



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PRAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CAUÊH CASTRO NOTARO

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS SOLOS EM UMIDADES PRÓXIMAS
AOS LIMITES DE ATTERBERG, UTILIZANDO O SQUEEZE-FLOW

RECIFE - PE

2012

CAUÊH CASTRO NOTARO

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS SOLOS EM UMIDADES PRÓXIMAS
AOS LIMITES DE ATTERBERG, UTILIZANDO O SQUEEZE-FLOW

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.

RECIFE – PE

2012

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS SOLOS EM UMIDADES PRÓXIMAS
AOS LIMITES DE ATTERBERG, UTILIZANDO O SQUEEZE-FLOW.

CAUÊH CASTRO NOTARO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado por:

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.
Curso de Engenharia Civil – UNICAP
Presidente

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira.
Curso de Engenharia Civil – UNICAP
Examinador Interno

Prof. Dr. Marcos Massao Futai
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica –
USP
Examinador Externo

Prof. Dr. Vanderley M. Jonh,
Departamento de Engenharia de Construção Civil e
Urbana – USP
Examinador Externo

RECIFE – PE
2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sua excelente bondade e graça. A minha preciosa mãe e aos meus familiares.

Aos professores Vanderley John (idealizador do estudo da reologia em solos), Massao Futai e Rafael Pileggi, por tornarem possível o estágio de pesquisa na Universidade de São Paulo e por terem se disponibilizado em ajudar na pesquisa.

Aos Professores Romilde Almeida e Fernando Arthur por terem contribuído na participação da banca prévia.

Aos Professores Silvio Romero e Joaquim de Oliveira a quem devo muita honra, pela participação e apoio em todo tempo e pela convivência com pessoas éticas e profissionais.

Ao projeto PROCAD (Programa de Cooperação Acadêmica), que possibilitou a interação entre a Universidade Católica de Pernambuco e a Universidade de São Paulo.

A CAPES por propiciar o programa de bolsa estudantil. E a Universidade Católica de Pernambuco pelo suporte acadêmico e por ser uma organização institucional pela qual me formei e tenho muito apreço.

RESUMO

O estudo do comportamento reológico relacionando a interação entre as partículas do solo com o fluido é de grande importância para o desempenho e aplicação em obras de engenharia. A reologia é mais utilizada na Engenharia Civil para avaliar a interação entre as partículas sólidas e a água em pasta, argamassa e concreto. Saibro é um material incoerente, originado pelo intemperismo incipiente de rochas graníticas, contendo grande quantidade de fragmentos pequenos de feldspatos e quartzo, além de outros minerais acessórios da rocha e é utilizado em argamassa. A presente pesquisa tem por objetivo caracterizar e avaliar o comportamento reológico de cinco Solos com diferentes consistências e de nove Saibros da Região Metropolitana do Recife (RMR) usados em argamassas, através de métodos convencionais de avaliação da consistência dos solos, como limites de liquidez e plasticidade e comparar com o comportamento obtido em ensaio com o Squeeze-Flow. O ensaio para o estudo da reologia consiste na compressão da amostra por meio de duas placas paralelas, medindo-se, simultaneamente, a carga aplicada e o deslocamento resultante. Foram obtidos os valores dos limites de consistências obedecendo às recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas. As amostras foram moldadas, no formato cilíndrico com diâmetro de 101 mm e altura de 10 mm, nas mesmas umidades utilizadas para a obtenção do limite de liquidez no aparelho de Casagrande e nas umidades correspondentes ao limite de liquidez e de plasticidade e posteriormente comprimidas com medidas de deslocamento e carga. Os resultados mostram que os materiais mais argilosos apresentam maiores valores dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade. Os dados obtidos nos ensaios com o Squeeze-Flow mostram a influência da quantidade de água na mistura com o solo e a curva carga versus deslocamento que apresenta comportamento elástico, plástico e plástico com endurecimento dependendo da quantidade de água, de finos e da consistência dos materiais. O estudo da interação entre as partículas e a água utilizando o Squeeze-Flow mostrou que a técnica é capaz de aferir e avaliar, com sensibilidade a forma da curva carga versus deslocamento dos materiais estudados para análise do comportamento utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Reologia; Limites de Atterberg; Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade.

ABSTRACT

The study of the rheological behavior relating the interaction between the soil particles with the fluid is of great importance for the performance and application engineering works. The rheology is most used in Civil Engineering to evaluate the interaction between the solid particles and water paste, mortar and concrete. Clay is a material inconsistency, caused by the incipient weathering of granitic rocks, containing large amounts of small fragments of feldspar and quartz, and other accessory minerals of the rock and is used in mortar. This research aims to characterize and evaluate the rheological behavior of five soils with different consistencies and nine grit of the Metropolitan Region of Recife (RMR) used in mortars, through conventional methods of assessing the consistency of the soil, such as limits on liquidity and plasticity and compare with the behavior obtained in the test with the Squeeze-Flow. The test for the study is the compression rheology of the sample by means of two parallel plates, measuring both the applied load and resultant displacement. We obtained the values of consistency limits of complying with recommendations of the Brazilian Association of Technical Standards. The samples were molded in a cylindrical shape with a diameter of 101 mm and height 10 mm, the same water content used to obtain the liquid limit of the apparatus Casagrande and moisture corresponding to the liquid limit and plasticity and subsequently compressed by measures load and displacement. The results show that the more clayey materials present higher liquidity limits and plasticity indexes. The data obtained in tests with the Squeeze Flow show the influence of the amount of water to mix with the ground and the load versus displacement curve which has elastic behavior, plastic and plastic hardness depending on the amount of water, and the consistency of fine material. The interaction between particles and water using the Squeeze-Flow showed that the technique is able to assess and evaluate, with sensitivity to the shape of load versus displacement curve of the studied materials used for the analysis of behavior.

KEYWORDS: Rheology, Atterberg Limits, Liquidity Limits, LimitsPlasticity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO.....	18
1.2 – OBJETIVOS.....	21
1.2.1 – Objetivo Geral.....	21
1.2.2 – Objetivos Específicos.....	21
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 – MATERIAL TEÓRICO.....	23
2.2 – ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	23
2.2.1 - Origens dos Solos.....	23
2.2.2 - Tamanho das Partículas.....	24
2.2.3 - Morfologia dos Grãos.....	25
2.2.4 Estado de Consistência e Limites de Atterberg.....	26
2.3 – REOLOGIA.....	30

2.3.1 – Fluidos.....	30
2.3.2 - Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos.....	31
2.3.3 – Viscosidade.....	31
2.3.4 – Tensão Superficial.....	32
2.3.5 – Empacotamento de Partículas.....	33
2.3.6 – Influência da Umidade.....	33
2.3.7 – Distância de Separação Entre Partículas.....	34
2.4 - SQUEEZE-FLOW.....	35
2.4.1 – Curva Carga versus Deslocamento Típica Obtida no Squeeze-Flow.....	35
2.4.2 – Teor de Ar Incorporado.....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 - SOLOS E SAIBROS.....	39
3.2 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	40
3.2.1 - Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Granulometria.....	40
3.3 - SQUEEZE-FLOW.....	41

3.3.1 - Características do Equipamento Squeeze-Flow.....	41
3.3.2 - Descrição dos Componentes Utilizados no Equipamento Squeeze-Flow.....	43
3.4 - ENSAIOS REOLÓGICOS – SQUEEZE-FLOW.....	44
3.4.1 - Procedimentos dos Ensaios Reológicos dos Solos.....	44
3.4.2 - Procedimentos dos Ensaios Reológicos dos Saibros.....	45
3.5 - CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA DECLIVIDADE.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 - GRANULOMETRIA E CONSISTÊNCIA.....	48
4.1.1 - Análise dos Limites de Consistência.....	48
4.2 - COMPORTAMENTO REOLÓGICO.....	50
4.2.1 - Forma das Curvas de Carga versus deslocamento para os Solos nas Umidades correspondentes ao WL e WP.....	50
4.2.2 - Forma das Curvas Carga Versus Deslocamento dos Saibros nas Umidades Correspondentes ao WL e WP.....	52
4.2.3 - Forma das Curvas Carga Versus Deslocamento Associada à Porcentagem de Silte + Argila, nos Saibros.....	53
4.2.4 - Formas dos Corpos de Prova Após os Ensaios com o Squeeze-Flow.....	55

4.3 - ANÁLISES DAS DECLIVIDADES DAS CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO DOS SOLOS E SAIBROS.....	58
4.4 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS NO SQUEEZE-FLOW.....	59
4.4.1 Para os Solos.....	60
4.4.2 Para os Saibros.....	63
4.5 - ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DE GRANULOMETRIA, CONSISTÊNCIA E CURVAS DE CARGA X DESLOCAMENTO DOS SAIBROS.....	69
4.6 ANÁLISES DOS DADOS DOS ENSAIOS REOLÓGICOS DOS SOLOS E SAIBROS.....	77
4.7 CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS ATRAVÉS DO SQUEEZE-FLOW.....	80
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	82
5.1 – CONCLUSÕES.....	82
5.2 – SUGESTÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
APÊNDICE A.....	88
APÊNDICE B.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Morfologia de grãos de solos (CARDOSO, 2009).....	26
Figura 2.2. Escoamento teórico de uma partícula em um líquido (PILEGGI, 2001).....	32
Figura 2.3. Apresenta a existência de trincas e rompimentos, comprovando a perda de coesão e capacidade de deformação plástica (CARDOSO, 2009).....	34
Figura 2.4. Representação esquemática do conceito de distância de separação entre partículas (D): (a) partículas em contato, sem umidade, ou a mesma preenche os vazios entre estas e, (b) partículas separadas pela umidade (PILEGGI, 2001).....	35
Figura 2.5. Curva típica do ensaio do squeeze-flow com controle por deslocamento expresso na forma de carga versus deslocamento, apresenta três regiões bem definidas, conforme demonstrado no gráfico (CARDOSO, 2009).....	37
Figura 2.6. Curvas carga versus deslocamento, referentes a seis tipos de argamassas (CARDOSO, 2009).....	38
Figura 2.7. Porcentagem de agregados, ar, componentes finos e água. Referentes a ensaios em argamassas (CARDOSO, 2009).....	38
Figura 3.1. Caracterização Granulométrica dos Saibros.....	41
Figura 3.2. Componentes do Equipamento Squeeze-Flow (CARDOSO, 2009).....	42
Figura 3.3. Equipamento Squeeze-Flow (imagem do autor).....	42

Figura 3.4. Preparação de moldagem para a realização do ensaio - (1) Gabarito; (2) Anel para moldagem com 101 mm de diâmetro; (3) Prato ou placa inferior. (imagem do autor).....	43
Figura 3.5. Detalhe do equipamento pronto para a realização do ensaio - (4) Punção – 50,8mm de diâmetro. (imagem do autor).....	44
Figura 3.6. Retirada do material para secagem em estufa (imagem do autor).....	46
Figura 3.7. Modelo - curva de carga versus deslocamento quanto às análises das declividades, divididos em cinco regiões.....	47
Figura 4.1. Umidades dos ensaios tradicionais relacionados aos Limites de Liquidez dos Saibros, no aparelho de Casagrande.....	49
Figura 4.2. Curva carga versus deslocamento dos Solos nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade.....	51
Figura 4.3. Curva carga versus deslocamento dos Solos nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez.....	51
Figura 4.4. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade.....	52
Figura 4.5. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez.....	53
Figura 4.6. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, referentes à quantidade de Silte + Argila maiores ou menores do que 50%.....	54

Figura 4.7. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas unidades correspondentes aos Limites de Liquidez, referentes à quantidade de Silte + Argila maiores ou menores do que 50%.....	55
Figura 4.8. Formas dos corpos de prova dos Solos e Saibros ao final do ensaio: (a) e (b) Saibro J13A3 na unidade correspondente ao Limite de Plasticidade, (c) Saibro J8A1, na unidade correspondente ao Limite de Plasticidade, Figuras (d), (e), (f), (g) e (h), nas unidades próximas correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros J9A4 e J24A1, e dos Solos, Bentonita, Laterítico e Bentonita, consecutivamente.....	57
Figura 4.9. Curva carga versus deslocamento – Silte.....	60
Figura 4.10. Curva carga versus deslocamento – Caulim.....	61
Figura 4.11. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (50%) + Caulim (50%).....	61
Figura 4.12. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (WP).....	62
Figura 4.13. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (WL).....	62
Figura 4.14. Curva carga versus deslocamento – Solo Laterítico.....	63
Figura 4.15. Curva carga versus deslocamento – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	64
Figura 4.16. Curva carga versus deslocamento – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	64
Figura 4.17. Curva carga versus deslocamento – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	65

Figura 4.18. Curva carga versus deslocamento – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	66
Figura 4.19. Curva carga versus deslocamento – Saibro J11A1 (WP) (* - Umidade do WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	67
Figura 4.20. Curva carga versus deslocamento – Saibro J11A1 (WL) (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	67
Figura 4.21. Curva carga versus deslocamento – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	68
Figura 4.22. Curva carga versus deslocamento – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	68
Figura 4.23. Curva carga versus deslocamento – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	69
Figura 4.24. Curva carga versus deslocamento – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	69
Figura 4.25. Análise integrada do Saibro J8A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	70
Figura 4.26. Análise integrada do Saibro J13A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	71
Figura 4.27. Análise integrada do Saibro J9A4 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	72

