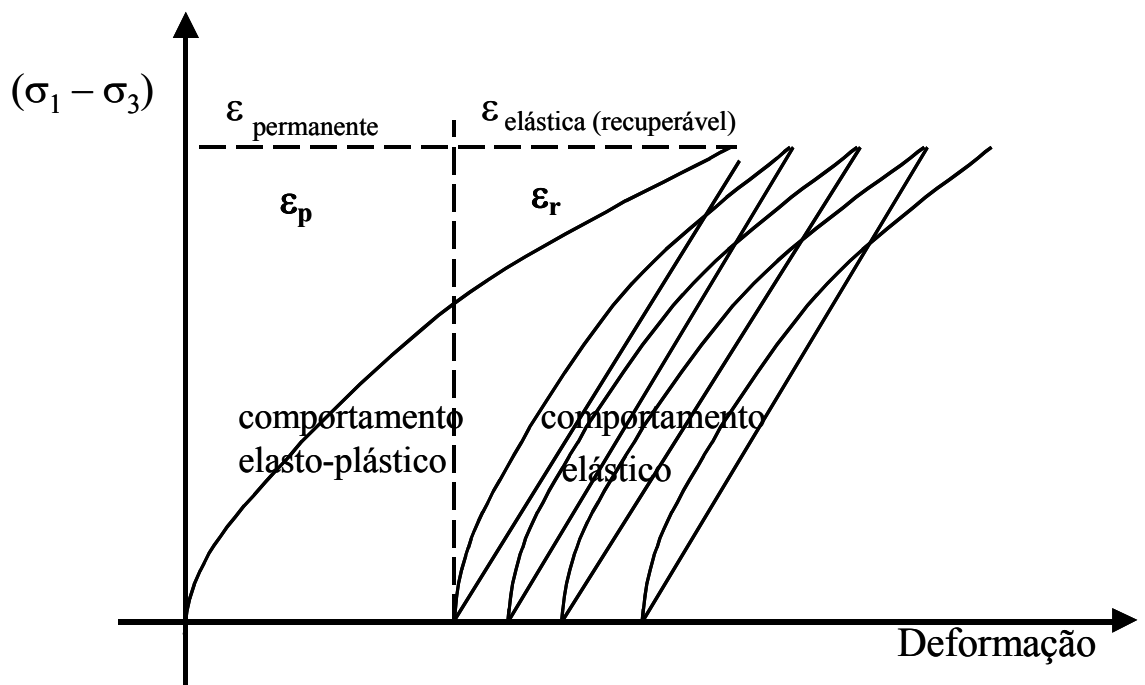


Figura 5: Deformação elástica e permanente em ciclos de carga e descarga de um solo num ensaio triaxial de carga repetida  
(fonte: Yoder e Witczack, 1975)

A Figura 6 mostra as deformações de um corpo de prova submetido a um carregamento cíclico no ensaio triaxial. Depois de atingir a tensão máxima em um dado ciclo ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ), verifica-se que apenas parte da deformação é recuperada após a descarga. Esta parte recuperada é a deformação elástica ou reversível ( $\epsilon_r$ ), também chamada de deformação resiliente. A parcela não recuperada acumulada em cada aplicação de carga é denominada deformação plástica ou permanente ( $\epsilon_p$ ) (CERATTI, 1999).

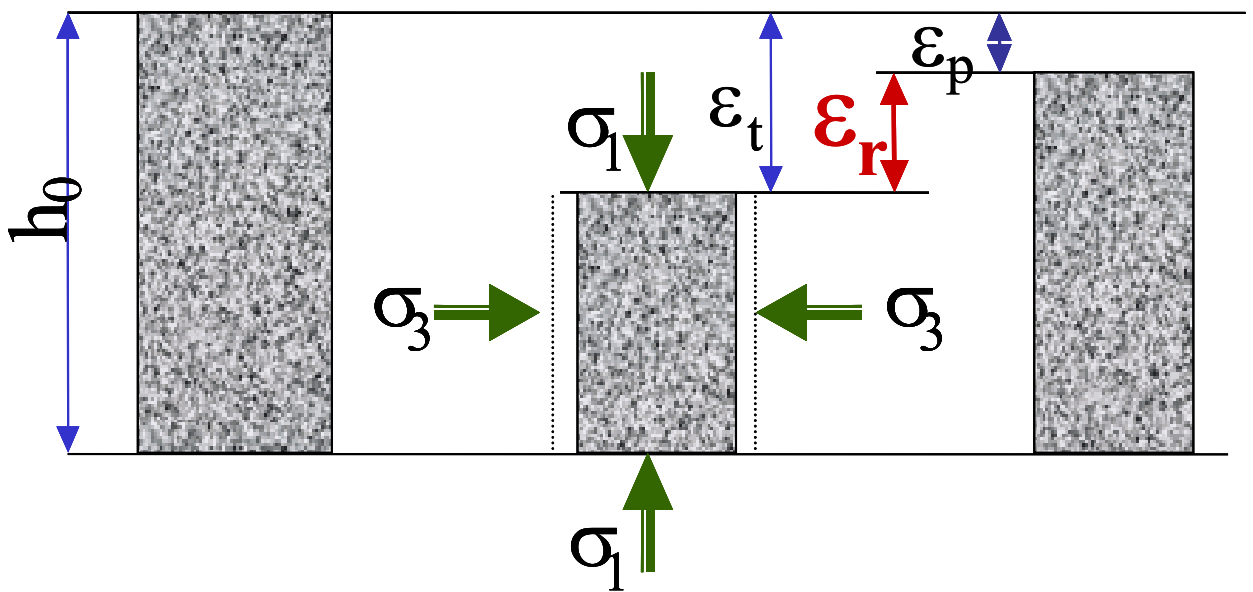


Figura 6: Deformação de um corpo de prova submetido a um carregamento cíclico

(fonte: Yoder e Witzack, 1975)

O ensaio triaxial de cargas repetidas faz com que o corpo de prova seja submetido a uma tensão de compressão vertical ( $\sigma_1$ ) e uma tensão de compressão horizontal de confinamento ( $\sigma_3$ ). A amostra quando submetida a sucessivos carregamentos e descarregamentos, deforma-se, obtendo-se assim, as deformações totais ( $\epsilon_t$ ).

Segundo Espinosa (1987), para que o ensaio seja significativo, as amostras ensaiadas devem seguir algumas recomendações: a) as amostras devem ser previamente submetidas a carregamentos repetidos de valores variados, compatíveis com as encontradas em campo, a fim de eliminar as deformações permanentes iniciais, dando ao material uma condição de pré-

compactação; b) o módulo de resiliência deve ser determinado após um número mínimo de repetições, acima do qual ele permanece aproximadamente constante.

### 3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MATERIAIS GRANULARES

Segundo Preussler (1983) e Lekarp et al. (2000) baseados em trabalhos de vários pesquisadores, é importante considerar como o módulo de resiliência varia com a influência de diferentes fatores. Para estes, os seguintes fatores podem afetar o comportamento resiliente dos materiais granulares: a) as tensões; b) o grau de compactação; c) a granulometria; d) a umidade; e) o tipo do agregado e forma da partícula; f) a história das tensões e o número de ciclo de cargas; g) a duração, frequência e seqüência da carga aplicada.

#### 3.3.1 Influência das Tensões

Das primeiras pesquisas em 1963 às atuais, encontradas na literatura, todas sem exceção, mostram que o nível de tensões atuante é o fator que muito influencia nas propriedades resilientes de materiais granulares.

Muitos pesquisadores como Mitry (1964), Preussler (1978), Espinosa (1987), Sweere (1990), verificaram grandes variações do módulo de resiliência com a variação da pressão confinante e com o somatório das tensões principais. O módulo de resiliência aumenta significativamente com o aumento da aplicação da pressão confinante e com o somatório das tensões principais.

Entretanto, em trabalhos de Morgan (1966), Hicks (1970), Preussler (1978), Espinosa (1987) verifica-se que a variação da tensão desvio pouco influi no módulo de resiliência.

#### 3.3.2 Influência do Grau de Compactação

O efeito da variação do grau de compactação na deformação resiliente é pouco conhecida, e o que se conhece traz divergência entre pesquisadores. Trollope et al. (1962), Rada e Witczack

(1981), Kolisoja (1997) mostram em suas pesquisas, que geralmente o módulo de resiliência aumenta com o aumento da densidade. Já, para Thom e Brown (1988), Brown e Selig (1991) os efeitos da densidade ou do grau de compactação não influenciam no módulo de resiliência.

Segundo Rada e Witczak (1981), materiais granulares com massas específicas elevadas expressam altos valores de módulo de resiliência. Quanto maior for o peso específico aparente seco do material, maior será o módulo de resiliência deste, portanto, é necessário conhecer o limite de variação do grau de compactação nas camadas do pavimento para se obter um peso específico aparente seco mais elevado e conseqüentemente um módulo de resiliência maior.

### **3.3.3 Influência da Granulometria**

Os solos são materiais naturais que se deformam quando submetidos à ação de forças externas. Isto se deve à estrutura interna do solo, a qual pode ser alterada pelo carregamento, com o deslocamento e/ou por ruptura de partículas que o compõem.

O comportamento mecânico e hidráulico de solos granulares está principalmente relacionado com a compacidade, tamanho, forma e a distribuição granulométrica dos materiais.

Experiências indicam que solos granulares bem graduados, ou seja, com ampla gama de tamanhos de grãos, apresentam melhor comportamento em termos de resistência e compressibilidade que os solos com granulometria uniforme (pouca variação de tamanho de partículas).

O modo como se arrumam e se aglomeram as partículas de solo é determinante na deformabilidade. Os materiais granulares apresentam, em sua composição, um vasto número de partículas, de variados tamanhos, que possibilitam o intertravamento destes grãos. Pesquisas recentes mostraram que a rigidez de alguns materiais dependem do tamanho dos grãos e da distribuição de suas partículas. Mas ainda pouco se sabe sobre a influência da porcentagem de finos nos materiais.

Thom e Brown (1988) ao estudarem o comportamento de pedra calcárea britada em diferentes graduações concluíram que os agregados uniformemente graduados apresentaram menor

rigidez que os agregados bem graduados. Os materiais bem graduados tendem a desenvolver altas densidades que os materiais uniformemente graduados porque os pequenos grãos preenchem os espaços entre as partículas maiores, gerando maior compacidade da estrutura.

Raad et al. (1992) ao compararem materiais bem graduados e mal graduados, em condições saturadas e não saturadas, usando ensaios triaxiais de cargas repetidas, propostos pela AASHTO T274 – 82, analisaram a influência da porcentagem de finos nas respostas do comportamento dinâmico, e concluíram que os agregados bem graduados apresentaram alto valor de módulo de resiliência enquanto os mal graduados apresentaram baixos valores de módulo de resiliência.

Tian et al. (1998) ao investigarem três graduações (graduação média, grossa e fina), de pedra calcária e arenito, verificaram que os materiais bem graduados, que possuem menor proporção de vazios, produzem uma maior massa específica. Os bem graduados são os que melhor respondem ao comportamento de deformações do pavimento. Os materiais de granulometria fina produziram menor valor de módulo de resiliência que os demais.

Segundo Kolisoja (1997), em pesquisas feitas variando-se o tamanho dos grãos, o módulo de resiliência é maior para grãos maiores. Pode-se afirmar que a maior parte da ação das cargas externas são transmitidas internamente através dos grãos mais grossos das bases granulares, resultando bases com menor deformação e alta rigidez do material.

Para que o material tenha uma maior rigidez é necessário que haja um aumento de contato entre as partículas preenchendo os espaços com os finos do material. Mas algumas pesquisas mostram que ainda é desconhecido a porcentagem relativa a este preenchimento. Pesquisadores vêm estudando a influência dos finos nos materiais granulares e apontam um limite de variação de porcentagem de finos para a composição de materiais bem graduados e mal graduados.

Pesquisadores como Thom e Brown (1987); Kamal et al. (1993) verificaram que o módulo de resiliência de materiais granulares geralmente diminui com o aumento da porcentagem de finos do material.

Segundo Hicks (1970), a porcentagem de finos deve variar entre 2 a 10% para que se tenha uma menor influência no módulo de resiliência.

Thompson et al. (1990), em Ilinóis/EUA, ao verificarem o desempenho de três materiais<sup>3</sup> usados como base e sub-base de pavimentos asfálticos, constataram que materiais mal graduados são menos sensíveis à umidade e produzem bases com melhor desempenho. Com isto, o Departamento de Transportes de Ilinóis desenvolveu uma especificação que propõem uma nova granulometria aos materiais mal graduados utilizados como base em pavimentos, CM-06, ou seja, é proposto um limite de 2 a 4% de finos passantes na peneira 200, e para CA-6, a especificação para materiais bem graduados, o limite de finos passantes na peneira 200 é de 8 a 12%.

### 3.3.4 Influência da Umidade

Pesquisadores como Haynes e Yoder (1963), Hicks e Monismith (1971), Rada e Witczak (1981), Barksdale e Itani (1989), Raad et al. (1992), Dawson et al. (1996), Heydinger et al. (1996), Tian et al. (1998) vêm reportando uma notável dependência do módulo resiliente com a umidade, para eles o módulo de resiliência diminui com o aumento da porcentagem de água adicionada no material granular, em pesquisas feitas em corpos de prova e umedecidos e ensaiados em laboratório.

Haynes e Yoder (1963) observaram uma queda de 50% no módulo de resiliência em pedregulho com o aumento do grau de saturação de 70 a 97%.

O módulo de resiliência diminui com o aumento da umidade, comparando com a umidade ótima. Para eles, materiais granulares saturados desenvolvem excesso de poro-pressão em condições de cargas repetidas, reduzindo o valor de módulo de resiliência. Como a poro-pressão atua, a tensão efetiva do material diminui com a diminuição da resistência do material. Segundo estes pesquisadores, pode-se argumentar que não é o grau de compactação mas sim a poro-pressão que controla a deformação do material (HICKS e MONISMITH, 1971; RAAD et al., 1992.)

Rada e Witczak (1981), na tentativa de desenvolver um resumo dos fatores que influenciam os valores de módulo de resiliência de materiais granulares dos Estados Unidos, analisaram os

---

<sup>3</sup> Pedra britada, pedregulho, cascalho britado.

resultados de 10 organizações de pesquisa<sup>4</sup>, totalizando 271 ensaios de 6 materiais<sup>5</sup> diferentes. Cabe salientar que todos os materiais foram ensaiados nas três energias de compactação<sup>6</sup> em três umidades<sup>7</sup> diferentes. E constataram que o módulo de resiliência é influenciado pela umidade. Para estes pesquisadores, para materiais angulosos, o módulo de resiliência diminui com o aumento da umidade.

Raad et al. (1992) compararam materiais bem graduados e mal graduados, em condições saturadas e não saturadas, e concluíram que o material granular saturado, submetido a uma repetição de cargas, irá desenvolver excesso de poro-pressão, contribuindo na redução do valor do módulo de resiliência. Estima-se que o dano causado pela repetição de carga em materiais saturados bem graduados pode ser muito maior que os constituídos de materiais mal graduados. Portanto, nos últimos anos, outros estados americanos construíram bases de pavimentos permeáveis, que drenam rapidamente a infiltração da umidade<sup>8</sup>.

Tian et al. (1998) ao estudarem a influência da umidade<sup>9</sup> no módulo de resiliência de pedra calcária e arenito, materiais usados em base e sub-base de pavimentos em Oklahoma/EUA, verificaram que aumentado o teor de umidade, o valor do módulo de resiliência diminui, comparado com os valores de módulo de resiliência para materiais na umidade ótima.

Dawson et al. (1996) estudaram vários agregados bem graduados e descobriram que a umidade abaixo da ótima aumenta a rigidez do material, e a umidade acima da ótima torna o material mais saturado e o processo de poro-pressão é desenvolvido diminuindo a rigidez e conseqüentemente diminuindo o módulo de resiliência do material.

Geralmente a resposta resiliente de materiais granulares seco e parcialmente saturado é similar, mas materiais granulares bem graduados completamente saturados tendem a

---

<sup>4</sup> As 10 organizações foram: (Asphalt Institute, University of California at Berkeley, Georgia Institute of Technology, National Crushed Stone Association, University of Illinois, Pennsylvania State University, Florida Department of Transportation, U.S. Army Corps of Engineers, Woodward Clyde, e University of Maryland, estudos preliminares e estudos finais).

<sup>5</sup> Areia siltosa, pedregulho arenoso, misturas de agregados-areia, rocha britada, calcáreo e escória.

<sup>6</sup> Energia de compactação: Normal, Intermediário e Modificado.

<sup>7</sup> Umidade ótima, umidade 2% acima da ótima, umidade 2% abaixo da ótima.

<sup>8</sup> Observações de campo de bases drenadas de Oklahoma indicam que nenhuma das bases tornou-se completamente saturada, mesmo com pobre drenagem (RAHMAN et al., apud RAAD et al., 1992).

<sup>9</sup> As umidades escolhidas foram: umidade ótima ( $W_{ot}$ ), 2% abaixo da ( $W_{ot}$ ), e 2% acima da ( $W_{ot}$ ).



desenvolver excesso de poro-pressão reduzindo o valor de módulo de resiliência (LEKARP et al., 2000).

### **3.3.5 Influência do Tipo do Agregado e o Formato das Partículas**

Sabe-se que as cargas transmitidas pelo tráfego são absorvidas e distribuídas uniformemente pela camada de base granular do pavimento. O sucesso desta transmissão depende do tipo do agregado e do formato de suas partículas.

Agregados maiores tendem a suportar e distribuir melhor tais carregamentos. Alguns agregados se caracterizam pelo seu formato anguloso ou arredondado. Barksdale e Itani (1989) estudaram vários formatos de agregados e descobriram que o agregado angular apresenta maior módulo de resiliência do que o pedregulho arredondado.

Segundo os pesquisadores Hicks (1970), Hicks e Monsmith (1971), Allen e Thompson (1974), Thom (1988), Barksdale e Itani (1989), Thom e Brown (1989), o agregado britado possuem em sua forma ângulos e subângulos, produzindo melhor a expansão da carga e, conseqüentemente, apresentam altos valores de módulo de resiliência comparados com os materiais não britados.

### **3.3.6 Influência da História das Tensões e do Número de Cargas Repetidas**

Estudos têm indicado que a história de tensões tem influência no módulo de resiliência de materiais granulares. Verifica-se que a velocidade do veículo influencia no tempo de duração do pulso de tensão vertical. Quanto menor a velocidade de um veículo, maior é o tempo de duração do pulso de tensão vertical. Para uma compactação a 100% do Proctor Normal, o aumento da frequência do pulso aumenta o módulo de resiliência do material e o aumento da duração do carregamento diminui o módulo de resiliência (MEDINA, 1997).

A influência da história de tensões pode ser reduzida com um pré-carregamento da amostra com poucos ciclos de cargas para se evitar deformações iniciais. Após o pré-carregamento, o

módulo de resiliência é determinado pela aplicação de aproximadamente 100 ciclos de mesma intensidade (HICKS, 1970; ALLEN, 1973).

### 3.3.7 Influência da Duração da Carga, Freqüência e Seqüência de Cargas

Estudos feitos por Seed et al. (1965), Morgan (1966), Hicks (1970), Allen (1973), Boyce et al. (1976), Thom e Brown (1987) concluíram que a duração, a freqüência e seqüência da carga tem pouca influência na obtenção do módulo de resiliência.

Mas Zaman et al. (1994) ao compararem a seqüência de cargas de dois procedimentos de testes da AASHTO observaram que o comportamento resiliente dos materiais estudados variam conforme a seqüência de carga aplicada. Compararam os procedimentos T292-91 I e T294-92 I em seis materiais<sup>10</sup> usados como base e sub-base de pavimentos da região de Oklahoma/EUA. O procedimento T294-92 I varia em 20,7 kPa, 34,5 kPa, 68,9 kPa, 103,4 kPa e 137,8 kPa e resultaram em altos valores de módulo de resiliência, porque a seqüência de suas cargas tem um melhor efeito de fortalecimento na estrutura das amostras, variando da mais baixa para a mais alta.

## 3.4 COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS GRANULARES

Como visto no item 3.3.1, o estado de tensões é um dos fatores que mais influem no comportamento resiliente dos materiais granulares. Nos últimos anos, muitos estudos referentes ao comportamento resiliente dos materiais granulares em ensaios triaxiais de cargas repetidas tem sido realizados.

Além de dependerem do estado de tensões aplicado, os materiais granulares apresentam um comportamento não linear quando submetidos à carregamentos repetidos. Segundo Lekarp et al.,<sup>11</sup>2000 (apud DUNLAP, 1963; MONISMITH et al., 1967; SEED et al., 1967; BROWN e

---

<sup>10</sup> Pedra calcárea de Comanche, Cherokee, Creek, Arenito de Choctaw, Granito de Johnston e Riolito de Murray.

<sup>11</sup> LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. Resilient Response of Unbound Aggregates. **Journal of Transportation Engineering**. January/February 2000.

PELL, 1967; HICKS, 1970) tentaram unificar modelos matemáticos que descrevem a influência dos estados de tensões no módulo de resiliência, e apresentaram modelos matemáticos que melhor representam a dependência do módulo de resiliência ao estado de tensões atuante.

Para materiais granulares, o módulo de resiliência é definido principalmente em função das tensões confinantes ( $\sigma_3$ ), ou da soma das tensões principais ( $\theta$ )<sup>12</sup>. No Brasil, os modelos matemáticos de resiliência mais usados estão representados na Figura 7. Os dois modelos matemáticos correspondem à solos granulares (MEDINA,1997).

| MODELO         | EQUAÇÃO                    | MODELO                | EQUAÇÃO                            |
|----------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| <p>ARENOSO</p> | $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$ | <p>ARENO-ARGILOSO</p> | $M_R = K_1 \theta^{K_2}$ $K_2 > 0$ |

Figura 7 : Modelos de comportamento resiliente de solos (observados no Brasil)

(fonte: Medina,1997, p. 176)

Muitas das experiências realizadas com materiais granulares têm sido verificadas através de ensaios triaxiais de compressão, nos quais a pressão confinante ( $\sigma_3$ ) é mantida constante, enquanto que a tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) é aplicada repetidamente desde zero até  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$

### 3.4.1 Modelo k - $\sigma_3$

Este modelo relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante. Conforme visto no item 2.4.1, o módulo de resiliência aumenta com a pressão confinante e é pouco influenciado pela tensão desvio. Segundo Lekarp et al., 2000 (apud DUNLAP, 1963 e MONISMITH et al.,

<sup>12</sup>  $\theta$  é a soma das tensões principais, onde  $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ .

1967) propuseram o seguinte modelo matemático que relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante.

$$M_R = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (\text{equação 2})$$

Na equação 2,  $\sigma_3$  é a pressão confinante,  $k_1$  e  $k_2$ , são coeficientes de regressão, derivados de resultados de ensaios em laboratório e dependem do tipo de material e das propriedades físicas da amostra durante o ensaio.

Fernandes (2000), em sua dissertação de mestrado, cita alguns valores de  $k_1$  e  $k_2$  obtidos de regressões linear para diferentes agregados de camadas de base e sub-base, para o modelo  $k-\sigma_3$ . E estes valores são mostrados na Figura 8.

| MATERIAL                          | $k_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $k_2$ | REFERÊNCIA                                    |
|-----------------------------------|------------------------------|-------|---|
| Brita graduada – BR 418/MG        | 3285                         | 0,591 | Macedo, 1996                                  |
| Base+Sub-base granular            | 10800 <sup>”</sup>           | 0,99  | Preussler, 1983 (apud ALMEIDA da Silva, 1995) |
| Brita graduada de rocha gnáissica | 1498                         | 0,454 | Espinosa, 1987                                |
| Base granular                     | 2609                         | 0,83  | Pinto, 2000                                   |
| Base granular – BR 040            | 2000                         | 1,0   | Pinto, 2000                                   |

“Valor em MPa.

Figura 8 : Resumo dos resultados de  $k_1$  e  $k_2$ , para materiais granulares segundo modelo  $k-\sigma_3$

(fonte: Fernandes, 2000)

### 3.4.2 Modelo $k-\theta$

Segundo Seed et al<sup>13</sup>( apud LEKARP, 2000), mostrou em suas experiências, que o módulo de resiliência de materiais granulares é dependente do somatório das tensões principais, e propuseram outro modelo matemático em função do primeiro invariante de tensões, e pode ser expresso pela equação:

<sup>13</sup>SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated load test. **National Cooperative Highway Research Program**, n. 35, 1967.

$$M_R = k_1' \times \theta^{k_2'} \quad (\text{equação 3})$$

Na equação 3,  $\theta$  é o primeiro invariante das tensões sob máxima tensão desvio, no caso de compressão triaxial,  $\theta = (\sigma_1 + 2.\sigma_3)$ . Os parâmetros  $k_1'$  e  $k_2'$  são coeficientes de regressão.

Na Figura 9 são apresentados alguns valores de  $k_1'$  e  $k_2'$ , informados por Fernandes (2000), para materiais granulares que constituem as camadas de base e sub-base, para o modelo k- $\theta$ .

| MATERIAL  | $k_1'$ *     | $k_2'$      | REFERÊNCIA  |
|---|--------------|-------------|---|
| Cascalho parcialmente britado;<br>rocha britada | 1600 - 5000  | 0,57 – 0,73 | Hicks e Monismith, 1971 (apud HEYDINGER et al., TRR 1547) |
| Base não tratada (San Diego Road)               | 2100 - 5400  | 0,61        | Hicks, Finn (apud ASPHALT INSTITUTE, 1982)                |
| Cascalho, pedra britada                         | 1800 - 8000  | 0,32 – 0,70 | Allen (apud ASPHALT INSTITUTE, 1982)                      |
| Pedra britada                                   | 4000 - 9000  | 0,46 – 0,64 | Kalcheff e Hicks (apud ASPHALT INSTITUTE, 1982)           |
| Materiais de base e sub-base em serviço         | 2900 - 7750  | 0,46 – 0,65 | Monismith et al., 1972 (apud HEYDINGER et al., TRR 1547)  |
| Brita graduada – BR 418/MG                      | 1322#        | 0,575       | Macedo, 1996  |
| Brita graduada de rocha gnáissica               | 685''        | 0,408       | Espinosa, 1987  |
| Cascalho britado                                | 7800 - 25000 | 0,38 – 0,60 | Apud LYTTON, 1989   |
| Granito gnáissico                               | 1500 – 34000 | 0,38 – 0,73 | Apud LYTTON, 1989   |
| Basalto   | 4700 - 8900  | 0,47 – 0,65 | Apud LYTTON, 1989   |
| Agregado de graduação densa                     | 11889        | 0,351       | Apud UZAN, 1985   |
| Pedra calcária britada                          | 2600 - 11000 | 0,40 – 0,65 | Apud LYTTON, 1989   |
| Pedra calcária britada uniformemente graduada   | 19454**      | 0,50        | Brown e Pappin, 1985                                      |
| Pedra calcária britada bem graduada             | 8000         | 0,67        | Boyce, Brown, Pell (apud ASPHALT INSTITUTE, 1982)         |
| Pedra calcária britada bem graduada             | 8634**       | 0,69        | Brown e Pappin, 1985                                      |

\*Valores de  $k_1$  em psi<sup>14</sup>, não converter diretamente em kPa; #Valor em kgf/cm<sup>2</sup>; ''Valor de  $k_1$  em MPa; \*\*Valor de  $k_1$  em kPa.

Figura 9: Resumo dos resultados de  $k_1'$  e  $k_2'$ , para materiais granulares segundo modelo k- $\theta$ .

(fonte: Fernandes, 2000)

<sup>14</sup> Conversão: 1psi = 6,895 kPa

Na maioria dos procedimentos de dimensionamento, o modelo  $k-\theta$  é o mais usado internacionalmente, por utilizar o somatório das tensões. Porém, no Brasil, o modelo  $k-\sigma_3$  é o mais utilizado por apresentar um coeficiente de correlação ( $R^2$ )<sup>15</sup> elevado, próximo de um.

---

<sup>15</sup>  $R^2$  é obtido através de regressão linear

## CAPÍTULO 4

### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este Capítulo aborda a metodologia utilizada na dissertação, descrevendo os materiais usados, o equipamento e os procedimentos utilizados na pesquisa.

Inicialmente, é relatada a localização das pedreiras onde foram extraídos os materiais. Na seqüência, cada material passou por processos de caracterização a fim de determinar as suas granulometrias, densidade e umidade ótima.

A segunda parte, descreve o equipamento de laboratório utilizado, assim como suas causas de erros e limitações.

Na seqüência, é relatada a preparação dos corpos de provas para serem ensaiados, dividido em três etapas, que vão da preparação inicial de cada amostra até a execução do ensaio. Após, notifica-se alguns cuidados e limitações que as amostras apresentaram ao serem moldadas.

#### 4.2 DADOS GEOTÉCNICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Esta pesquisa caracterizou três britas graduadas (um granito e dois basaltos) extraídas e utilizadas em Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O Granito foi extraído de uma pedreira em Biguaçu, próximo à capital Florianópolis em Santa Catarina, e será nomeado, para melhores interpretações, como **Granito**. Um dos basaltos foi extraído de uma pedreira em Frederico Wetsphalen ao norte do estado do Rio Grande do Sul e será nomeado, a partir daqui, como

**Basalto 01.** O outro basalto, nomeado como **Basalto 02**, foi extraído de uma pedra em Estância Velha próximo à capital, Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. A Figura 10 localiza as pedreiras onde foram extraídas as três britas graduadas.

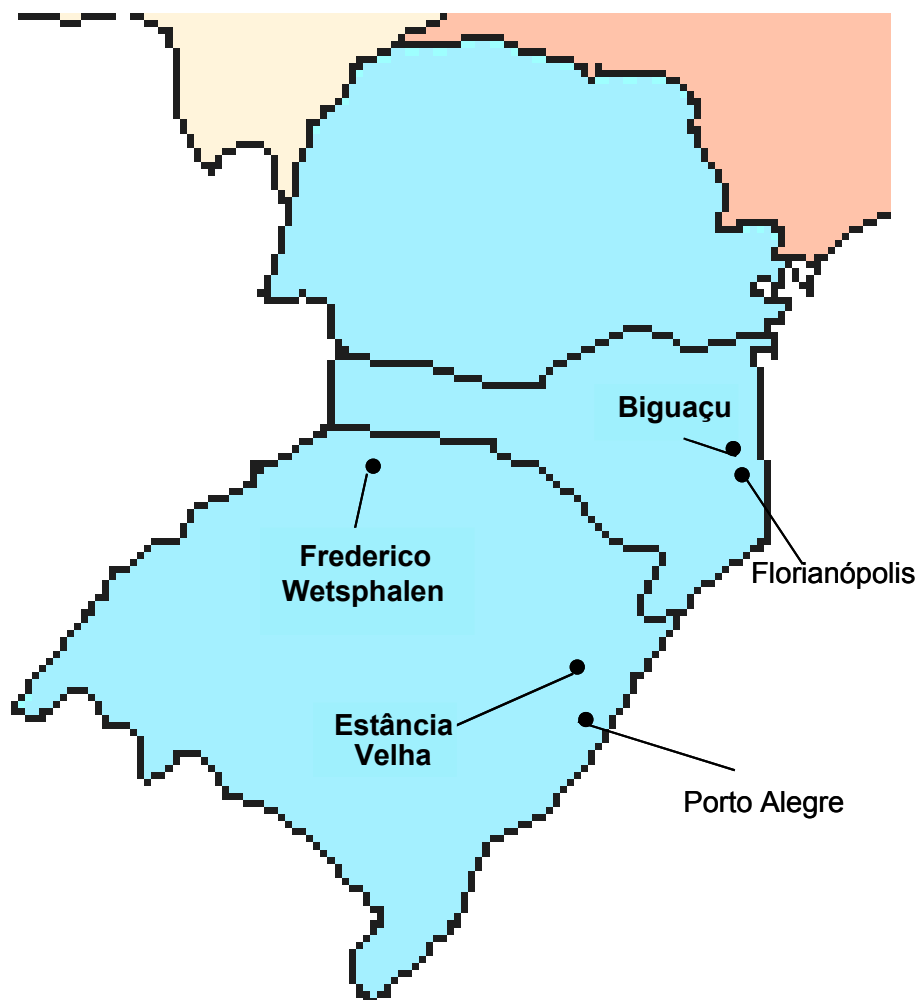


Figura 10: Localização das pedreiras onde foram extraídas as três britas graduadas na região sul do Brasil

Pelo indicado na Figura 3, apresentado no Capítulo 2, pode-se verificar que as cidades gaúchas de Frederico Wetsphalen e Estância Velha estão na região de rochas vulcânicas básicas, conforme localização destas no mapa geológico do Rio Grande do Sul.

As três britas graduadas foram submetidas a ensaios de granulometria e densidade, e estão apresentadas na Tabela 1.



Tabela 1: Características dos materiais estudados

| TIPO<br>DE<br>MATERIAL | $\gamma_d$ máx. *<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\omega_{ot}$<br>(%) | % EM PESO PASSANDO NAS PENEIRAS |           |           |           |          |          |          |           |            |
|------------------------|---|----------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|------------|
|                        |   |                      | 50,8 (mm)                       | 38,1 (mm) | 25,4 (mm) | 19,1 (mm) | 9,5 (mm) | 4,8 (mm) | 2,4 (mm) | 0,42 (mm) | 0,074 (mm) |
|                        |   |                      | 2"                              | 1 1/2"    | 1"        | 3/4"      | 3/8"     | Nº 4     | Nº 10    | Nº 40     | Nº 200     |
| Granito                | 2,371                                     | 3,5                  | 100                             | 100       | 99,42     | 72,62     | 51,63    | 37,92    | 29,29    | 10,49     | 2,16       |
| Basalto 01             | 2,440                                     | 6,3                  | 100                             | 100       | 91,37     | 77,51     | 65,63    | 42,93    | 23,89    | 10,75     | 3,16       |
| Basalto 02             | 2,335                                     | 6,0                  | 100                             | 100       | 100       | 100       | 54,5     | 36,2     | 21,2     | 10,3      | 3,7        |
| Faixa A - DNER         |   |                      | 100                             | 95-100    | 75-100    | 60-90     | 35-65    | 25-65    | 20-40    | 10-30     | 1-8        |

(\*) Energia do Proctor Modificado - 5 camadas e 55 golpes por camada

O Granito apresentou uma umidade ótima de 3,5% enquanto o Basalto 01 e Basalto 02 apresentaram uma umidade ótima elevada, 6,3% e 6,0% . Com isso, a confecção dos moldes dos corpos de prova na umidade acima da ótima para os materiais Basalto 01 e Basalto 02 foi dificultosa, devido a combinação de elevada umidade ótima e pouca quantidade de finos passantes na peneira 200, não sendo suficiente para unir os grãos do material. As quantidades de finos passante na peneira 200 e a umidade ótima dos materiais basaltos podem ser vistos na Tabela 1.

A Figura 11 mostra as curvas de compactação dos dois basaltos estudados. Nota-se que não há a curva de compactação do granito, uma vez que tais dados foram enviados pela empresa que forneceu o material, as informações de umidade ótima e massa específica são mostradas na Tabela 1 apresentada anteriormente.

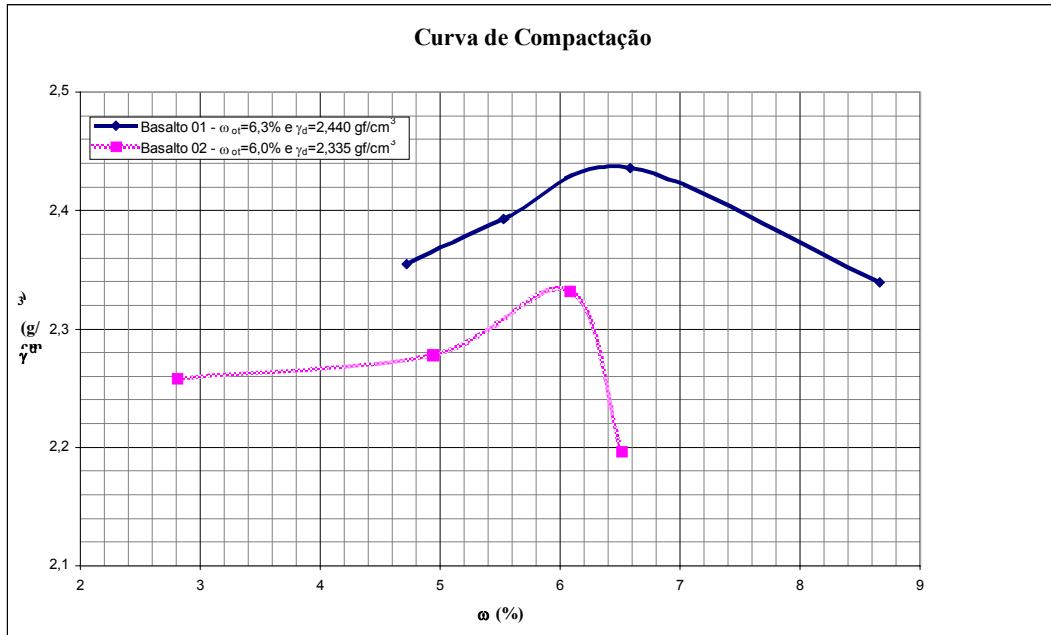


Figura 11: Curva de compactação do Basalto 01 e Basalto 02

A Figura 12 representa as curvas granulométricas dos três materiais estudados. Os três materiais granulares se encontram dentro da especificação da norma do DNER, na faixa A. Sua porcentagem granulométrica pode ser observada na Tabela 1, citada anteriormente.

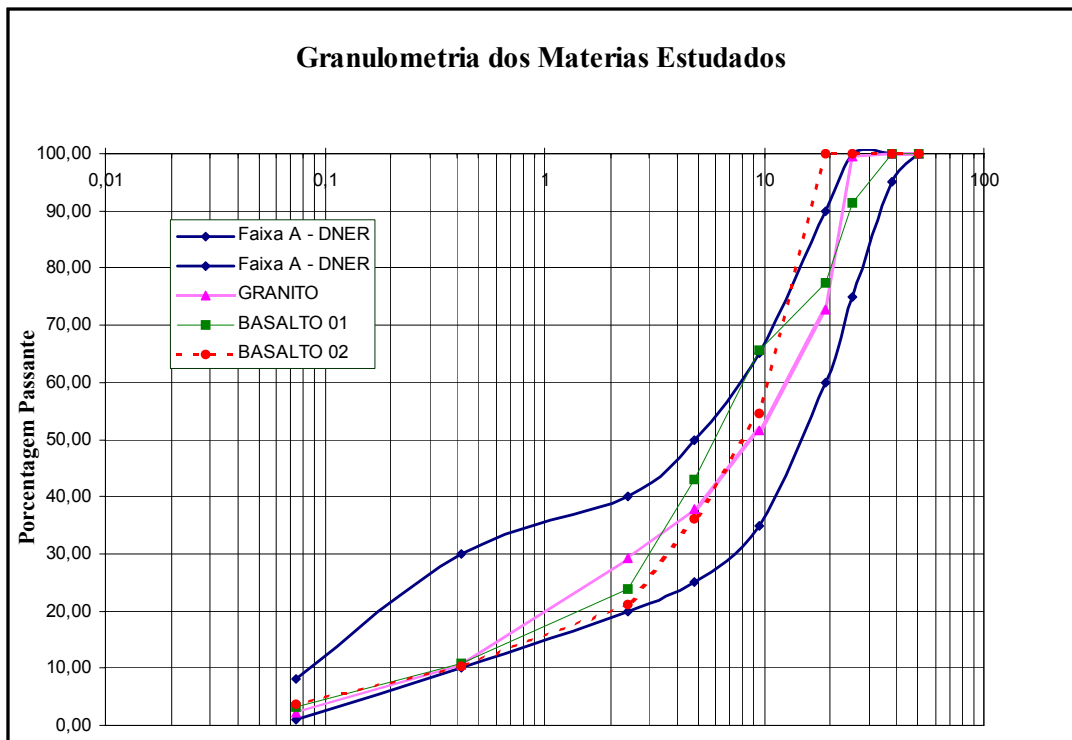


Figura 12: Curvas granulométrica dos materiais estudados

### 4.3 EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO

No Brasil, os estados de tensões aplicados nos ensaios de laboratório são comumente definidos pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) pelo método ME 131/94 que define os estados de tensões em função das características do material, e pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), pelo método TP46-94, que define os estados de tensões em função da posição que o material vai ser utilizado na estrutura do pavimento. Assim sendo, adotou-se para este ensaio o método TP46-94 definido pela AASHTO, por ser estudado materiais utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos.

O ensaio triaxial de cargas repetidas foi introduzido nos estudos de pavimentação pelo Prof. H. Bolton Seed, na década de 50, na Universidade da Califórnia, Berkeley, quando da investigação da deformabilidade do solo do subleito da pista experimental da AASHTO<sup>16</sup>.

No Brasil, a realização dos ensaios laboratoriais para determinação sistemática das propriedades resilientes dos solos foi iniciada na COPPE/UFRJ, a partir da década de 70 (MEDINA, 1997).