Figura 4.28. Análise integrada do Saibro J24A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	72
Figura 4.29. Análise integrada do Saibro J11A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	73
Figura 4.30. Análise integrada do Saibro J11A1 (WL) – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	74
Figura 4.31. Análise integrada do Saibro J10A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	75
Figura 4.32. Análise integrada do Saibro J9A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	75
Figura 4.33. Análise integrada do Saibro J12A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	76
Figura 4.34. Análise integrada do Saibro J19A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).....	76
Figura 4.35. Curva carga x deslocamento correspondente à umidade no Limite de Liquidez.....	80

Figura 4.36. Curva carga x deslocamento correspondente à unidade no Limite de Plasticidade.....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Limites de Liquidez, de Plasticidade, e IP dos Solos.....	39
Tabela 3.2. Ensaio Granulométrico dos Saibros.....	40
Tabela 4.1. Frações Granulométricas dos Solos, Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade.....	48
Tabela 4.2. Declividades das Curvas Carga x Deslocamento dos Limites de Plasticidade e dos Limites de Liquidez dos Solos.....	58
Tabela 4.3. Declividades das Curvas Carga x Deslocamento dos Limites de Plasticidade e dos Limites de Liquidez dos Saibros.....	59
Tabela 4.4. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Liquidez dos Solos.....	77
Tabela 4.5. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Liquidez dos Saibros.....	78
Tabela 4.6. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Plasticidade dos Solos.....	79
Tabela 4.7. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Plasticidade dos Saibros.....	79
Tabela 4.8. Fatores influentes na forma da curva carga versus deslocamento em umidades correspondentes ao Limite de Liquidez.....	81

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Esta dissertação buscou a interação entre a reologia e a geotecnia, para agregar ao estudo dos solos um aprofundamento de conhecimento. Este estudo utilizando essa integração de conhecimentos é um estudo pioneiro, que se inicia com esta dissertação, entre outras que surgirão, e que contribui para fomentar um aprofundamento do conhecimento, que pode resultar em substituição de métodos em parte ou formular novos métodos de ensaios para solos. A reologia já é utilizada por outras áreas da engenharia civil e do conhecimento, entre outras áreas afins, como por exemplo, a indústria de alimentos, cosméticos, materiais cerâmicos, compósitos polimérico, entre outros.

Os solos analisados possuem fatores que influenciam com relevância os resultados dos ensaios, um fator da interação entre as partículas é um fator que interfere nos resultados dos ensaios de maneira significativa, outro fator está relacionado à quantidade de umidade contida no solo, este fator é o mais importante por resultar no comportamento do solo em seus estados líquido, plástico, ou semi-sólido. E um fator que não é de menor importância é a origem do solo, pois, ela pode interferir significativamente nos resultados dos ensaios, associada as interferências já citadas quanto aos demais componentes de interferência relacionados.

Um fator que influencia significativamente no comportamento reológico da distância de separação entre as partículas é a quantidade de umidade contida no material. Pois, quando a umidade no solo é inferior ou igual à porosidade das partículas, o solo não apresenta plasticidade ou não ocorre um deslocamento significativo, isto porque as partículas encontram-se em contato mútuo. Entretanto, quando o teor de água for maior e exceder a porosidade e recobrir a superfície das partículas, isto ocasiona uma significativa separação entre as mesmas, que resulta em um material plástico, ou com um maior deslocamento.

O formato das partículas é um fator importante quanto aos resultados obtidos através dos ensaios reológicos. Caso as partículas apresentem formatos esféricos, triangulares, hexagonais, entre outros, resultam em comportamentos diferentes, um conceito quanto à morfologia das partículas é, quando mais afastado do formato esférico for à partícula, menor é a capacidade plástica do material. Esse resultado é oriundo da fricção que ocorre nos grãos devido ao contato com as superfícies irregulares. Outro conceito existente é quanto menor for o tamanho das partículas o efeito se torna maior, em função da maior área de superfície específica. Não possui na literatura, regras que estabeleçam quantitativamente o comportamento da morfologia das partículas referente à exatidão da plasticidade do material, existindo uma avaliação somente qualitativa.

O Saibro é muito utilizado na engenharia civil como material plastificante na mistura da argamassa de revestimento, aumentando o volume e a trabalhabilidade do material. O emprego do Saibro é muito utilizado no Recife Metropolitana do Recife (RMR) e em várias partes do Brasil. O Saibro foi selecionado para esta dissertação devido aos esforços de estudos sobre este material realizados por REGO (2008) e FERREIRA (2010), que ocasionou em uma continuidade de análises sobre o ponto de vista reológico.

O Saibro é um material de característica incoerente, resultante do intemperismo incipiente de rochas graníticas, existindo em sua composição uma elevada quantidade de fragmentos pequenos de feldspatos e quartzo, além de outros minerais acessórios da rocha. O Saibro é o resultado do início da decomposição de uma rocha e possui uma constituição mineralógica e química muito variável. Quanto à exploração do Saibro é de difícil acesso a obtenção desse material, provocando significativas mudanças no aspecto do terreno, pois para atingi-lo é necessário retirar a cobertura do solo que pode ser muito espessa. Quanto ao Brasil, é comum encontrar Saibro abaixo de camadas profundas, que podem atingir 30 ou mais metros.

A Reologia ou estudo dos fluidos quanto à deformação dos materiais, refere-se a importantes conhecimentos quanto a materiais que se encontram neste estado. A pesquisa analisa solos que estão no limite da transição do estado líquido para o estado plástico (Limite de Liquidez), e nos pontos de umidades próximos a esse limite, e no

limite da transição do estado plástico para o estado semi-sólido (Limite de Plasticidade). Isto torna o estudo reológico de fundamental importância para entender melhor o comportamento desses materiais por meio de análises mais detalhadas em relação aos métodos tradicionais.

A reometria realizada por meio do Squeeze-Flow se caracteriza na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas. Quanto ao método, é simples e versátil, tornando-se capaz de avaliar com precisão materiais em ampla faixa de consistência e em velocidades e medidas de deformações variáveis. É importante destacar que a mudança geométrica inerente ao ensaio, que simula fenômenos de restrição similares aos que ocorrem durante as etapas da aplicação dos materiais, faz que a técnica seja importante para a avaliação reológica.

A dissertação utilizou solos aqui denominados de: Silte; Caulim; Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%); Bentonita; e Solo Laterítico, e nove Saibros (J8A1; J9A3; J9A4; J10A1; J11A1; J12A1; J13A3; J19A3; e J24A1). A dissertação comparou os dados obtidos através dos ensaios tradicionais quanto às umidades correspondentes aos Limites de Liquidez e aos Limites de Plasticidade, referentes aos ensaios reológicos realizados por meio do Squeeze-Flow.

Esta pesquisa está inscrita no projeto PROCAD (Programa de Cooperação Acadêmica), que possibilitou a realização de parte da pesquisa através da interação da Universidade Católica de Pernambuco, com a escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Isto ocorreu por meio de duas etapas de realizações dos ensaios, nos Laboratórios de Microestruturas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a realização da primeira etapa, no período de novembro/dezembro de 2010, e a segunda etapa de realizações dos ensaios ocorreu no período de maio/junho de 2011, ambas com duração de um mês.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento reológico dos solos em umidades próximas aos Limites de Liquidez e de Plasticidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física dos Solos e Saibros.
- Utilizar a técnica do ensaio do Squeeze-Flow em solos.
- Analisar as curvas carga versus deslocamento para diferentes tipos de solos com variações de umidades.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 – **Introdução**. A pesquisa estudou solos quanto à comparação dos resultados tradicionais dos Limites de Liquidez e de Plasticidade em relação aos ensaios reológicos por meio do Squeeze-Flow, que é um importante meio de aprofundamento dos estudos geotécnicos.

Capítulo 2 – **Revisão Bibliográfica**. A revisão bibliográfica seguiu duas vertentes, uma sobre o estudo das características físicas dos solos, e a outra referente aos estudos reológicos.

Capítulo 3 – **Materiais e Métodos**. Apresenta os tipos e as origens dos materiais analisados e os métodos dos ensaios geotécnicos e reológicos.

Capítulo 4 – **Resultados e Discussões**. Apresenta análises e discute os ensaios tradicionais dos Limites de Liquidez, dos Limites de Plasticidade e reológicos referentes

às umidades próximas aos Limites de Liquidez e de Plasticidade dos materiais estudados.

No capítulo 5 são apresentadas às conclusões dos resultados quanto aos solos e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAL TEÓRICO

Para esta pesquisa ocorreu o levantamento bibliográfico necessário para um aprofundamento do tema em questão, servindo como ferramenta para uma análise fundamentada em bases teóricas. O estudo bibliográfico teve uma fundamentação teórica em dois assuntos fundamentais: o estudo das características físicas dos solos (incluindo limites de liquidez e limites de plasticidade), e o estudo referente à reologia.

2.2 ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS

2.2.1 Origens dos Solos

Segundo PINTO (2000). A origem da formação dos solos é na degeneração das rochas que formavam inicialmente a crosta terrestre. A decomposição destes solos é proveniente de agentes físicos e químicos. As trincas que são decorrentes das variações de temperaturas, pelas quais ocorrem a penetram da água, atacam quimicamente os minerais. Com a ocorrência do congelamento da água entre as trincas, entre outros fatores, favorece a elevação das tensões, com isto ocorre à fragmentação dos blocos.

“Por decomposição química entende-se o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição.” (CAPUTO, 1996)

Para GUSMÃO FILHO (2008). As definições morfológicas principais dos solos, tanto as externas quanto as internas, empregam critérios consagrados como padrões pelas instituições de ciências dos solos. Com relação às propriedades morfológicas externas são destacados o relevo, a drenagem, a erosão, a vegetação, os materiais rochosos e o uso atual, que possui influência preponderante no planejamento de obras de engenharia.

As propriedades morfológicas internas são os tipos de horizontes, a espessura e transição entre os mesmos, a cor, textura, estrutura, consistência, entre outros, por influenciarem na maioria dos parâmetros utilizados nos solos.

De acordo com FERREIRA (2010). A origem do termo Saibro vem do Latim "sabulu" e significa uma mistura argila e areia grossa, produto da decomposição de rochas feldspáticas, principalmente granitos ou gnaisses, onde pode observar a textura primitiva da rocha. O Saibro é um material proveniente da decomposição do granito ou gnaiss que conserva o vestígio da rocha de origem. Em um perfil de solo, o Saibro é encontrado entre o solo maduro (evoluído) e a rocha de origem ou matriz, ainda não decomposta, sendo identificado pelo pedólogo como horizonte C e o geotécnico com Saprolítico (solo jovem). É comum encontrar Saibro no Brasil abaixo de camadas profundas de solo, que podem atingir 30 metros, ou superar essa profundidade.

2.2.2 Tamanho das Partículas

Para PINTO (2000), a principal característica que diferencia os solos está relacionada ao tamanho das partículas que o constitui. É possível destacar que alguns solos possuem grãos que são perceptíveis na observação natural do ser humano sem a utilização de equipamentos de ampliação de imagens, como por exemplo, os grãos de pedregulho ou a areia do mar, e outros possuem grãos muito finos, que se molhados, se transformam numa pasta (barro), desta maneira, não é possível visualizar as partículas individualmente.

Segundo CAPUTO (1996). Com relação às dimensões das partículas e de acordo com estabelecidos limites convencionais, as frações que constituem os solos recebem identificações próprias que correspondem com as definições usuais dos termos. As frações, referentes aos padrões da escala granulométrica brasileira ABNT (1984), são: pedregulho – que constitui um conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 e 4,8 mm; areia – é caracterizada entre o diâmetro de 4,8 e 0,005 mm; silte – corresponde entre 0,05 e 0,005 mm; e argila – representa as partículas inferiores a 0,005 mm.

De acordo com COSTA (1979). A constituição da argila é proveniente de um conjunto de partículas minerais, podendo conter em sua parte menos fina, uma certa quantidade de minerais primários (como quartzo, mica, etc.). Em sua predominância é constituído de minerais secundários: minerais de argila e óxido e hidróxido de alumínio e de ferro, resultantes da alteração de minerais primários. Quanto aos minerais de argilas, que se diferenciam de um para outro tipo de solo, geralmente são os principais componentes constituintes da argila.

“Bentonita é o nome genérico da argila composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita (55-70%). As bentonitas são argilas ultra-finas, em sua composição predomina a montmorilonita, que explica sua tendência ao inchamento.” (CAPUTO, 1996)

2.2.3 Morfologia dos Grãos

As diferentes formas dos grãos de solos podem ser vista na Figura 2.1. Sobre a morfologia dos grãos é importante destacar que os formatos das partículas influenciam no comportamento dos solos. Existem três principais tipos de morfologias de partículas. A primeira se refere a um formato arredondado, predominam nos pedregulhos, areias e siltes. O segundo tipo possui um formato laminar, são encontrados nas argilas. E o terceiro tipo possui um formato fibrilar, existentes em solos turfosos.