O equipamento é uma câmara triaxial apoiada em um pórtico composto de duas barras horizontais, uma inferior, fixa, que possui uma base circular onde é acoplado a base da câmara de acrílico, e uma barra horizontal superior, ajustável, onde é montado o cilindro pneumático responsável pela aplicação das forças verticais. O equipamento possui dimensões que comportam amostras de *10 cm de diâmetro e 20 cm de altura*<sup>17</sup>. Os corpos de prova (CPs) são envoltos por uma membrana de látex que permite a integridade destes quando estão sendo ensaiados. As pressões aplicadas no ensaio são: tensão confinante e tensão desvio. A tensão confinante é obtida pela injeção de ar comprimido para dentro da câmara e é medida por um manômetro com capacidade de  $4 \text{ kgf/cm}^2$ . A tensão desvio, tensão vertical, é carregada e descarregada na frequência de 1 Hz e uma duração de 0,1 segundo. É medida por um manômetro de até  $4 \text{ kgf/cm}^2$ . A frequência e a duração da tensão desvio são controladas por

---

<sup>16</sup> AASHTO – American Association State of Highway Officials

<sup>17</sup> O diâmetro do molde deve ser superior ou igual a 4 vezes o diâmetro máximo das partículas do solo (DNER-ME 131/94, p. 3). No caso deste ensaio, os materiais possuem um diâmetro máximo de 1', portanto o diâmetro máximo do molde deve ser de 10 cm.

um aparelho tipo “timer”. O equipamento possui um LVDT (Linear Variable Differential Transformer) que é responsável pela medição da deformação do corpo de prova (CP) e é instalado externamente, junto ao pistão de aplicação de cargas verticais. O LVDT transforma as deformações do CP em um potencial elétrico, que é transmitido para um programa de computador, que recebe como dados de entrada as tensões confinantes e desvio determinadas pela AASHTO e calcula automaticamente o módulo de resiliência para as determinadas tensões.

A Figura 13 esquematiza o equipamento triaxial de cargas repetidas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Pavimentação – LAPAV.

No entanto, é importante comentar que a câmara triaxial desenvolvida para a realização de ensaios de carga repetida para materiais granulares graúdos é similar às câmaras para solos finos; a diferença está no tamanho, pois é capaz de ensaiar amostras de dimensões maiores (10 x 20 cm). Cabe também salientar que o tempo de execução do ensaio é em torno de 45 min, aplicando-se as tensões sugeridas pela AASHTO. Com a utilização de ar comprimido, um sistema de vácuo pode ser anexado à base da câmara triaxial, com a finalidade de permitir a moldagem de solos não coesivos e verificar a integridade da membrana de borracha que envolve os corpos de prova. A Figura 14 apresenta o equipamento triaxial de cargas repetidas do LAPAV.

### **4.3.1 Causas de Erros**

O ensaio triaxial é de suma importância no campo da pesquisa de solos por fornecer elementos necessários ao dimensionamento de novos pavimentos e auxiliar no diagnóstico de problemas específicos de pavimentos a serem restaurados.

Atualmente seus resultados são comparados com os resultados obtidos por ensaios realizados em campo, a fim de completar e reforçar a análise feita por equipamentos *in situ*.

Os ensaios de laboratórios têm a importante função de simular tensões semelhantes às que o material é submetido com o movimento intenso do tráfego em uma rodovia, a fim de determinar o módulo de rigidez elástica de cada camada da estrutura do pavimento.

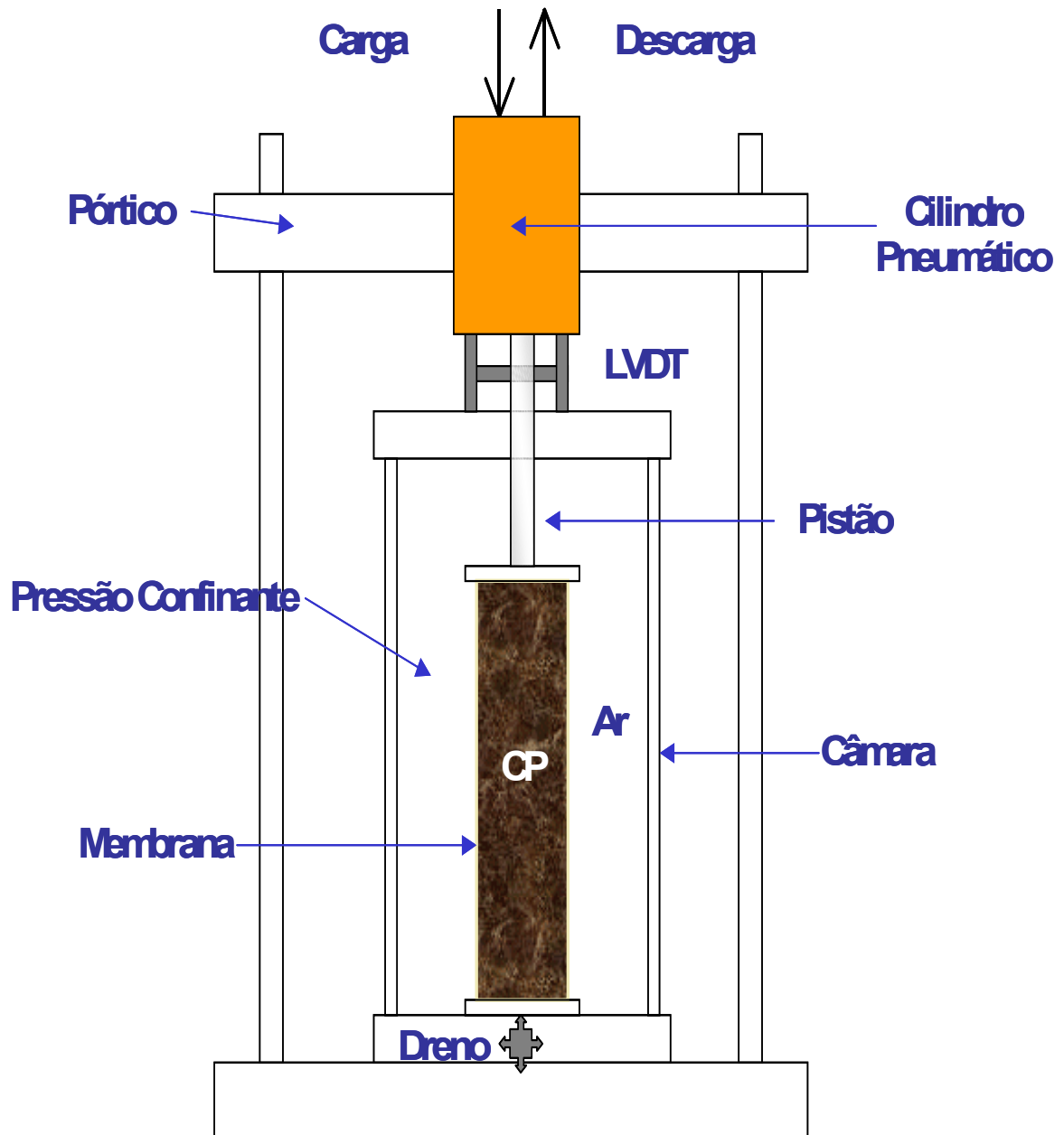


Figura 13: Esquema do equipamento triaxial de cargas repetidas  
(fonte: elaborado pela autora com base no equipamento do LAPAV)

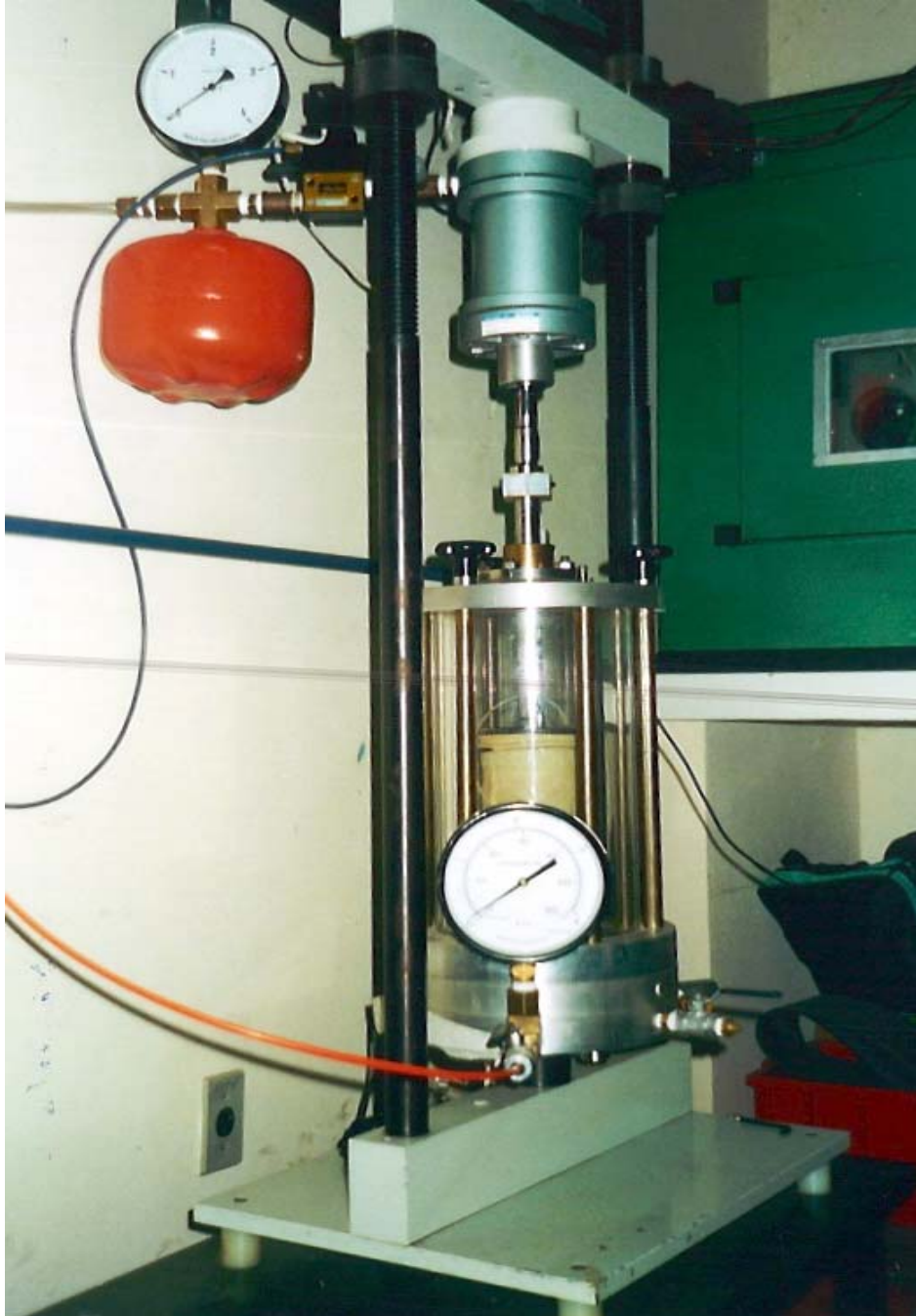


Figura 14: Equipamento triaxial de cargas repetidas, LAPAV - UFRGS

Como ele fornece tensões semelhantes às que o material é submetido na prática, os valores dos parâmetros determinados a partir dos ensaios de laboratório podem ser afetados por erros de medição na altura e diâmetro das amostras, uma vez que estas medições são feitas manualmente com o paquímetro e suas medidas são informadas ao software.

### 4.3.2 Limitações do Equipamento

Apesar do equipamento triaxial fornecer valores confiáveis de módulo de resiliência e ser de fácil manuseio, algumas limitações devem ser respeitadas:

- a) a pressão de confinamento no interior da câmara triaxial não pode ser aplicada repetidamente, devendo ser estática. Porém, esta limitação não tem muita influência no caso do módulo resiliente; como abordado no item. 3.3.1.do Capítulo 3;
- b) a determinação do módulo resiliente pode ser executada em corpos de prova de até 100 mm de diâmetro, o que é considerado muito bom para ensaios de solos granulares. Mas, com esta limitação de diâmetro, fica a curiosidade em se conhecer o módulo resiliente de materiais de granulometrias maiores, como o caso dos matacões, pela necessidade de maquinários muito maiores que o já existente, por se tratar de corpos de prova de grandes proporções.

## 4.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como já explicado anteriormente, os moldes dos corpos de prova (CPs) deverão ter um diâmetro superior ou igual a quatro vezes o diâmetro máximo das partículas do solo. O corpo de prova (CP) deve ter dimensões tais que a relação altura/diâmetro seja aproximadamente igual a dois (DNER-ME 131-94; AASHTO TP-46/94).

### 4.4.1 Primeira Parte do Ensaio: Preparação das Amostras

Adiciona-se ao material a porcentagem calculada de água para  $\omega_{ot}$ ,  $\omega$  2% acima da  $\omega_{ot}$ ,  $\omega$  2% abaixo da  $\omega_{ot}$ , e deixa-se homogeneizando no mínimo 24 horas, a fim de que a umidade possa ser absorvida uniformemente pelos grãos do material. Deve-se ter cuidado de armazená-los em recipientes impermeáveis para que não haja perda nem acréscimo de umidade.

### 4.4.2 Segunda Parte do Ensaio: Moldagem e Compactação do Material Granular

Os CPs foram compactados na energia de compactação do Proctor Modificado, conforme especificação da norma do DNER e teores de umidade desejados ( $\omega_{ot}$ ,  $\omega$  2% acima da  $\omega_{ot}$ , e  $\omega$  2% a baixo da  $\omega_{ot}$ ), com variação do grau de compactação (GC) de 100%, 97%, 95% e 93%.

A Figura 15 esclarece a totalidade de combinações para cada material estudado. Moldou-se então, 3 CPs para a combinação das três umidades com os quatro graus de compactação, totalizando 36 CPs para cada material e 108 CPs para os três materiais.



| 3 CPs                        |           | 3 CPs                          |           | 3 CPs                          |           |
|------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| ω <sub>ót</sub>              | GC = 100% | ω 2% acima da ω <sub>ót</sub>  | GC = 100% | ω 2% abaixo da ω <sub>ót</sub> | GC = 100% |
|                              | GC = 97%  |                                | GC = 97%  |                                | GC = 97%  |
|                              | GC = 95%  |                                | GC = 95%  |                                | GC = 95%  |
|                              | GC = 93%  |                                | GC = 93%  |                                | GC = 93%  |
| Total p/ 1 material = 36 CPs |           | Total p/ 3 materiais = 108 CPs |           |                                |           |

Figura 15: Demonstrativo da quantidade de CPs executados

Algumas dificuldades, no entanto, modificaram a execução do número de CPs ensaiados. Foram moldados 36 CPs de Granito conforme as combinações de umidade e densidade, mas seus CPs foram secados, umedecidos e reutilizados pela escassez de material, ao contrário dos dois basaltos que foram fornecidos em grande quantidade.

Para os Basaltos 01 e 02 foram moldados 24 CPs para cada material, ou seja, apenas as combinações de umidade ótima e umidade 2% abaixo da ótima forneceram condições de moldagem e possibilidade de ensaio; os CPs moldados na combinação de 2% acima da ótima não forneceram amostras consistentes em seu desmolde, fato percebido pela combinação de pouca quantidade de finos e grande umidade.

#### 4.4.3 Terceira Parte do Ensaio: Execução do Ensaio

Após a desmoldagem e a medição da amostra, ela é então preparada dentro da câmara triaxial a fim de ser ensaiada.

Inicialmente faz-se uma seqüência de carregamentos dinâmicos, com a finalidade de confinar o corpo de prova, eliminando as imperfeições na moldagem, as irregularidades iniciais de contato e as grandes deformações permanentes que ocorrem durante as primeiras aplicações da tensão desvio. As cargas sugeridas pela AASHTO para esta fase de confinamento foram de  $\sigma_d = 93,1$  kPa e  $\sigma_3 = 103,4$  kPa, num número médio de 5 aplicações. O tempo de aplicação é de aproximadamente 9 minutos.

Terminado o condicionamento, segue a seqüência de carregamento sugerida pelo método da AASHTO ao corpo de prova para a caracterização do comportamento resiliente, como segue

na Tabela 2. O módulo de resiliência deve ser determinado pela aplicação de 100 ciclos de mesma intensidade, a partir da qual ele permanece constante.

Tabela 2: Sequência das cargas imposta pela AASHTO n° TP 46-94 (1996)

SOLOS DE BASE / SUB-BASE

Condicionamento:

| $\sigma_3$ (kPa) | $\sigma_d$ (kPa) | n° aplicações | Módulo de Resiliência* |
|------------------|------------------|---------------|------------------------|
| 103,4            | 93,1             | 500 - 1000    | -                      |
|                  |                  |               | -                      |
|                  |                  |               | -                      |
|                  |                  |               | -                      |

Cargas:

| $\sigma_3$ (kPa) | $\sigma_d$ (kPa) | n° aplicações | Módulo de Resiliência* |
|------------------|------------------|---------------|------------------------|
| 20,7             | 18,6             | 100           | -                      |
|                  | 37,3             |               | -                      |
|                  | 55,9             |               | -                      |
| 34,5             | 31               | 100           | -                      |
|                  | 62               |               | -                      |
|                  | 93,1             |               | -                      |
| 68,9             | 62               | 100           | -                      |
|                  | 124,1            |               | -                      |
|                  | 186,1            |               | -                      |
| 103,4            | 62               | 1000          | -                      |
|                  | 93,1             |               | -                      |
|                  | 186,1            |               | -                      |
| 137,9            | 93,1             | 100           | -                      |
|                  | 124,1            |               | -                      |
|                  | 248,2            |               | -                      |

\*a última coluna serve para anotar os valores de  $M_R$  fornecidos pelo programa computacional para cada tensão aplicada

Os ensaios foram realizados em condições drenadas, procedimento que melhor simula as condições de base e sub-base dos pavimentos.

Posterior ao ensaio, o corpo de prova é desmanchado e secado em uma estufa a 110 °C, a fim de se determinar a sua real umidade. Com os dados processados pelo programa computacional plotaram-se gráficos de módulo de resiliência, conforme os apêndices A, B e C, para cada material.

#### **4.4.4 Limitações das Amostras Ensaçadas**

Os três materiais ensaiados apresentaram algumas limitações quanto à confecção de suas amostras:

- a) o condicionamento e manuseio de amostras de britas graduadas pode ser muito difícil, uma vez que o material não possui coesão;
- b) as amostras de Basalto 01 e Basalto 02 não puderam ser moldadas na umidade acima da ótima por apresentarem uma umidade ótima elevada e pouca porcentagem de finos.

## CAPÍTULO 5

### 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os valores de módulo de resiliência para materiais granulares, plotados em gráficos logarítmicos, apresentam um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) próximo a um. Portanto, para uma análise mais coerente, adotou-se um critério para validade dos ensaios: somente os CPs que apresentaram valores de  $R^2$  superior a 0,7 serão considerados válidos para a análise. Dos 84 CPs ensaiados, 10 foram excluídos por não apresentarem estes critério de avaliação, e os demais apresentaram valores muito próximos de um.

Os dois modelos matemáticos utilizados apresentaram valores de  $R^2$  muito semelhantes, para efeito de análise destacou-se em negrito, nas tabelas a seguir, os maiores valores dos coeficientes de correlação entre os dois modelos matemáticos. Como os valores de correlação do modelo matemático  $k-\sigma_3$  se manifestou mais vezes, atribui-se que  $k-\sigma_3$  seja o modelo de maior aceitação desta pesquisa, e o motivo pelo qual seja o mais usado e melhor aceito entre os pesquisadores brasileiros.

Algumas considerações são importantes relatar. Para os três materiais, alguns CPs, ao serem moldados, não apresentaram as características desejadas de grau de compactação e umidade, devido à dificuldade em se manter a umidade dos CPs durante o ensaio.

Em alguns casos, as densidades encontradas em laboratório foram maiores que as estimadas e alguns CPs de umidade ótima apresentaram grau de compactação maior que 100%.

Quanto à umidade, alguns CPs apresentaram umidade de laboratório maior que a estimada, mas isso ocorreu somente para os CPs moldados na umidade 2% abaixo da ótima.

## 5.2 PARÂMETROS DE RESILIÊNCIA

Os modelos matemáticos mais usados para representar o comportamento resiliente podem ser expressos pelas relações já apresentadas no Capítulo 3, item 3.4. Na análise dos módulos de resiliência foram utilizados os modelos  $k-\theta$  e  $k-\sigma_3$ . O modelo  $k-\theta$  é muito utilizado internacionalmente, pois introduz as somas das tensões principais na análise. Entretanto, o modelo  $k-\sigma_3$  é o mais tradicionalmente utilizado no Brasil.

Nos apêndices A, B e C, encontram-se os valores dos módulos de resiliência em função da pressão confinante e do primeiro invariante de tensões em escala logarítmica, para cada CP ensaiado. Cada anexo corresponde a um material estudado – Granito, Basalto 01 e Basalto 02, respectivamente. Utilizando a regressão linear, foram obtidos os coeficientes de regressão  $k_1$  e  $k_2$  para o modelo  $k-\sigma_3$  e  $k_1'$  e  $k_2'$  para o modelo  $k-\theta$ . Foi obtido também, com a regressão linear, o coeficiente de correlação  $R^2$ , que indica a representação do módulo de resiliência em função das tensões aplicadas, também apresentadas nas figuras dos apêndices A, B e C.

As Tabelas 3, 4 e 5 resumem as características de cada corpo de prova para os dois modelos matemáticos usados.

Tabela 3: Resumo das constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_1'$  e  $k_2'$  dos modelos  $K-\sigma_3$  e modelo  $K-\theta$  em MPa do Granito

| Material | Umidade        | CP              | Condições de Compactação |         | modelo $k-\sigma_3$                    |              |              | modelo $k-\theta$                      |        |              |              |
|----------|----------------|-----------------|--------------------------|---------|--|--------------|--------------|--|--------|--------------|--------------|
|          |                |                 | Umidade<br>%             | GC<br>% | $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ (MPa) |              |              | $M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'}$ (MPa) |        |              |              |
|          |                |                 |                          |         | $k_1$                                  | $k_2$        | $R^2$        | $k_1'$                                 | $k_2'$ | $R^2$        |              |
| GRANITO  | Ótima          | CP 01           | 3,2%                     | 99%     | 1.610                                  | 0,42         | <b>0,784</b> | 964                                    | 0,41   | 0,777        |              |
|          |                | CP 02           | 3,2%                     | 97%     | 1.450                                  | 0,47         | 0,926        | 800                                    | 0,49   | <b>0,936</b> |              |
|          |                | CP 03           | 3,5%                     | 97%     | 1.390                                  | 0,48         | <b>0,976</b> | 750                                    | 0,50   | <b>0,976</b> |              |
|          |                | CP 04           | 3,5%                     | 96%     | 920                                    | 0,32         | 0,772        | 620                                    | 0,32   | <b>0,777</b> |              |
|          |                | CP 05           | 3,8%                     | 96%     | 950                                    | 0,37         | <b>0,821</b> | 590                                    | 0,39   | 0,816        |              |
|          |                | CP 06           | 3,2%                     | 95%     | 1.550                                  | 0,50         | 0,946        | 820                                    | 0,52   | <b>0,950</b> |              |
|          |                | CP 07           | 3,2%                     | 95%     | 1.460                                  | 0,48         | <b>0,857</b> | 790                                    | 0,49   | 0,844        |              |
|          |                | CP 08           | 3,4%                     | 95%     | 1.060                                  | 0,36         | <b>0,938</b> | 670                                    | 0,38   | 0,936        |              |
|          |                | CP 09           | 3,5%                     | 95%     | 2.290                                  | 0,54         | <b>0,920</b> | 1.150                                  | 0,56   | <b>0,920</b> |              |
|          |                | CP 11           | 3,5%                     | 95%     | 1.260                                  | 0,40         | 0,905        | 750                                    | 0,41   | <b>0,907</b> |              |
|          |                | CP 13           | 3,5%                     | 94%     | 1.410                                  | 0,45         | <b>0,929</b> | 790                                    | 0,47   | 0,926        |              |
|          |                | CP 14           | 3,5%                     | 94%     | 1.250                                  | 0,49         | <b>0,961</b> | 670                                    | 0,51   | 0,951        |              |
|          |                | CP 15           | 3,4%                     | 94%     | 2.230                                  | 0,58         | 0,966        | 1.070                                  | 0,60   | <b>0,970</b> |              |
|          |                | abaixo da Ótima | CP 16                    | 1,5%    | 104%                                   | 590          | 0,34         | <b>0,855</b>                           | 380    | 0,35         | <b>0,855</b> |
|          |                |                 | CP 17                    | 1,9%    | 96%                                    | 1.100        | 0,45         | <b>0,944</b>                           | 620    | 0,47         | 0,942        |
|          | CP 18          |                 | 1,5%                     | 96%     | 830                                    | 0,34         | <b>0,743</b> | 540                                    | 0,35   | 0,742        |              |
|          | CP 21          |                 | 1,5%                     | 95%     | 1.630                                  | 0,46         | <b>0,937</b> | 900                                    | 0,48   | 0,926        |              |
|          | CP 22          |                 | 1,5%                     | 94%     | 1.040                                  | 0,42         | 0,897        | 730                                    | 0,43   | <b>0,900</b> |              |
|          | CP 19          | 1,6%            | 94%                      | 1.240   | 0,51                                   | <b>0,927</b> | 540          | 0,52                                   | 0,921  |              |              |
|          | acima da Ótima | CP 24           | 4,1%                     | 99%     | 1.200                                  | 0,45         | 0,920        | 680                                    | 0,47   | <b>0,928</b> |              |
|          |                | CP 26           | 4,0%                     | 98%     | 1.550                                  | 0,55         | 0,928        | 780                                    | 0,57   | <b>0,933</b> |              |
|          |                | CP 25           | 5,5%                     | 97%     | 1.380                                  | 0,59         | 0,917        | 650                                    | 0,62   | <b>0,927</b> |              |
|          |                | CP 27           | 5,5%                     | 96%     | 930                                    | 0,41         | 0,953        | 550                                    | 0,43   | <b>0,955</b> |              |
|          |                | CP 23           | 5,5%                     | 95%     | 980                                    | 0,44         | 0,879        | 560                                    | 0,46   | <b>0,880</b> |              |
|          |                | CP 28           | 5,5%                     | 95%     | 1.710                                  | 0,52         | <b>0,897</b> | 880                                    | 0,54   | 0,887        |              |

Tabela 4: Resumo das constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_1'$  e  $k_2'$  dos modelos K- $\sigma_3$  e modelo K- $\theta$  em MPa do Basalto 01

| Material   | Umidade         | CP       | Condições de Compactação |         | modelo k- $\sigma_3$                   |       |              | modelo k- $\theta$                     |              |              |
|------------|-----------------|----------|--------------------------|---------|--|-------|--------------|--|--------------|--------------|
|            |                 |          | Umidade<br>%             | GC<br>% | $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ (MPa) |       |              | $M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'}$ (MPa) |              |              |
|            |                 |          |                          |         | $k_1$                                  | $k_2$ | $R^2$        | $k_1'$                                 | $k_2'$       | $R^2$        |
| BASALTO 01 | Ótima           | CP 01    | 5,5%                     | 101%    | 810                                    | 0,41  | <b>0,945</b> | 480                                    | 0,42         | 0,938        |
|            |                 | CP 01(B) | 5,9%                     | 101%    | 530                                    | 0,29  | <b>0,828</b> | 370                                    | 0,30         | 0,820        |
|            |                 | CP 02    | 5,8%                     | 101%    | 890                                    | 0,52  | 0,840        | 460                                    | 0,54         | <b>0,847</b> |
|            |                 | CP 03    | 5,6%                     | 101%    | 940                                    | 0,41  | 0,933        | 560                                    | 0,43         | <b>0,942</b> |
|            |                 | CP 09    | 5,3%                     | 101%    | 1.080                                  | 0,58  | <b>0,951</b> | 520                                    | 0,60         | 0,949        |
|            |                 | CP 07    | 5,9%                     | 100%    | 1.060                                  | 0,52  | 0,927        | 550                                    | 0,54         | <b>0,930</b> |
|            |                 | CP 02(B) | 5,7%                     | 100%    | 920                                    | 0,41  | <b>0,835</b> | 540                                    | 0,43         | 0,832        |
|            |                 | CP 08    | 6,0%                     | 99%     | 1.040                                  | 0,50  | 0,932        | 550                                    | 0,52         | <b>0,936</b> |
|            |                 | CP 01(A) | 5,6%                     | 99%     | 980                                    | 0,32  | <b>0,923</b> | 640                                    | 0,34         | 0,911        |
|            | CP 21           | 5,8%     | 97%                      | 1.280   | 0,50                                   | 0,950 | 680          | 0,52                                   | <b>0,951</b> |              |
|            | abaixo da Ótima | CP 13    | 4,1%                     | 102%    | 700                                    | 0,58  | <b>0,908</b> | 340                                    | 0,61         | 0,905        |
|            |                 | CP 14    | 3,5%                     | 102%    | 1.040                                  | 0,48  | <b>0,945</b> | 560                                    | 0,49         | 0,938        |
|            |                 | CP 19    | 5,1%                     | 101%    | 1.060                                  | 0,59  | <b>0,886</b> | 500                                    | 0,61         | 0,875        |
|            |                 | CP 15    | 5,2%                     | 100%    | 1.330                                  | 0,49  | 0,944        | 710                                    | 0,51         | <b>0,946</b> |
|            |                 | CP 04 C  | 5,0%                     | 99%     | 3.150                                  | 0,76  | 0,987        | 1.200                                  | 0,79         | <b>0,990</b> |
|            |                 | CP 05    | 4,3%                     | 98%     | 1.590                                  | 0,49  | <b>0,770</b> | 850                                    | 0,51         | 0,767        |
|            |                 | CP 12    | 4,2%                     | 98%     | 1.500                                  | 0,56  | <b>0,966</b> | 740                                    | 0,58         | 0,958        |
|            |                 | CP 04    | 5,2%                     | 97%     | 1.320                                  | 0,60  | <b>0,955</b> | 620                                    | 0,62         | 0,950        |
|            |                 | CP 10    | 4,8%                     | 97%     | 1.350                                  | 0,46  | <b>0,854</b> | 750                                    | 0,48         | 0,849        |
|            |                 | CP 11    | 4,3%                     | 97%     | 1.480                                  | 0,60  | 0,966        | 690                                    | 0,63         | <b>0,969</b> |
|            |                 | CP 18    | 4,3%                     | 97%     | 870                                    | 0,54  | <b>0,896</b> | 440                                    | 0,56         | 0,891        |
|            |                 | CP 23    | 4,6%                     | 97%     | 1.230                                  | 0,59  | <b>0,971</b> | 580                                    | 0,61         | 0,969        |
|            |                 | CP 24    | 4,4%                     | 96%     | 1.480                                  | 0,60  | <b>0,970</b> | 690                                    | 0,63         | 0,967        |
|            |                 | CP 17    | 5,2%                     | 96%     | 1.440                                  | 0,45  | 0,910        | 820                                    | 0,47         | <b>0,917</b> |
|            |                 | CP 22    | 4,7%                     | 95%     | 1.920                                  | 0,74  | <b>0,974</b> | 750                                    | 0,77         | <b>0,974</b> |
|            |                 | CP 16    | 4,8%                     | 93%     | 1.910                                  | 0,61  | <b>0,989</b> | 880                                    | 0,64         | <b>0,989</b> |

Tabela 5: Resumo das constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_1'$  e  $k_2'$  dos modelos K- $\sigma_3$  e modelo K- $\theta$  em MPa do Basalto 02

| Material   | Umidade         | CP    | Condições de Compactação |         | modelo k- $\sigma_3$                   |              |              | modelo k- $\theta$                     |        |              |
|------------|-----------------|-------|--------------------------|---------|--|--------------|--------------|--|--------|--------------|
|            |                 |       | Umidade<br>%             | GC<br>% | $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ (MPa) |              |              | $M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'}$ (MPa) |        |              |
|            |                 |       |                          |         | $k_1$                                  | $k_2$        | $R^2$        | $k_1'$                                 | $k_2'$ | $R^2$        |
| BASALTO 02 | Ótima           | CP 02 | 5,9%                     | 105%    | 1.230                                  | 0,47         | <b>0,960</b> | 670                                    | 0,49   | 0,953        |
|            |                 | CP 03 | 5,5%                     | 105%    | 1.460                                  | 0,41         | <b>0,933</b> | 870                                    | 0,42   | 0,924        |
|            |                 | CP 07 | 6,0%                     | 103%    | 1.490                                  | 0,60         | 0,971        | 698                                    | 0,62   | <b>0,973</b> |
|            |                 | CP 08 | 5,6%                     | 103%    | 1.250                                  | 0,58         | <b>0,932</b> | 590                                    | 0,61   | 0,930        |
|            |                 | CP 09 | 5,7%                     | 103%    | 2.830                                  | 0,84         | <b>0,979</b> | 970                                    | 0,87   | <b>0,979</b> |
|            |                 | CP 10 | 6,0%                     | 102%    | 1.490                                  | 0,58         | <b>0,952</b> | 710                                    | 0,61   | 0,951        |
|            |                 | CP 19 | 6,1%                     | 102%    | 1.170                                  | 0,60         | <b>0,942</b> | 550                                    | 0,62   | 0,941        |
|            |                 | CP 01 | 5,9%                     | 101%    | 940                                    | 0,56         | 0,925        | 460                                    | 0,59   | <b>0,930</b> |
|            |                 | CP 21 | 6,4%                     | 97%     | 780                                    | 0,53         | <b>0,951</b> | 400                                    | 0,55   | <b>0,951</b> |
|            | CP 11           | 6,1%  | 96%                      | 1.860   | 0,69                                   | <b>0,979</b> | 770          | 0,72                                   | 0,978  |              |
|            | abaixo da Ótima | CP 14 | 5,0%                     | 101%    | 1.110                                  | 0,48         | <b>0,944</b> | 600                                    | 0,50   | <b>0,944</b> |
|            |                 | CP 16 | 4,5%                     | 101%    | 1.690                                  | 0,58         | <b>0,897</b> | 800                                    | 0,61   | 0,896        |
|            |                 | CP 17 | 4,6%                     | 100%    | 1.620                                  | 0,58         | <b>0,958</b> | 800                                    | 0,60   | 0,957        |
|            |                 | CP 18 | 4,5%                     | 100%    | 1.330                                  | 0,40         | <b>0,769</b> | 800                                    | 0,41   | 0,760        |
|            |                 | CP 06 | 4,4%                     | 99%     | 1.370                                  | 0,78         | 0,806        | 510                                    | 0,81   | <b>0,814</b> |
|            |                 | CP 15 | 4,7%                     | 99%     | 1.160                                  | 0,43         | <b>0,827</b> | 664                                    | 0,45   | 0,816        |
|            |                 | CP 22 | 4,5%                     | 99%     | 1.410                                  | 0,61         | <b>0,966</b> | 650                                    | 0,63   | 0,961        |
|            |                 | CP 24 | 4,5%                     | 99%     | 1.360                                  | 0,52         | 0,859        | 700                                    | 0,55   | <b>0,863</b> |
|            |                 | CP 23 | 4,3%                     | 98%     | 2.050                                  | 0,64         | <b>0,957</b> | 900                                    | 0,67   | 0,955        |
|            |                 | CP 04 | 4,4%                     | 97%     | 1.330                                  | 0,72         | 0,862        | 540                                    | 0,75   | <b>0,864</b> |
|            |                 | CP 05 | 4,6%                     | 97%     | 1.110                                  | 0,49         | <b>0,907</b> | 600                                    | 0,51   | <b>0,907</b> |
|            |                 | CP 13 | 4,5%                     | 97%     | 1.470                                  | 0,50         | 0,901        | 780                                    | 0,52   | <b>0,904</b> |
|            |                 | CP 20 | 4,8%                     | 93%     | 1.740                                  | 0,57         | <b>0,981</b> | 840                                    | 0,59   | 0,980        |

Cada tabela introduz os valores dos coeficientes de regressão para os dois modelos matemáticos estudados e, conseqüentemente, apresentam os valores dos coeficientes de correlação  $R^2$  que estão dentro dos critérios de validade de ensaio estabelecidos nesta pesquisa.

Os modelos matemáticos  $k-\sigma_3$  e  $k-\theta$  apresentam valores de  $R^2$  muito semelhantes, e usou-se os maiores valores de  $R^2$  dos dois modelos, destacados em negrito nas Tabelas 3, 4 e 5.

Cabe salientar que o CP 04 C de Basalto 01 apresentado na Tabela 4 não foi incluído nas análises gráficas por apresentar valores de  $k_1$  e  $k_2$  muito altos, divergindo dos valores de coeficientes de regressão para os dois modelos matemáticos comparados com os demais daquele intervalo de umidade.

A Tabela 6 relaciona o intervalo das constantes  $k_1$  e  $k_2$ ,  $k_1'$  e  $k_2'$  dos três materiais analisados em laboratório para os dois modelos matemáticos estudados.

Tabela 6: Resumo dos valores de  $k_1$  e  $k_2$ ,  $k_1'$  e  $k_2'$  obtidos pela regressão linear dos dois modelos estudados

| Material   | Umidade                 | n° testes | $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ |             | $M_R = k_1' \cdot \theta^{k_2'}$ |             |
|------------|-------------------------|-----------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
|            |                         |           | $k_1$ (MPa)                      | $k_2$       | $k_1'$ (MPa)                     | $k_2'$      |
| Granito    | W <sub>ot</sub>         | 14        | 920 a <b>2.290</b>               | 0,32 a 0,58 | 590 a <b>1.150</b>               | 0,32 a 0,60 |
|            | W <sub>acima wot</sub>  | 6         | 930 a 1.710                      | 0,41 a 0,59 | 550 a 880                        | 0,43 a 0,62 |
|            | W <sub>abaixo wot</sub> | 5         | 590 a 1.630                      | 0,34 a 0,51 | 380 a 900                        | 0,35 a 0,52 |
| Basalto 01 | W <sub>ot</sub>         | 10        | 530 a 1.280                      | 0,29 a 0,58 | 370 a 680                        | 0,30 a 0,60 |
|            | W <sub>abaixo wot</sub> | 16        | 700 a <b>1.920</b>               | 0,45 a 0,74 | 340 a <b>880</b>                 | 0,47 a 0,77 |
| Basalto 02 | W <sub>ot</sub>         | 9         | 780 a 1.860                      | 0,41 a 0,69 | 400 a 870                        | 0,42 a 0,87 |
|            | W <sub>abaixo wot</sub> | 14        | 1.110 a <b>2.050</b>             | 0,40 a 0,78 | 510 a <b>900</b>                 | 0,41 a 0,81 |
|            |                         | 74        | CPs confiáveis                   |             |                                  |             |

Analisando a umidade ótima dos três materiais, pode-se observar que o Granito apresentou maior valor de  $k_1$  que os demais, e o Basalto 01 e o Basalto 02 apresentaram valores de  $k_1$  menores que os valores do Granito, mas semelhantes entre eles.

Portanto, o Granito, por apresentar valores de  $k_1$  maiores que os demais materiais, é o material que possui maior módulo de resiliência comparado com o Basalto 01 e o Basalto 02. A Figura

16 interpreta melhor e confirma os valores de módulo de resiliência para cada material na umidade ótima.

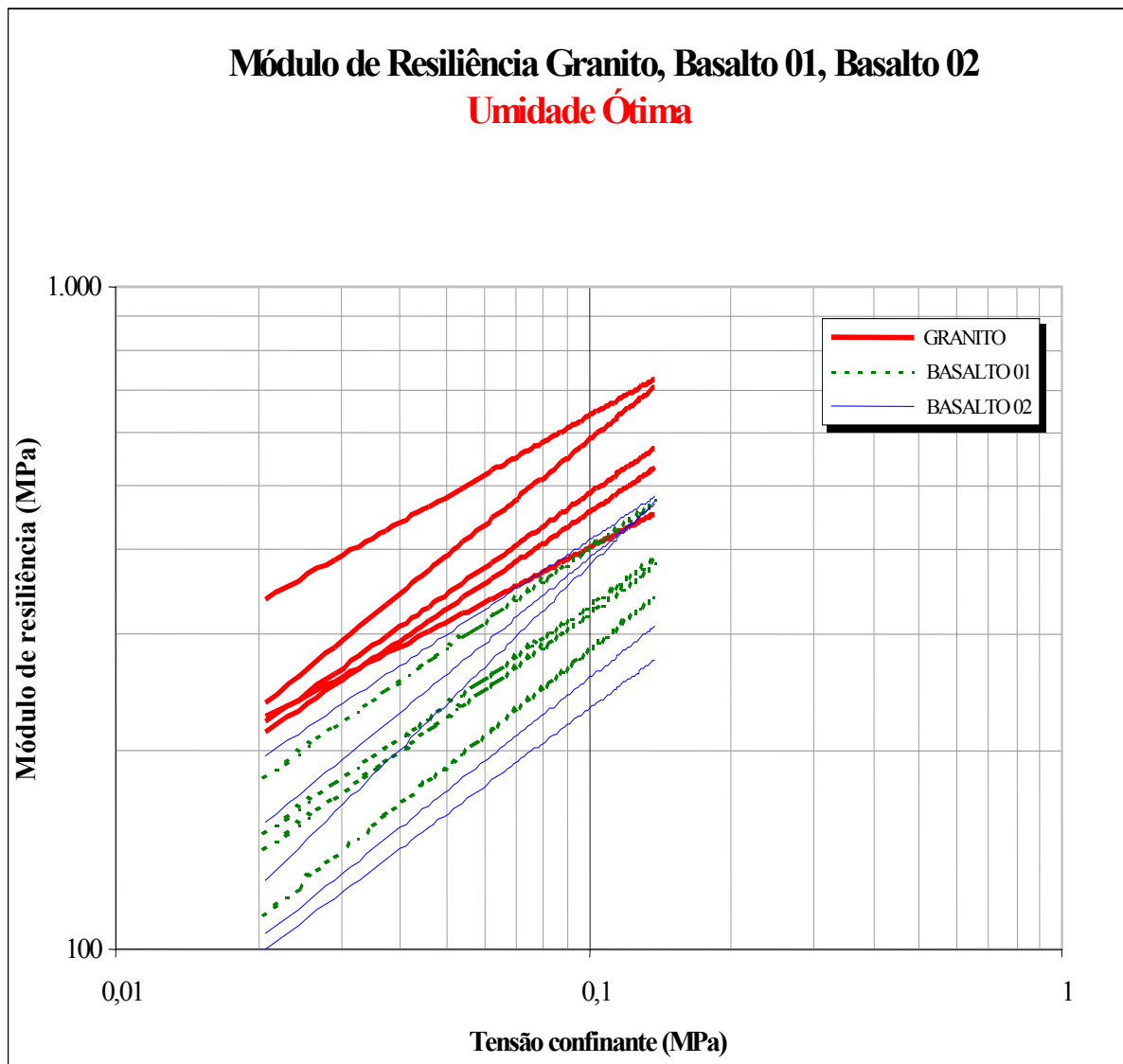


Figura 16: Valores de  $k_1$  para os três materiais estudados na umidade ótima

Observa-se que o Granito possui valores de módulo de resiliência maiores que os demais materiais. O Basalto 01 apresenta valores mais concentrados, enquanto o Basalto 02 apresenta valores mais dispersos, porém ambos possuem valores aproximados e apresentam as mesmas características resilientes.