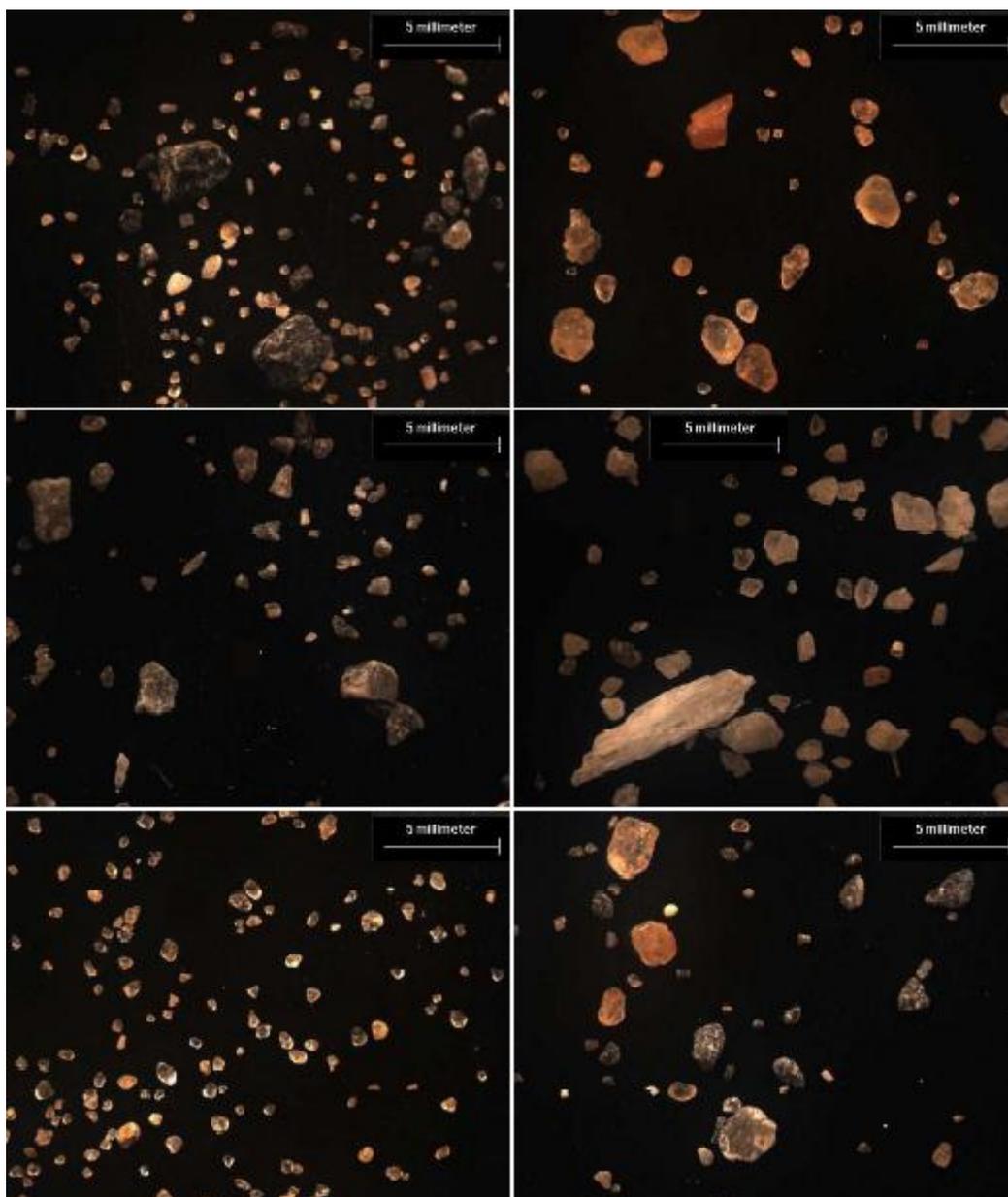


Figura 2.1. Morfologia de grãos de solos (CARDOSO, 2009).

2.2.4 Estado de Consistência e Limites de Atterberg

Estado de Consistência

Quanto a Umidade (w) gravimétrica do solo corresponde a razão entre o peso da água (P_a) contida em um certo volume de solo e o peso da parte sólida (P_s) existente neste mesmo volume, expressa em porcentagem.

$$W\% = Pa \times 100 / Ps$$

Existem diferentes estados que o solo pode possuir, isto depende da quantidade de água em seus espaços vazios. Sua determinação é simples: basta determinar o peso da amostra no seu estado natural (é importante destacar que a amostra examinada não deve perder umidade) e o peso depois de concluída a secagem em uma estufa a 105° C ou 110° C. O seu valor pode variar entre limites muito afastados. As argilas do México, por exemplo, apresentam a porcentagem de umidade no patamar de 400%. Esse índice é muito significativo, principalmente para os solos argilosos, que tem sua resistência dependendo dessa porcentagem de água.

Estado líquido – solo com umidade muito elevada, é constituído como um fluido denso.

Estado plástico – devido à evaporação da água, o solo endurece, e de acordo com a umidade existente, ou $W = WL$ (limite de liquidez) ele perde a propriedade de fluir, porém, pode ser moldado e conservar sua forma.

Estado semi-sólido – com a continuação da diminuição de umidade, o estado plástico desaparece até que, de acordo com a quantidade de umidade, ou $W = WP$ (limite de plasticidade) o solo se desmancha ao ser trabalhado.

Estado sólido – continuando a diminuição da umidade, ocorre à passagem sequencial para o estado sólido, de acordo com $W = WC$ (limite de contração).

De acordo com BRADY (1979), a nomenclatura usada para descrever as características físicas de um solo é a consistência do solo, que com diferentes porcentagens de umidade, conforme destacado pelo comportamento de um solo, quando submetido a esforços mecânicos e a manipulação. Os esforços são, destacados pela manipulação pessoal, manuseio pelo tato, ou mediante emprego de um instrumento de subsolagem. A constituição de um solo é considerada uma correspondência das propriedades do solo, que se encontram na dependência das forças de atração entre suas partículas de acordo com a influência da umidade do próprio solo. É considerada a consistência de um solo em três níveis de umidade: molhado, úmido e seco.

Segundo GRAVANDE (1972), quanto à consistência de um solo, este fator está relacionado às características do mesmo, que estão direcionadas em sua classe de conhecimento e adesão ou em sua resistência a deformação ou ruptura. Com relação aos fenômenos provenientes pela consistência do solo são: fragilidade, plasticidade, pegajosidade e resistência à compressão e as rupturas.

Segundo PINTO (2000), em um solo, apenas parte do volume total é ocupado pelas partículas sólidas que se encaixam formando uma estrutura. O volume remanescente é denominado de vazios, entretanto, esses vazios estão ocupados por água ou ar. O solo possui em sua constituição três fases: partículas sólidas, água e ar. O comportamento de um solo é referente à quantidade relativa de cada uma das três fases.

Limites de Atterberg

De acordo com ORTIGÃO (1993). Em de 1911, o agrônomo sueco Atterberg, dividiu as porcentagens de umidades que uma argila apresenta em limites correspondente ao estado aparente do material, seguindo a sequência de estado sólido, semi-sólido, estado plástico e estado líquido. O estudo foi desenvolvido posteriormente por Casagrande, que projetou um equipamento para a realização do ensaio para a determinação do limite de liquidez, sendo este equipamento empregado em todo o mundo e padronizado no Brasil.

Limite de Liquidez – ABNT (1984)

WL – É o percentual elevado de umidade de um solo, ele apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. Quando ocorre a evaporação da água, o material endurece e, para uma porcentagem de umidade, ou $W = WL$ (limite de liquidez), perde sua capacidade de fluir. Entretanto, pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. O solo encontra-se, agora, no estado plástico. Este limite entre o estado líquido para o estado plástico, é denominado Limite de Liquidez.

De acordo com ORTIGÃO (1993), no ensaio referente ao limite de liquidez, ocorre inicialmente o destorroamento e a homogeneização de uma amostra de solo, para determinar sua umidade. Posteriormente a amostra é colocada no recipiente do aparelho,

fazendo-se então um sulco longitudinal. O recipiente contendo a amostra é deixado cair de uma altura padrão, batendo sobre a base do aparelho, e o número de golpes necessário para provocar o fechamento desse sulco é registrado. Adicionando água à amostra, vai-se repetindo o procedimento, com variações nos percentuais de umidade das amostras. Os resultados são representados em um gráfico, que especifica o número de golpes versus umidade para a determinação do limite de liquidez.

Método do Penetrômetro de Cone

O método do Penetrômetro de Cone, de acordo com Souza (2000), é realizado pela iniciação da calibração do penetrômetro de cone, verifica se sua ponta está adequadamente afiada e se sua massa pesa aproximadamente 80 g, estando estes requisitos adequados, é colocada sobre uma superfície de vidro a amostra preparada, esta amostra é colocada na cápsula do aparelho para efetuar a medição, enche até o topo e pressiona contra as paredes e o fundo da cápsula, o início é do centro para as laterais, para evitar a formação de bolhas de ar dentro da amostra, a ponta do cone tem que tangenciar a superfície da amostra, o aparelho é travado e zerado, posteriormente é liberado o cone, ele penetra na amostra durante 5 s, programados no temporizador do aparelho. O valor da profundidade de penetração atingida pelo cone é observado na escala do penetrômetro, retira aproximadamente 15 g do ponto de penetração, para determinação da umidade. É determinado que o intervalo de valores de penetração do cone na amostra esteja na faixa de 15 a 25 mm. O solo restante na cápsula é retirado e agregado ao resto da amostra contida na placa de vidro, prosseguindo, adiciona um pouco de água, formando uma nova pasta, e desta maneira se repete o ensaio. Este procedimento é realizado mais três vezes, obtendo-se quatro pares dos valores de penetração e umidade, para cada repetição. É representada em um gráfico, a leitura da penetração na ordenada e a umidade na abscissa, traça uma reta que melhor se ajusta aos pontos e o valor de umidade correspondente a 20 mm de penetração, e com isto, é considerado o limite de liquidez deste método.

Limite de Plasticidade – ABNT (1984)

O estado plástico é proveniente da diminuição de umidade com relação ao percentual de umidade encontrado no limite de liquidez. O estado plástico desaparece até que, para $W = WP$ (limite de plasticidade), o solo se desmancha ao ser trabalhado. Passando para o estado semi-sólido. A transição do estado plástico para o estado semi-sólido, é denominado de Limite de Plasticidade.

Segundo ORTIGÃO (1993), quanto ao limite de plasticidade, o ensaio é padronizado pela ABNT (1984), consta do percentual de determinação da umidade correspondente ao início do fraturamento de uma amostra cilíndrica de 3 mm de diâmetro. A amostra é rolada com a mão, em um movimento de vaivém, é verificado o percentual de umidade que a amostra começa a se partir para a determinação do valor do limite de plasticidade.

2.3 REOLOGIA

Segundo PILEGGI (2001), a reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando submetidos a uma determinada tensão ou solicitação mecânica externa. Existe a relação da reologia quanto à mecânica dos fluídos que estuda as propriedades físicas que interferem no transporte da quantidade de movimento em um fluido.

2.3.1 Fluidos

Segundo SCHIOZER (1996), os materiais provenientes da natureza, podem com relação aos aspectos da agregação, serem agrupados em várias classes. O agrupamento mais simples é o que forma duas classes: fluidos e sólidos. Em uma designação primária um fluido é uma substância que, de acordo com a ação de esforços, por menores que sejam, sofre deformações. Quanto a uma definição mais apropriadamente técnica é a que relata o fluido como toda substância incapaz de suportar, sem se deformar continuamente, efeitos de tensões de cisalhamento, por menores que estas sejam. Entretanto, um sólido elástico, quando submetido a tensões de cisalhamento, pode ou não deformar-se,

havendo deformação para valores de tensão acima de um mínimo, esta deformação é finita e proporcional às tensões, podendo no limite ocorrer ruptura.

2.3.2 Fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos

Segundo PILEGGI (2001). Ocorre uma relação proporcionada pelos fluidos newtonianos referentes à tensão e a taxa de cisalhamento, Entretanto, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento. De acordo com estes fluidos, o conceito clássico de viscosidade definido por Newton, não possui mais aplicabilidade, por não haver uma simples constante de proporcionalidade. A viscosidade deixa de ser uma simples característica intrínseca do fluido, para tornar-se dependente da taxa de cisalhamento e de vários outros fatores.

Segundo NAVARRO (1997), na maioria das vezes, o aparecimento dos comportamentos não-newtonianos é devido à formação e/ou, destruição de aglomerados de partículas, que são provenientes da ação do cisalhamento que propicia a orientação das partículas da fase dispersa no direcionamento do escoamento. Em meio a outros fatores que exercem influência, a aglomeração de partículas é mais eficiente quanto menor for à esfericidade das partículas, ou quanto maior for à atração eletrostática gerada pelo atrito durante o escoamento por cisalhamento.

2.3.3 Viscosidade

Para STREETER (1998), entre todas as características dos fluidos, a viscosidade demanda a maior importância nos estudos dos escoamentos. Quanto à natureza e as propriedades da viscosidade como as unidades e os fatores de conversão para as viscosidades absoluta e cinemática. Define-se a viscosidade como a propriedade de um fluido responsável pela resistência ao cisalhamento. A lei de Newton da viscosidade estabelece que para uma determinada velocidade de deformação angular de um fluido, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à viscosidade.

Segundo MASSEY (2002), mesmo que todos os fluidos proporcionem resistência às forças que favorecem o deslizamento de qualquer camada de fluido sobre as suas

camadas adjacentes, essa resistência apenas se manifesta quando há movimento relativo, ver Figura 2.2. A resistência referente ao movimento de cada camada do fluido, uma vez que o movimento entre as camadas vizinhas só se torna possível se houver forças tangenciais, (estas reações também são chamadas de forças de corte, isto é, forças paralelas às superfícies sobre as quais atuam, as forças que resistem às forças de corte tem que ter sentido oposto a estas, em concordância ao princípio de ação e reação), desta maneira, também paralelas a essas mesmas superfícies.

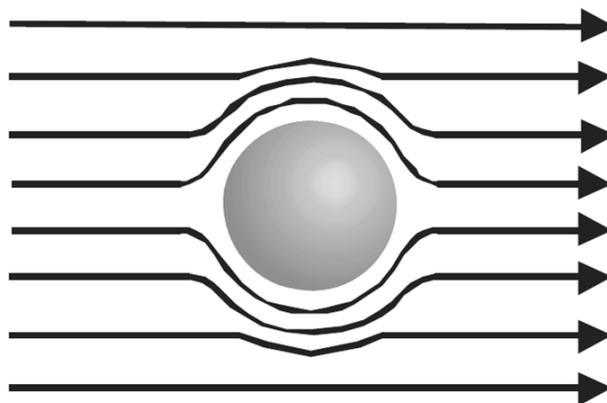


Figura 2.2. Escoamento teórico de uma partícula em um líquido (PILEGGI, 2001).

2.3.4 Tensão Superficial

Para SCHIOZER (1996), tensão superficial é uma grandeza física proveniente de forças de atração molecular. Uma partícula líquida, em decorrência de forças de atração entre suas moléculas e sem o efeito de outras forças, que não essa atração molecular, apresenta uma força esférica. Referente a uma partícula líquida que esteja relacionada à superfície de separação com outras fases gasosas ou líquidas. Esta partícula apresenta, na direção perpendicular à superfície, efeitos de forças que tendem a unir para o interior do meio mais denso, o que ocasiona em uma tendência de deformar a superfície para uma geometria não-plana, cuja área, portanto, cresce em relação à da superfície plana. Com isto, mais moléculas devem ser deslocadas do interior para a superfície, para garantir uma maior ocupação de área: para que isto ocorra, deve ser realizado trabalho, o que envolve energia. Este efeito, que resulta em energia potencial por unidade de área,

apresenta-se como força por unidade de comprimento e é denominada especificamente de tensão superficial.

2.3.5 Empacotamento de Partículas

O empacotamento de partículas pode ocorrer com baixa, média, ou alta densidade de acordo com a distribuição granulométrica disposta no material. O formato das partículas também interfere no resultado do empacotamento, por exemplo, partículas esféricas, triangulares, hexagonais, entre outras, apresentam comportamentos diferentes, um comportamento a observar é, quanto mais afastado do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento em uma distribuição granular. Isto é proveniente da fricção que ocorre nos grãos devido ao contato com as superfícies irregulares. Quanto menor for o tamanho das partículas o efeito é maior, em função da maior área superficial específica. Não é encontrado na literatura, regras que definam quantitativamente o comportamento da morfologia das partículas referentes à exatidão da densidade do empacotamento, existindo uma avaliação apenas qualitativa, PILEGGI (2001).

2.3.6 Influência da Umidade

A Figura 2.3, sofreu perda de água que ocasionou o aparecimento de trincas ou rompimentos, perda de coesão e capacidade de deformação plástica, que acarretou na redução da carga para deformação do material, devido ao rompimento do mesmo, decorrente da perda de coesão (CARDOSO, 2009). Este material é uma argamassa que apresentou algumas reações provenientes dos comportamentos químicos das argamassas, como por exemplo, a reação química da coagulação, porém, ocorreram processos semelhantes referentes aos solos que foram utilizados na dissertação.

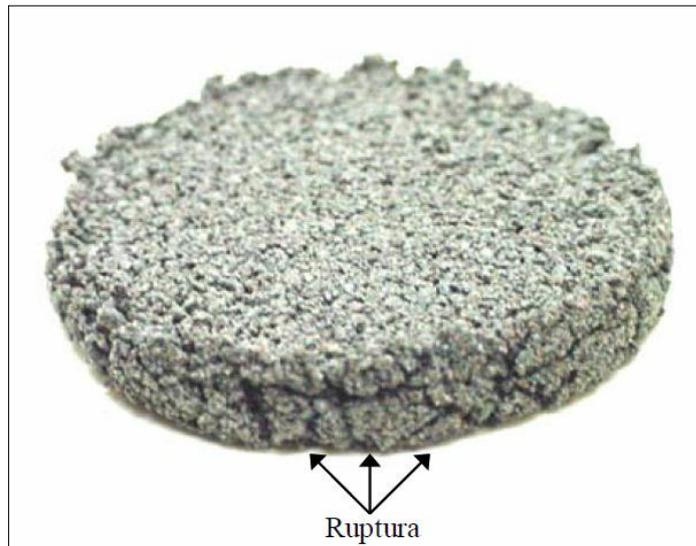


Figura 2.3. Apresenta a existência de trincas e rompimentos, comprovando a perda de coesão e capacidade de deformação plástica (CARDOSO, 2009).

2.3.7 Distância de Separação Entre Partículas

De acordo com PILEGGI (2001), a umidade provoca efeitos referentes à distância de separação entre partículas que é definida como a distância média entre duas partículas adjacentes, admitindo que todas as partículas são componentes separados, ou seja, que não existam aglomerados. A distância de separação entre as partículas (D) é a umidade contida no material, que se for inferior ou igual à porosidade existente nas partículas, a mistura não é plástica, pois as partículas encontram-se em contato mútuo. Somente quando a umidade for suficiente para exceder a porosidade e recobrir a superfície das partículas, ocasionando uma significativa separação entre as partículas, é que se pode observar plasticidade nos materiais, como é representado esquematicamente na Figura 2.4.

A porosidade e a área de superfície específica de um material possuem influência no resultado da distância de separação entre as partículas, pois os dois fatores possuem a relação de quanto maior a porosidade ou a área de superfície específica, maior a quantidade de líquido para o seu recobrimento, reduzindo assim, o volume de líquido para o afastamento entre as partículas. A distribuição granulométrica influencia na quantidade de líquido necessária para ocorrer o afastamento das partículas, isto porque, mesmo que um material possua similaridade em sua porosidade, caso sua granulometria

seja distinta, esse material apresenta maior ou menor área de superfície específica, necessitando de uma maior ou menor quantidade de líquido para ocorrer o afastamento entre as partículas.

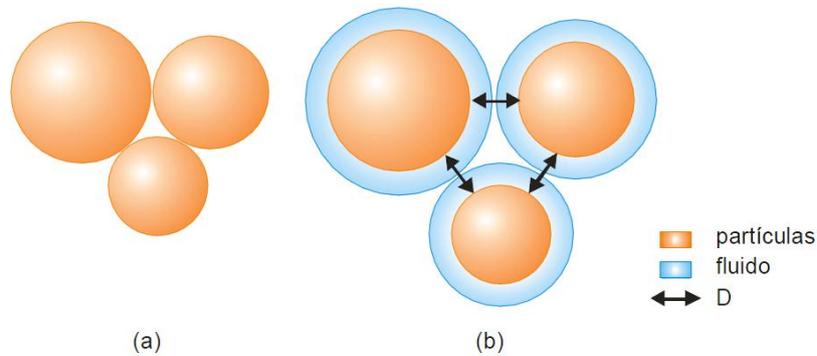


Figura 2.4. Representação esquemática do conceito de distância de separação entre partículas (D): (a) partículas em contato, sem umidade, ou a mesma preenche os vazios entre estas e, (b) partículas separadas pela umidade (PILEGGI, 2001).

2.4 SQUEEZE-FLOW

Segundo PILEGGI (2001). O conceito de reometria por squeeze-flow se caracteriza na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas. Este método é simples e versátil, sendo capaz de avaliar com precisão materiais em ampla faixa de consistência e em velocidades e graus de deformações variáveis. É ressaltado, que a mudança geométrica inerente ao ensaio, que simula fenômenos de restrição similares aos que ocorre durante as etapas da aplicação dos materiais, faz com que a técnica seja relevante para a avaliação reológica.

2.4.1 Curva Carga versus Deslocamento Típica Obtida no Squeeze-Flow

De acordo com PILEGGI (2001). O resultado do perfil típico obtido de um ensaio de Squeeze-Flow com controle por deslocamento expresso na forma de carga versus deslocamento, constitui três regiões bem definidas, conforme demonstrado na Figura 2.5.

No primeiro estágio é observado, em pequenas deformações, que o material comporta-se como um sólido, resultando em deformação elástica linear. No próximo estágio, em deslocamentos intermediários, a compressão ocasiona em deformação radial alongacional e de cisalhamento excedendo as forças que mantinham o material submetido ao comportamento elástico, com isto, o material flui por deformação plástica e/ou viscosa, em consequência das suas características. Nesta fase o material é capaz de apresentar grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento.

O comportamento no terceiro estágio, é referente ao material submetido a grandes deformações, pode ocasionar um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para o deslocamento do material. O resultado de aproximação entre as partículas ou de outros constituintes de um sistema, submetido a grandes deformações ocasiona em forças restritivas ao fluxo devido à maior interação (embricamento ou entrelaçamento) das unidades móveis. Provavelmente, esta é uma fase de comportamento em que métodos de aplicação e acabamento do material devem ser dificultados, provenientes das altas cargas (tensões) indispensáveis para deformá-lo, provavelmente, levando a um acabamento defeituoso. É relevante destacar que a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem mudar referente à composição dos materiais (teor de água, dimensões mínima e máxima das partículas) e também referente à configuração do ensaio utilizado.

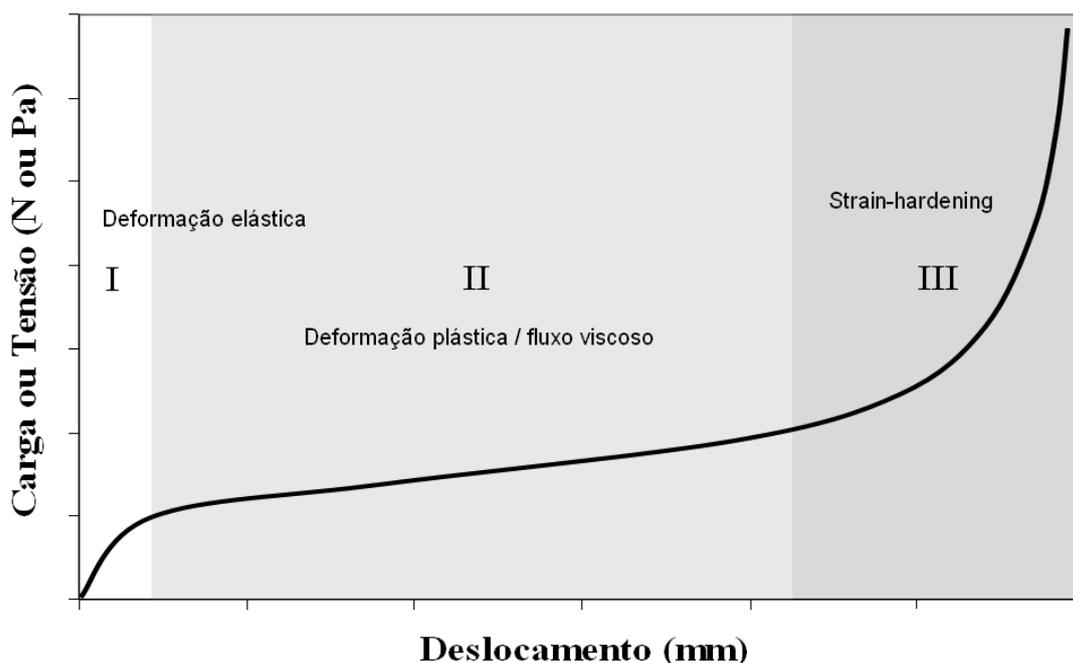


Figura 2.5. Curva típica do ensaio do squeeze-flow com controle por deslocamento expresso na forma de carga versus deslocamento, apresenta três regiões bem definidas, conforme demonstrado no gráfico (CARDOSO, 2009).