Na umidade 2% abaixo da ótima, os valores de  $k_1$  são semelhantes e conforme a Figura 17 há pouca variabilidade de módulo de resiliência para os três materiais.



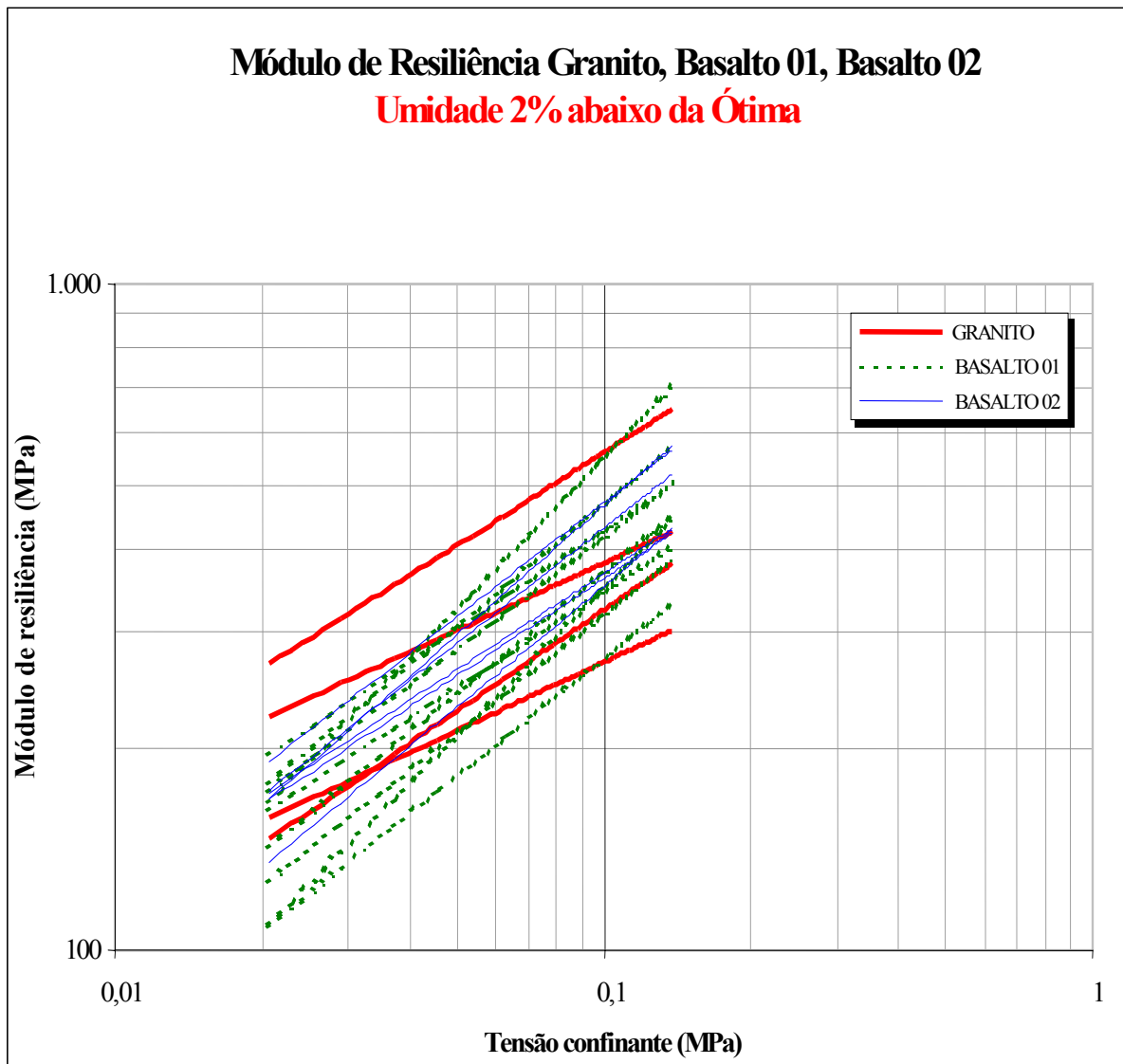


Figura 17: Valores de  $k_1$  para os três materiais estudados na umidade abaixo da ótima

Com as respostas destas caracterizações resilientes, pode-se melhor empregar os materiais no pavimento. Quanto maior for o módulo de resiliência do material usado como base mais resistente é este material quanto à influência do movimento repetido das cargas impostas pelo tráfego, inibindo a formação das trincas por fadiga. Portanto, os três materiais apresentaram altos valores de módulo de resiliência, mas o material do tipo granito foi o que melhor apresentou um comportamento resiliente.

## 5.3 INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DENSIDADE NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

### 5.3.1 Efeito da Umidade

A influência da umidade no módulo de resiliência das três britas graduadas pôde ser investigada apenas para o material Granito, que foi ensaiado nas três umidades desejadas. Os demais materiais foram ensaiados apenas na umidade ótima e abaixo da ótima.

Ao analisar graficamente o módulo de resiliência com os valores de  $k_1$ , percebe-se que seus resultados estão ligados diretamente com a variação da umidade. Conforme a Tabela 06, apresentada no item 5.2, o Granito apresentou um maior valor de  $k_1$  para a umidade ótima. Confirmou-se, para este material, que o módulo de resiliência é influenciado pela variação da umidade. Aumentando a umidade, o módulo de resiliência diminui em relação à umidade ótima. Esta influência pode ser mais bem observada na Figura 18, que expressa graficamente os valores de módulo de resiliência do Granito, nas três umidades desejadas, no modelo que utiliza a tensão confinante.

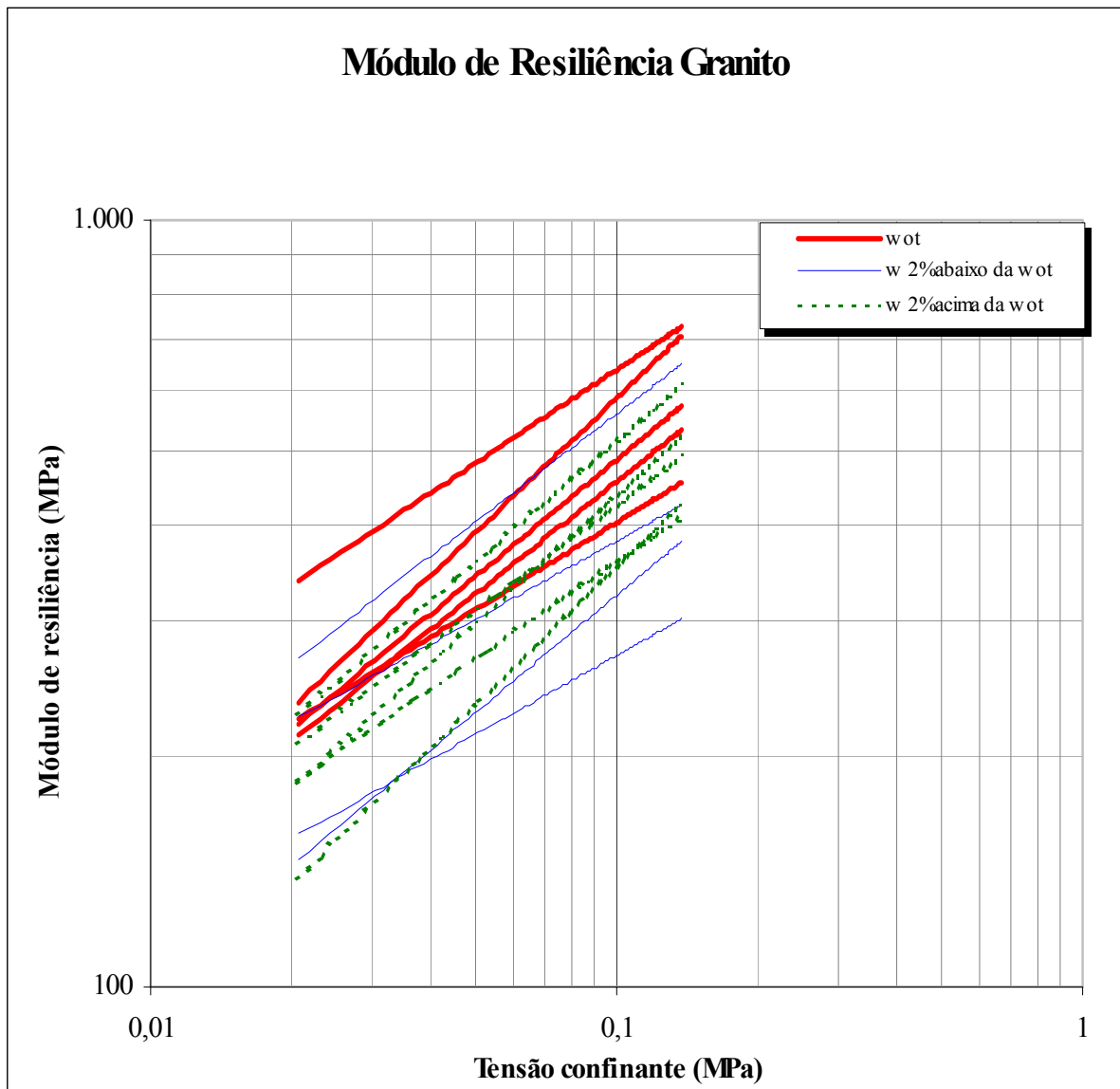


Figura 18: Módulo de resiliência do Granito nas três umidades estudadas

Portanto, aumentando a umidade de compactação, o módulo de resiliência diminui em relação a umidade ótima de compactação. Conclui-se, assim, que este material apresenta melhor comportamento resiliente quando compactado na umidade ótima.

Para o Basalto 01, a Tabela 06 informa que o valor de  $k_1$  é um pouco maior para a umidade 2% abaixo da ótima, comparando com os valores de  $k_1$  da umidade ótima, mas analisando graficamente, como é mostrado na Figura 19, tais valores possuem quase a mesma variação. Ou seja, para o material Basalto 01, o valor do módulo de resiliência não varia com a diminuição da umidade.

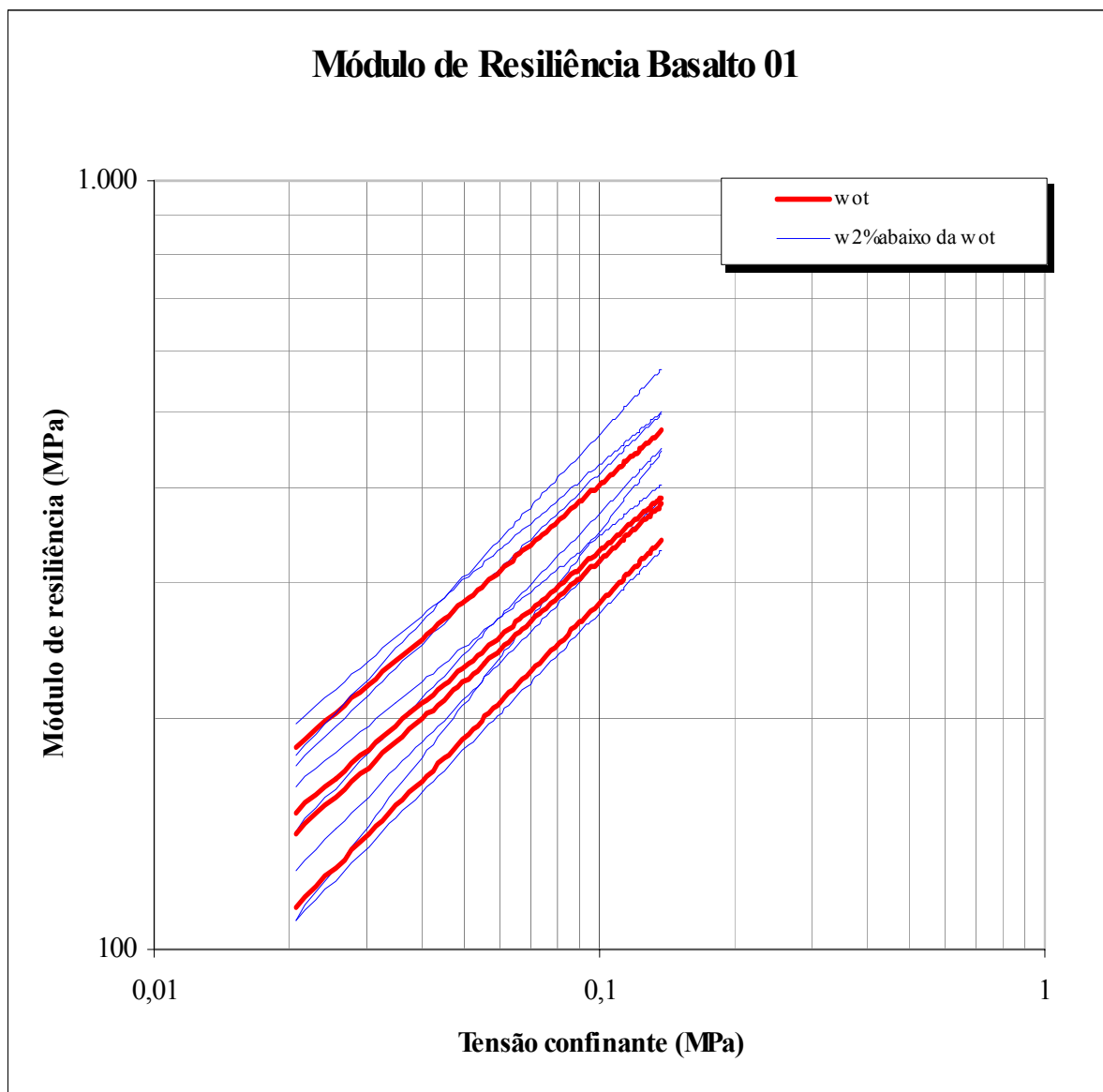


Figura 19: Módulo de resiliência do Basalto 01

Para o Basalto 02, a umidade 2% abaixo da ótima apresenta um valor maior de  $k_1$ , como pode ser lido na Tabela 06 do item 5.2, mas, analisado graficamente pela Figura 20 do modelo que relaciona a tensão confinante, os valores de  $k_1$  estão mais concentrados na parte superior do gráfico, podendo-se interpretar que o módulo de resiliência para a umidade abaixo da ótima deste material é maior que para a umidade ótima.

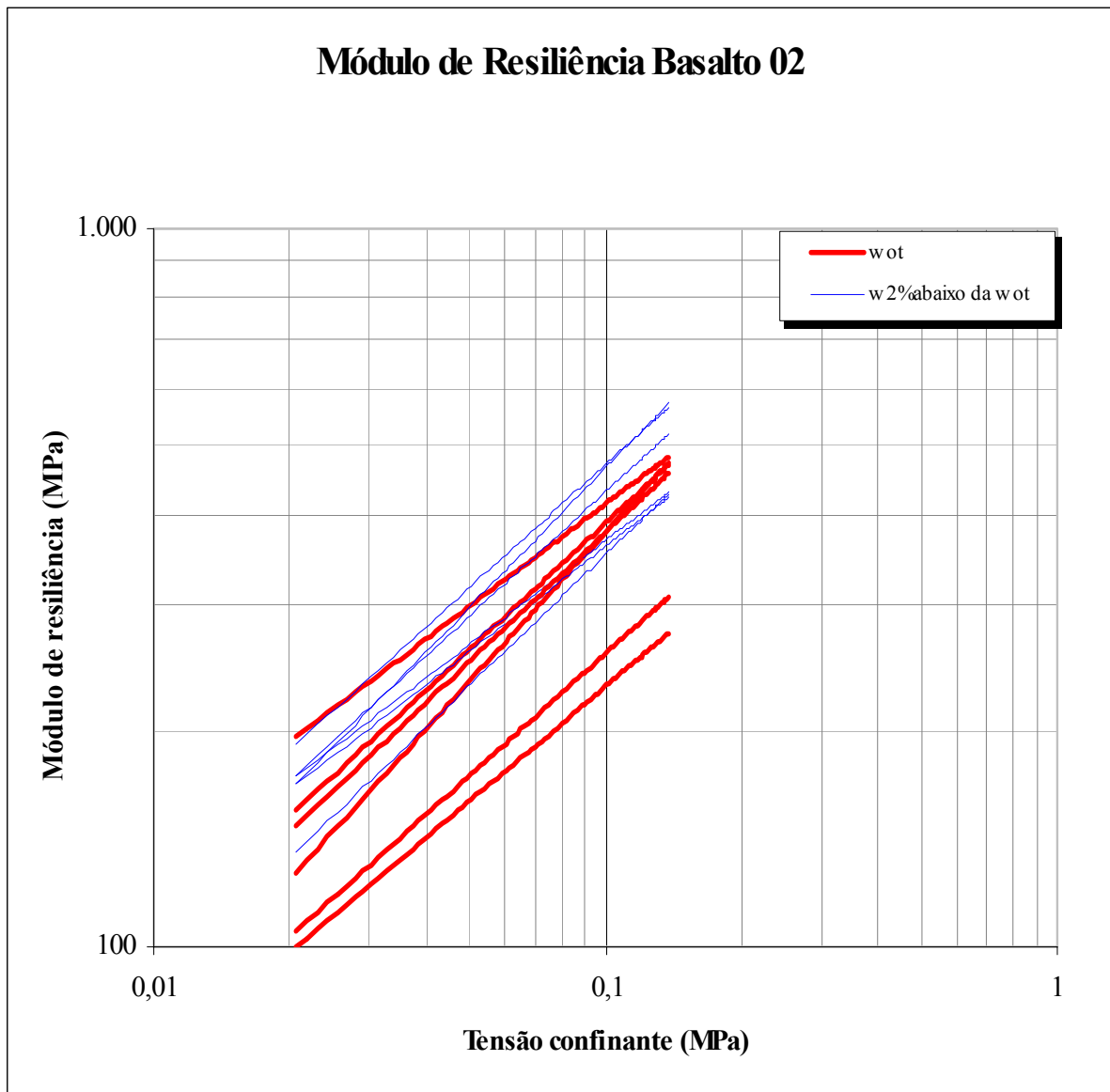
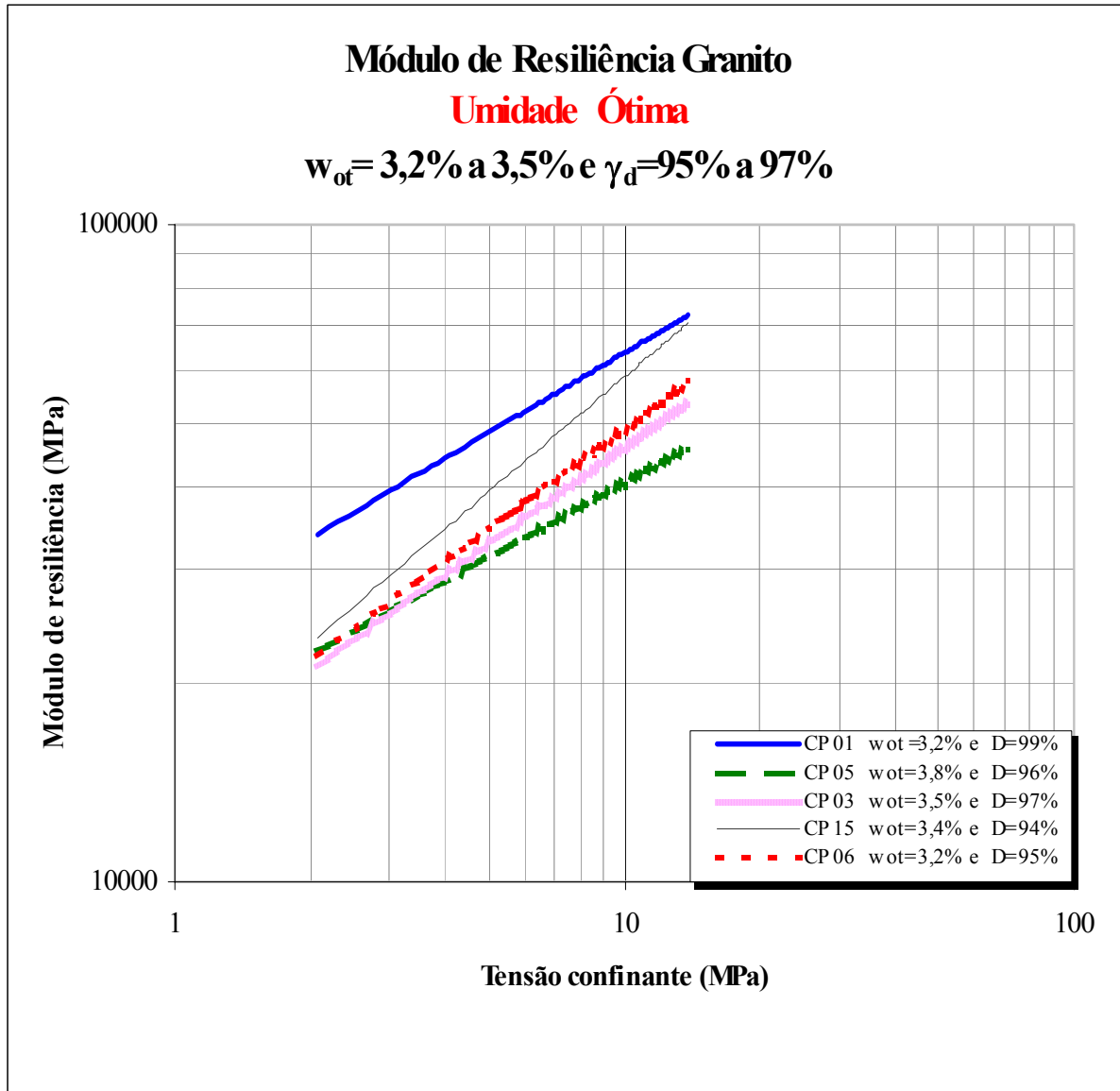


Figura 20: Módulo de resiliência do Basalto 02

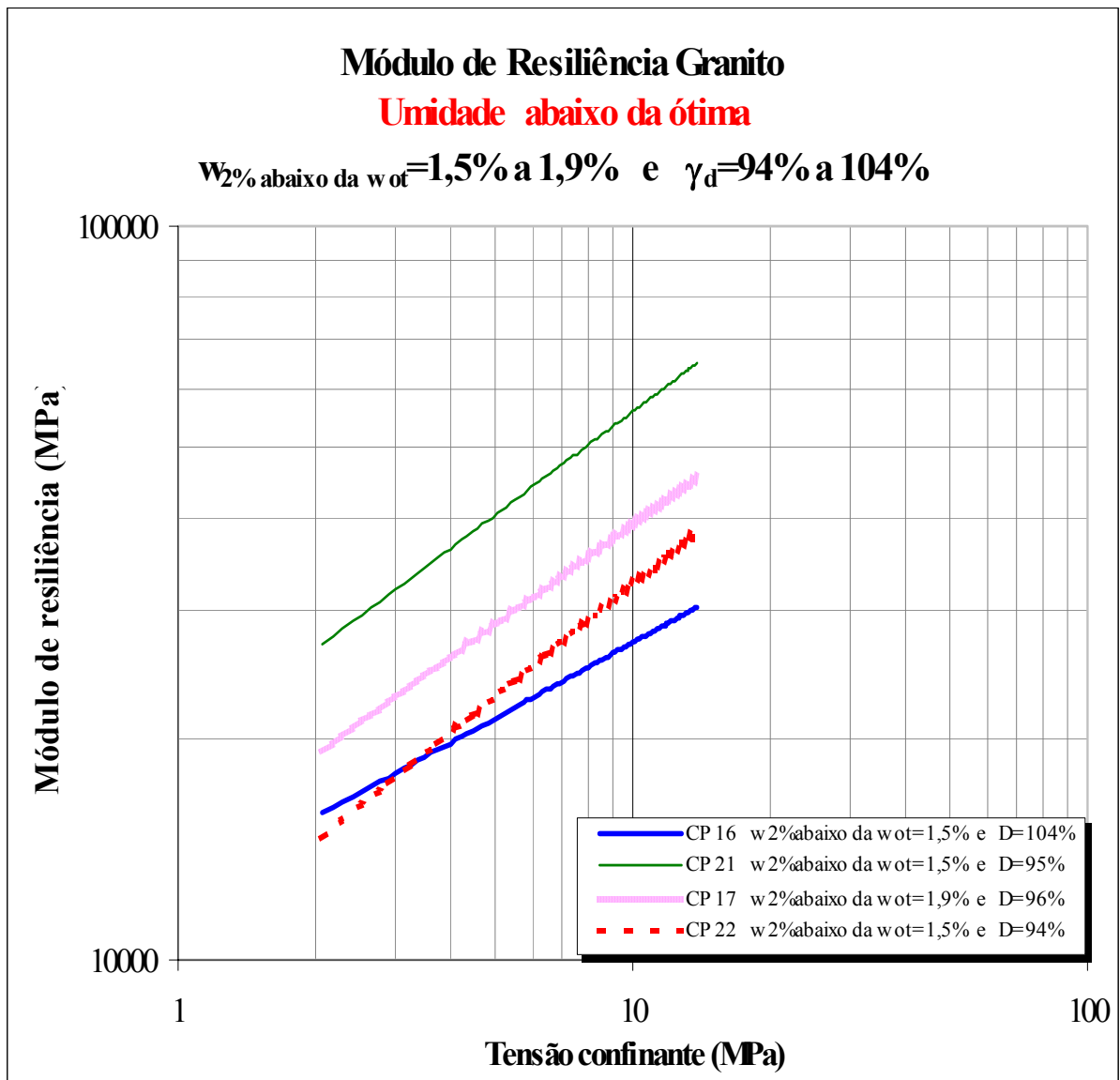
### 5.3.2 Efeito da Densidade

O estudo do efeito da densidade na influência do módulo de resiliência dos materiais estudados por esta pesquisa não apresentou uma conclusão clara. Na análise das figuras que relacionam o módulo de resiliência com a densidade de cada material, não há uma coerência de variação dos valores de módulo de resiliência. Estas variações são apresentadas nas figuras de cada material.

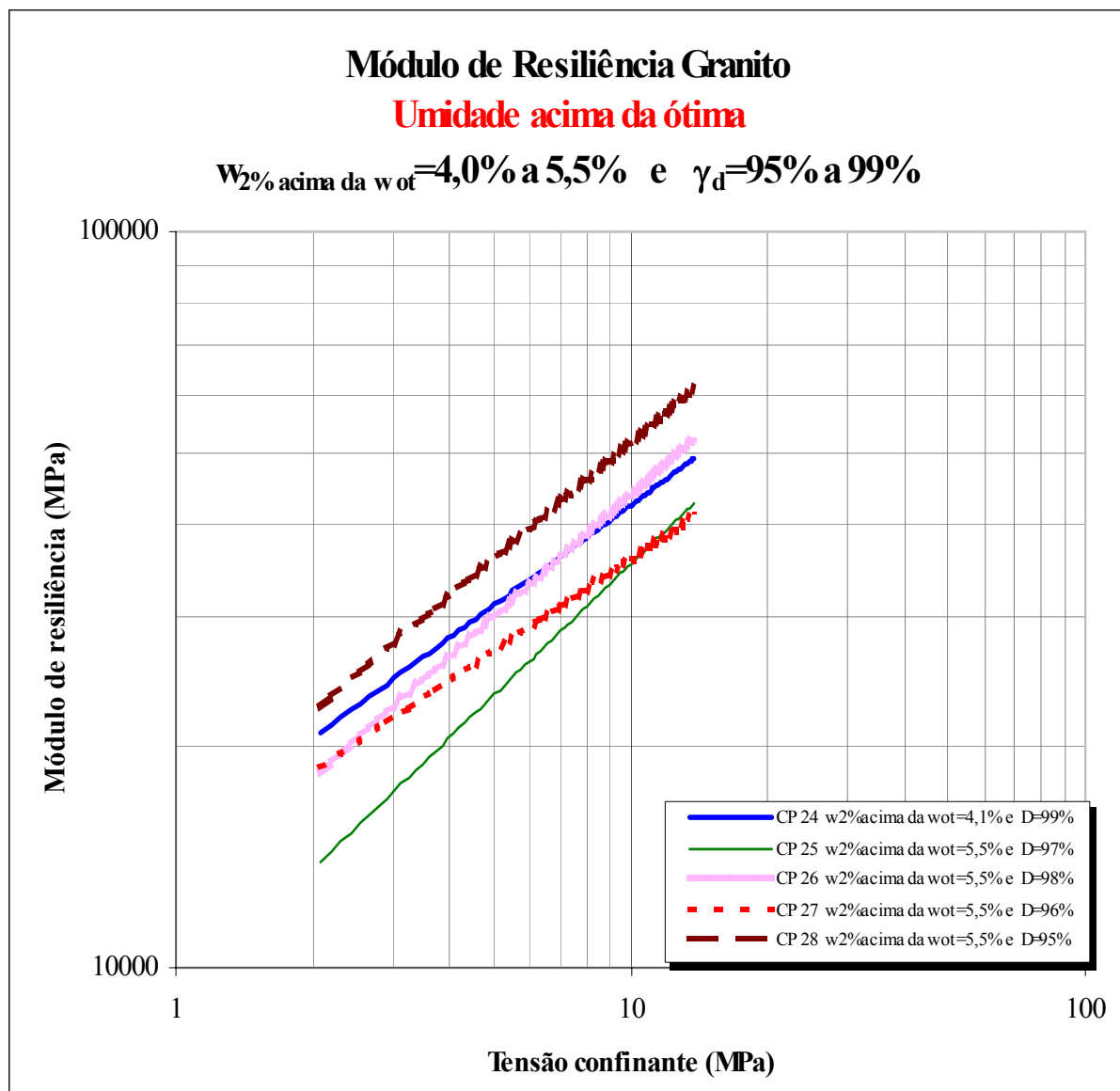
O Granito, plotado nas três umidades, não apresentou uma relação de variação do grau de compactação com o módulo de resiliência. Este resultado é apresentado na Figura 21.



(a) Granito na umidade ótima



(b) Granito na umidade abaixo da ótima

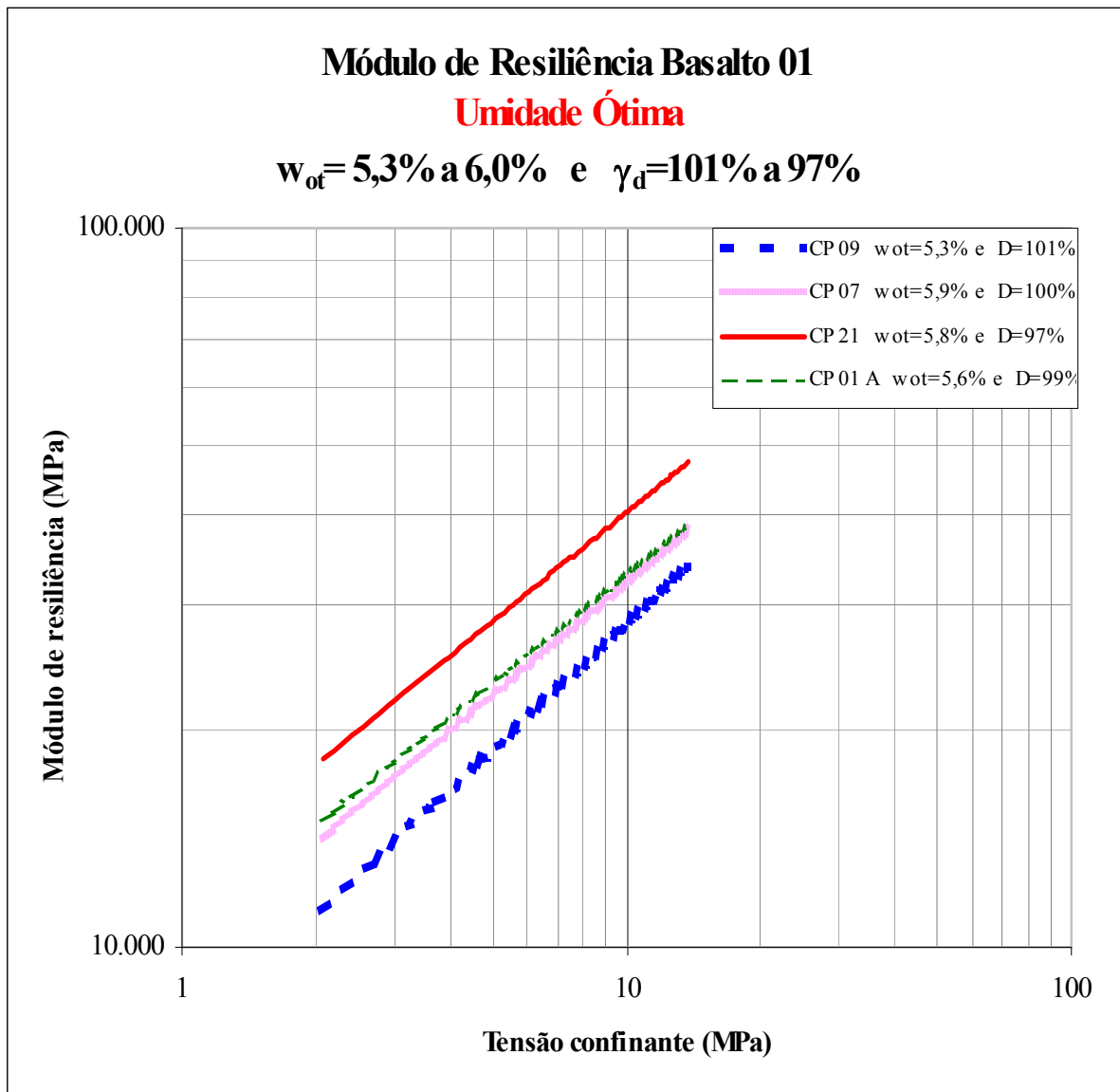


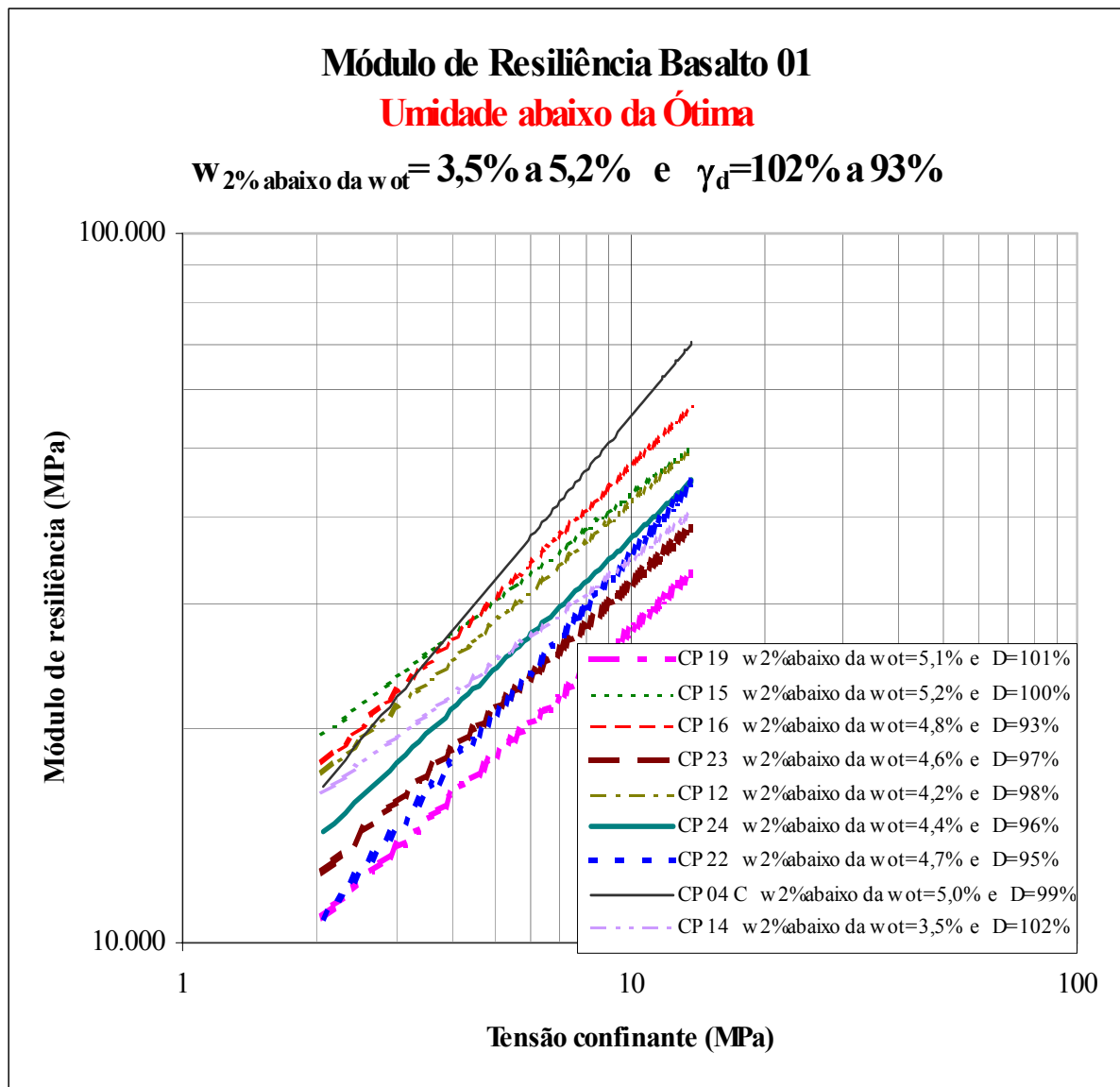
(c) Granito na umidade acima da ótima

Figura 21: Módulo de resiliência do Granito em relação à densidade

Para o material de Basalto 01, percebe-se uma relação entre o módulo de resiliência e a densidade para os CPs moldados na umidade ótima, neste caso, o módulo de resiliência aumentou para a diminuição do grau de compactação da amostra. Para a umidade abaixo da ótima, o material não apresentou uma relação. Este resultado é mostrado na Figura 22.