2.4.2 – Teor de Ar Incorporado

A Figura 2.6, refere-se aos resultados dos ensaios reológicos por meio do Squeeze-Flow proveniente da pesquisa de CARDOSO (2009), que utiliza seis tipos de argamassas em seus ensaios, que se diferenciam pela quantidade de: agregados, ar, partículas finas e água, que são apresentados na Figura 2.7. A carga total do ensaio é de 1000 Newtons e o deslocamento máximo é de 9 milímetros, com velocidade constante de 3 mm/s. Observa-se que os materiais que tiveram um maior deslocamento plástico apresentaram uma maior quantidade de ar incorporado e uma menor quantidade de agregados, sendo estas argamassas as de números 2, 3, 4 e 5, e as argamassas de menor deslocamento plástico as que possuem uma menor quantidade de ar incorporado e uma maior quantidade de agregados, as de números 1 e 6. As argamassas apresentadas possuem o II e o III estágios da curva teórica citada por PILEGGI (2001), com uma maior evidência.

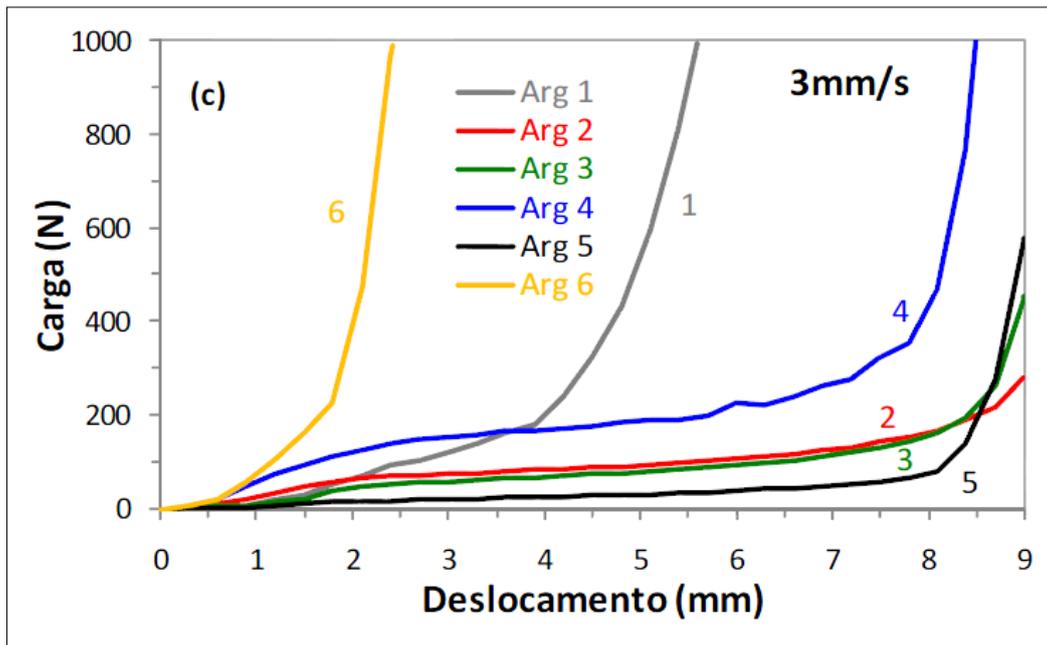


Figura 2.6. Curvas carga versus deslocamento, referentes a seis tipos de argamassas (CARDOSO, 2009).

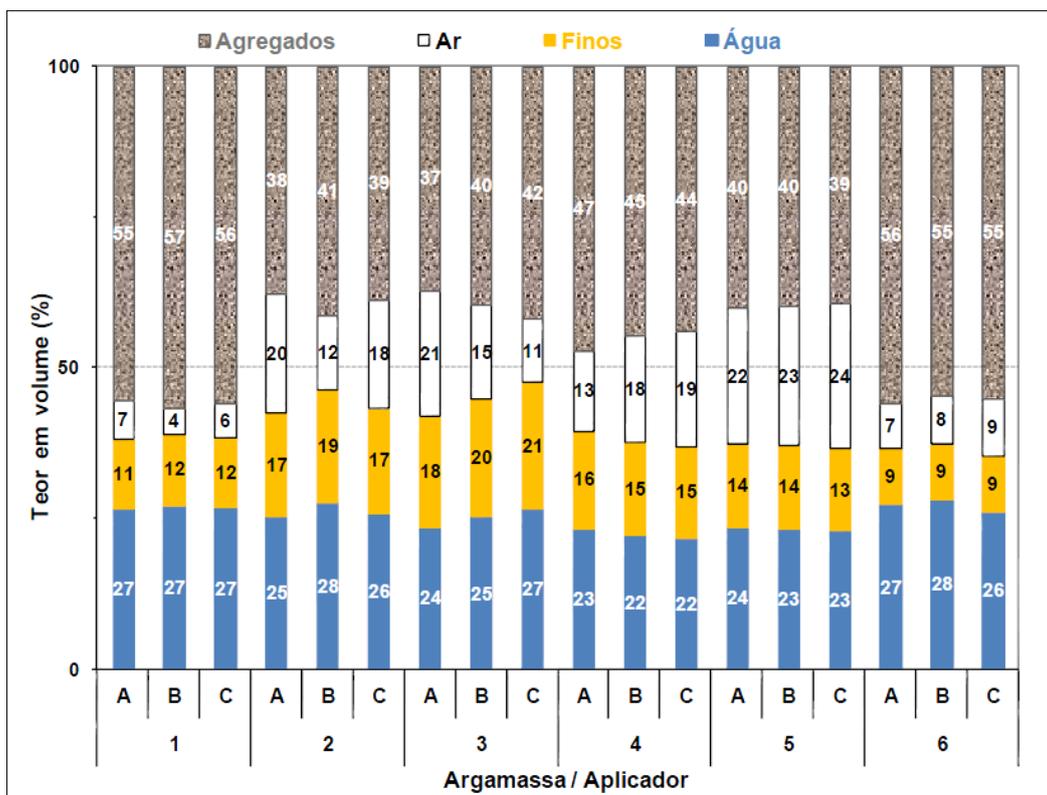


Figura 2.7. Porcentagem de agregados, ar, componentes finos e água. Referentes a ensaios em argamassas (CARDOSO, 2009).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SOLOS E SAIBROS

Os solos selecionados para a dissertação foram divididos em dois grupos, um grupo denominado de Solos (Silte; Caulim; Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%); Bentonita; e Solo Laterítico), foram sugeridos pelo professor Massao Futai da Universidade de São Paulo – USP, e o outro denominado de Saibros (J8A1; J9A3; J9A4; J10A1; J11A1; J12A1; J13A3; J19A3; e J24A1). Os Saibros possuem a letra J e um número posterior, que se refere à Jazida e ao local numérico desta Jazida, após estas referências existe a letra A e outro número, que refere-se consecutivamente a amostra e ao número ou tipo de amostra selecionada nesta Jazida.

Os resultados dos Limites de Liquidez e de Plasticidade seguiram as normas da ABNT (1984) realizados nos Silte; Caulim; Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%); Bentonita; e Solo Laterítico, foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e fornecido por FUTAI (2010), e são apresentados na Tabela 3.1. Os ensaios granulométricos dos Solos não foram fornecidos.

Tabela 3.1. Limites de Liquidez, de Plasticidade, e IP dos Solos.

AMOSTRA	WL (%)	WP (%)	IP (%)	
Silte	44	28	16	(A)
Caulim	47	33	14	(M)
Mistura de bentonita (50%) + caulim (50%)	68	37	31	(A)
Bentonita	322	70	252	(A)
Solo Laterítico	70	45	25	(A)

(A) Altamente Plástico (M) Medianamente Plástico (F) Fracamente Plástico

A caracterização física dos Saibros da Região Metropolitana do Recife foi fornecida por REGO (2008) e FERREIRA (2010), e são apresentadas na Tabela 3.2 e Figura 3.1.

3.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.2.1 Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Granulometria

Os Limites de Liquidez, os Limites de Plasticidade, e os ensaios Granulométricos foram realizados conforme as Normas Brasileiras (NBR). Os Limites de Liquidez e os Limites de Plasticidade atenderam os padrões da ABNT (1984), e os ensaios Granulométricos também atenderam os padrões da ABNT (1984).

Tabela 3.2. Ensaio Granulométricos dos Saibros

Solos	J8A1	J9A3	J9A4	J10A1	J11A1	J12A1	J13A3	J19A3	J24A1	
Pedregulho	3	1	1	2	0,5	0	0,4	0,5	0	
Areia (%)	Grossa	3	2	0,5	0,5	1,5	0,3	0,5	1	2
	Média	29	11	28	12	10	0,5	50	4,5	14
	Fina	44	12	41,5	8,5	25,5	7,47	35,7	18,5	37
	Total	76	25	70	21	37	8,27	86,2	24	53
	Silte (%)	2	31	20	21	5	20	5	47	35
Argila(%)	16	42	8	54	57	72	8	28,5	12	

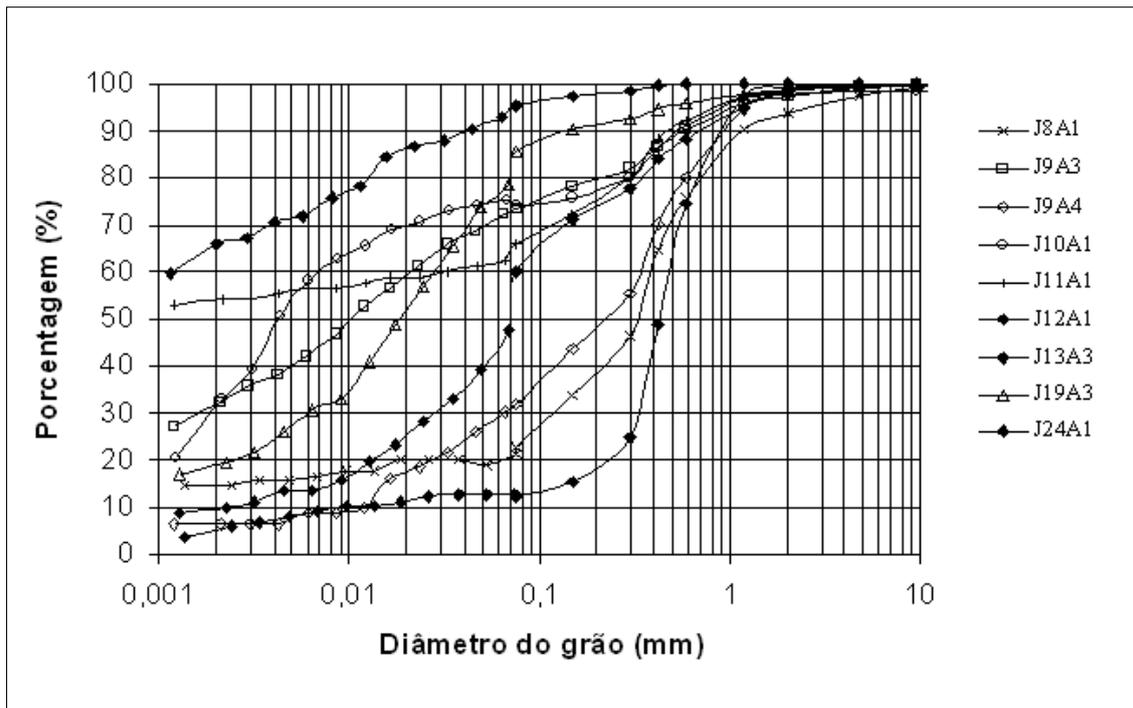


Figura 3.1. Caracterização Granulométrica dos Saibros.

3.3 SQUEEZE-FLOW

3.3.1 Características do Equipamento Squeeze-Flow

Os ensaios reológicos foram baseados em dados fornecidos por meio de realizações prévias dos ensaios tradicionais dos Limites de Liquidez e dos Limites de Plasticidade, com o objetivo de compará-los aos dados dos ensaios reológicos. Desta maneira, foi possível verificar o comportamento desses solos por meio da reologia por Squeeze-Flow, que forneceu resultados de um ensaio minucioso e preciso. Para a realização dos ensaios reológicos referentes às unidades correspondentes aos Limites de Liquidez e aos Limites de Plasticidade, foram realizados três ensaios para cada amostra de unidade, considerando para apresentação os valores médios obtidos nos ensaios.

O Squeeze-Flow consiste em um equipamento que possui duas placas paralelas, a placa inferior, serve de suporte para colocar o prato com a amostra do material, e a placa superior serve para comprimir o material ensaiado, Figura 3.2. Existem variadas células de carga no equipamento, para aumentar a capacidade de compressão do material. O

equipamento é interligado em um computador que controla quase todas as funções da máquina, como por exemplo: o método que é utilizado no ensaio, à carga da realização do ensaio e o deslocamento vertical, como também a velocidade da compressão, Figura 3.3.

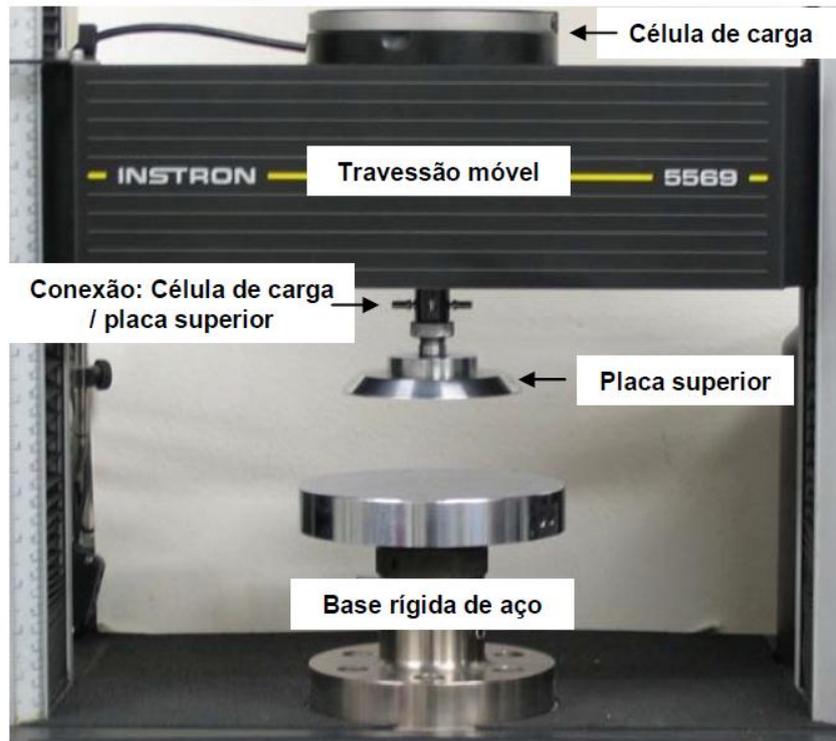


Figura 3.2. Componentes do Equipamento Squeeze-Flow (CARDOSO, 2009).

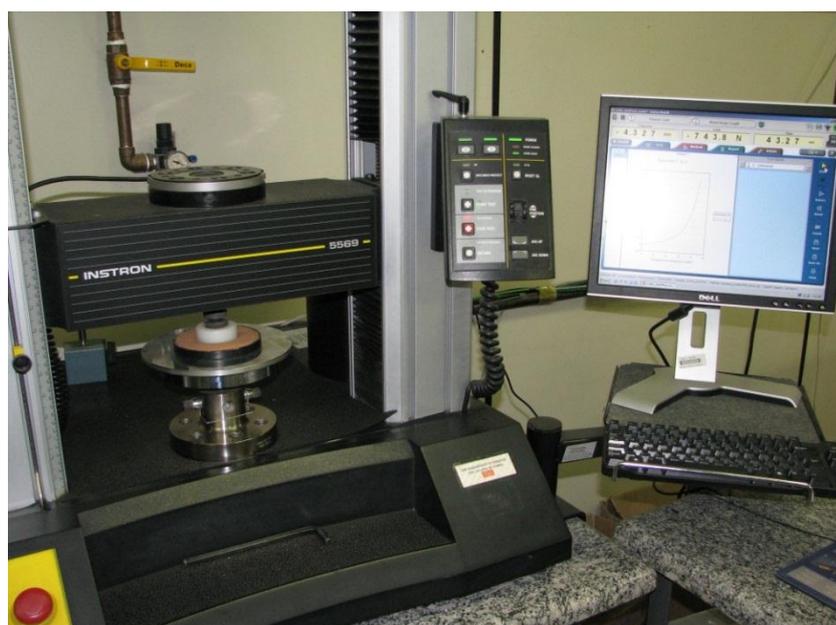


Figura 3.3. Equipamento Squeeze-Flow (imagem do autor).

3.3.2 Descrição dos Componentes Utilizados no Equipamento Squeeze-Flow

A seguir estão descritos os materiais que são utilizados na confecção das amostras que são submetidas ao equipamento Squeeze-Flow. A Figura 3.4 apresenta os componentes mencionados.

- Moldagem das amostras – utilizando o gabarito, o prato e o anel que confina o material submetido ao ensaio.
- Placa inferior – pratos de aço com 20 mm de diâmetro e superfície cromada.
- Gabarito – acessório para auxiliar a moldagem garantindo a centralização da amostra na placa inferior.
- Molde – anel de plástico com controle de dimensões e paralelismo (101 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura).

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram o preparo da amostra utilizando o gabarito de moldagem e confinado no anel de 101 mm de diâmetro, e o material sobre a placa inferior no equipamento Squeeze-Flow no momento que a punção é posicionada cuidadosamente sobre o material para o início do ensaio.

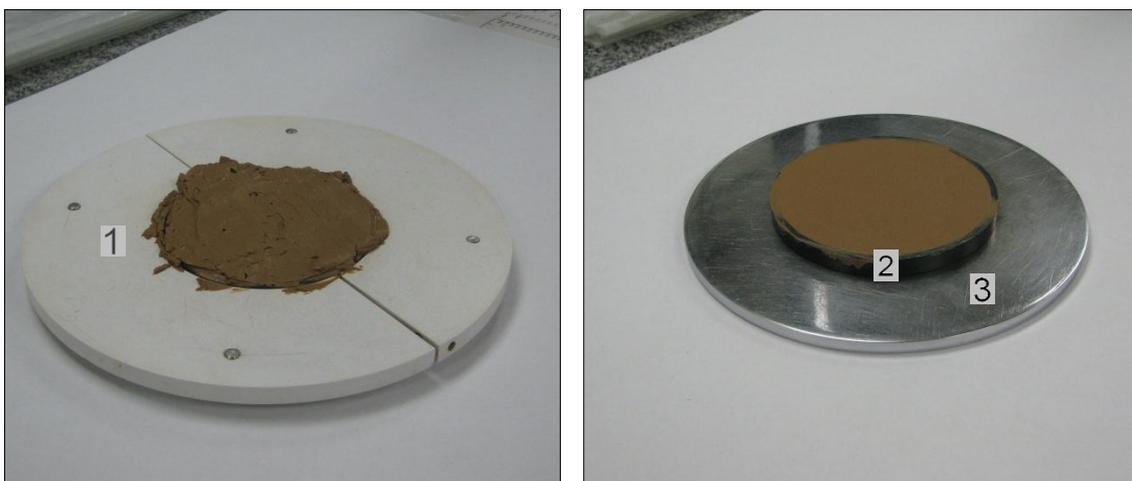


Figura 3.4. Preparação de moldagem para a realização do ensaio - (1) Gabarito; (2) Anel para moldagem com 101 mm de diâmetro; (3) Prato ou placa inferior (imagem do autor).

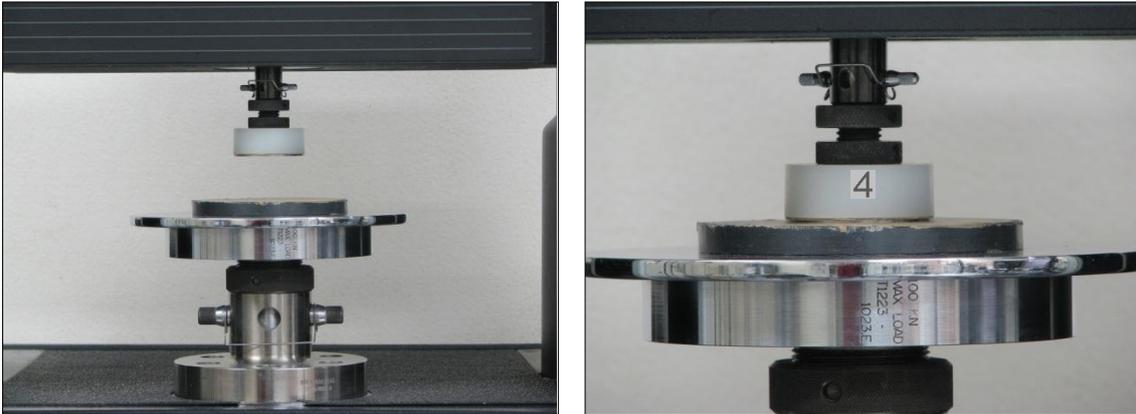


Figura 3.5. Detalhe do equipamento pronto para a realização do ensaio - (4) Punção – 50,8mm de diâmetro (imagem do autor).

3.4 ENSAIOS REOLÓGICOS – SQUEEZE-FLOW

3.4.1 Procedimentos dos Ensaios Reológicos dos Solos

A realização dos ensaios reológicos dos Solos no equipamento Squeeze-Flow foi desenvolvida com a escolha dos materiais, que já possuíam as umidades correspondentes aos Limites de Liquidez e aos Limites de Plasticidade, sendo eles: Silte; Caulim; Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%); Bentonita; e Solo Laterítico. A realização dos ensaios ocorreu de acordo com o método que está exposto a seguir:

- material destorroado manualmente e submetido à peneira de número 10, ou 2,00 mm;
- material submetido à secagem natural;
- pesagem do Solo e da água para atingirem a umidade estabelecida;
- homogeneização manual do solo em recipiente;
- moldagem dos corpos de prova e ajuste no equipamento Squeeze-Flow;

- critério do término do ensaio: atingir 1000 Newtons ou 9 milímetros, com velocidade de 0,1 mm/s.

3.4.2 Procedimentos dos Ensaios Reológicos dos Saibros

A realização dos ensaios reológicos dos Saibros no equipamento Squeeze-Flow foi desenvolvida com a escolha dos materiais que foram usados outrora na pesquisa de RÊGO (2008) e FERREIRA (2010), em pesquisas de análises dos Saibros em argamassas. Parte desse material foi utilizado nesta pesquisa, ampliando os conhecimentos dos Saibros adquiridos. Os Saibros em questão, não possuíam os ensaios dos Limites de Liquidez e dos Limites de Plasticidade. Estes Saibros estão denominados na sequência a seguir: J8A1; J9A3; J9A4; J10A1; J11A1; J12A1; J13A3; J19A3; e J24A1. A realização dos ensaios adotou o método que está exposto abaixo:

- escolha das nove amostras dos Saibros em jazidas da Região Metropolitana do Recife (RMR), através das pesquisas de RÊGO (2008) e FERREIRA (2010);
- foram realizados todos os ensaios dos Limites de Liquidez e de Plasticidade das nove amostras dos Saibros, para fornecerem as umidades que foram utilizadas nos ensaios reológicos;
- os ensaios seguiram os padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- material destorroado e submetido à peneira de número 40, ou 0,42 mm;
- material submetido à secagem em estufa, até atingir a ausência de umidade;
- pesagem do Saibro e da água para atingirem a umidade estabelecida pelos ensaios tradicionais dos Limites de Atterberg;
- homogeneização manual do Saibro em recipiente;

- moldagem do corpo de prova e ajuste no equipamento Squeeze-Flow;
- critérios de término do ensaio: atingir 1000 Newtons ou 9 milímetros, com velocidade de 0,1 mm/s.

Após os ensaios, as amostras de todos os Saibros foram colocadas em cápsulas, para a secagem em estufa, retirando assim as umidades reais dos materiais submetidos aos ensaios, como pode ser visto na Figura 3.6.



Figura 3.6. Retirada do material para secagem em estufa (imagem do autor).

As diferenciações que ocorreram entre os nove tipos de Saibros estudados com relação aos cinco Solos, não foram substanciais, elas foram apenas quanto à secagem do material antes dos ensaios, que ocorreu em estufa entre os Saibros, e entre os Solos a secagem foi realizada naturalmente. Isto trouxe uma precisão maior quando a secagem dos Saibros. Outra diferença encontrada nos ensaios dos Saibros foi quanto o peneiramento do material, que foi através da peneira 40 (0,42 mm), e entre os Solos foi com a utilização da peneira de número 10 (2,00 mm). A última característica de diferenciação entre os Saibros com relação aos Solos, foi relacionado ao término dos ensaios, as amostras de todos os Saibros foram colocadas em cápsulas, para a secagem em estufa, retirando assim as umidades reais dos materiais submetidos aos ensaios. As umidades reais determinadas ao final dos ensaios no Squeeze-Flow, tem importância devido à verificação dos ensaios, para saber se houve distorções quanto à similaridade

dos ensaios reológicos com os tradicionais. Que entre todos os ensaios dos Saibros (151 ensaios), não ocorreu qualquer diferenciação elevada entre as umidades comparadas, que na maioria dos ensaios, obtiveram umidades que variaram do mesmo valor percentual ou até dois por cento de umidade para mais ou para menos. Vale registrar que a utilização do método Squeeze-Flow em solos é uma adaptação do procedimento utilizado em outros materiais, consistindo em uma inovação na área geotécnica.