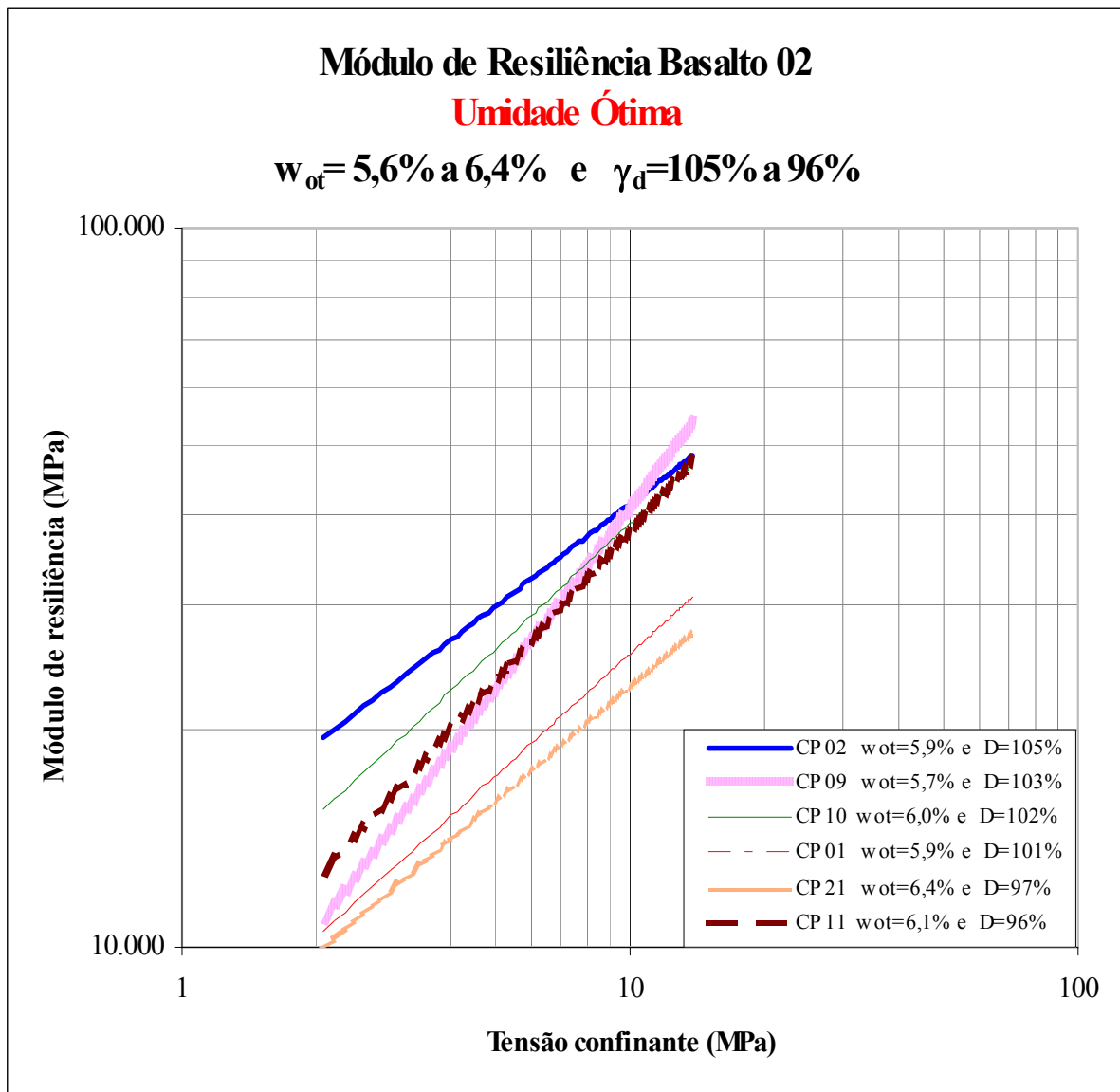




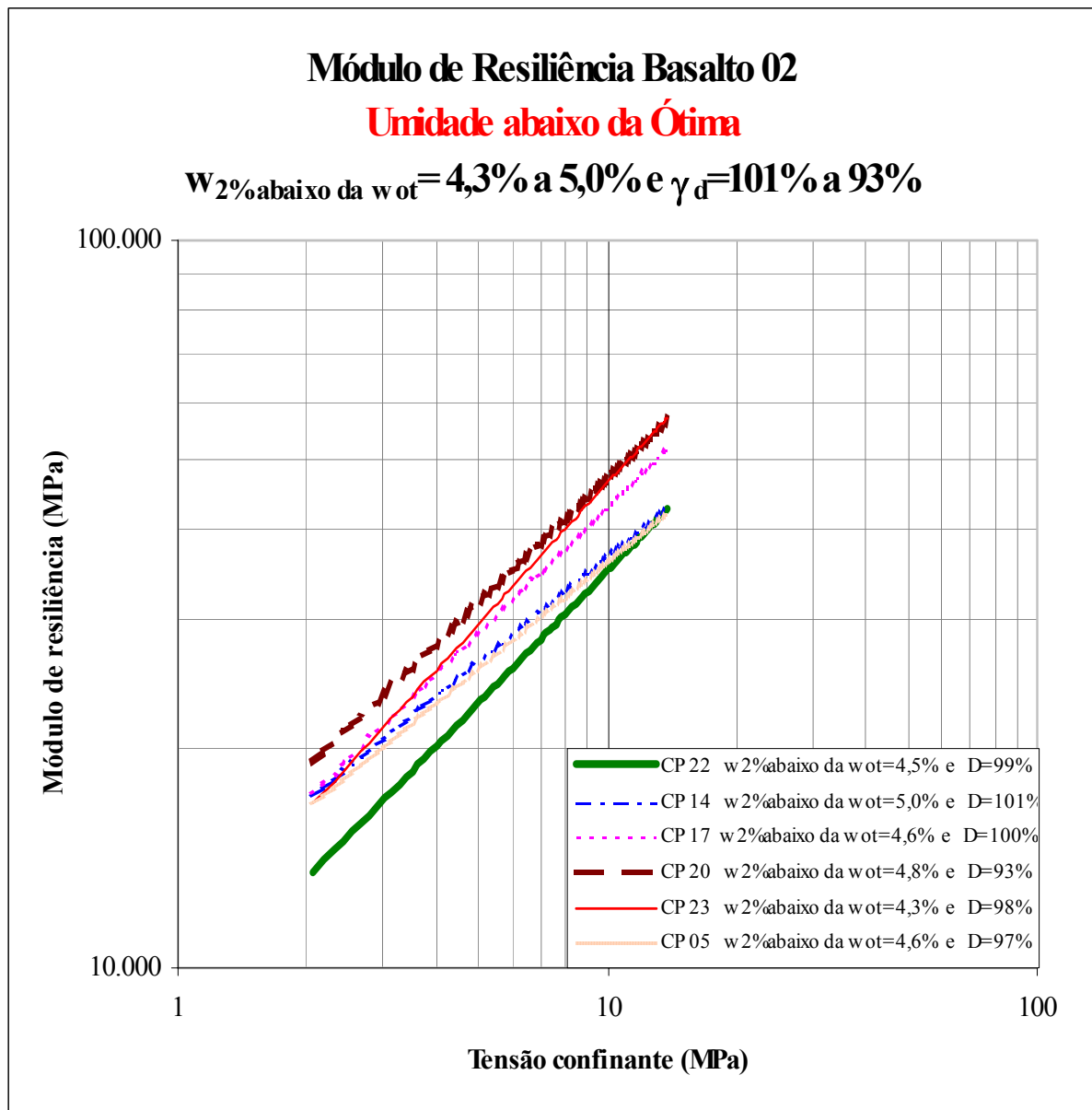
(b) Basalto 01 na umidade abaixo da ótima

Figura 22: Módulo de resiliência do Basalto 01 em relação à densidade

Para o Basalto 02, com as duas umidades estudadas, o módulo de resiliência também não apresenta uma relação com a densidade do material. Este resultado é visto na Figura 23.



(a) Basalto 02 na umidade ótima



(b) Basalto 02 na umidade abaixo da umidade ótima

Figura 23: Módulo de resiliência do Basalto 02

## CAPÍTULO 6

### 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 6.1 CONCLUSÕES

A caracterização resiliente de materiais granulares utilizados como base e sub-base em pavimentos é de suma importância, uma vez que, ao se identificar o comportamento resiliente destes materiais, os projetistas poderão dimensionar pavimentos mais duráveis e econômicos, por serem mais resistentes às trincas por fadiga causada pela sucessão de carga e descarga no pavimento.

A análise da influência da umidade e densidade no comportamento resiliente dos três materiais de britas graduadas (um Granito e dois Basaltos) foram estudadas através do ensaio triaxial de carga repetida, utilizando as tensões estipuladas pela AASHTO. As principais análises sobre o comportamento destes materiais permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

a) algumas considerações importantes:

- Houve dificuldade em moldar amostras de materiais granulares com pouca porcentagem de finos (não possibilitando o melhor intertravamento de grãos) e alto valor de umidade ótima. Nesta pesquisa, não foi possível investigar as características resilientes dos materiais Basalto 01 e Basalto 02 na umidade acima da ótima por apresentarem umidade ótima elevada e pouca porcentagem de finos passante na peneira 200;
- Os modelos  $k-\sigma_3$  e  $k-\theta$  apresentaram coeficientes de correlação  $R^2$  próximos a um e muito semelhante entre si. Verificou-se que o modelo  $k-\sigma_3$  forneceu valores de  $k_1$  mais elevados comparados com os valores fornecidos pelo modelo  $k-\theta$ . Portanto, adotou-se nesta pesquisa o modelo  $k-\sigma_3$  para a determinação do módulo de resiliência dos materiais granulares estudados.

b) conclusões quanto à comparação entre os três materiais estudados:

- Os dois modelos estudados apresentaram respostas semelhantes em relação aos valores de  $k_1$  e o módulo de resiliência de cada material. O Granito foi o material que melhor respondeu a esta relação, apresentando um valor de  $k_1$  maior para a umidade ótima do que os demais materiais, o que mostra que este material é mais resistente a altas deformações do pavimento que os demais materiais analisados. O Basalto 01 e o Basalto 02 apresentaram valores de  $k_1$  altos, mas menores do que os do Granito.

c) conclusões quanto à influência da umidade

- A influência da umidade no módulo de resiliência só pôde ser analisada para o material Granito, para o qual conclui-se que o módulo de resiliência é influenciado pela umidade, diminuindo quando do aumento desta.

d) conclusões quanto à influência da densidade

- Os resultados das análises da influência da densidade no módulo de resiliência dos materiais estudados não permitiram melhores conclusões. Apenas o Basalto 01 na umidade ótima apresentou uma relação de aumento do módulo de resiliência com a diminuição do grau de compactação da amostra.

## 6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES

- a) Dar continuidade à pesquisa em laboratório para outros tipos de materiais granulares, não só utilizados e encontrados no sul do País, mas em todo o Território Nacional.
- b) Investigar outras granulometrias dos mesmos materiais, a fim de determinar a relevância da porcentagem de finos na pesquisa.
- c) Como o equipamento usado em laboratório limita o tamanho das amostras e, conseqüentemente, o tamanho dos grãos usados, não há a possibilidade de ensaiar amostras maiores. Seria interessante ter conhecimento do módulo de resiliência de materiais do tipo macadame, utilizados na construção da estrutura do pavimento.

## REFERÊNCIA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. AASHTO, Washington, D.C., 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO TP46-94**: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR - 7207/82**: Terminologia e classificação de pavimentos - procedimentos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – ABGE. **Geologia de engenharia**. Associação Brasileira de Geografia e Estatística - Editora Oficina de Textos, 1998. São Paulo. 584 p.

ALLEN, T. J.; THOMPSON, M. R. Resilient response of granular materials subjected to time dependent lateral stress. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 510, p. 1-13, 1974.

ALLEN, J. **The effect of non-constant lateral pressures of the resilient response of granular materials**. Illinois, 1973, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, III.

ARNOLD, G. P. A. **Estudo do Comportamento mecânico de basaltos alterados do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos rodoviários**. Porto Alegre, 1990, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 145 p. Geotecnia.

BARKSDALE, R. D.; ITANI, S. Y. 1989. Influence of aggregate shape on base behaviour. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1227, 1989, p. 173-182.

BOYCE, J. R.; BROWN, S. F.; PELL, P. S. The resilient behavior of a granular material under repeated loading. In: Australian Road Research Board conf. mat. constr. and maintenance, 8., 1976, **Proceedings ...** Vol. 8, Part 3, p. 1-12.

BROWN, S. F.; SELIG, E. T. **The design of pavement and rail track foundations**. *Cyclic loading of soils: From theory to design*. Glasgow, Scotland, M. P. O'Reilly; S. F. Brown, (eds.), Blackies and Son, 1991, p. 249-305.

BROWN, S. F.; PELL, P. S. An experimental investigation of the stress, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 2., **Proceedings ...** 1967, p. 487-501.

BURCZYK, J. M.; SAIBATI K. K.; SPRECHER R. A.; FARRAR M. J. Factors influencing determination of a subgrade resilient modulus value. **Transportation Research Record**, Washington, D.C, n. 1462, p. 72-78, 1994.

CERATTI, J. A . P. **Mecânica dos pavimentos**. Porto Alegre, CPGEC / Escola Engenharia / UFRGS, 1999. [Notas de Aula].

DAWSON, A. R.; THOM, N. H.; PAUTE, J. L. Mechanical characteristics of unbound granular materials as function of condition. Flexible Pavements. In: Eurp. Symp. Euroflex , 1993, Rotterdam. **Proceedings ...** , Balkema, The Netherland, A. G. Correia, , p. 65-44, 1996.

DUNLAP, W. A. A report on a mathematical model describing the deformation characteristics of granular materials. **Tech. Rep. Texas Transportation Institute, n. 1**, Proj. 2-8-62-27, Texas A&M University, College Station, Tex. 1963.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 131/94**. Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. Norma Rodoviária, Método de Ensaio. 1994. 8p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Geologia do Brasil**. Brasília, 1984. 604 p.

ERNST, W. G. **Minerais e rochas**. São Paulo, Edgard Blücher, 1969. 163 p.

ESPINOSA, V. R. P. **Ensaio triaxiais de carga repetida de uma brita**. Rio de Janeiro, 1987, Dissertação de Mestrado - COPPE/RJ. 107f, ciências.

FERNANDES, I. S. **Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”**. Florianópolis, 2000, Dissertação de Mestrado– UFSC. 184 f. Infra-Estrutura e Gerência Viária.

HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E.; COSTA, J. B. S. Megaestruturação pré-cambriana do território brasileiro baseada em dados geofísicos e geológicos. **Geociências**. Rio Claro, v. 12, n.1, p. 7-31. 1993a.

HAYNES, J. G.; YODER. E. J. Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO Road Test. **Highway Research Record**, n. 39. 1963.

HEYDINGER, A. G.; XIE, Q. L.; RANDOLPH, B. W.; GUPTA, J. D. Analysis of resilient modulus of dense and open-graded aggregates. **Transportation Research Record**, Washington, D.C, n. 1547, p. 1-6, 1994.

HICKS R. G. **Factors influencing the resilient properties of granular materials**. Berkeley, CA, 1970, PhD thesis, University of California.

HICKS R. G.; MONSMITH, C. L. Factors influencing the resilient properties of granular materials. **Highway Research Record**, n. 345, p. 15-31, 1971.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, 1986, v. 33, 587 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Geografia do Brasil - Região Sul**. Rio de Janeiro, 1996, v. 2, 578 p.



KAMAL, M. A.; DAWSON, A. R.; FAROUKI, O. T.; HUGHES, D. A. B.; SHA'AT, A. A. Field and laboratory evaluation of the mechanical behaviour of granular materials in pavements. **Transportation Research Record**, Washington, D.C, n. 1406, p. 88-97, 1993.

KALISOJA, P. **Resilient deformation characteristics of granular materials**. Tampere, Finland, 1997, PhD thesis, Tampere University of Technology, Pub. N°. 223.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. Resilient Response of Unbound Aggregates. **Journal of Transportation Engineering**. January/February 2000. Disponível em <http://www.nottingham.ac.uk/~evzard/asce2000a.pdf>. Acessado em: agosto/2002.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à geologia de engenharia**. 2. ed. Santa Maria: Editora da UFSM: Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1997. 284 p.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380 p.

MONSMITH, C. L.; SEED, H. B.; MITRY, F. G.; CHAN, C. K. Prediction of pavement deflections from laboratory tests. In: International Conference Structure Design of Asphalt Pavements, 2., **Proceedings ...** 1967, p. 109-140.

MORGAN, J. R. **The response of granular materials to repeated loading**. In: Australian Road Research Board Conference, 3., **Proceedings ...** 1966, p. 1178-1192.

MITRY, F. G. **Determination of the modulus of resilient deformation of untreated base course materials**. Berkeley, CA, 1964, PhD thesis, University of California.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Rio de Janeiro, 1983. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos de um Solo Arenoso**. Rio de Janeiro, 1978. Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ.

RAAD, L.; G. H. MINASSIAN; GARTIN, S. Characterization of saturated granular bases under repeated loads. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n 1369, p. 73-82, 1992.

RADA, C.; WITCZAK, W. M. Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular material. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 810, p. 23-33, 1981.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de técnicas para avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos**. São Paulo, 1996, Dissertação Tese de Mestrado, ITA.

SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated load test. *Rep. N° TE-65-6*, Soil Mech. And Bituminous Mat. Res. Lab., University of California, Berkeley, CA, 1965.

SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated load test. **National Cooperative Highway Research Program**, n. 35, 1967.

SWEERE, G. T. H. **Unbound granular basis for roads**. Delft, The Netherlands, 1990, PhD thesis, University of Delft.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001, 568 p.

THOM, N. H.; BROWN, S. F. The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone. In: Australian Road Research Board conference, 14., **Proceeding ...** v. 14, Part 7, 1988, p. 94-100.

THOM, N. H.; BROWN, S. F. The mechanical properties of unbound aggregates from various sources. In: Jones R. H; Dawson A. R. (eds) **Unbound Aggregates in Roads**, p. 130-142. 1989.

THOM, N. H. **Design of road foundations**. Nottingham, England, 1988, PhD thesis, University of Nottingham, Department. of Civil Engineer.

THOM, N. H.; BROWN, S. F. Effects of moisture on the structural performance of a crushed limestone road base. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1121, p. 50-56. 1987.

THOMPSON, M. R.; SMITH K. L. **Repeated triaxial characterization of granular bases**. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1278 p. 7-17, 1990.

TIAN, P.; MUSHARRAF, M. Z.; LAGUROS, J. G. Gradation and moisture effects on resilient moduli of aggregate bases. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1619, p. 75-84, 1998.

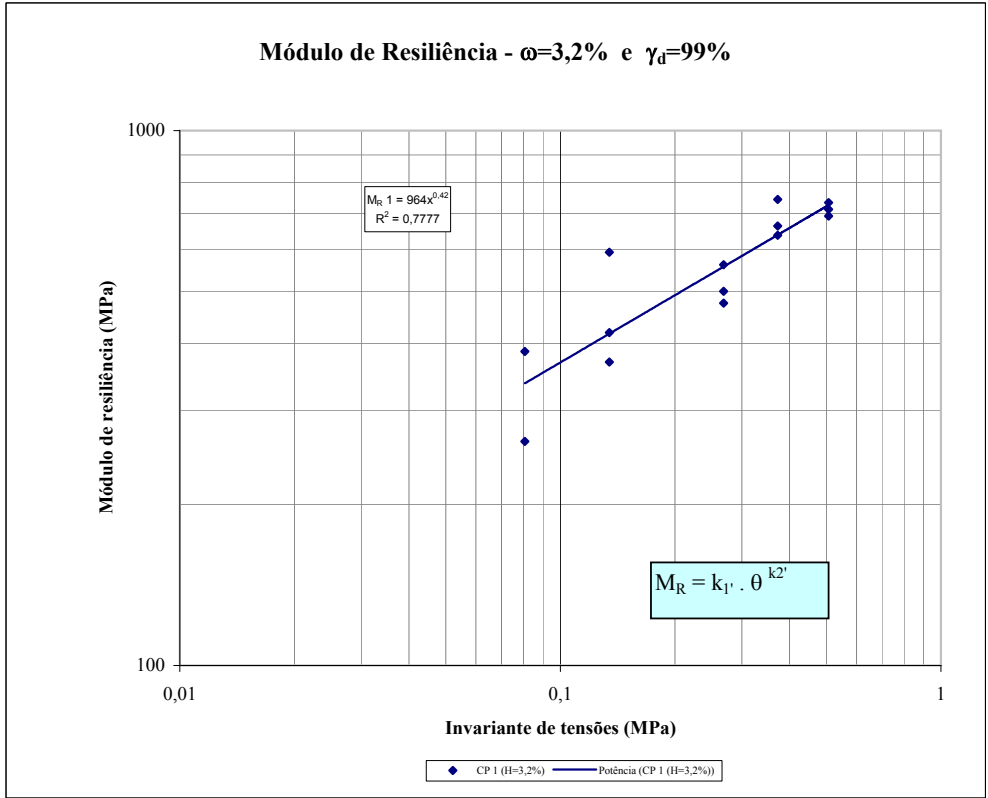
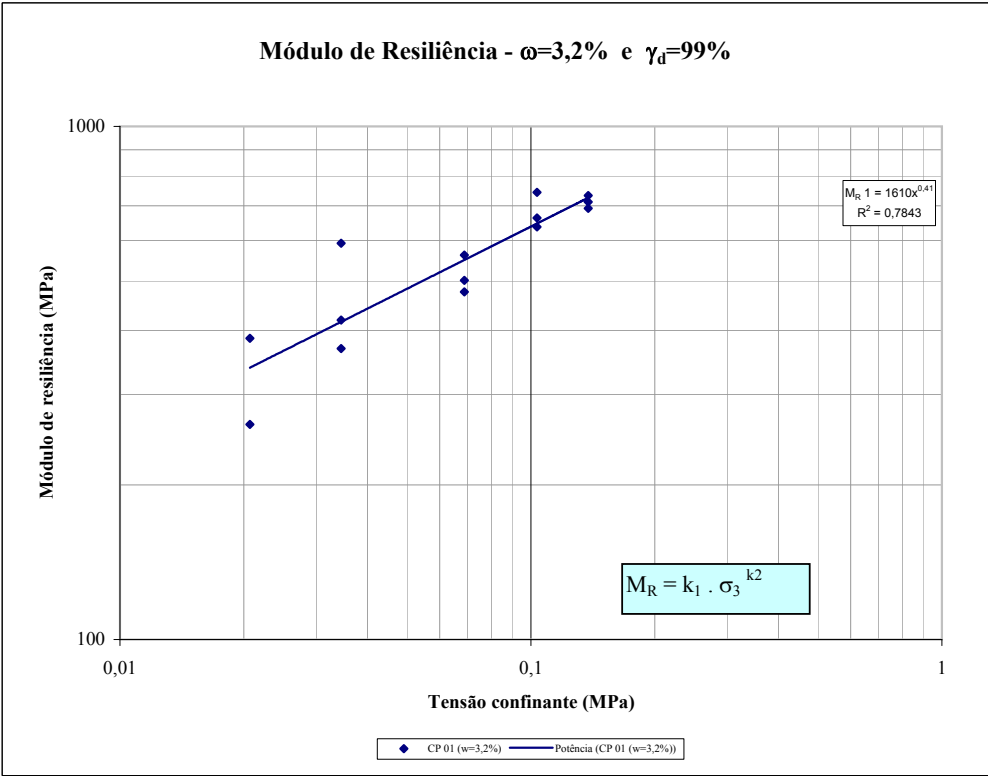
TROLLOPE, E. H.; LEE, I. K.; MORRIS, J. Stresses and deformation in two-layer pavement structures under slow repeated loading. In: Australian Road Research Board, **Proceeding ...** V. 1, Part 2, p. 693-718, 1962.

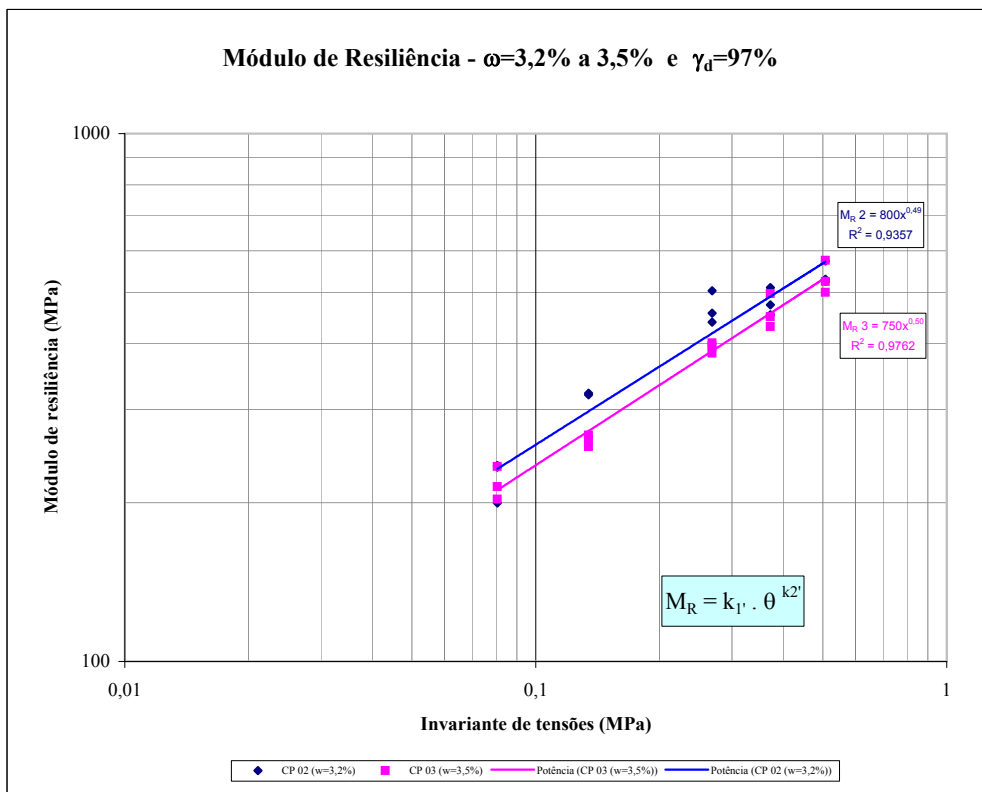
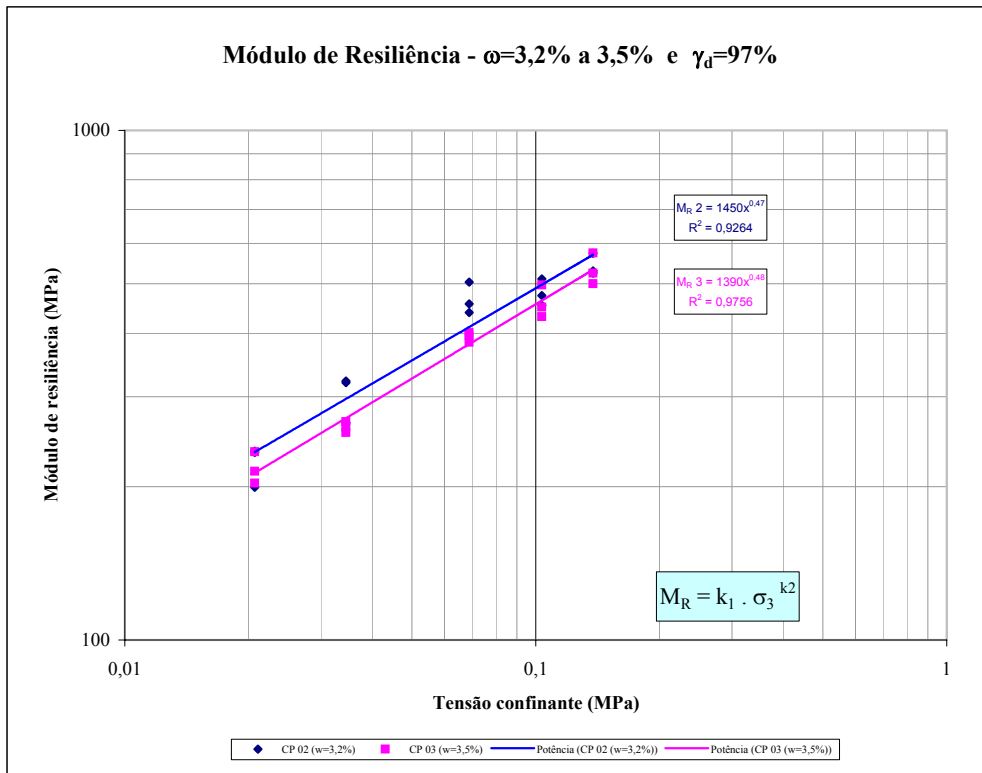
YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2. ed., USA, John Wiley, 1975. 711 p.

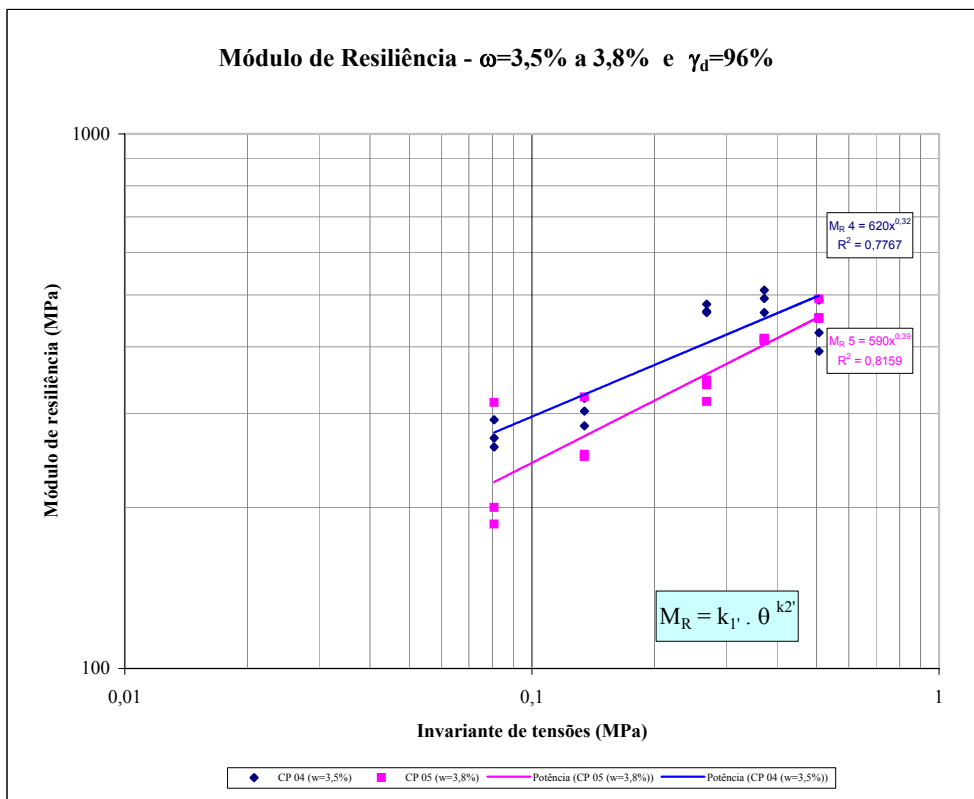
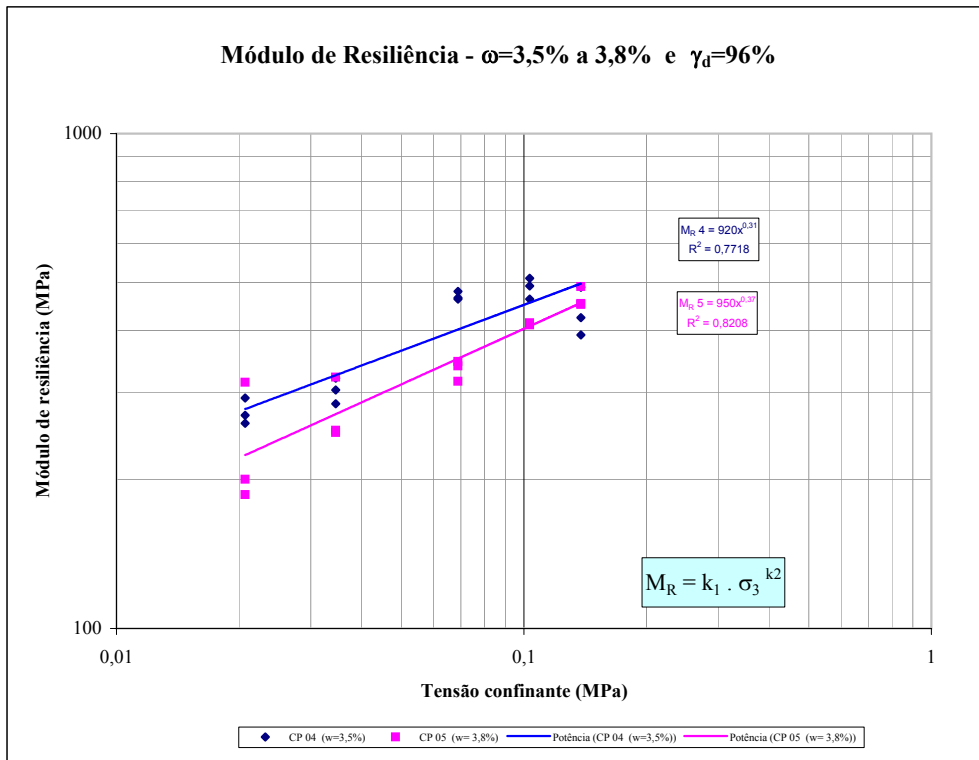
ZAMAN, M. M.; CHEN D. H.; LAGUROS J.G. Resilient moduli of granular materials. **Journal of Transportation Engineering**. v. 120, n. 6, p. 967-988, 1994.

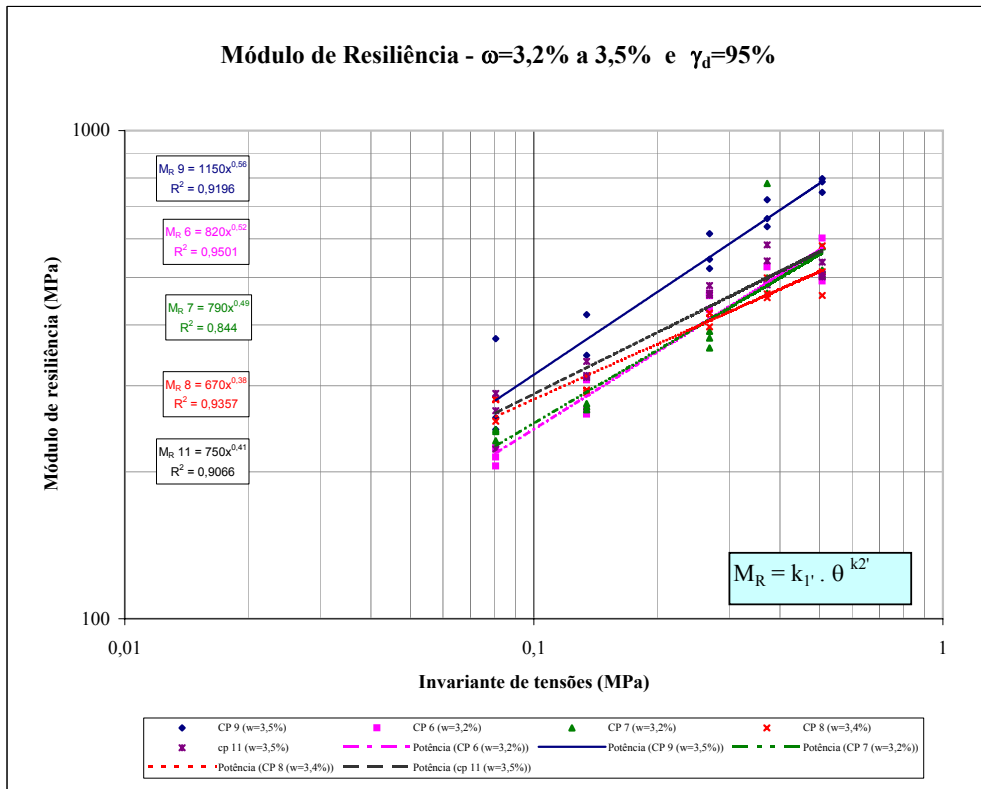
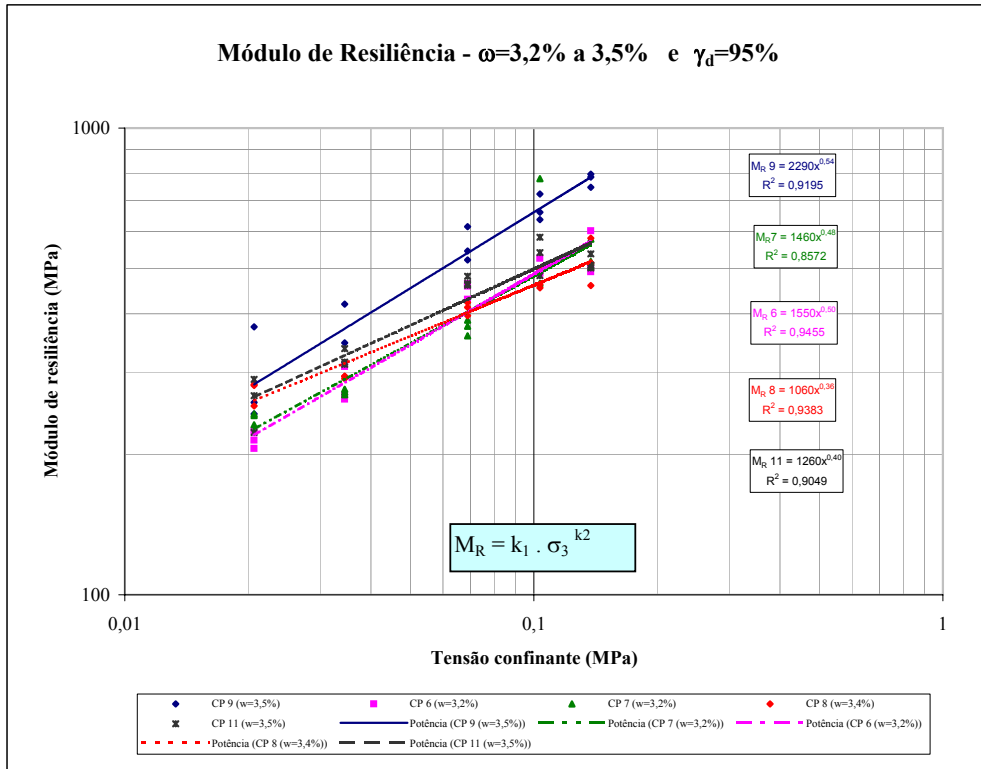
## **APÊNDICES**

## **APÊNDICE A – GRANITO**

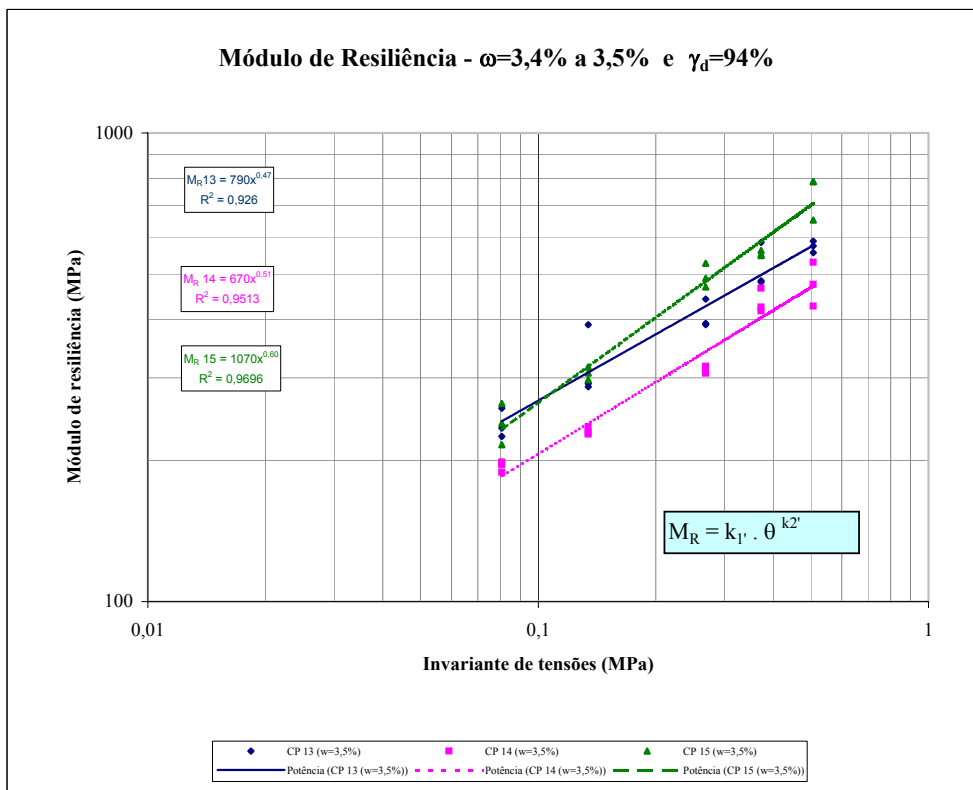
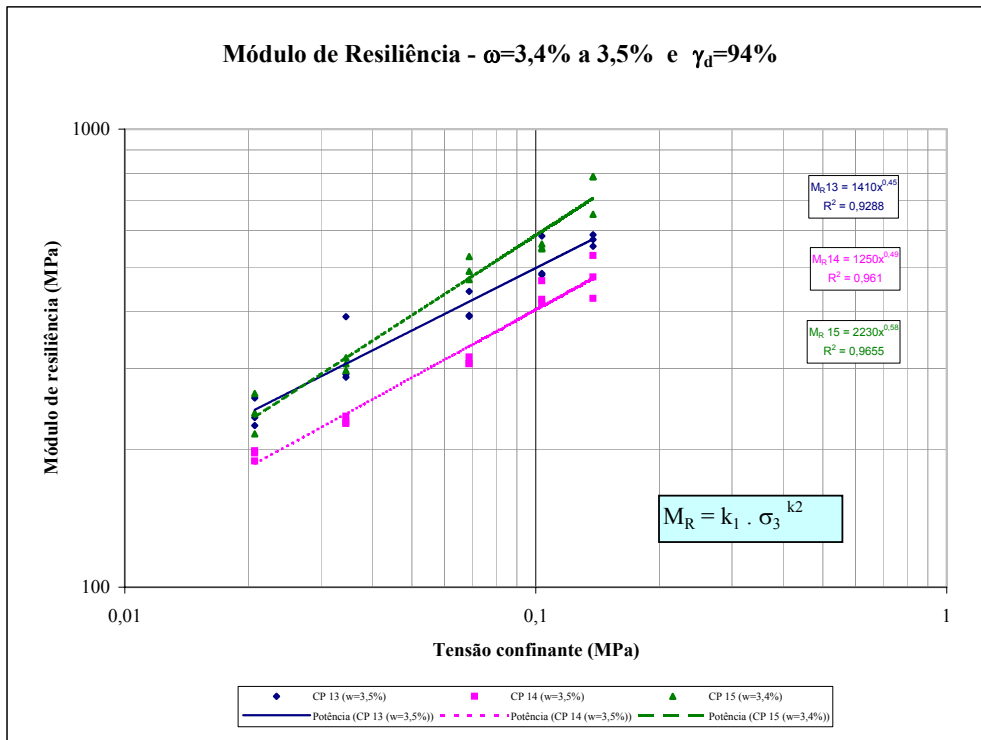


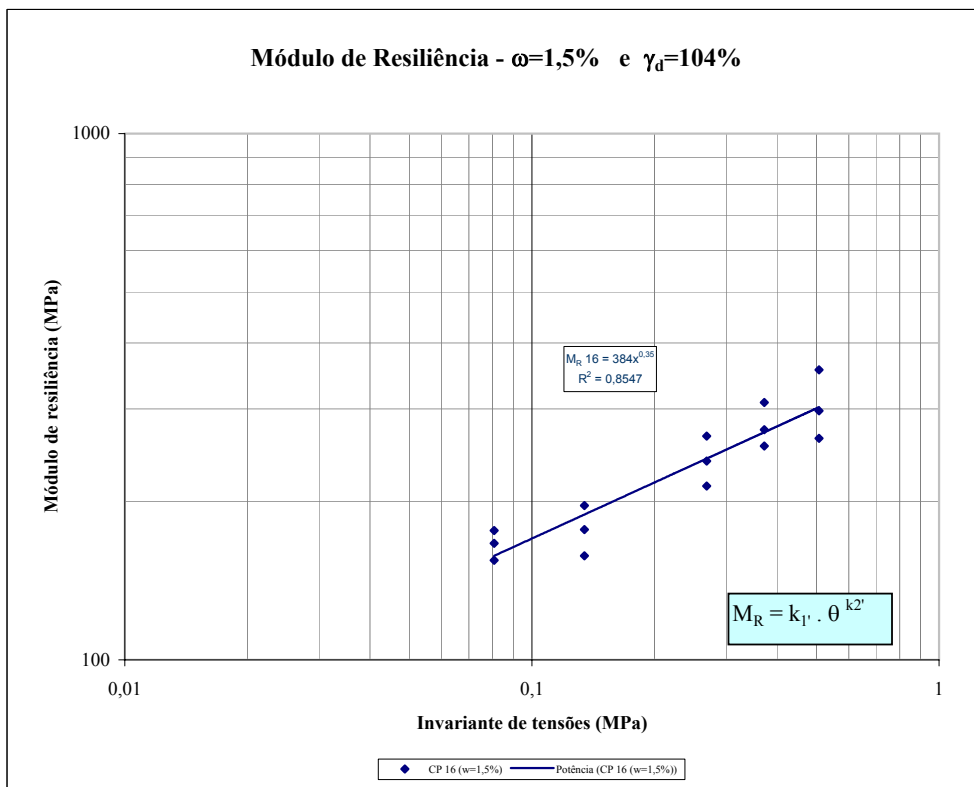
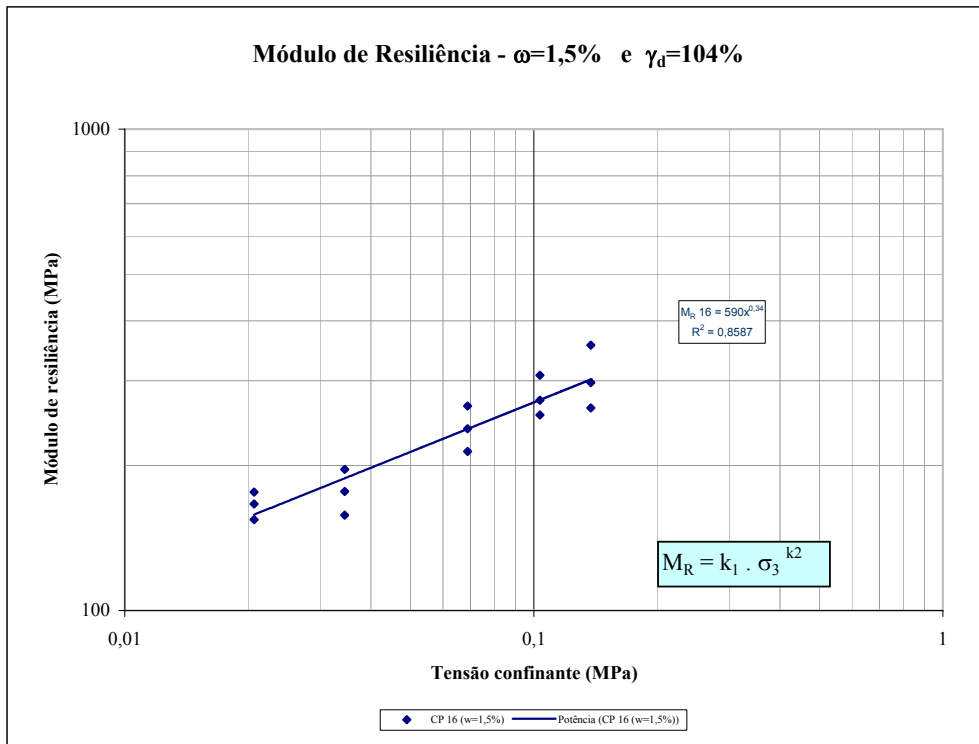






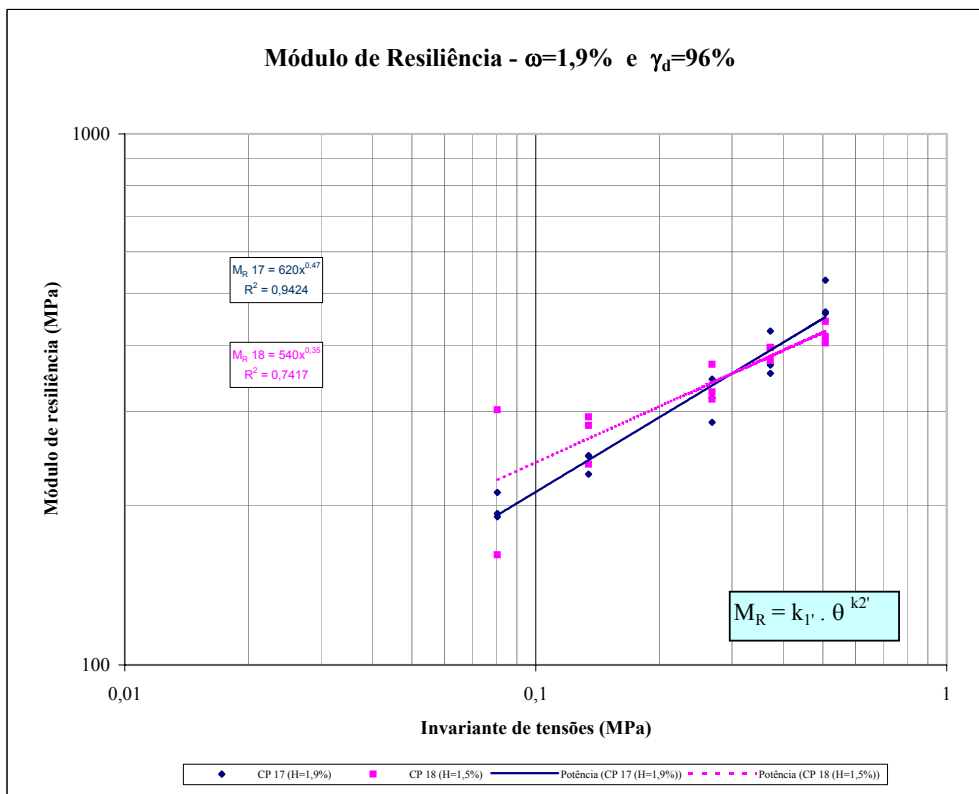
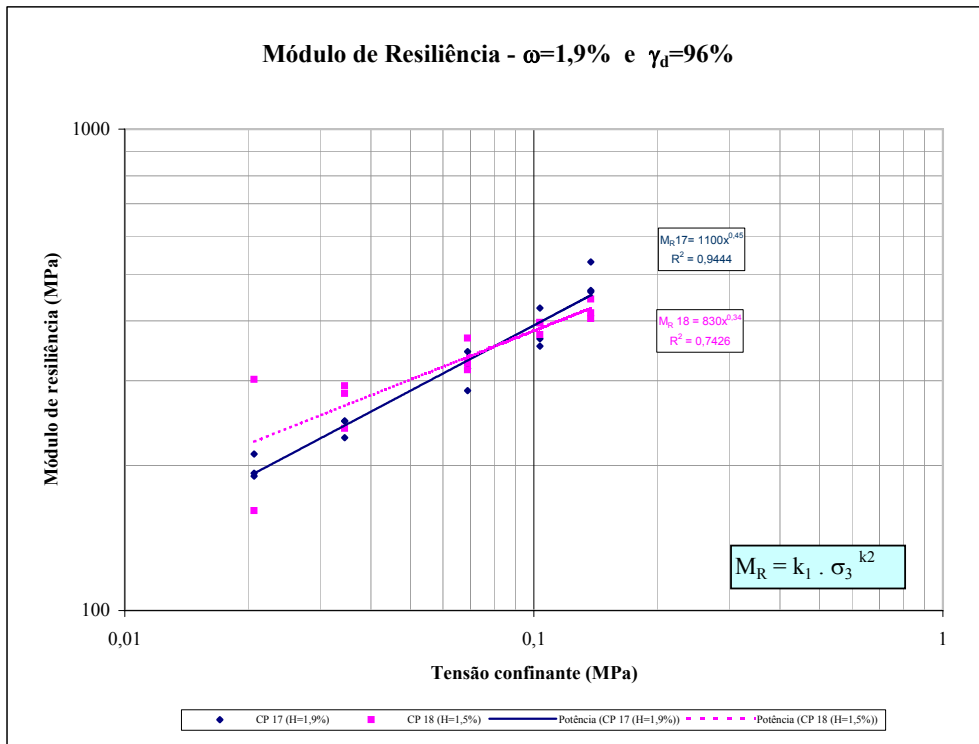






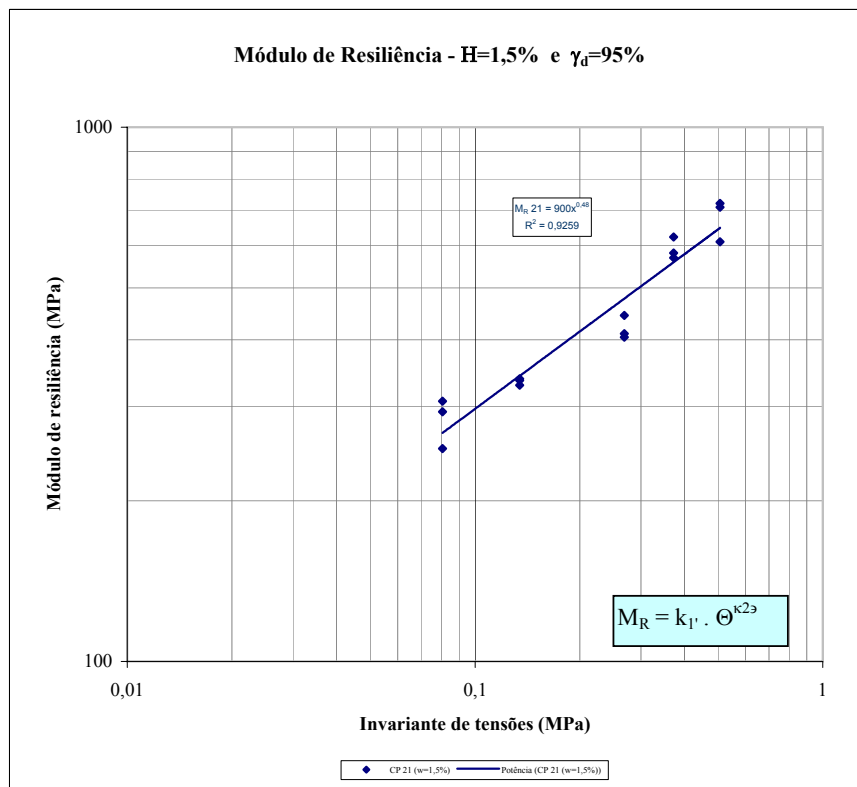
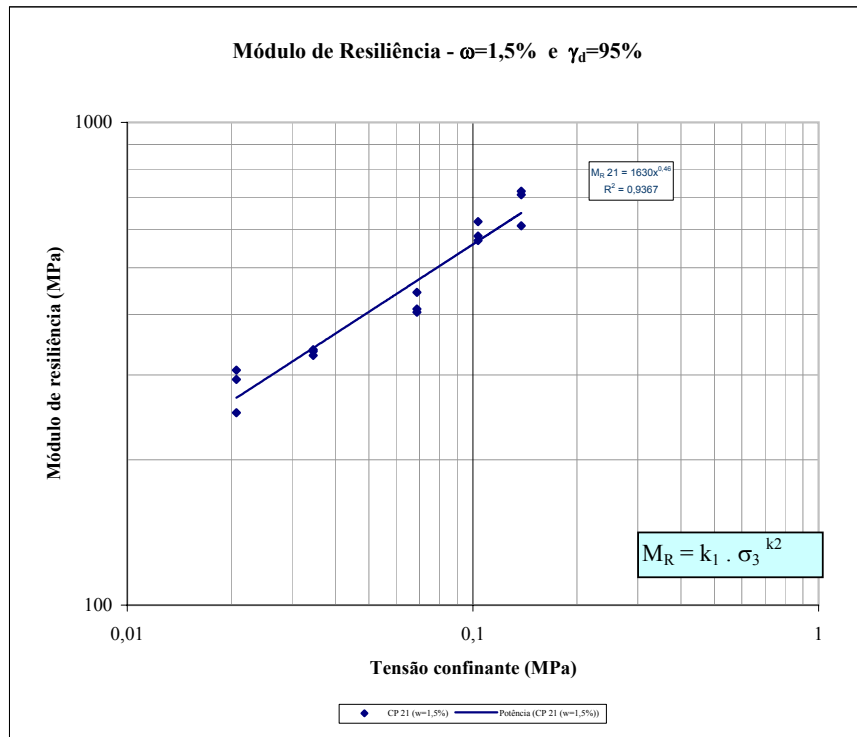
w 2% abaixo da w ot

GRANITTO



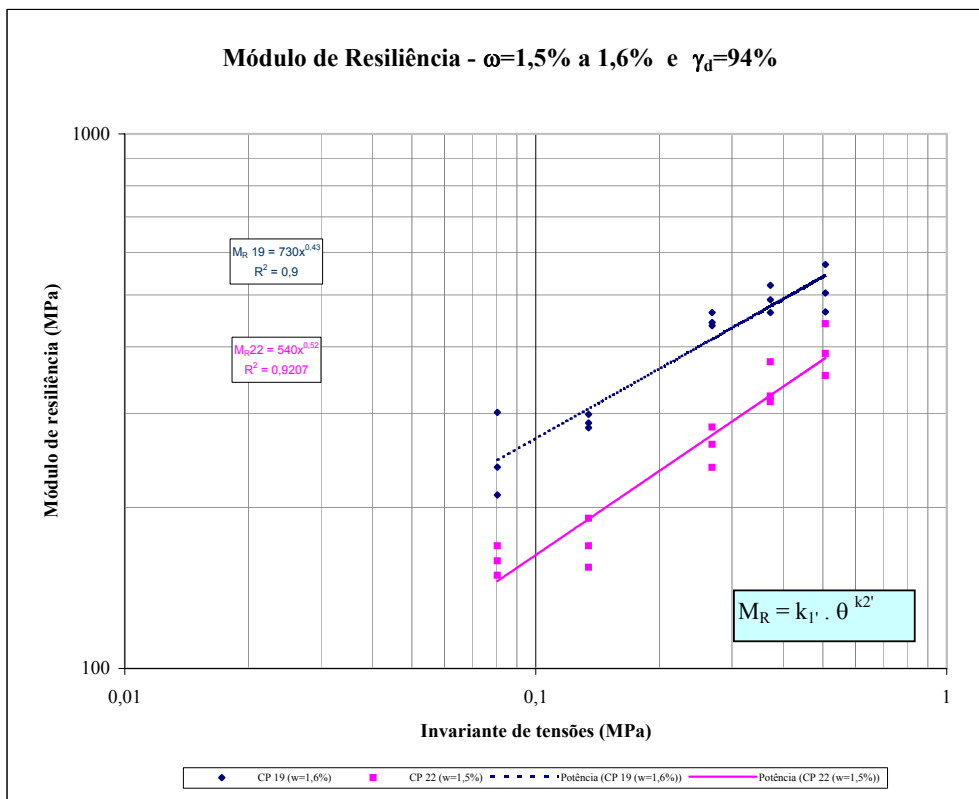
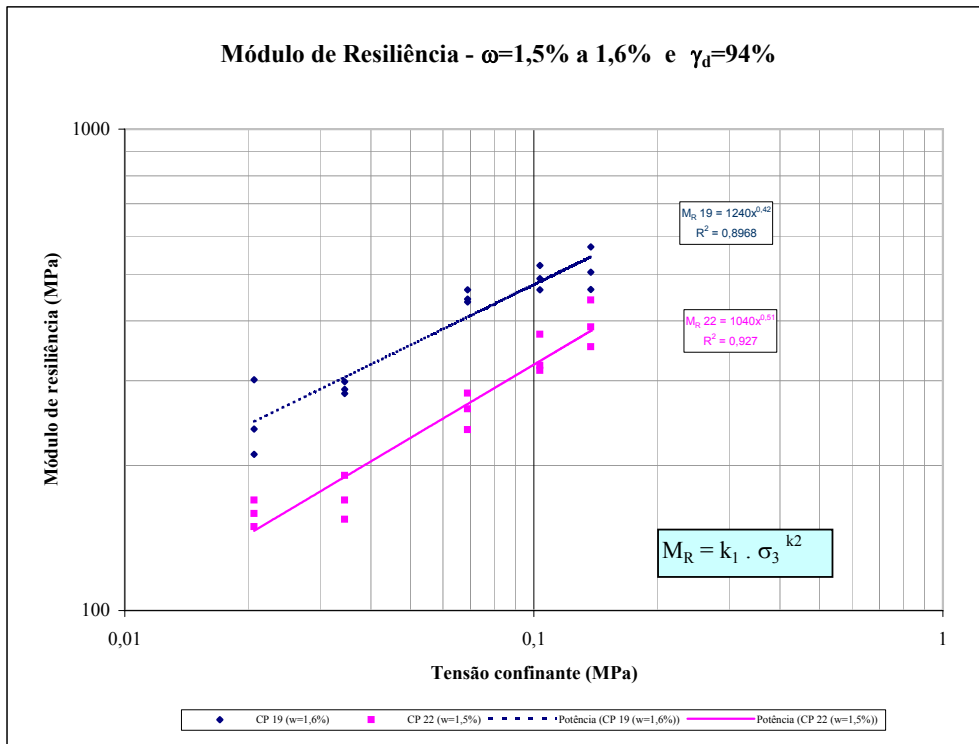
w 2% abaixo da w ot

GRANITTO



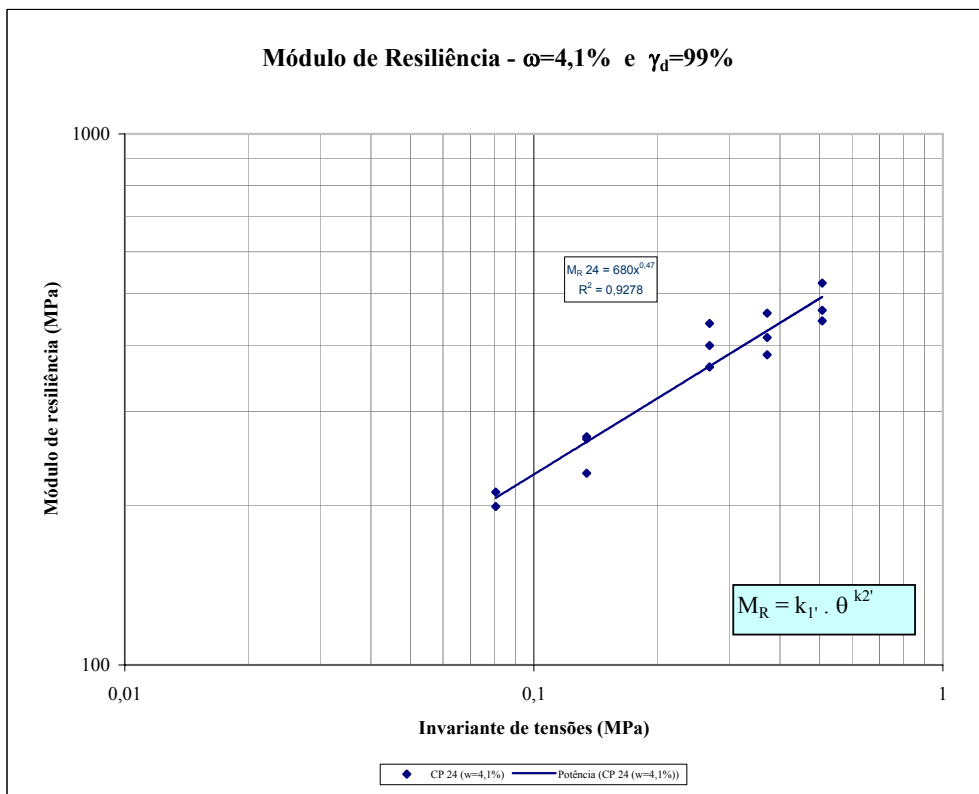
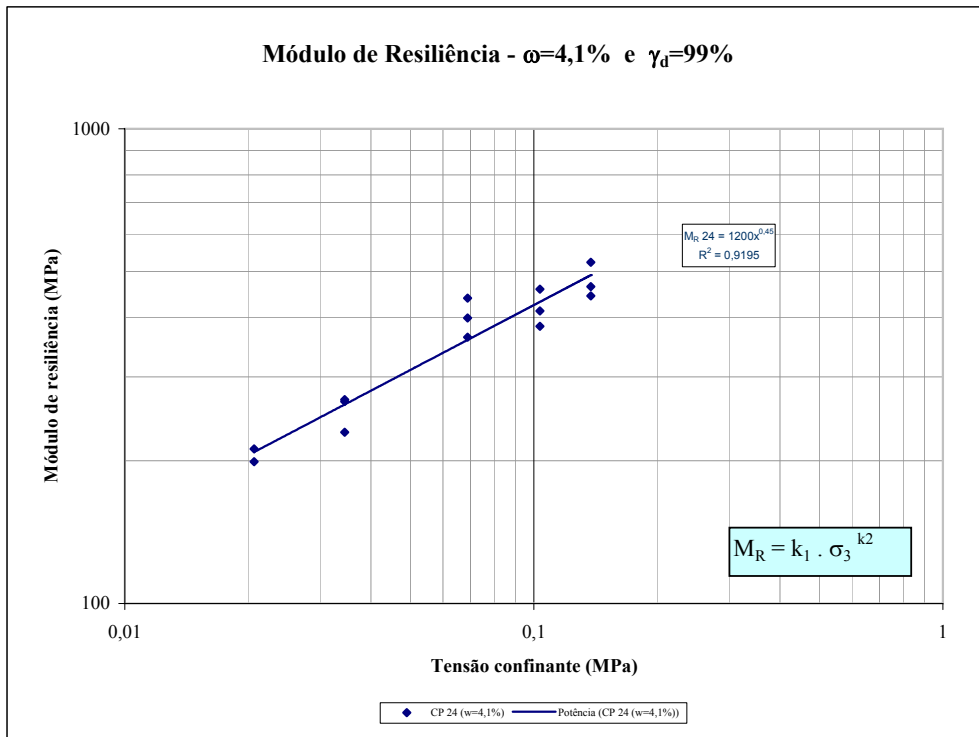
*w 2% abaixo da w ot*

**GRANITTO**



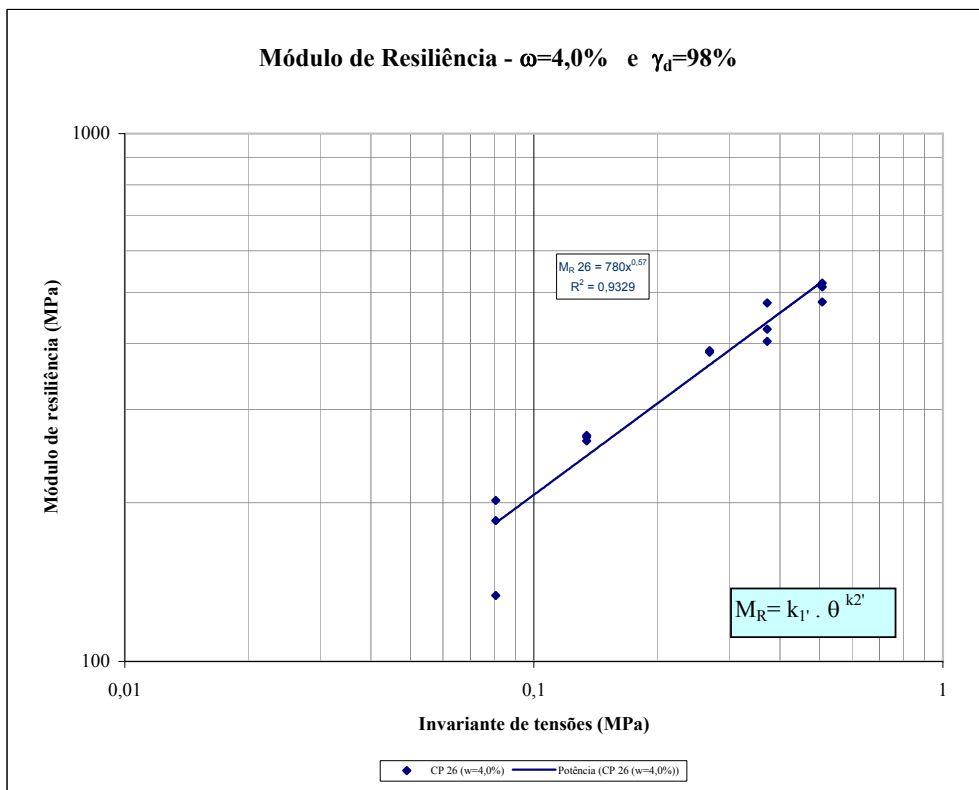
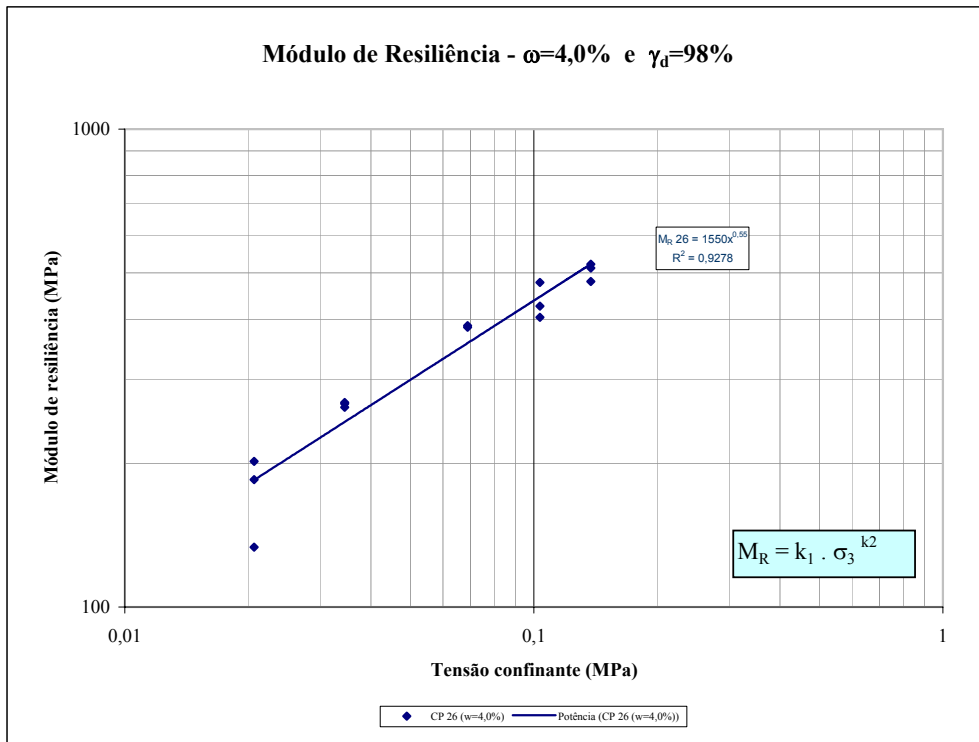
w 2% abaixo da w ot

GRANITTO



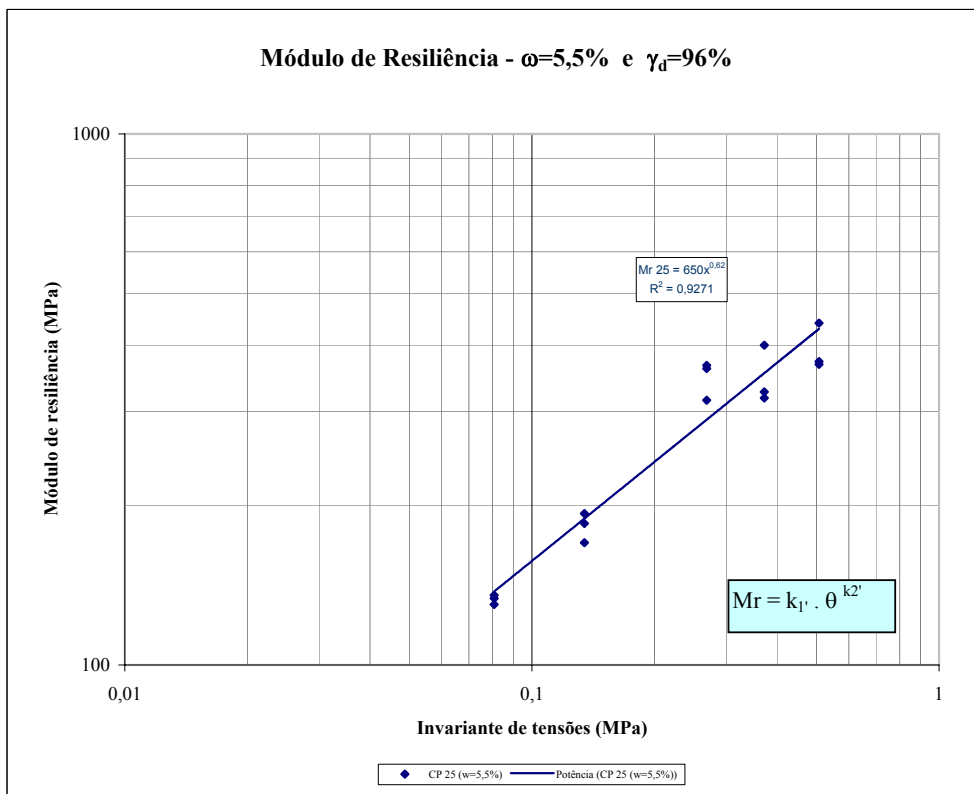
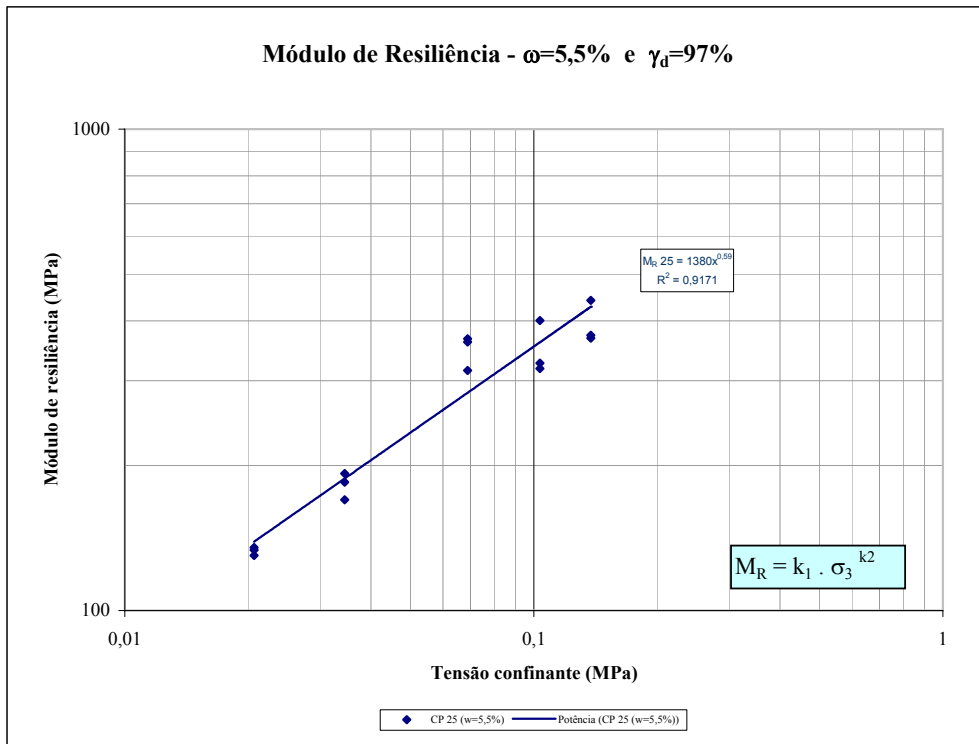
W 2% acima da Wot

GRANITTO



W 2% acima da Wot

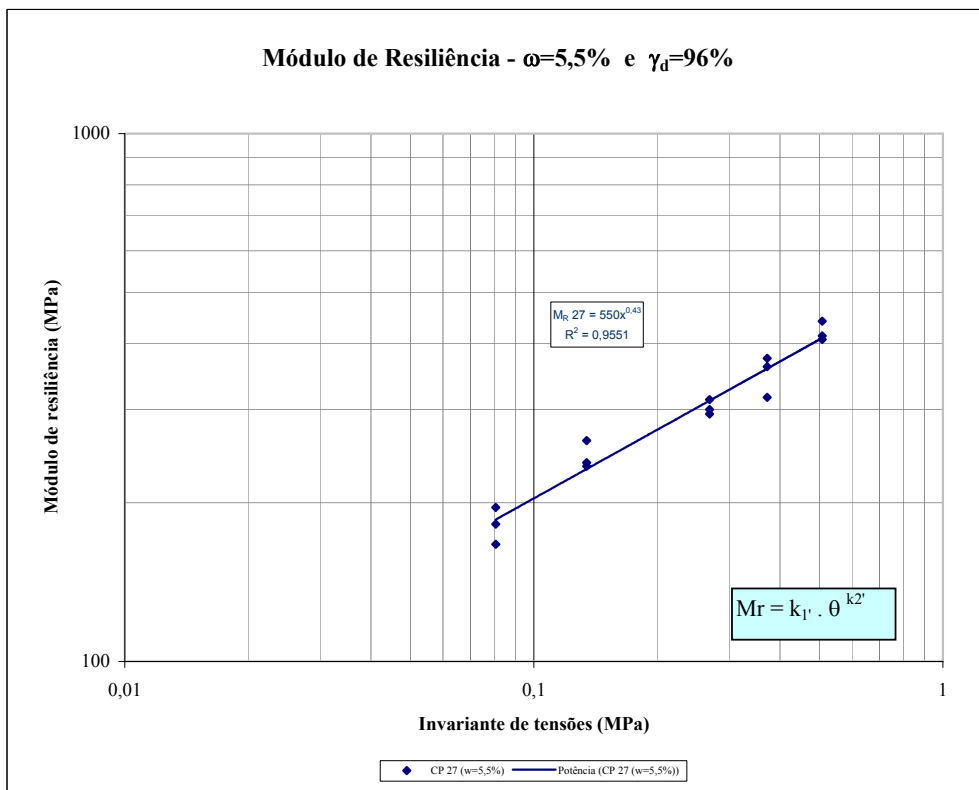
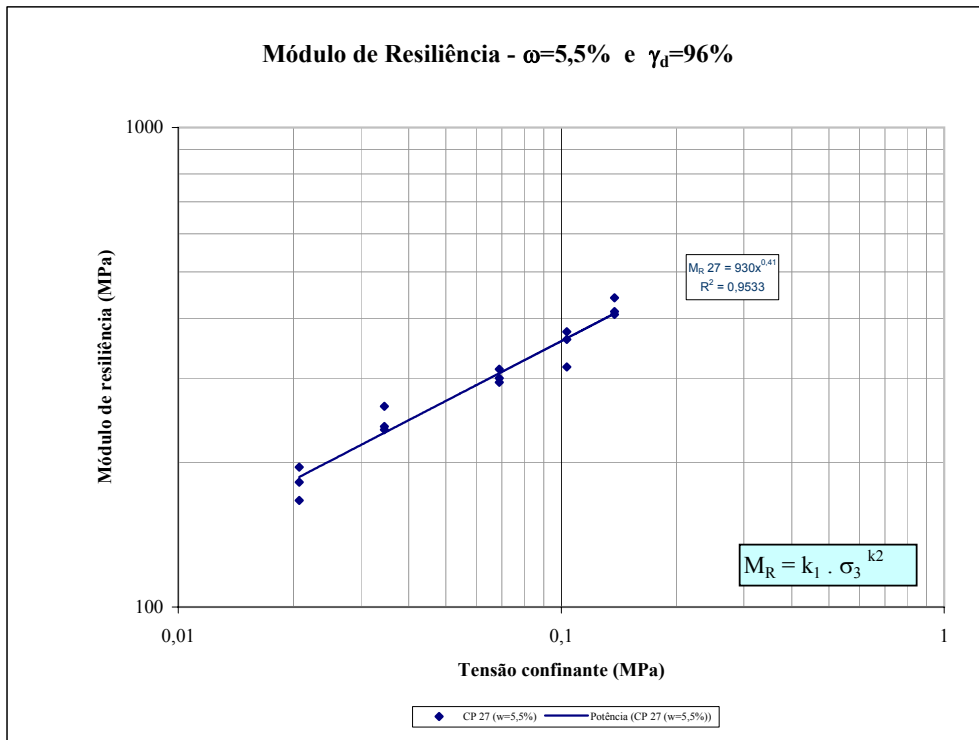
GRANITTO



W 2% acima da W ot

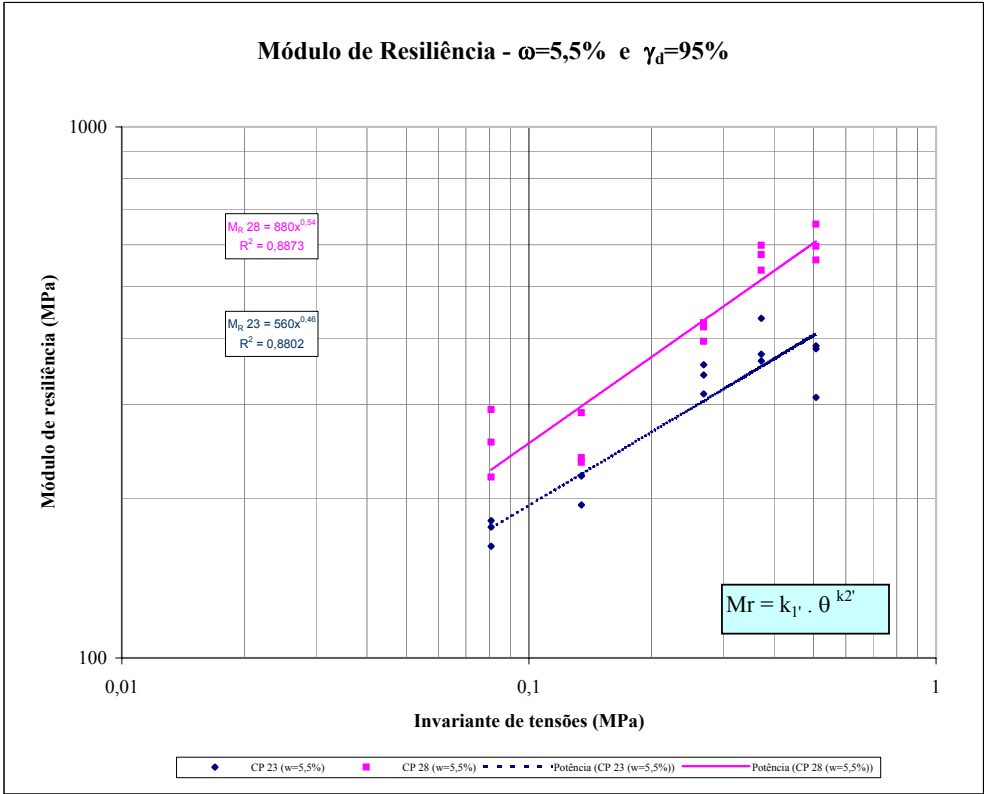
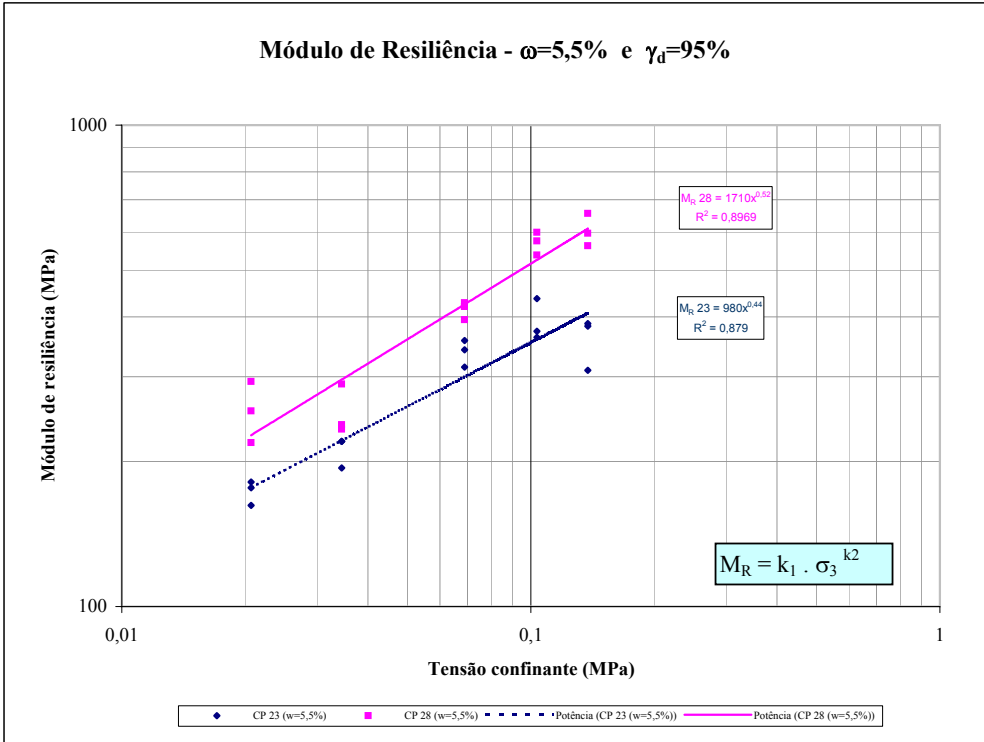
GRANITTO