3.5 CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA DECLIVIDADE

O critério de término do ensaio no Squeeze-Flow foi estabelecido quando a capacidade de carga atingir 1000 Newtons, ou 9 milímetros, com velocidade de 0,1 mm/s. Quanto à descrição do gráfico, ele mostra no eixo Y a carga de compressão, e no eixo X se encontra o deslocamento em milímetro. Na Figura 3.7, é mostrada a carga de compressão no eixo Y, de 1000 Newtons, que possui espaços intercalados a cada 200 Newtons, e no eixo X um deslocamento máximo de 9 milímetros, entretanto, no gráfico a numeração atinge 10 milímetros, com intercaladas a cada dois milímetros. Este gráfico foi dividido em cinco regiões, para obter com mais precisão as análises de suas partes. Em cada região o Limite de Plasticidade e o Limite de Liquidez apresentam as declividades de seus ângulos, mostrando assim o desenvolvimento peculiar dos Limites de Plasticidade e dos Limites de Liquidez de todos os materiais estudados.

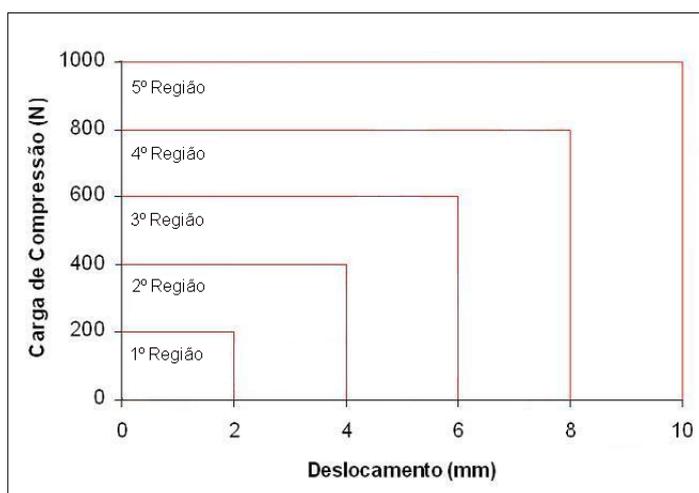


Figura 3.7. Modelo - curva de carga versus deslocamento quanto às análises das declividades, divididos em cinco regiões.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de caracterização física e dos estudos reológicos serão apresentados e discutidos nesse capítulo.

4.1 GRANULOMETRIA E CONSISTÊNCIA

As curvas granulométricas dos Saibros foram apresentadas na Figura 3.1, e as frações são apresentadas na Tabela 4.1. Os Saibros analisados são tanto arenosos quanto siltosos ou argilosos. A distribuição granulométrica e os limites de consistência permitiram identificar os Saibros em dois grupos: solos granulares e solos finos. Nos solos granulares, dois foram identificados como areia siltosa e argilosa – SC e SM (J8A1 e J13A3), como areia siltosa – SM (J24A1). Nos solos finos, um foi classificado como argila de alta compressibilidade – CH (J11A1), um como silte de alta compressibilidade – MH (J9A3) e três como argila de baixa compressibilidade – CL (J10A1, J12A1, J19A3).

Tabela 4.1. Frações Granulométricas dos Solos, Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade.

Jazidas	Ped.	Areia	Silte	Argila	WL	WP	IP	Classificação Unificada
J8A1	3	76	2	16	29	23	6	SC e SM
J9A3	2	25	31	42	65	39	26	MH
J9A4	1	70	20	8	34	25	9	SC
J10A1	2	22	21	54	46	25	21	CL
J11A1	0,5	37	5	57	72	29	43	CH
J12A1		8	20	72	33	17	16	CL
J13A3	1	86	5	8	18	13	6	SC e SM
J19A3		24	47	29	46	23	23	CL
J24A1		53	35	12	37	NP		SM

4.1.1 Análise dos Limites de Consistência

Os resultados dos ensaios dos Limites de Liquidez e de Plasticidade se realizaram nos Solos analisados, Silte; Caulim; Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%); Bentonita; e Solo Laterítico, foram apresentados na Tabela 3.1. Os Limites de Liquidez

ficaram entre 40% e 76%, entretanto, o Solo Bentonita obteve as porcentagens de umidade entre 300% e 340%. Com relação aos Limites de Plasticidade, as porcentagens de umidade ficaram entre 28% e 70%, sendo o Limite de Plasticidade da Bentonita no valor de 70%.

Os Saibros estudados, J8A1, J9A3, J9A4, J10A1, J11A1, J12A1, J13A3, J19A3, e J24A1, obtiveram umidades quanto aos Limites de Liquidez entre 17% e 81%, sendo a maior umidade do Saibro J11A1, e a menor do Saibro J13A3. Quanto aos valores dos Limites de Plasticidade, a menor umidade foi de 13%, e a maior foi de 39%. O Saibro J24A1 não obteve Plasticidade (NP), como pode ser observado na Tabela 4.1.

Os Saibros J9A3, J10A1, J11A1, J12A1, e J19A1 apresentaram $IP > 15$ e foram classificados de alta plasticidade, o Saibro J9A4 foi classificado de média plasticidade por ter $7 < IP < 15$, e os Saibros J8A1 e J13A1 foram classificados como fracamente plásticos, $IP < 7$.

A Figura 4.1, apresenta os resultados dos ensaios obtidos pelo aparelho de Casagrande relacionando à Umidade com o número de golpes dos Saibros.

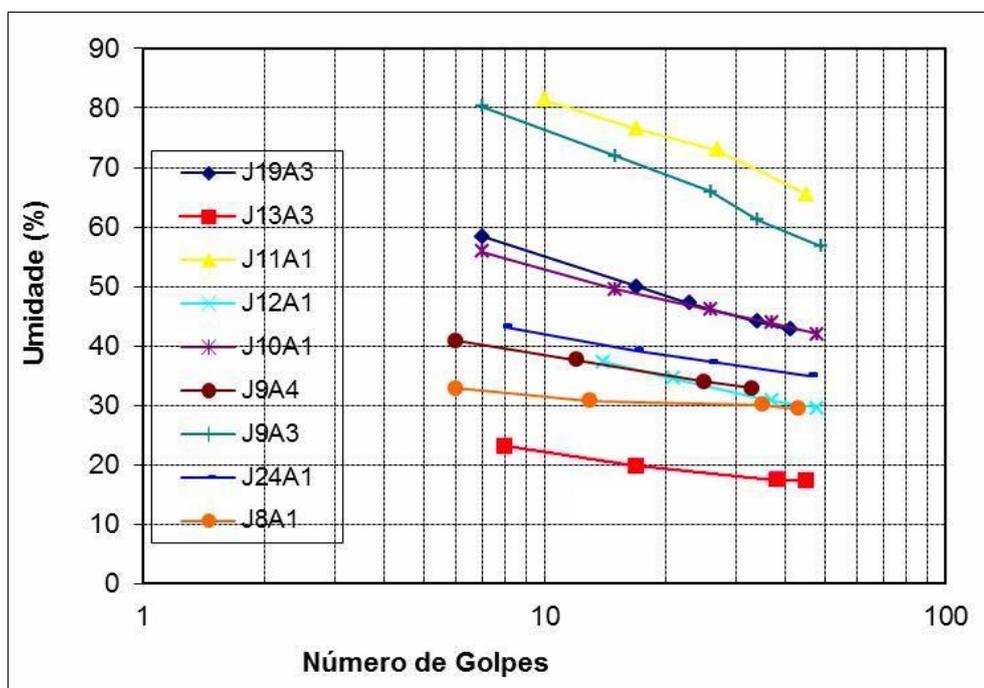


Figura 4.1. Umidades dos ensaios tradicionais relacionados aos Limites de Liquidez dos Saibros, no aparelho de Casagrande.

4.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

4.2.1 Forma das Curvas de Carga versus deslocamento para os Solos nas Umidades correspondentes ao WL e WP

As curvas carga versus deslocamentos obtidos com o Squeeze-Flow com os solos nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade e aos Limites de Liquidez são apresentadas respectivamente nas Figuras 4.2 e 4.3. Comparando as formas das curvas carga versus deslocamento dos Solos nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, Figura 4.2, com a curva teórica, Figura 2.5, observa-se que:

- os Solos Caulim e Mistura de Bentonita e Caulim só apresentaram o trecho I, trecho elástico da curva, quando o ensaio foi concluído pela carga máxima;
- o Solo Silte, apresenta dois trechos da curva teórica, deformação plástica II e deformação com enrijecimento III, quando o ensaio foi concluído por atingir carga máxima;
- os Solos Bentonita e Solo Laterítico apresentaram os três trechos (I, II, e III) da curva, até atingirem o deslocamento máximo.

Na Figura 4.2, é observado o Solo Laterítico que apresenta um maior deslocamento plástico no resultado correspondente à umidade do Limite de Plasticidade com relação ao resultado que representa a umidade do Limite de Liquidez, devido a um procedimento inadequado no momento do preparo da amostra que resultou em uma alteração do ensaio correspondente ao Limite de Plasticidade. Entretanto, o resultado que representa a umidade do Limite de Liquidez está corretamente representado. O Efeito de plasticidade que apresentou o Solo Laterítico na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, corresponde ao preparo do corpo de prova, que ocorreu sem a devida compactação, resultando em um excesso de ar incorporado na amostra, influenciando assim o resultado do ensaio. Uma representação semelhante a este resultado, pode ser vista na Figura 2.6, onde ocorre um maior deslocamento plástico nos materiais 2, 3, 4 e 5, devido ao maior teor de ar incorporado onde é observado na Figura 2.7.

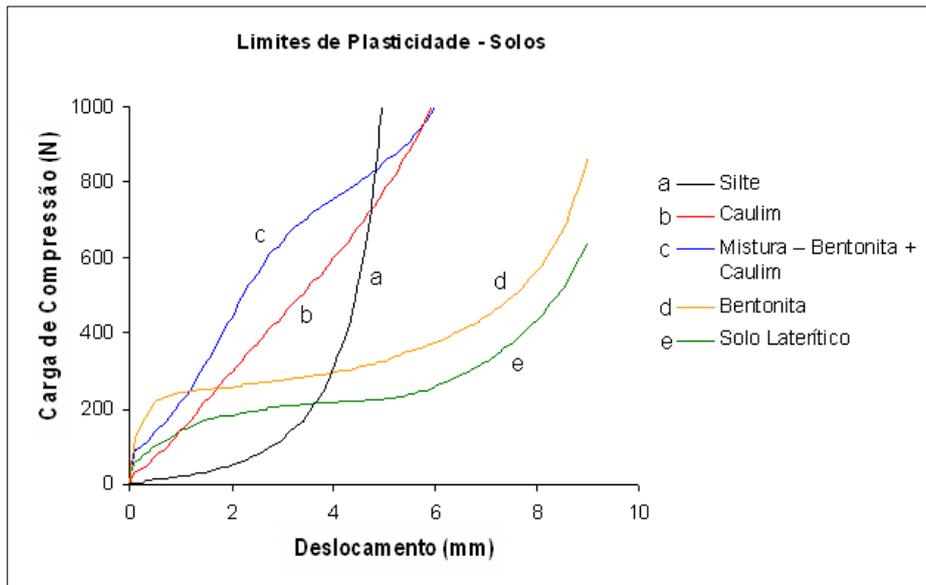


Figura 4.2. Curva carga versus deslocamento dos Solos nas unidades correspondentes aos Limites de Plasticidade.

As formas das curvas carga versus deslocamento dos Solos nas unidades correspondentes aos Limites de Liquidez, Figura 4.3, quando comparadas com a curva teórica, Figura 2.5, verifica-se que todos os resultados apresentaram formas semelhantes a apenas dois trechos, II e III, da curva teórica para todos os Solos. Os ensaios nos Solos Silte e Laterítico foram concluídos por atingirem a carga máxima e nos demais Solos pelos deslocamentos máximos.

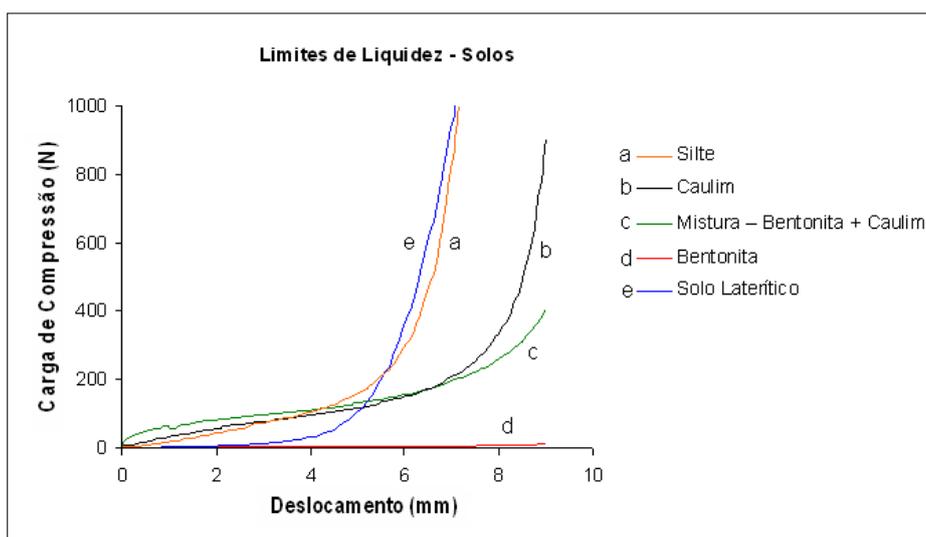


Figura 4.3. Curva carga versus deslocamento dos Solos nas unidades correspondentes aos Limites de Liquidez.