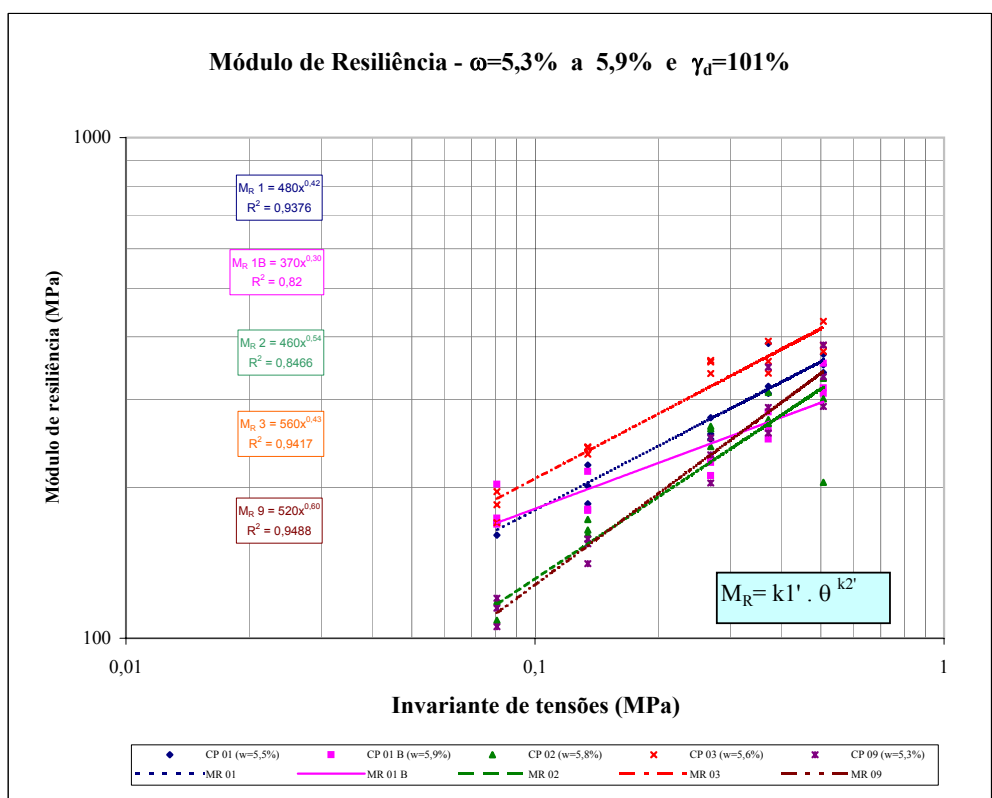
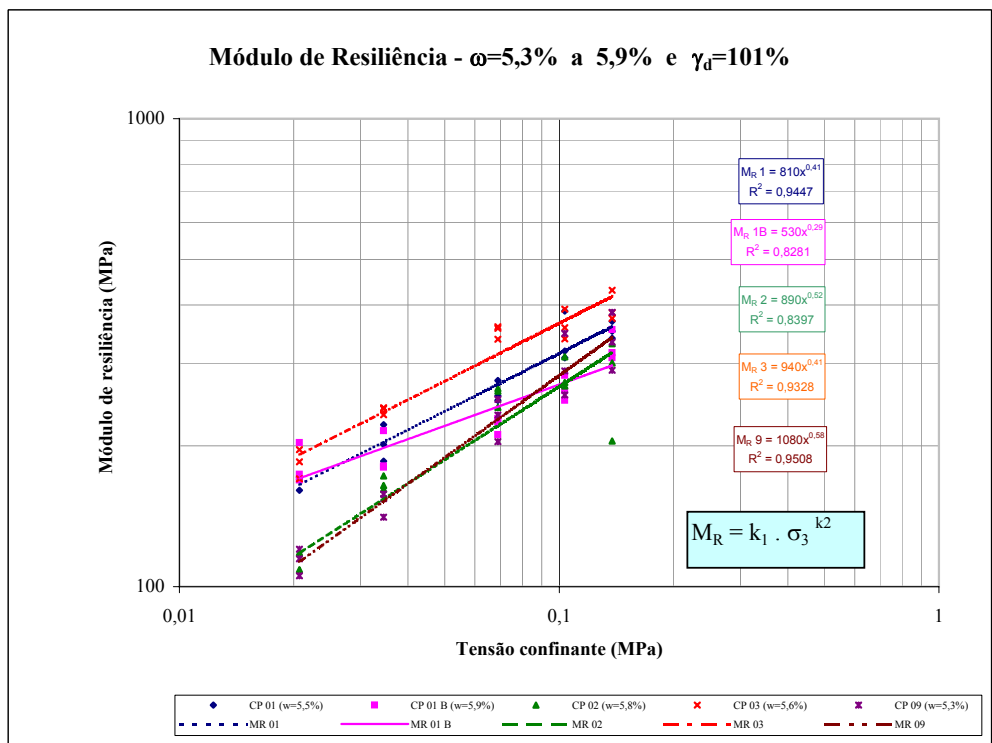


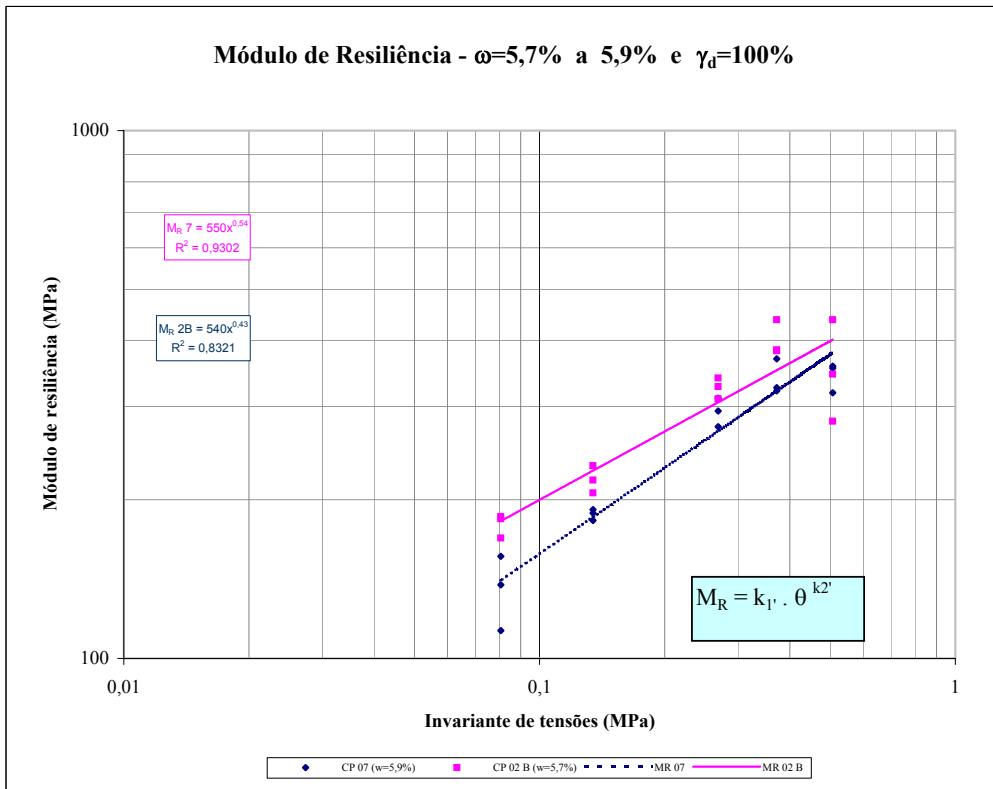
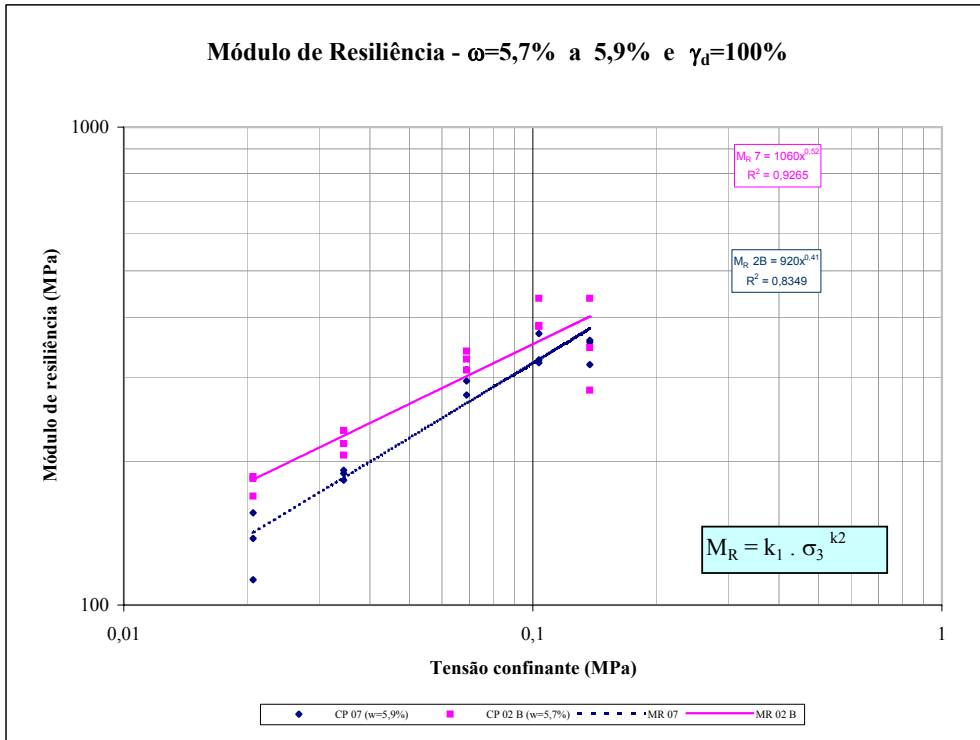
W 2% acima da w<sub>ot</sub>

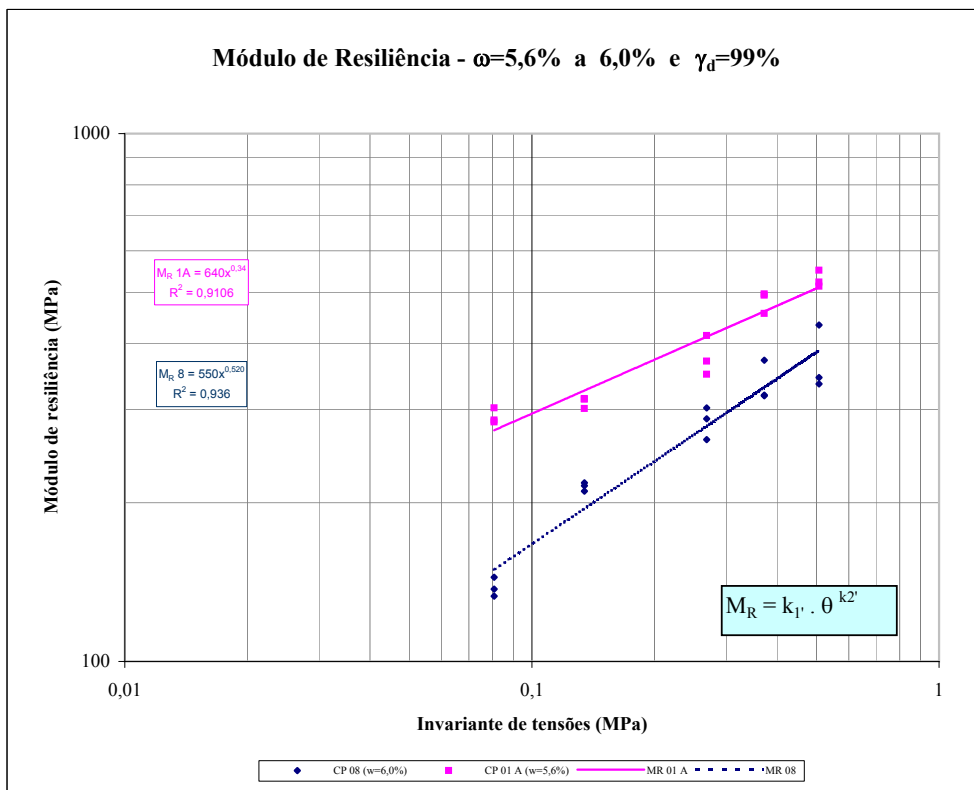
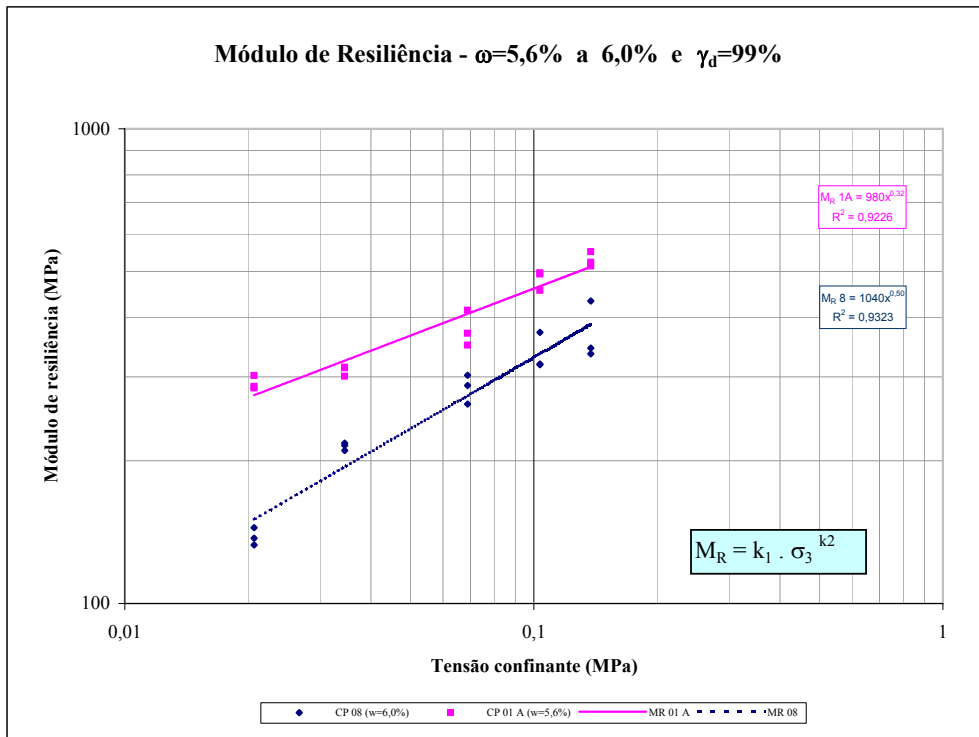
GRANITTO

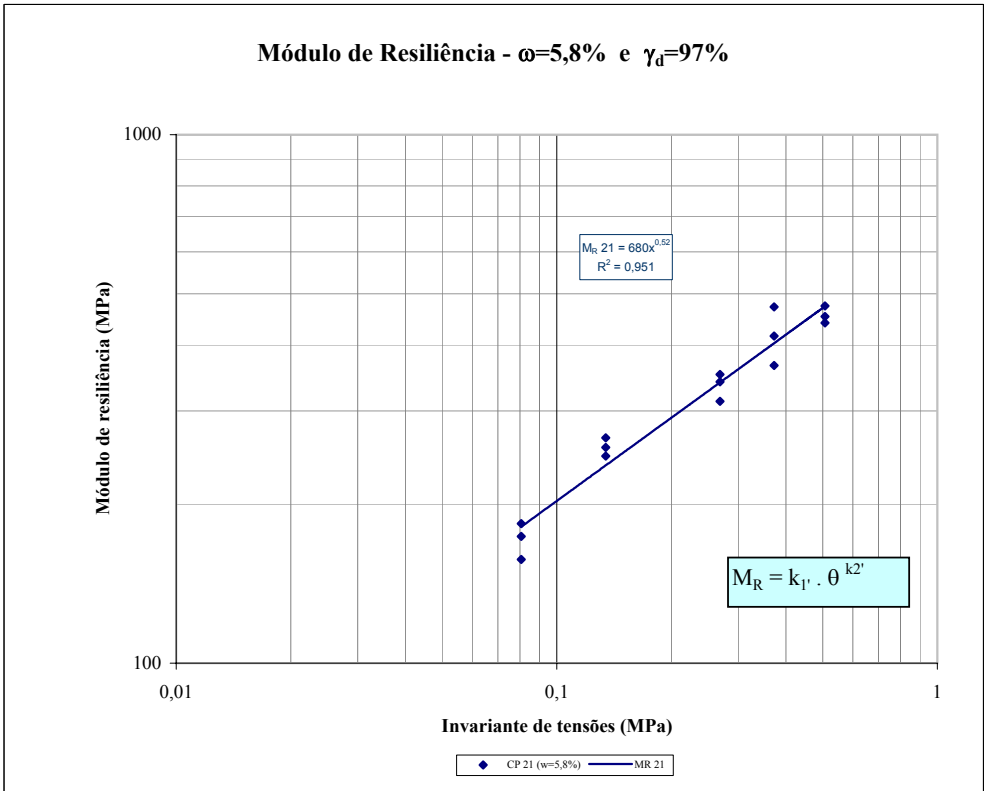
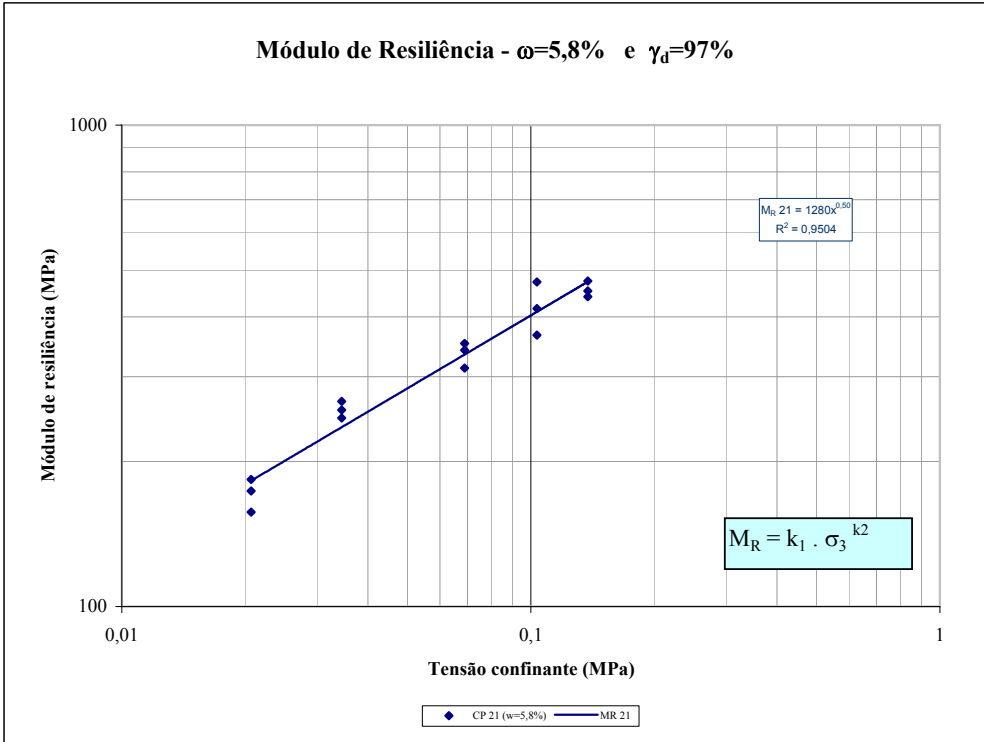


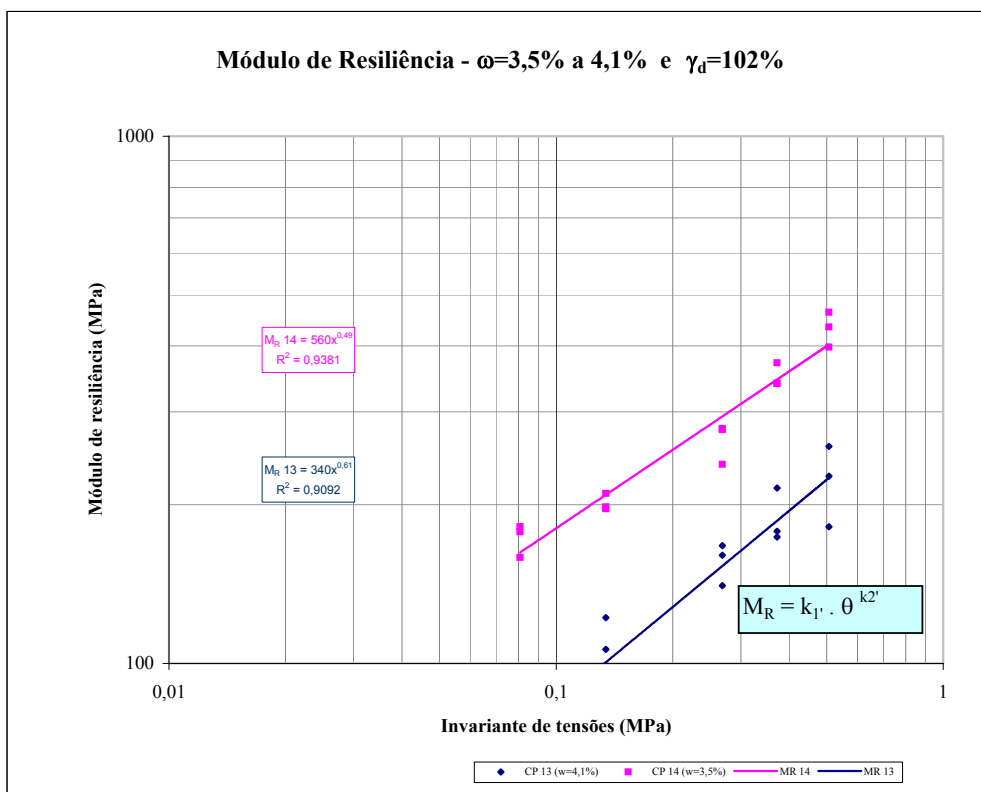
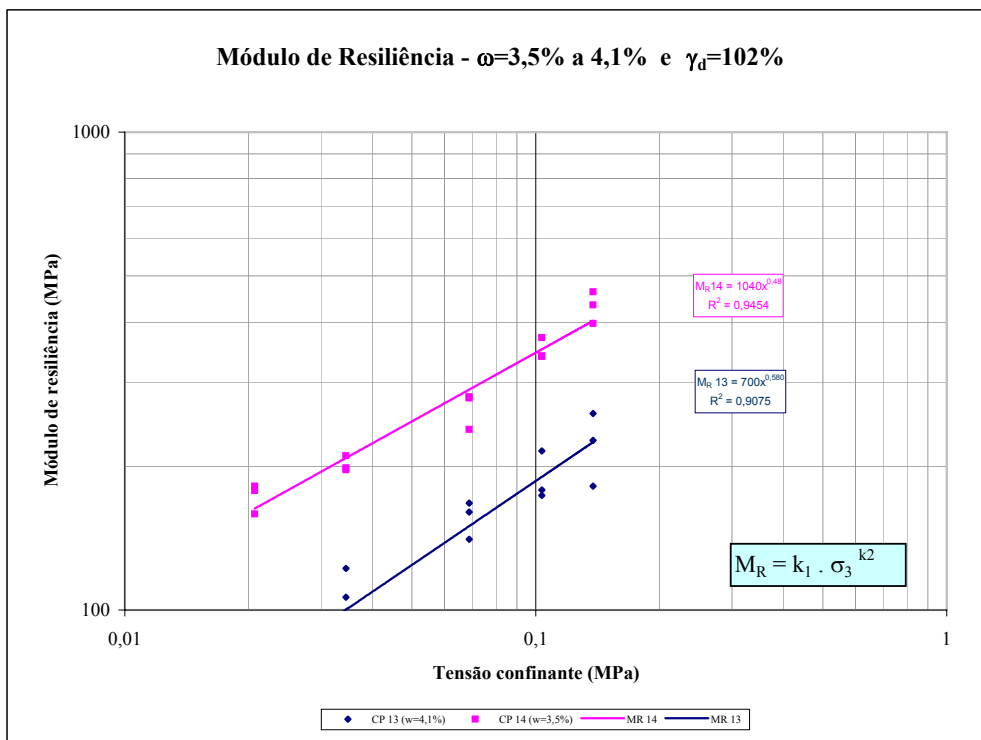
**APÊNDICE B – B A S A L T O 01**



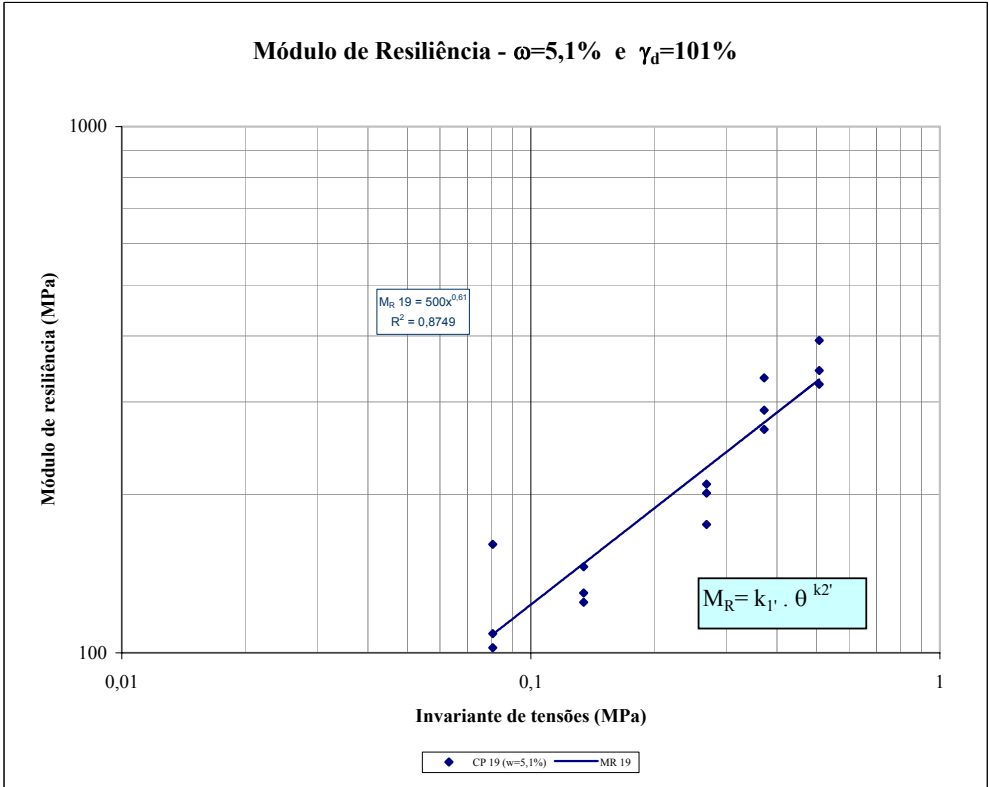
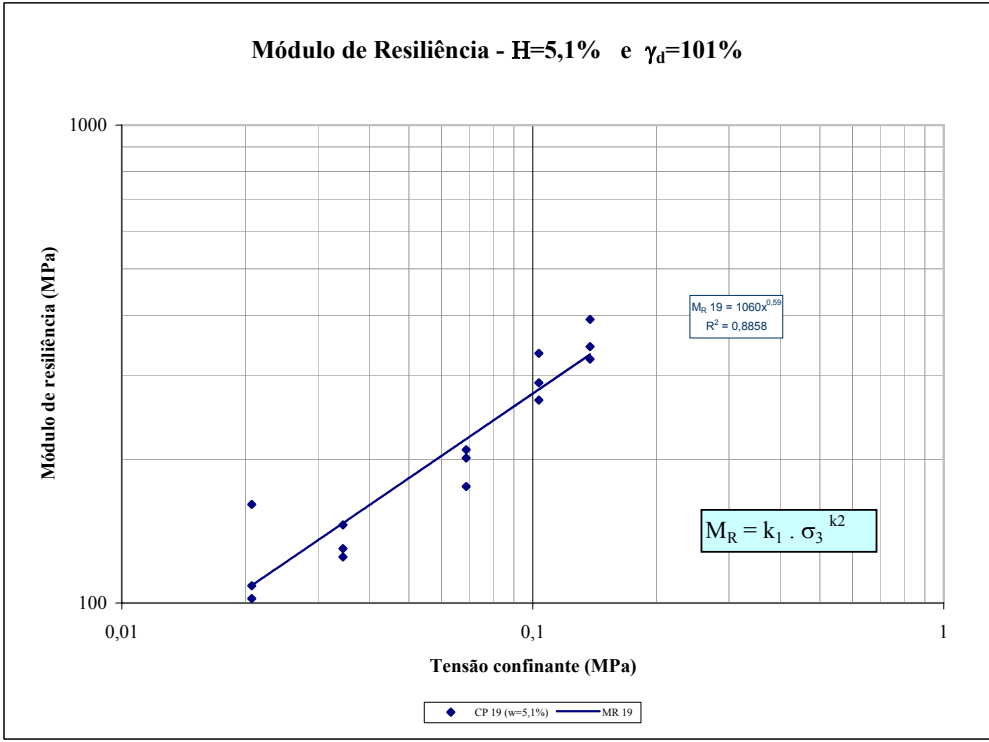






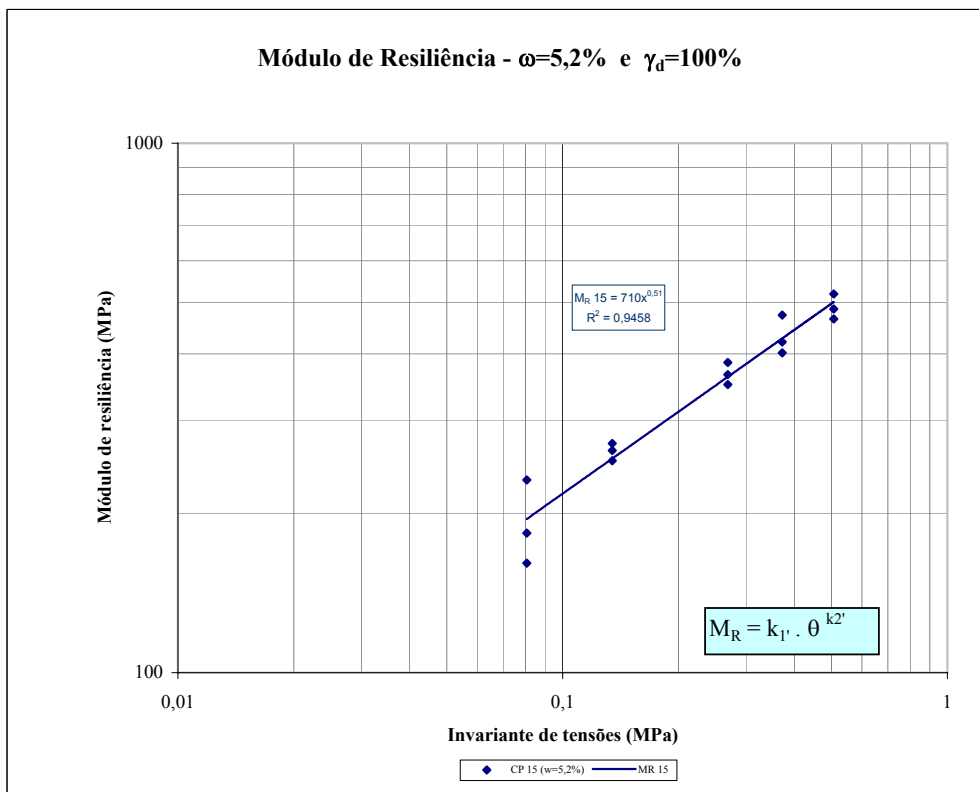
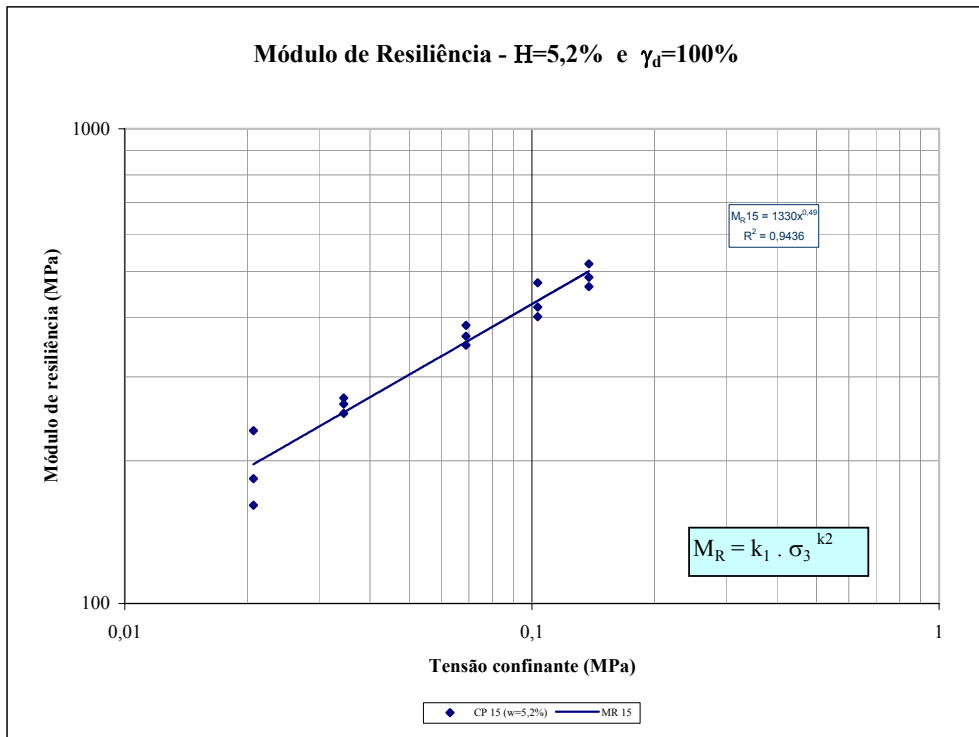






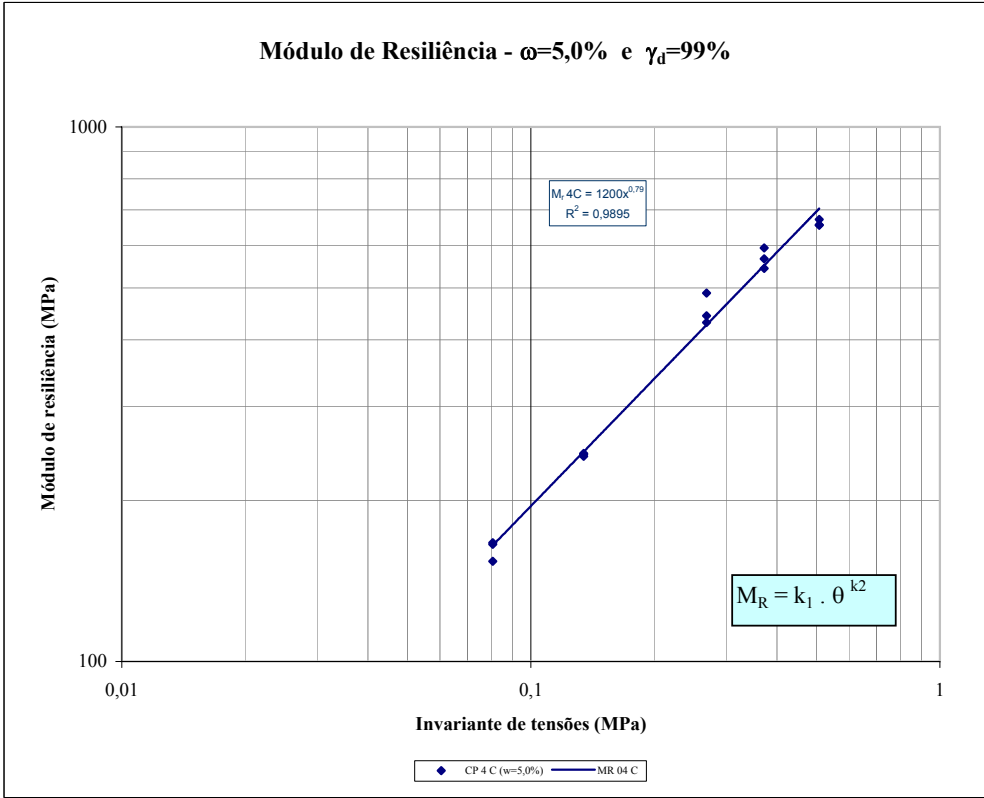
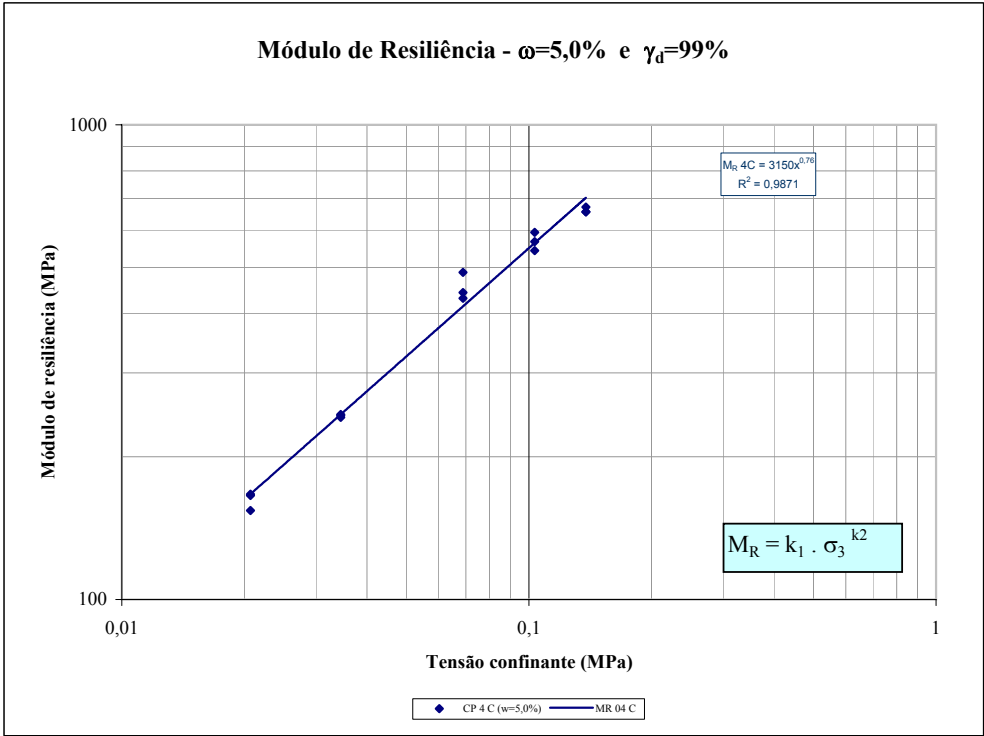
w 2% abaixo da w ot

BASALTO 01



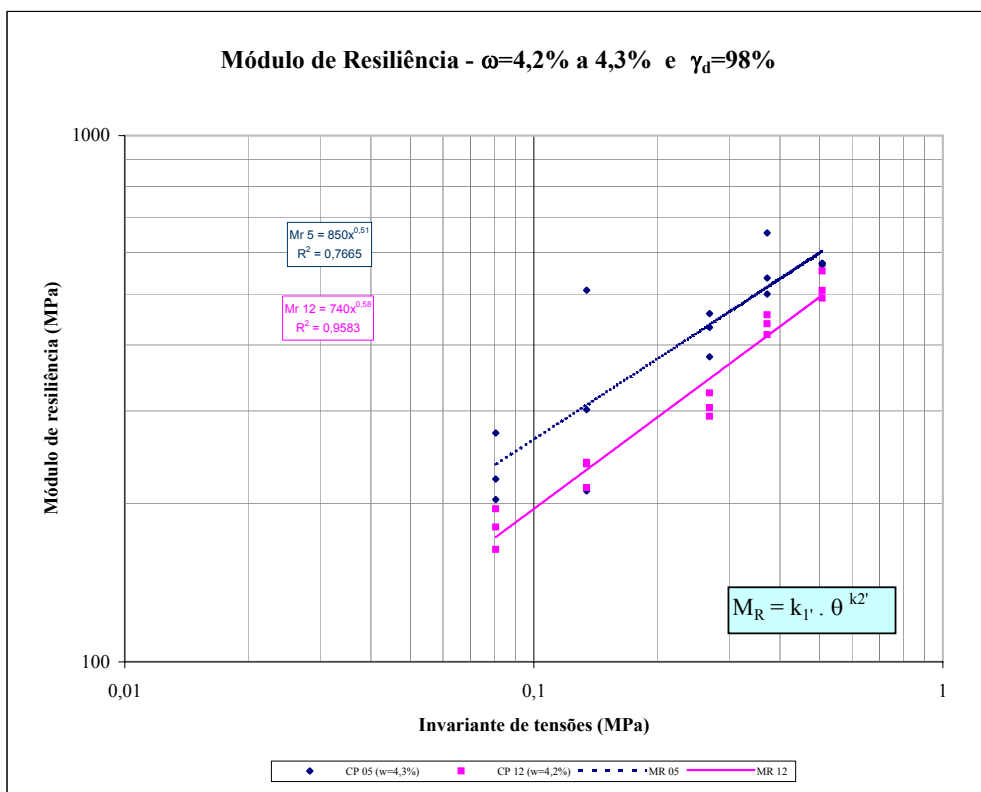
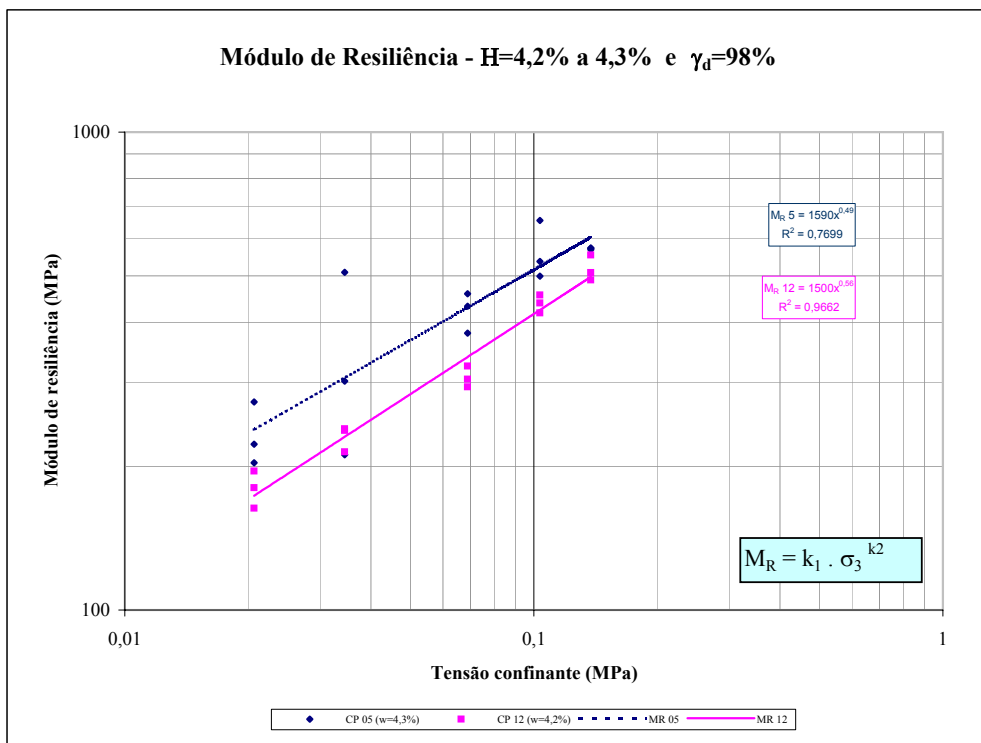
**w 2% abaixo da w ot**

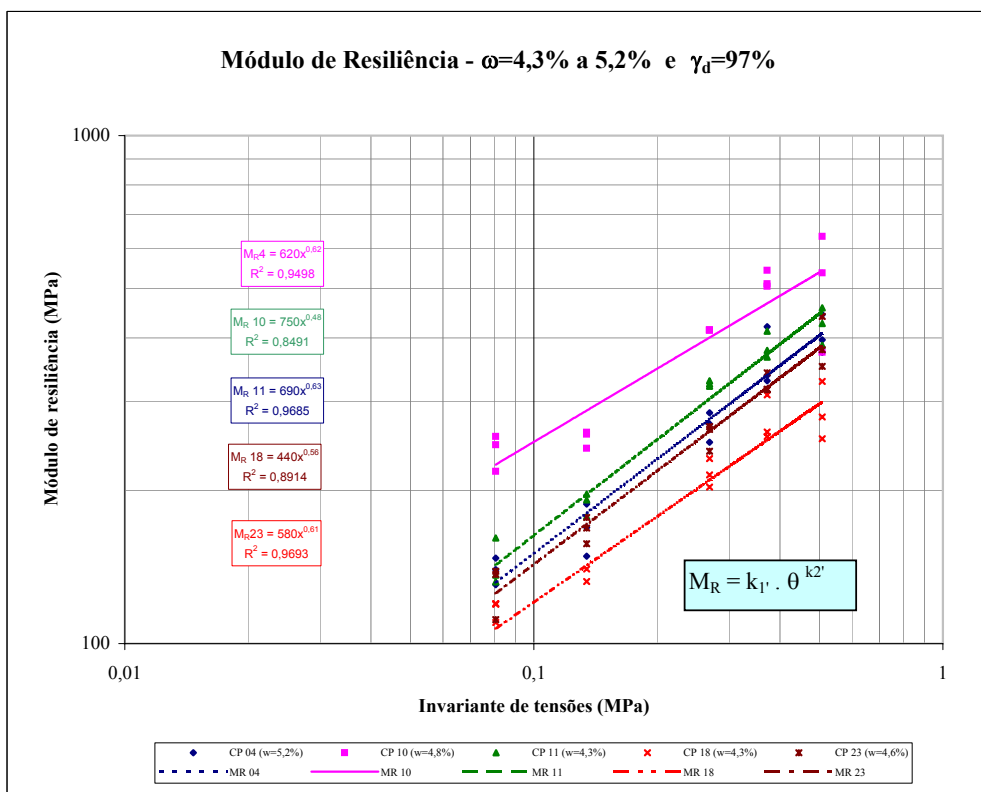
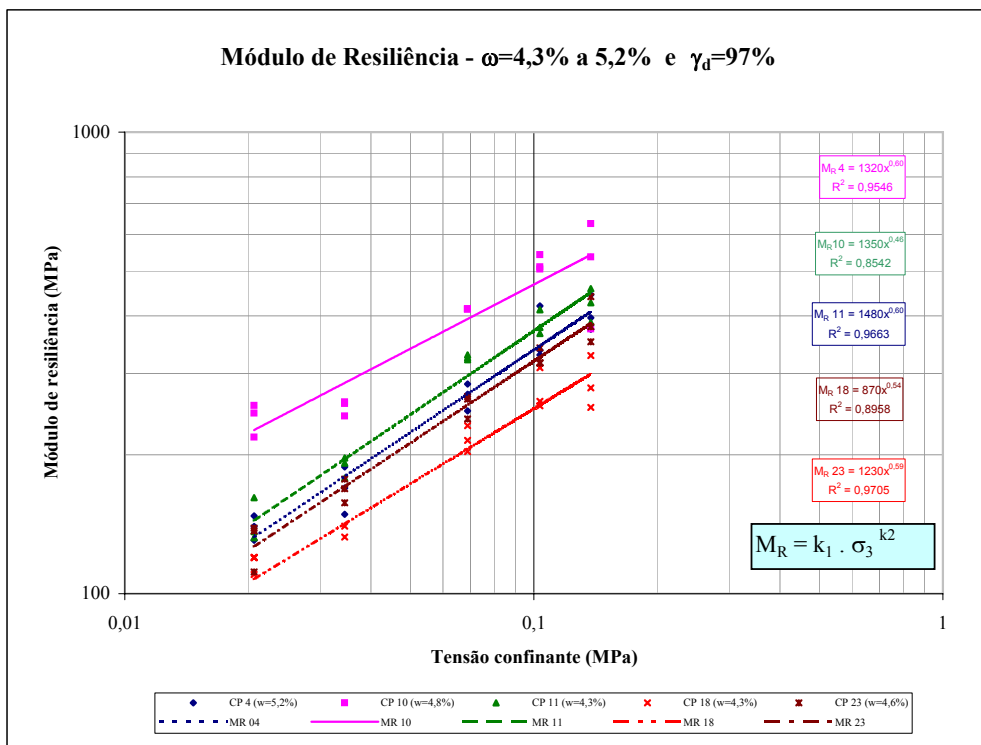
**BASALTO 01**

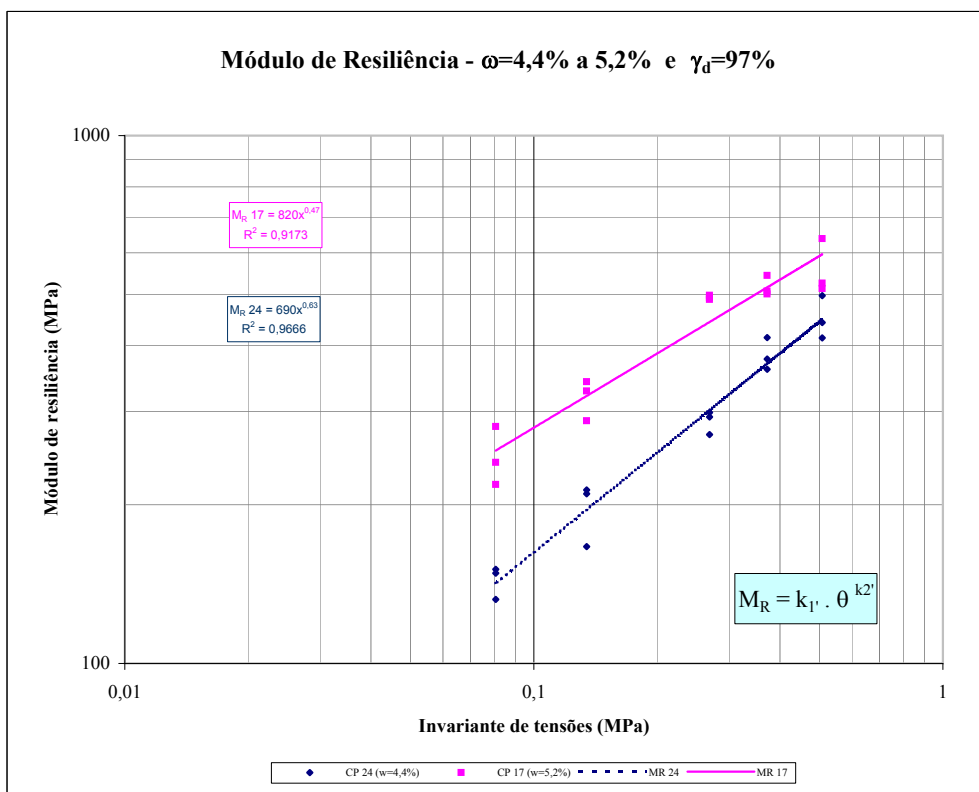
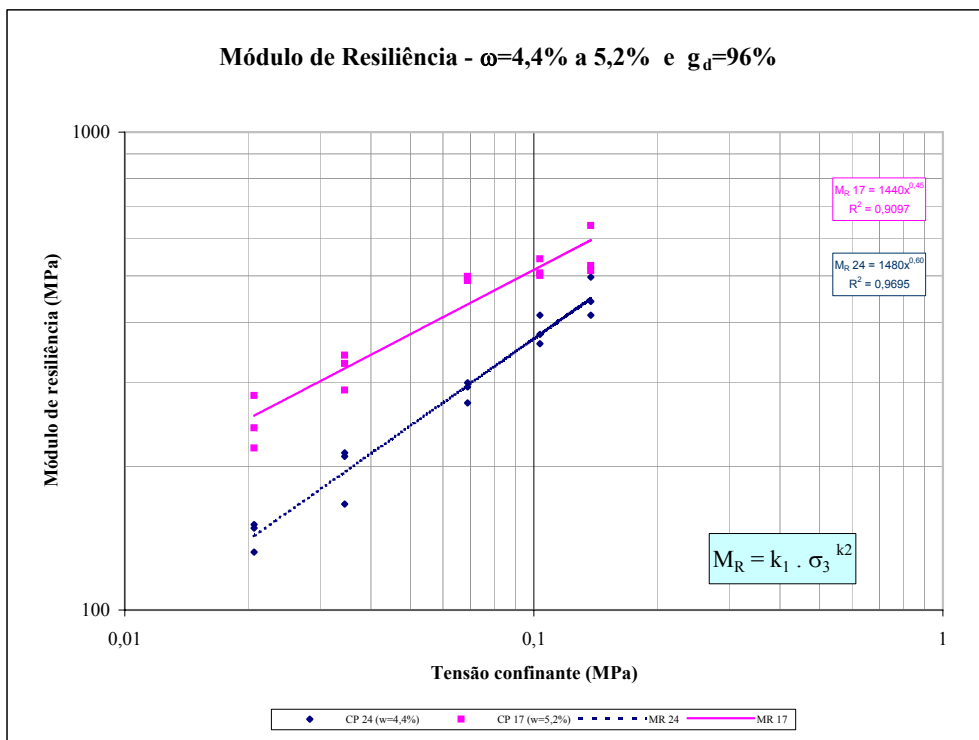


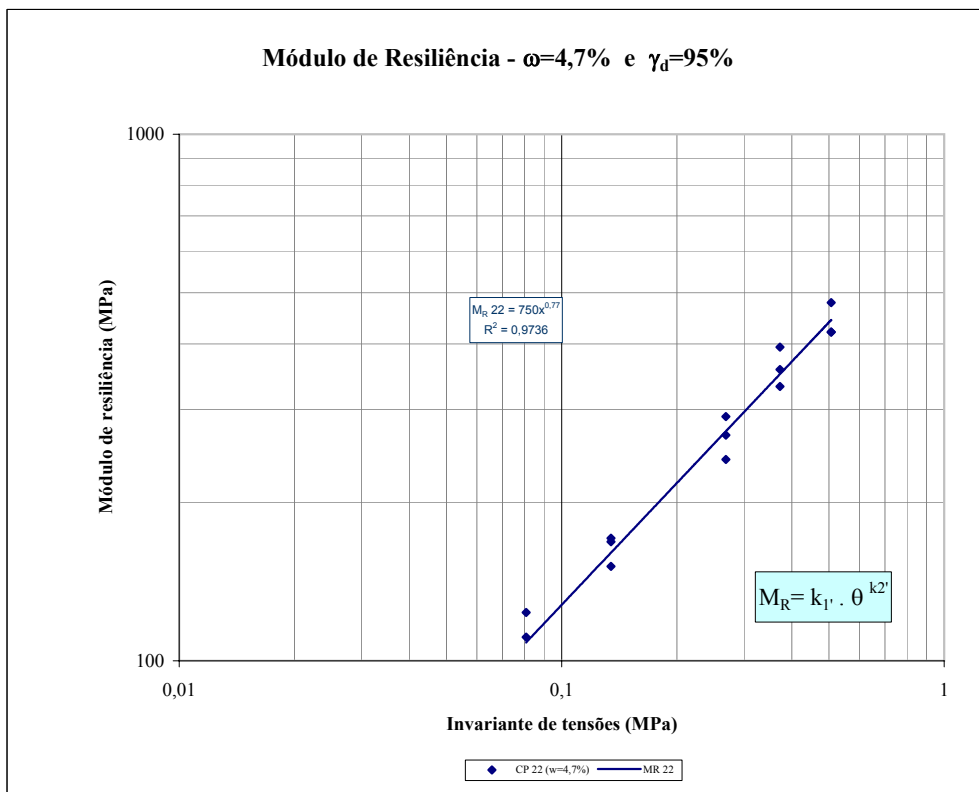
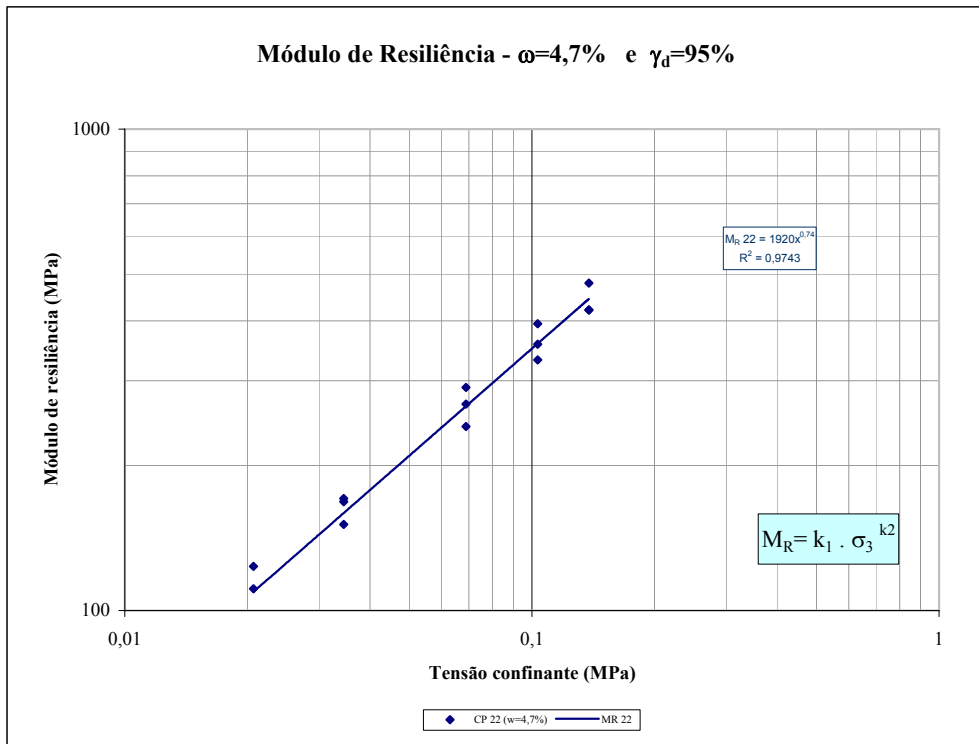
w 2% abaixo da w ot

BASALTO 01



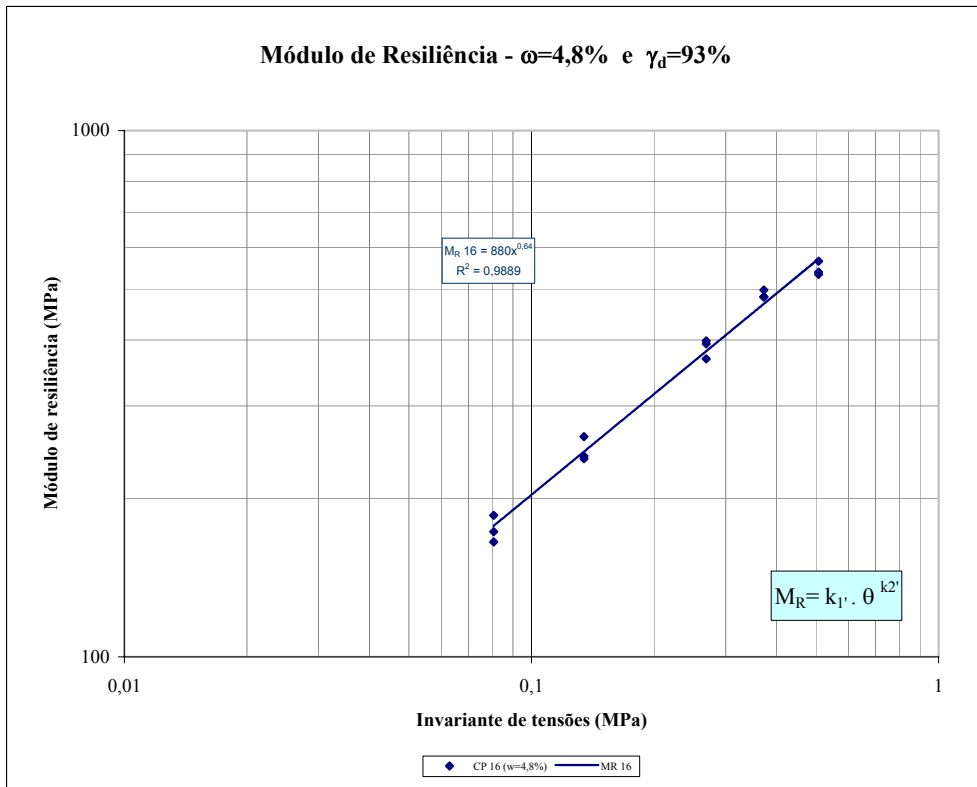
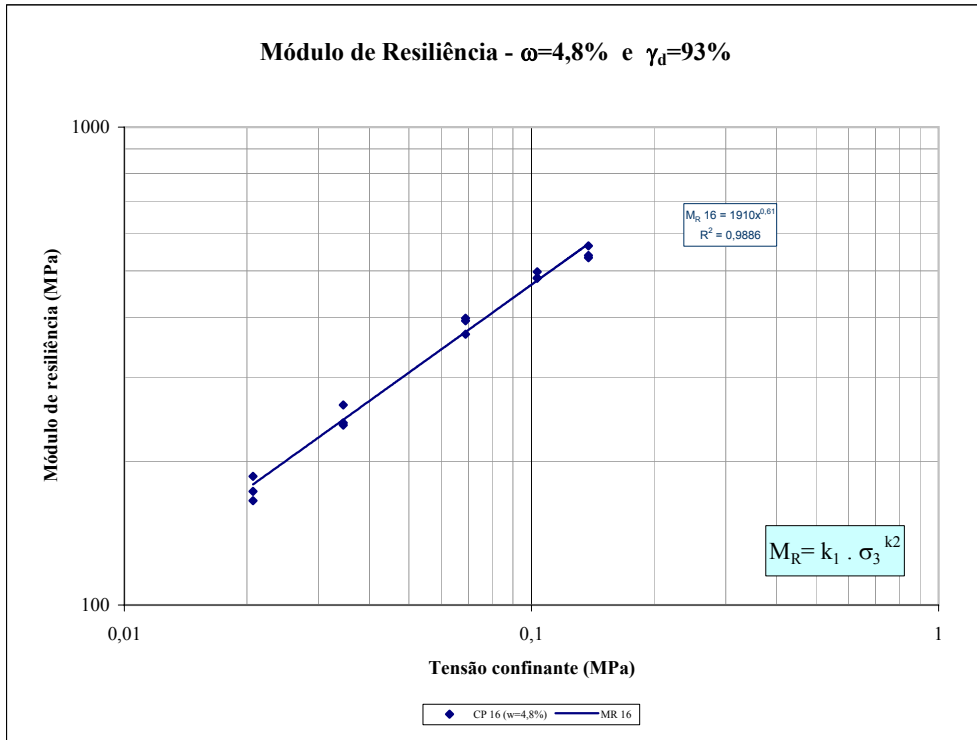






w 2% abaixo da w ot

BASALTO 01

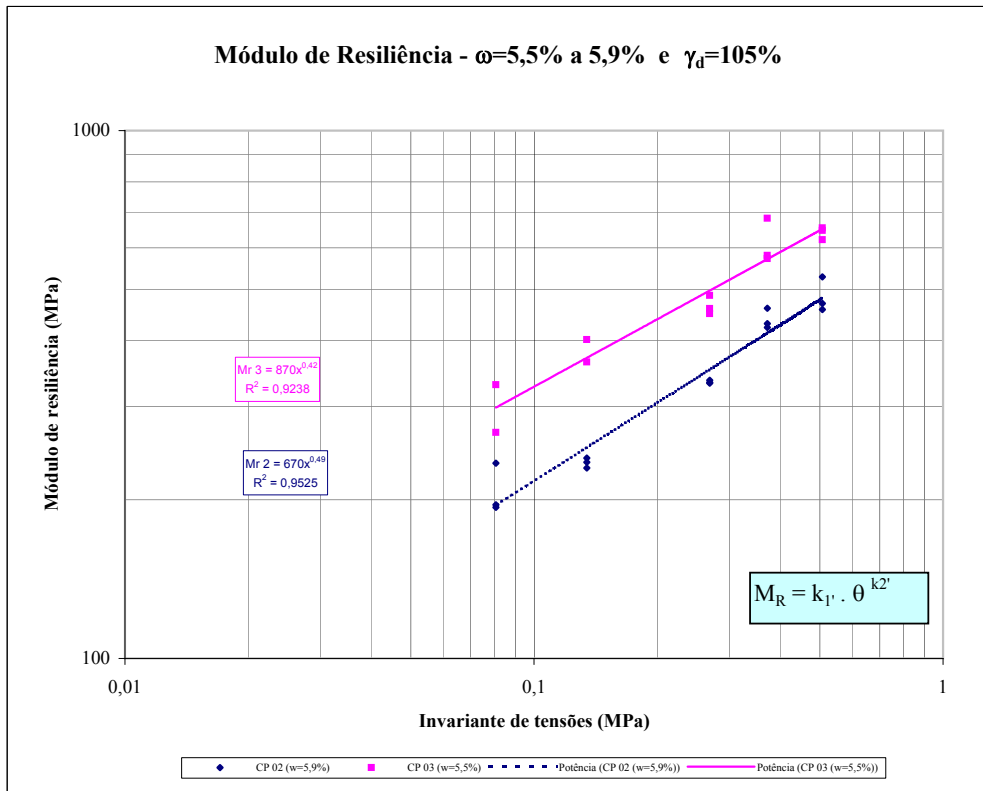
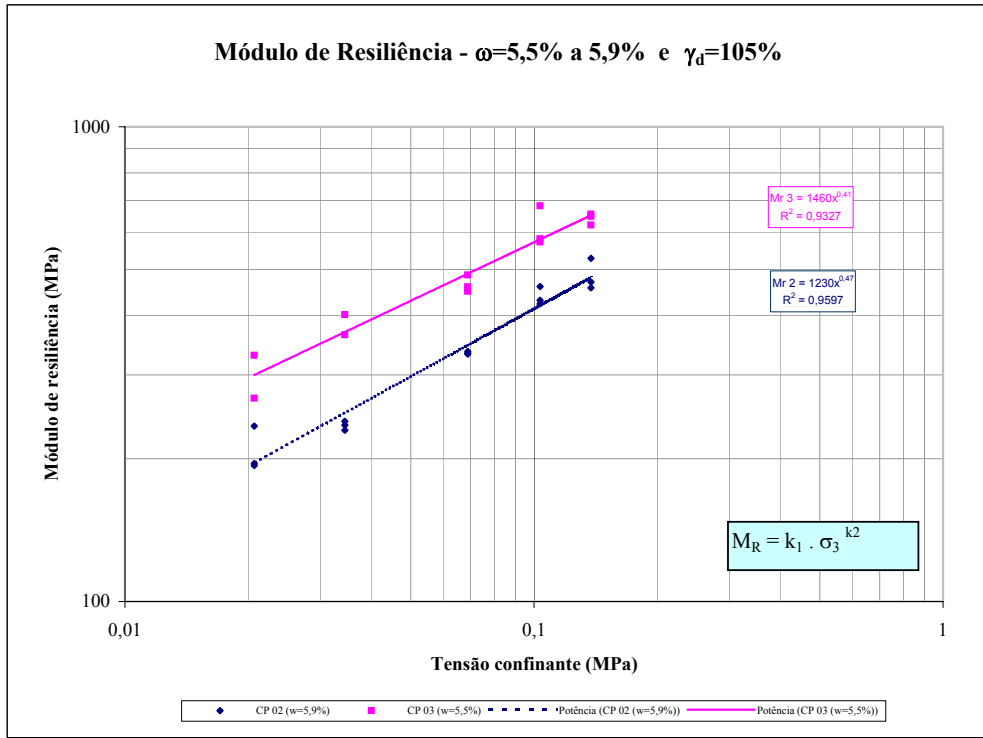


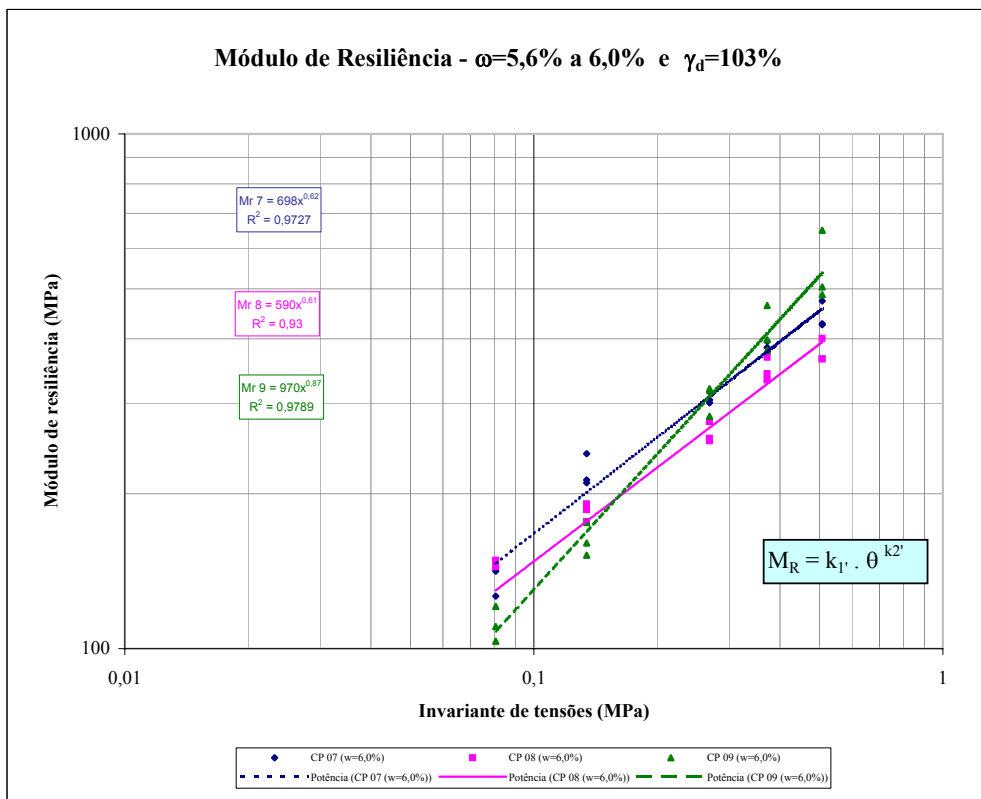
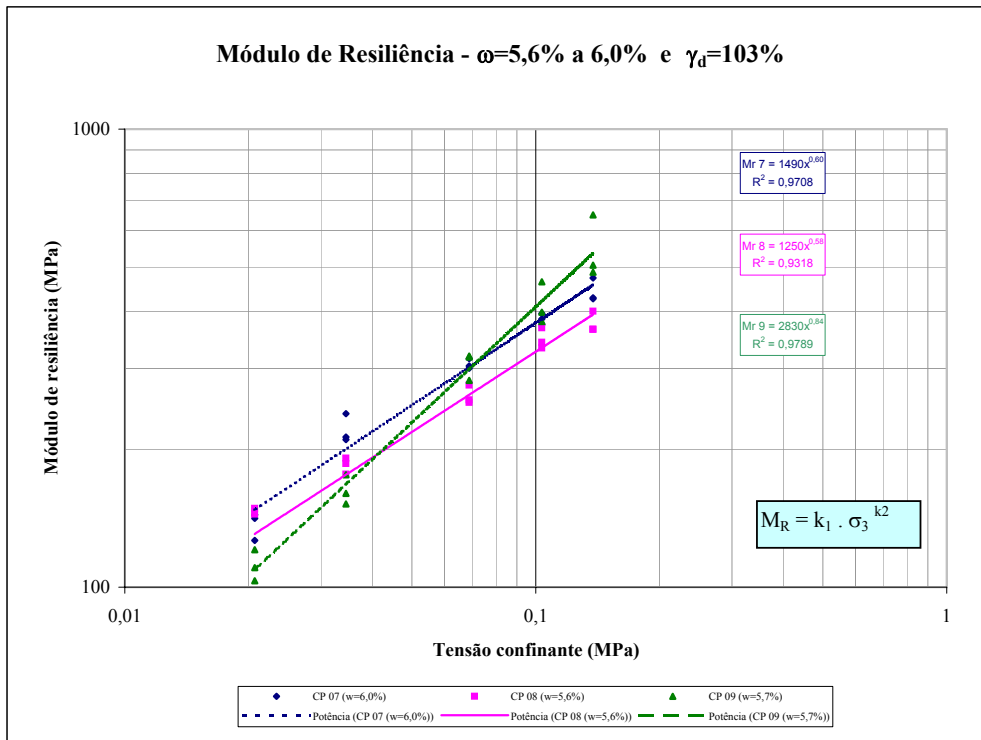
**w 2% abaixo da w<sub>ot</sub>**

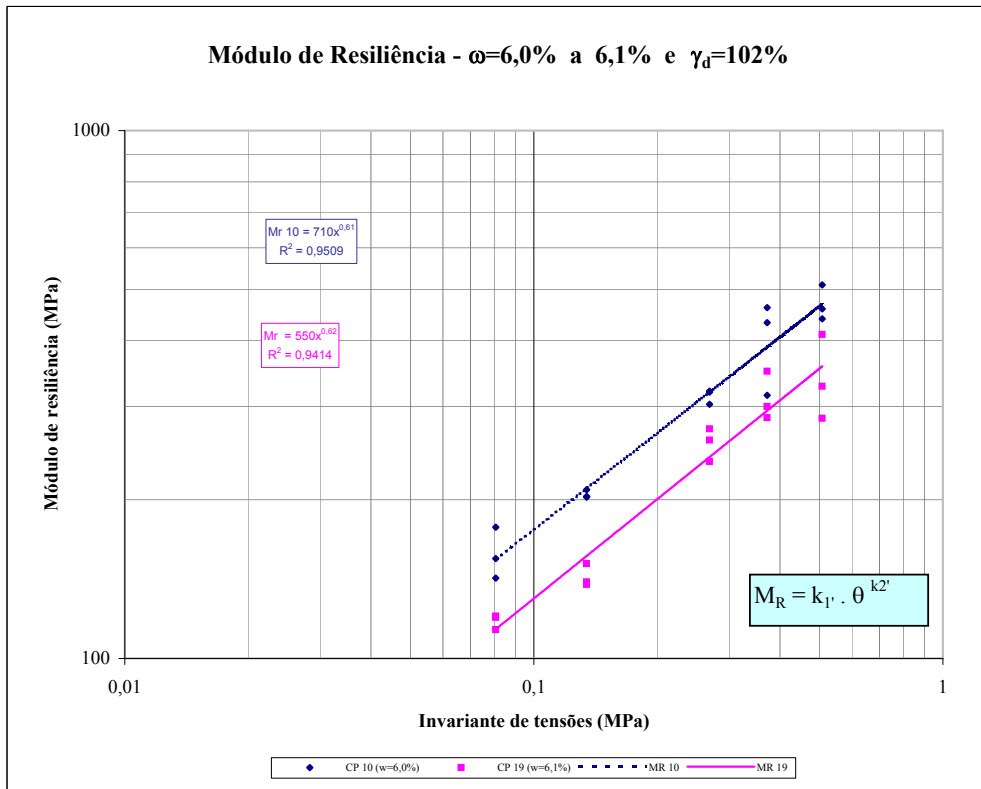
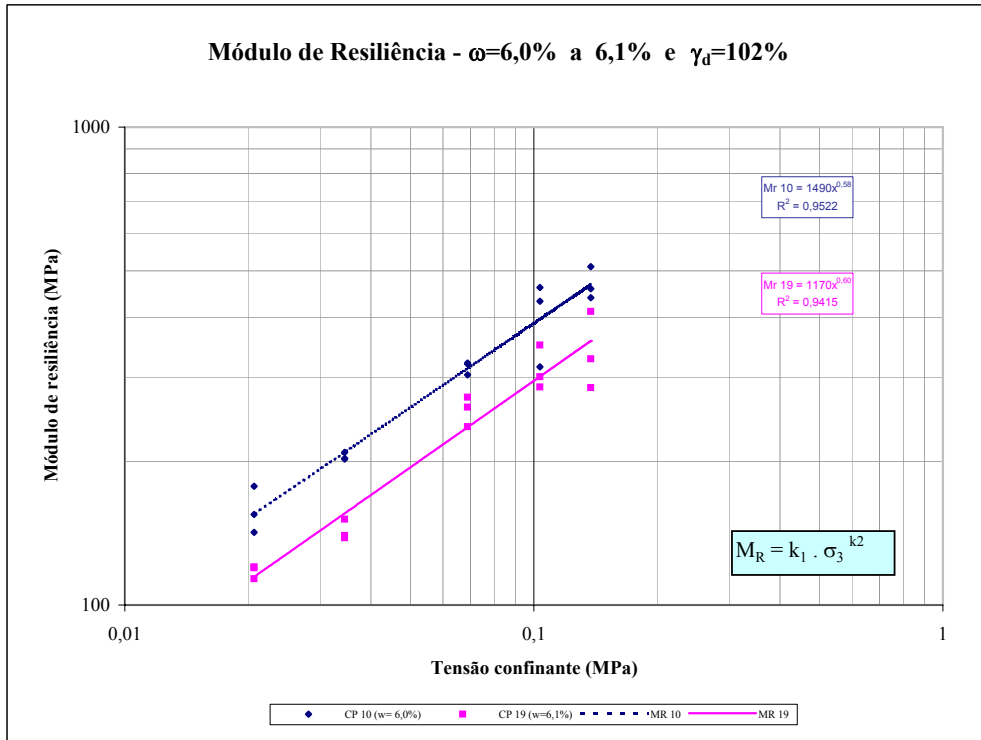
**BASALTO 01**

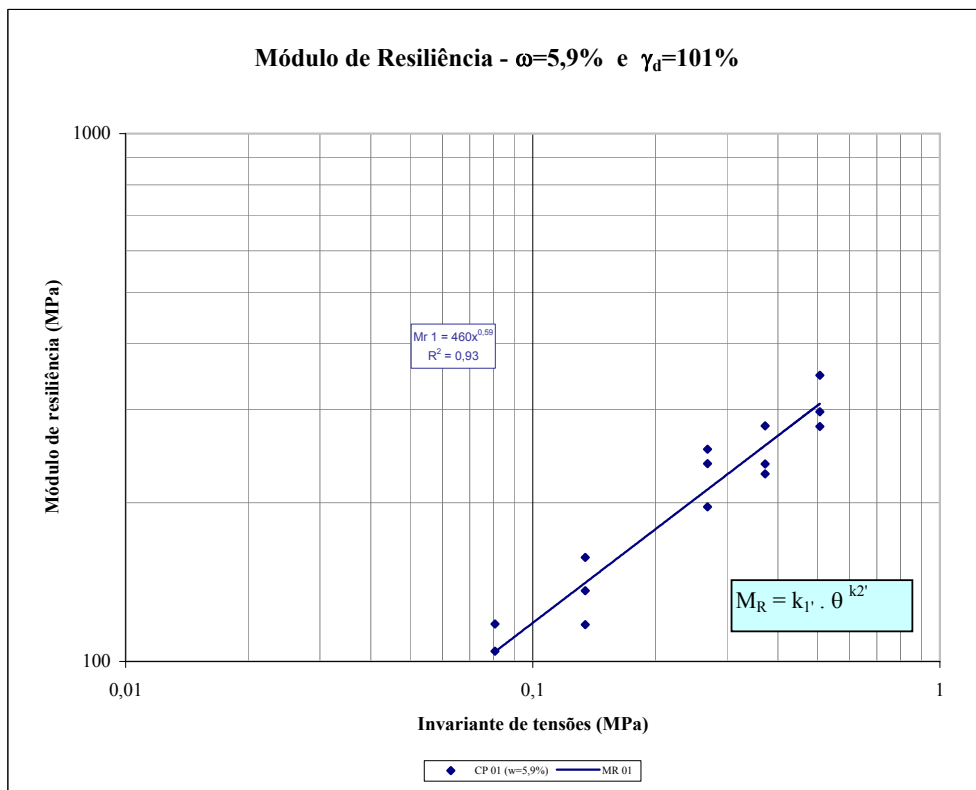
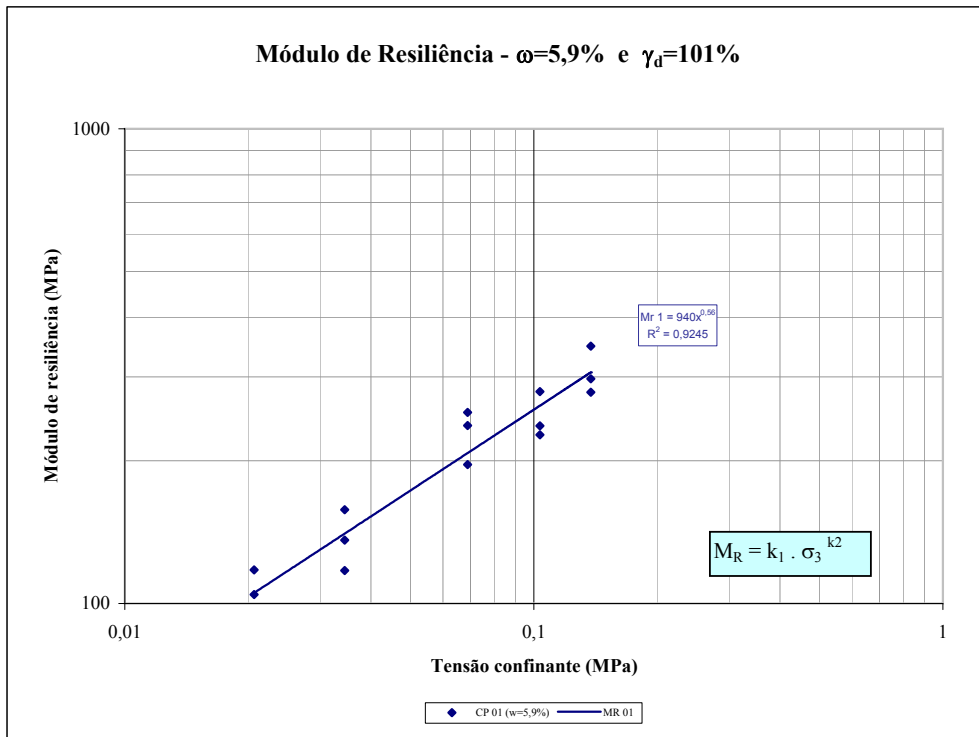


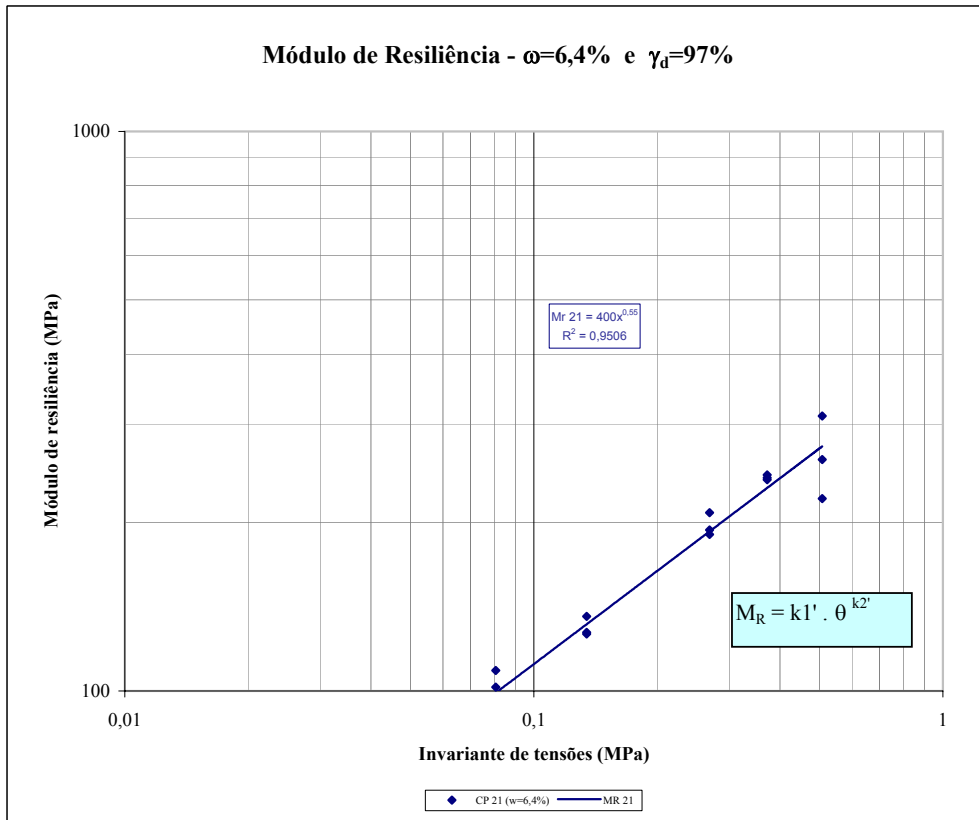
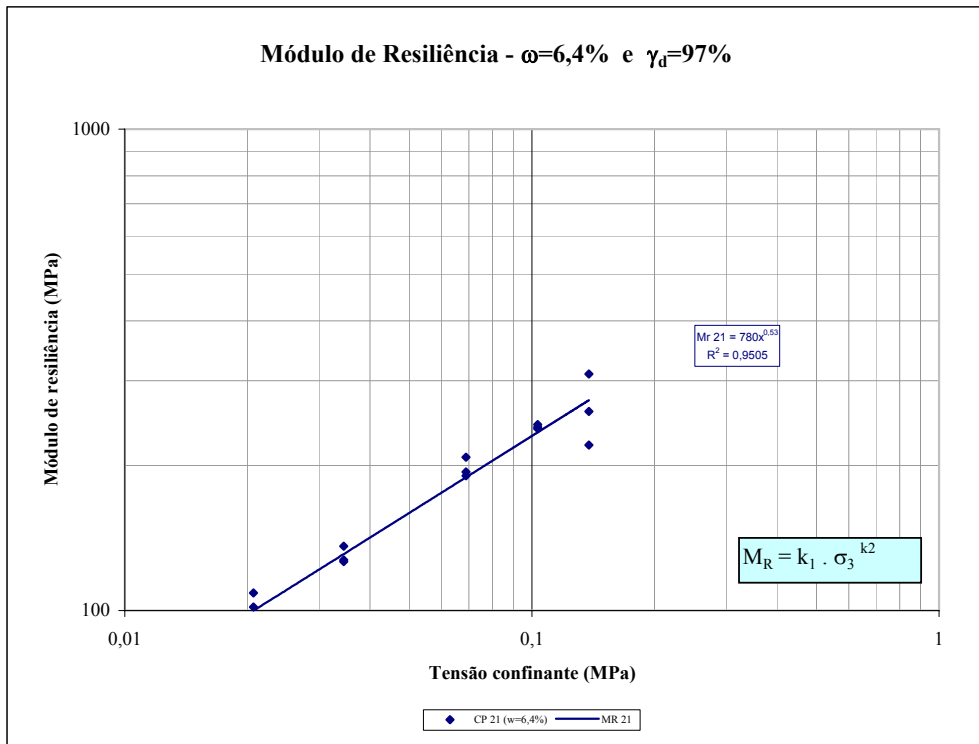
**APÊNDICE C – B A S A L T O 02**

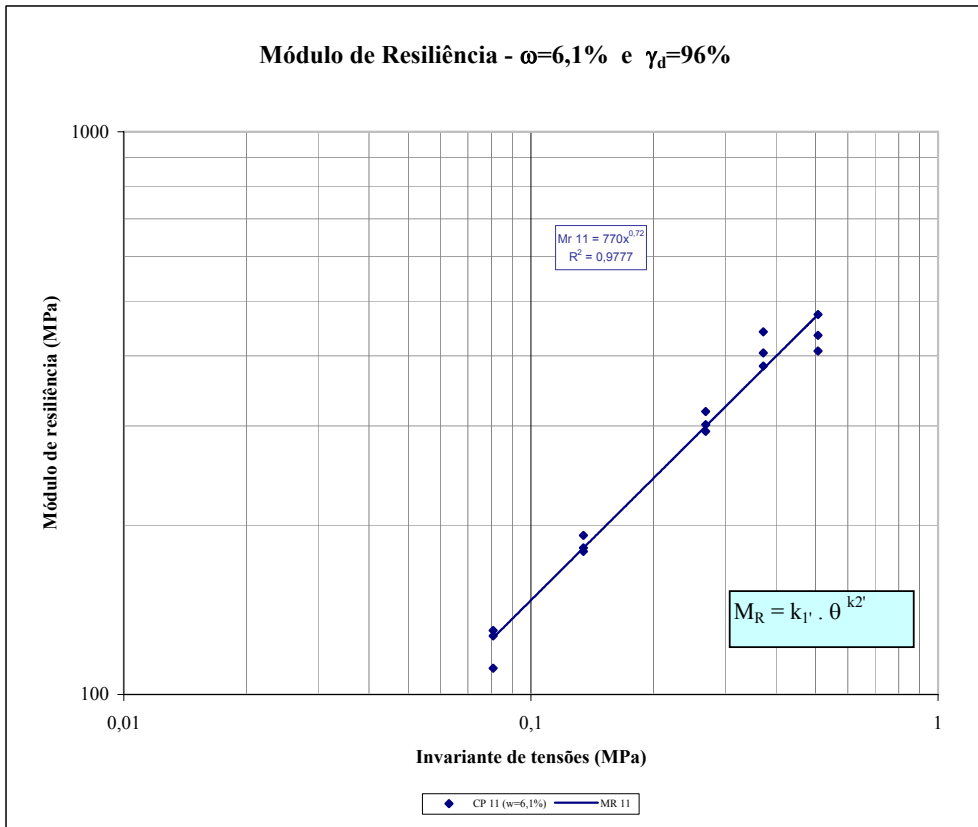
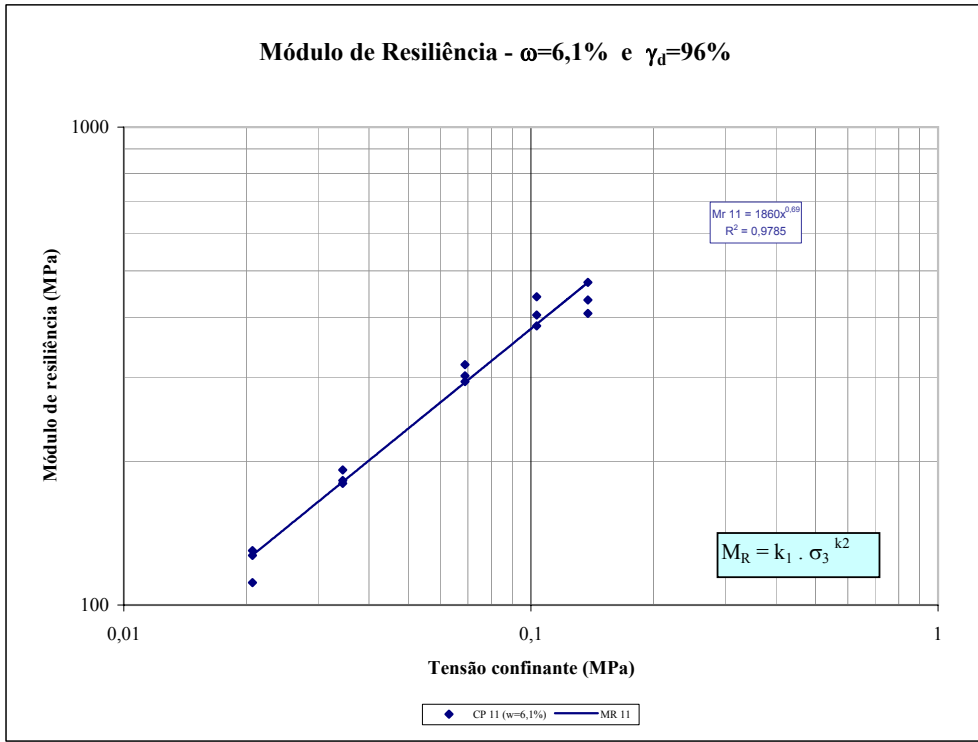


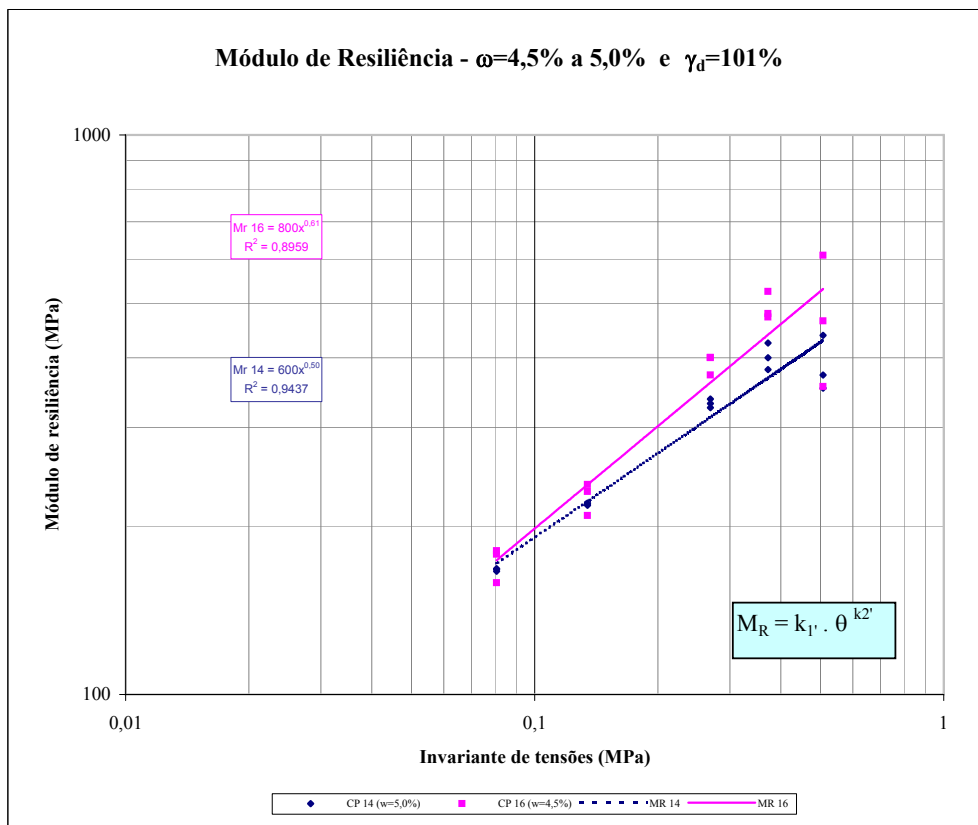
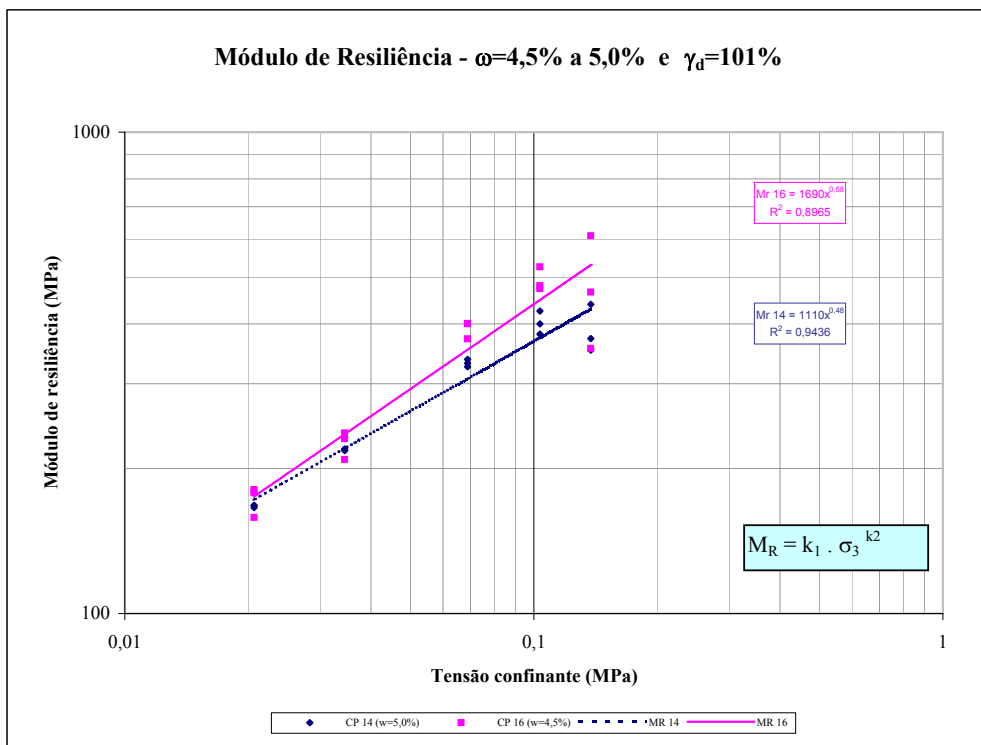




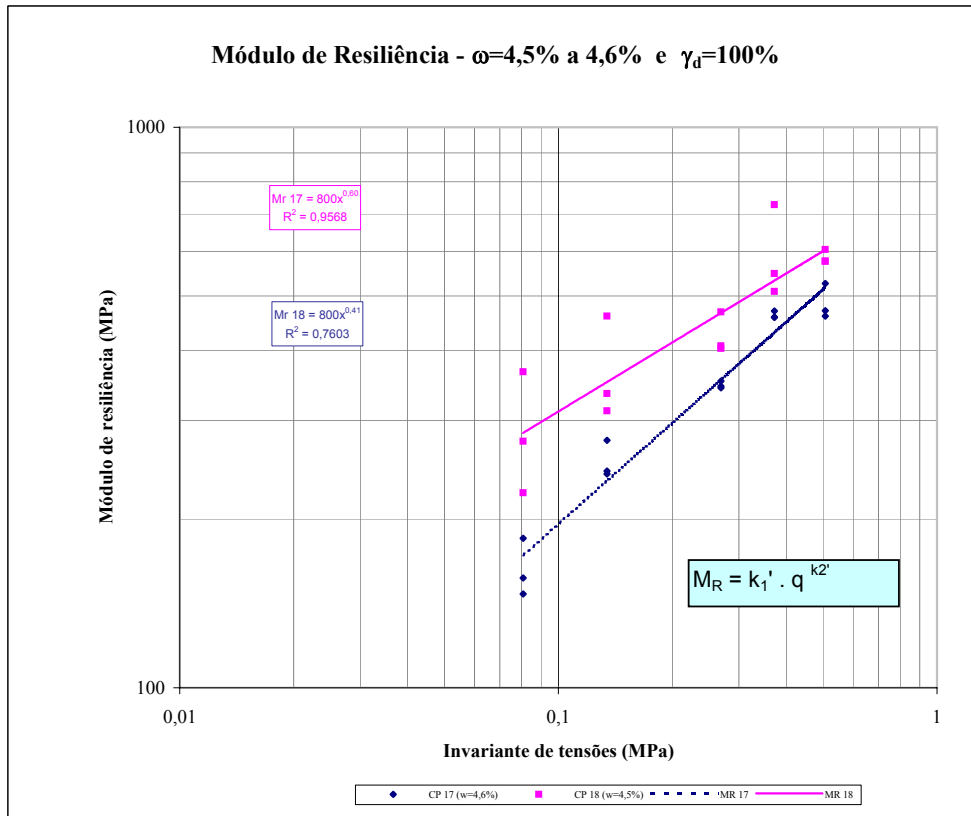
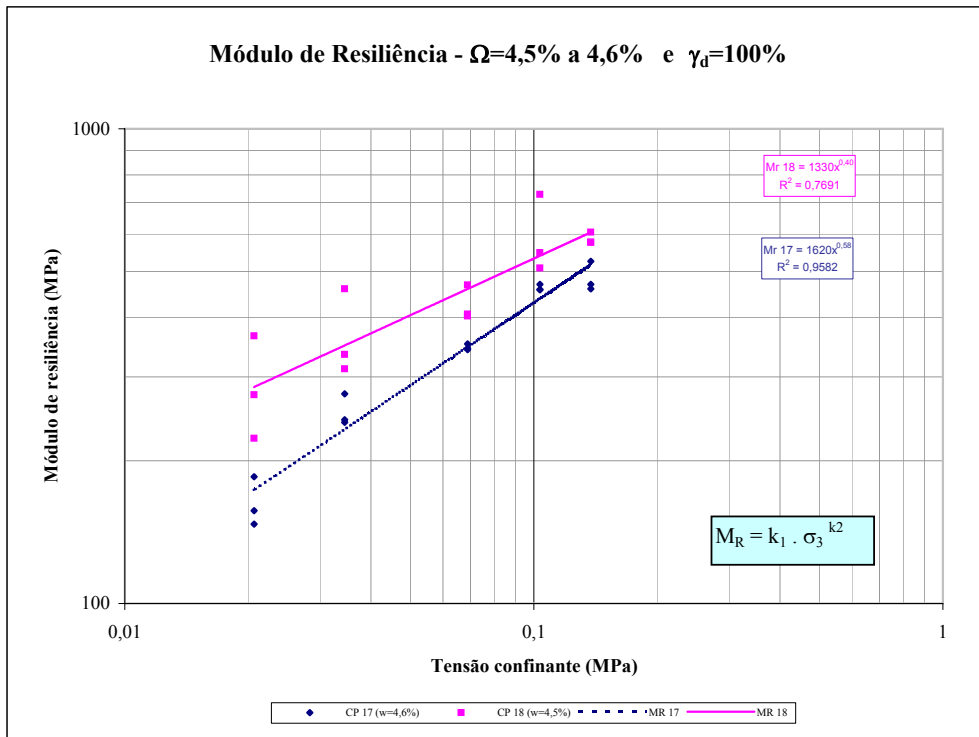






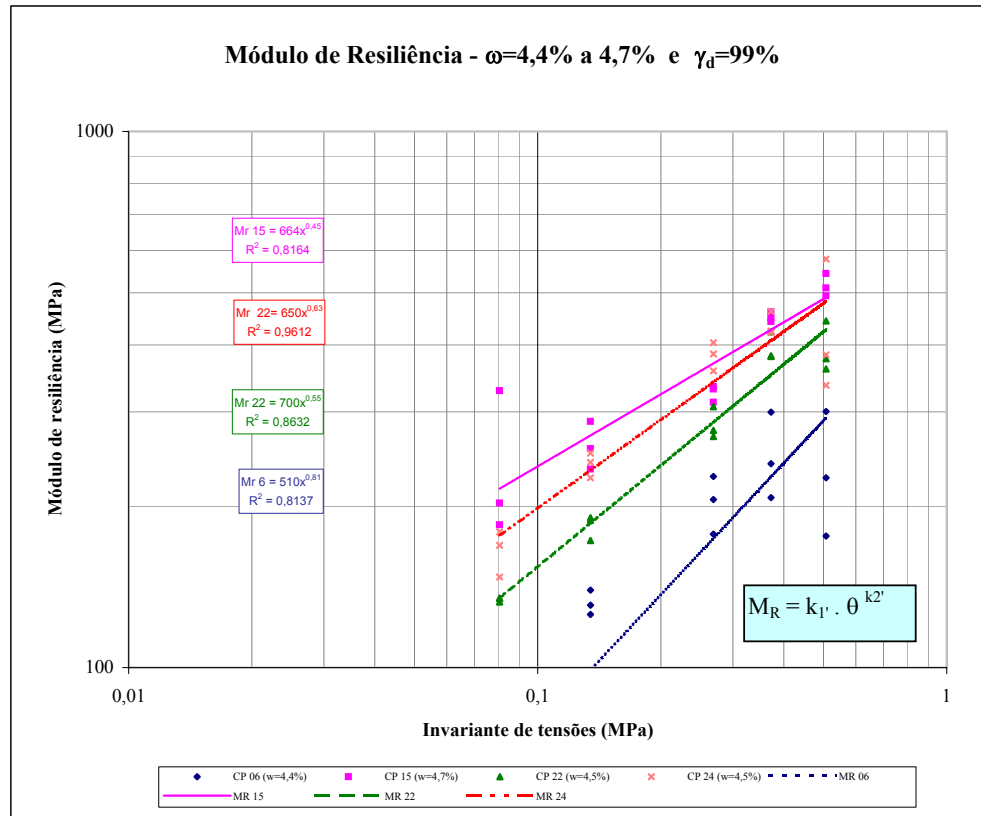
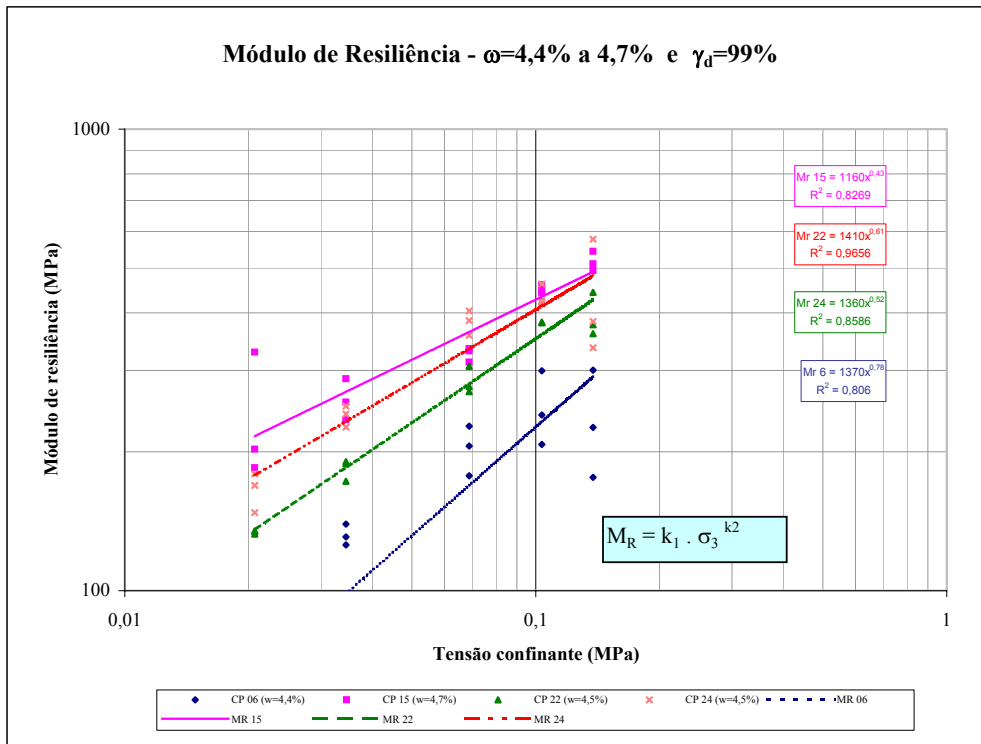






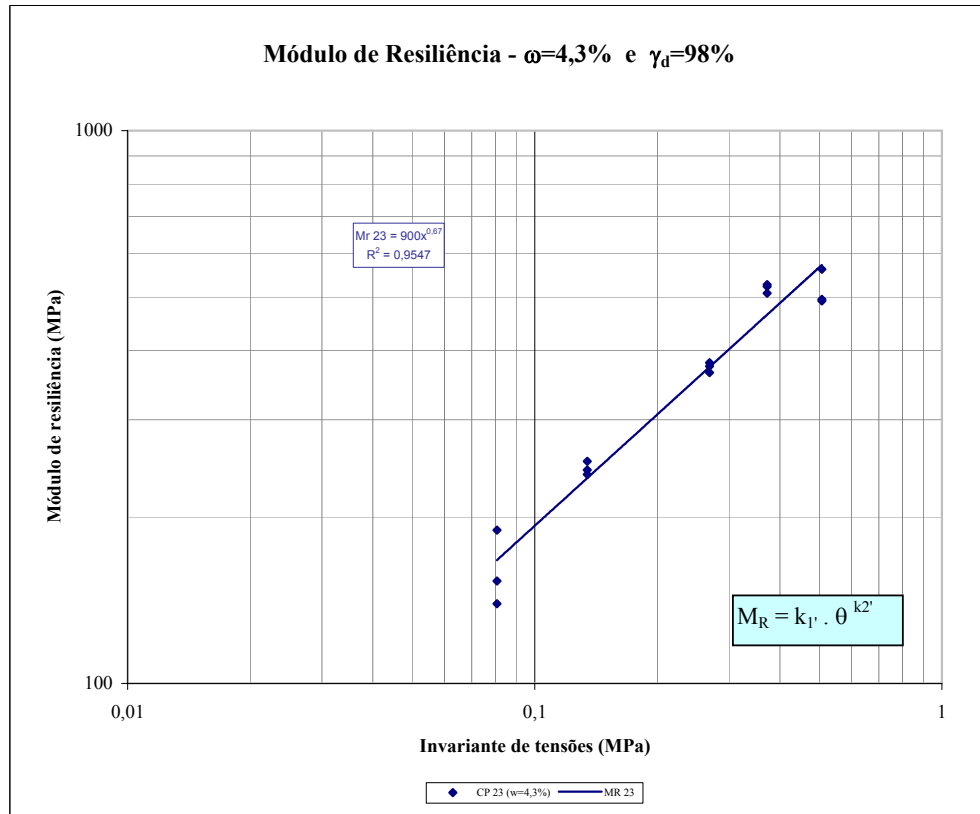
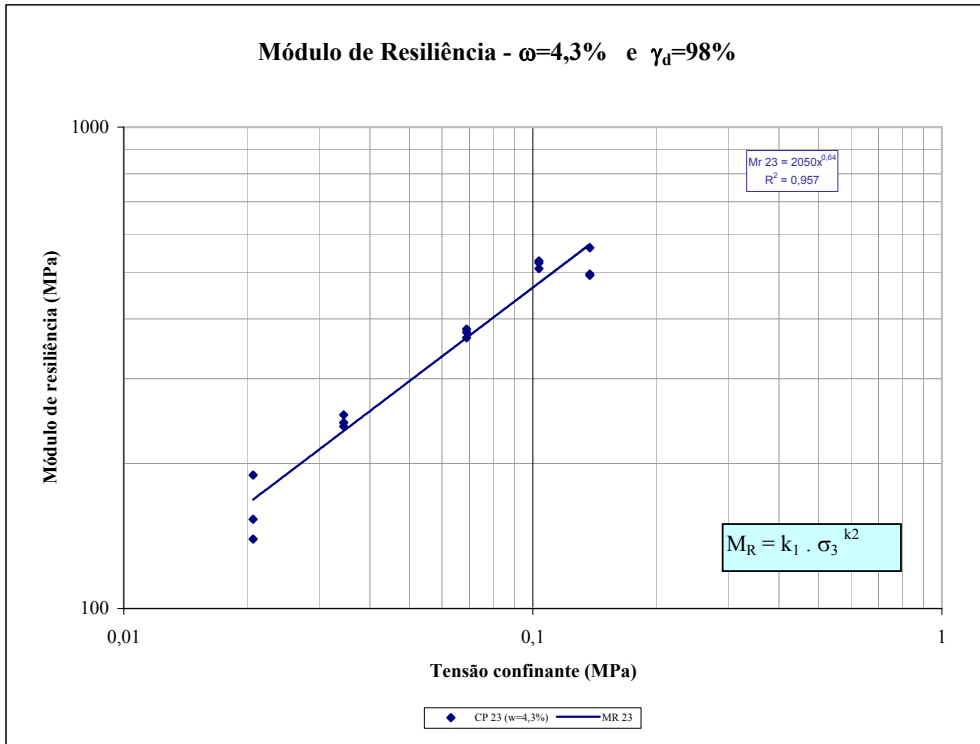
w 2% abaixo da w ot

BASALTO 02



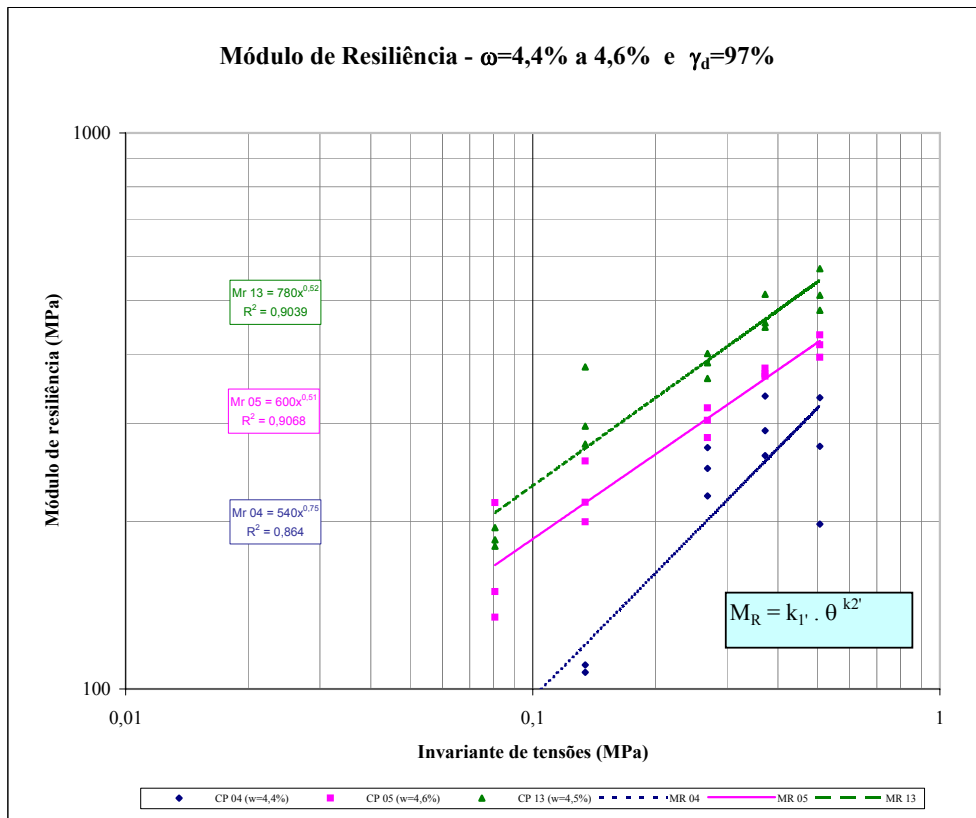
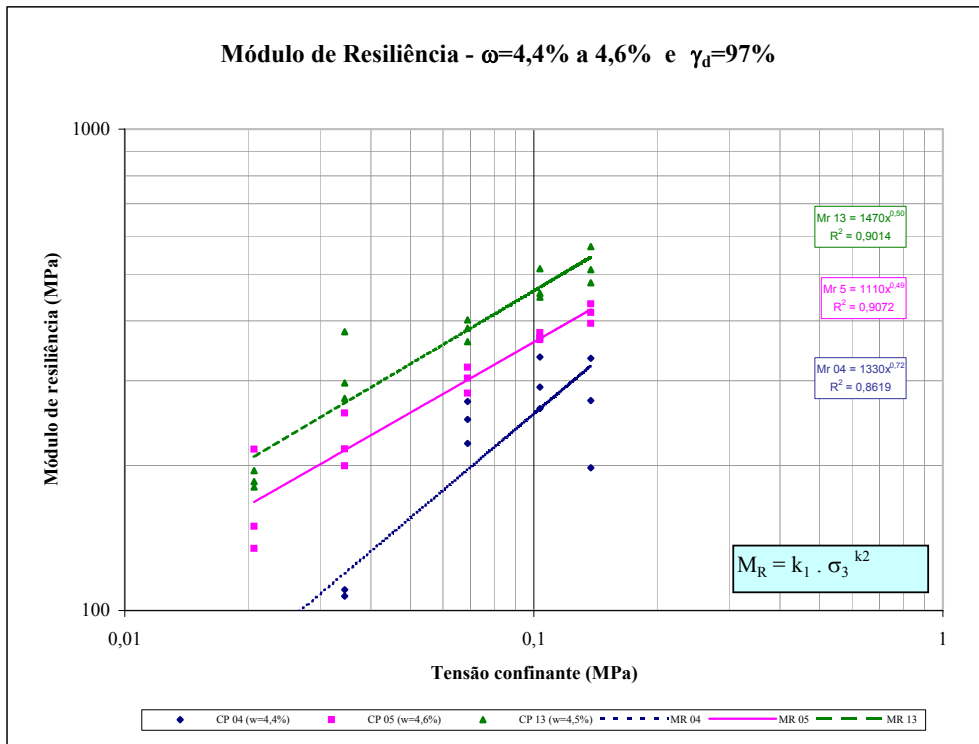
w 2% abaixo da w ot

BASALTO 02

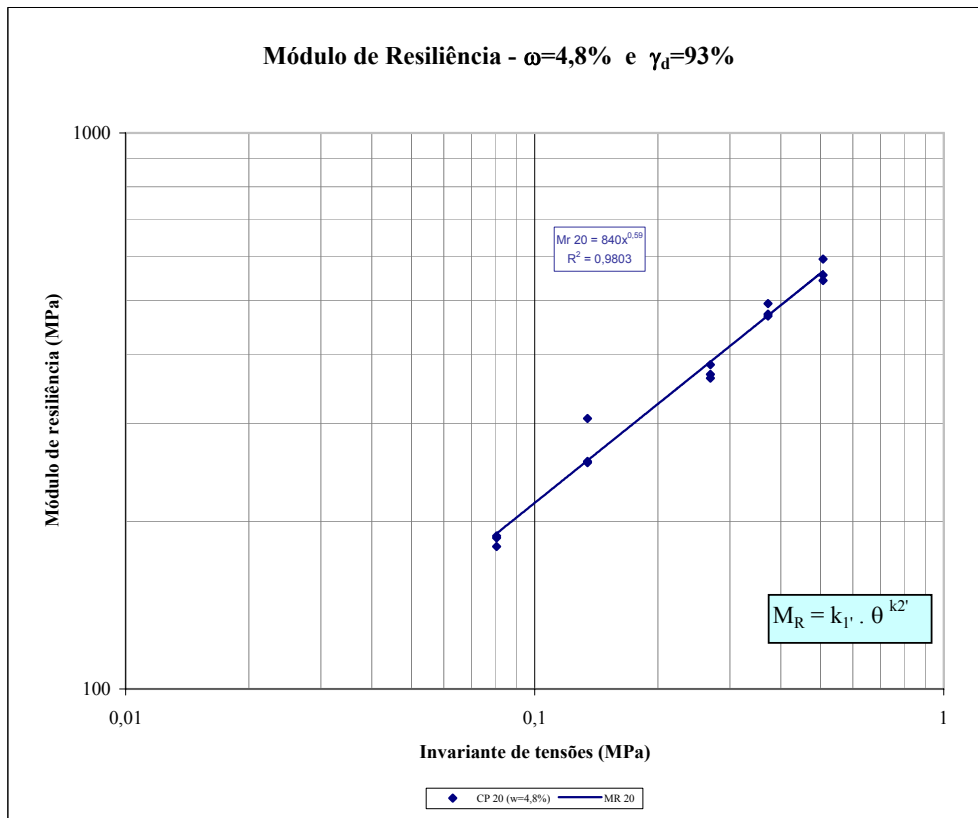
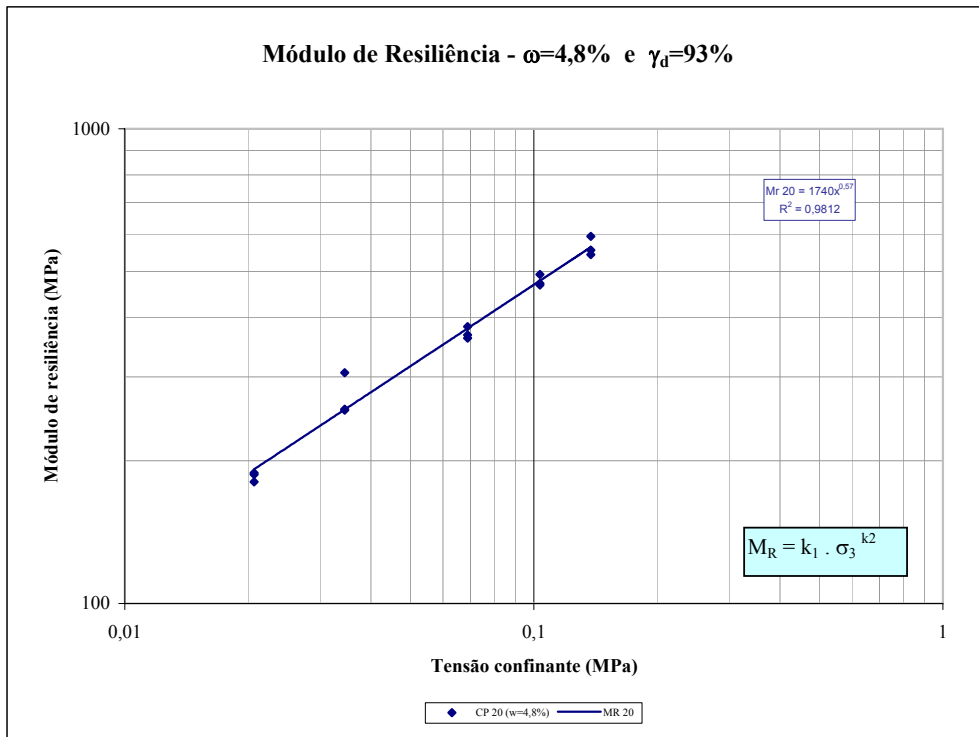


w 2% abaixo da w ot

BASALTO 02



w 2% abaixo da w ot



w 2% abaixo da w ot

BASALTO 02