4.2.2 Forma das Curvas Carga Versus Deslocamento dos Saibros nas Umidades Correspondentes ao WL e WP

Os ensaios reológicos dos Saibros revelaram um comportamento distinto das curvas carga versus deslocamento, entre as umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade (Figura 4.4), em relação aos resultados correspondentes as umidades dos Limites de Liquidez (Figura 4.5), sendo de fácil percepção a diferença entre eles.

As curvas carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, possuem a mesma característica, a de apresentar um comportamento de semi-sólido, ou deformação elástica. Esta característica é observada nos Limites de Plasticidade dos Saibros, devido a menor porcentagem de umidade que os Limites de Plasticidade possuem em relação aos Limites de Liquidez. Os ensaios foram concluídos por atingirem a carga máxima de 1000 Newtons.

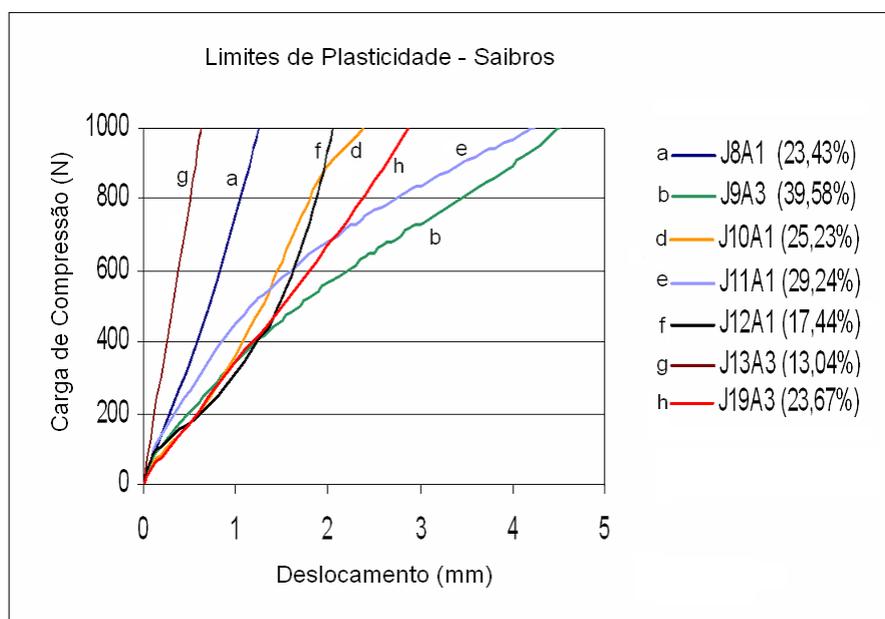


Figura 4.4. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade.

Nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros, a curva carga versus deslocamento apresentou os dois últimos estágios da curva teórica, sendo no segundo estágio, a deformação plástica, e no terceiro estágio ocorre à compactação da

amostra, devido ao efeito do empacotamento de partículas. As umidades correspondentes aos Limites de Liquidez transpassam 18%, os seus deslocamentos seguiram o comportamento de quanto maior o percentual de umidade maior o deslocamento, e quanto menor o percentual de umidade menor o deslocamento. Os ensaios foram concluídos pela carga máxima, exceto no Saibro J11A1.

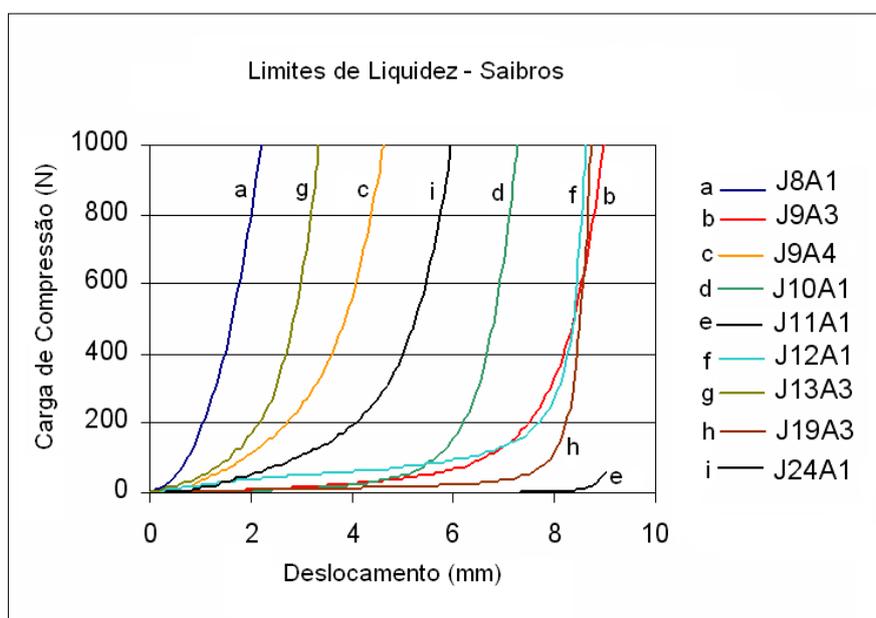


Figura 4.5. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez.

4.2.3 Forma das Curvas Carga Versus Deslocamento Associada à Porcentagem de Silte + Argila, nos Saibros

Os Saibros foram separados em dois grupos, o GRUPO I (J8A1, J9A4, J13A3 e J24A1), refere-se à percentagem de Silte + Argila menor do que 50%, e o GRUPO II (J9A3, J10A1, J11A1, J12A1 e J19A3), refere-se à percentagem de Silte + Argila maior do que 50%. A menor quantidade de Silte + Argila foi encontrada no Saibro J13A3 – 13%, e a maior quantidade de Silte + Argila é observada no Saibro J12A1 – 92%.

Todos os resultados dos Limites de Plasticidade dos Saibros apresentaram a primeira fase da curva teórica, que se refere à deformação elástica, entretanto, o Grupo II da Figura 4.6, apresentou uma deformação elástica maior com relação ao Grupo I.

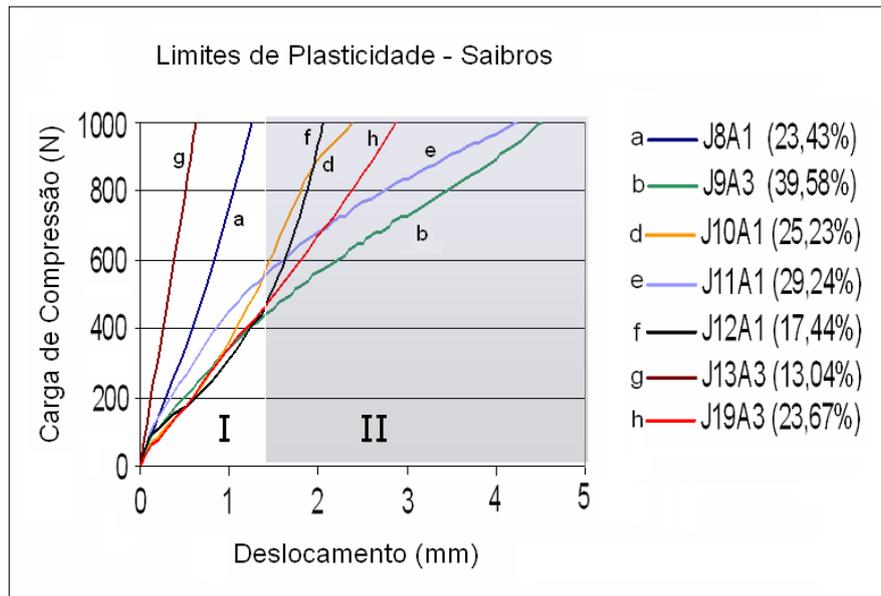


Figura 4.6. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, referentes à quantidade de Silte + Argila maiores ou menores do que 50%.

Um dos fatores importantes no deslocamento plástico dos materiais é a quantidade de Silte + Argila contidos nos Saibros. Os resultados referentes aos Limites de Liquidez apresentaram a relação de quanto maior a quantidade de Silte + Argila, maior o deslocamento plástico entre esses materiais. O GRUPO II se inicia a partir de aproximadamente 6,2 mm, e o GRUPO I, refere-se aproximadamente aos resultados gráficos que estão em uma posição inferior a 6,2 mm (Figura 4.7). Outro fator importante no deslocamento plástico dos Saibros foi à porcentagem de umidade, com a relação de quanto maior a porcentagem de líquido, maior o deslocamento plástico dos materiais.

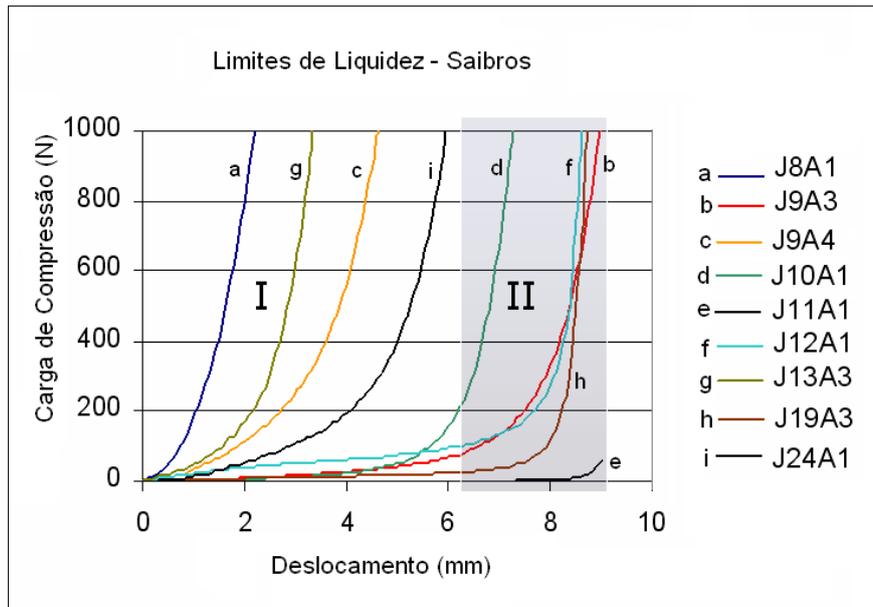


Figura 4.7. Curva carga versus deslocamento dos Saibros nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez, referentes à quantidade de Silte + Argila maiores ou menores do que 50%.

4.2.4 Formas dos Corpos de Prova Após os Ensaios com o Squeeze-Flow

A Figura 4.8, apresenta diferentes formas dos corpos de prova no final dos ensaios, Figura (a) e (b), Saibro J13A3 na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, Figura (c), Saibro J8A1, na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, Figuras (d), (e), (f), (g) e (h), nas umidades próximas correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros J9A4 e J24A1, e Solos, Bentonita, Laterítico e Bentonita, consecutivamente.

Três formas são observadas. Na primeira praticamente não há compressão perceptível dos corpos de prova, como pode ser observado no ensaio com o Saibro J13A3, na umidade do Limite de Plasticidade, Figura 4.8 (a) e (b). O material quase não sofre deformação, devido à falta de umidade necessária para diminuir o atrito entre as partículas do material. Com esta ausência de umidade neste Solo, o atrito das partículas provoca um travamento entre essas partículas, resultando no término do ensaio com a carga máxima de 1000 Newtons, e um deslocamento (mm) muito pequeno.

Na segunda forma, ocorre a compressão e o solo desloca apenas preponderantemente para baixo com pequenos deslocamentos nas bordas da punção, um exemplo disto é apresentado na Figura 4.8 (c), (d), (e) e (f), Saibro J8A1, na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, e nas umidades próximas correspondentes aos Limites de Liquidez os Saibros J9A4 e J24A1, e o Solo Bentonita, respectivamente.

Na terceira forma há deslocamento dos solos em todas as direções, para baixo e para as bordas da punção com grande movimento do material. Isto pode ser mostrado na Figura 4.8 (g) e (h), nas umidades próximas correspondentes aos Limites de Liquidez dos Solos Laterítico e Bentonita, sucessivamente.

De acordo com a Figura 2.4, do item 2.3.7, ocorre à distância de separação entre partículas que é ocasionada devido ao excesso de água que preenche os poros e o recobrimento das superfícies das partículas dos solos, acarretando em um distanciamento entre eles, que resulta em uma maior plasticidade, ou em um maior deslocamento (mm) do material, como pode ser observado na Figura 4.8 (d), (e) e (f), nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros J9A4 e J24A1, e no Solo Bentonita, com uma menor evidência, e também em maior evidência no Solo Bentonita, na umidade correspondente ao Limite de Liquidez, Figura 4.8 (h).

É importante destacar o comportamento do Solo Laterítico, Figura 4.8 (g), na umidade próxima ao Limite de Liquidez, que apresentou o comportamento de rompimento do material, devido à perda de coesão e capacidade de deformação plástica, mesmo tendo apresentado um grande deslocamento no ensaio, onde pode ser visto um comportamento semelhante na Figura 2.3, referente à influência da umidade nas amostras.

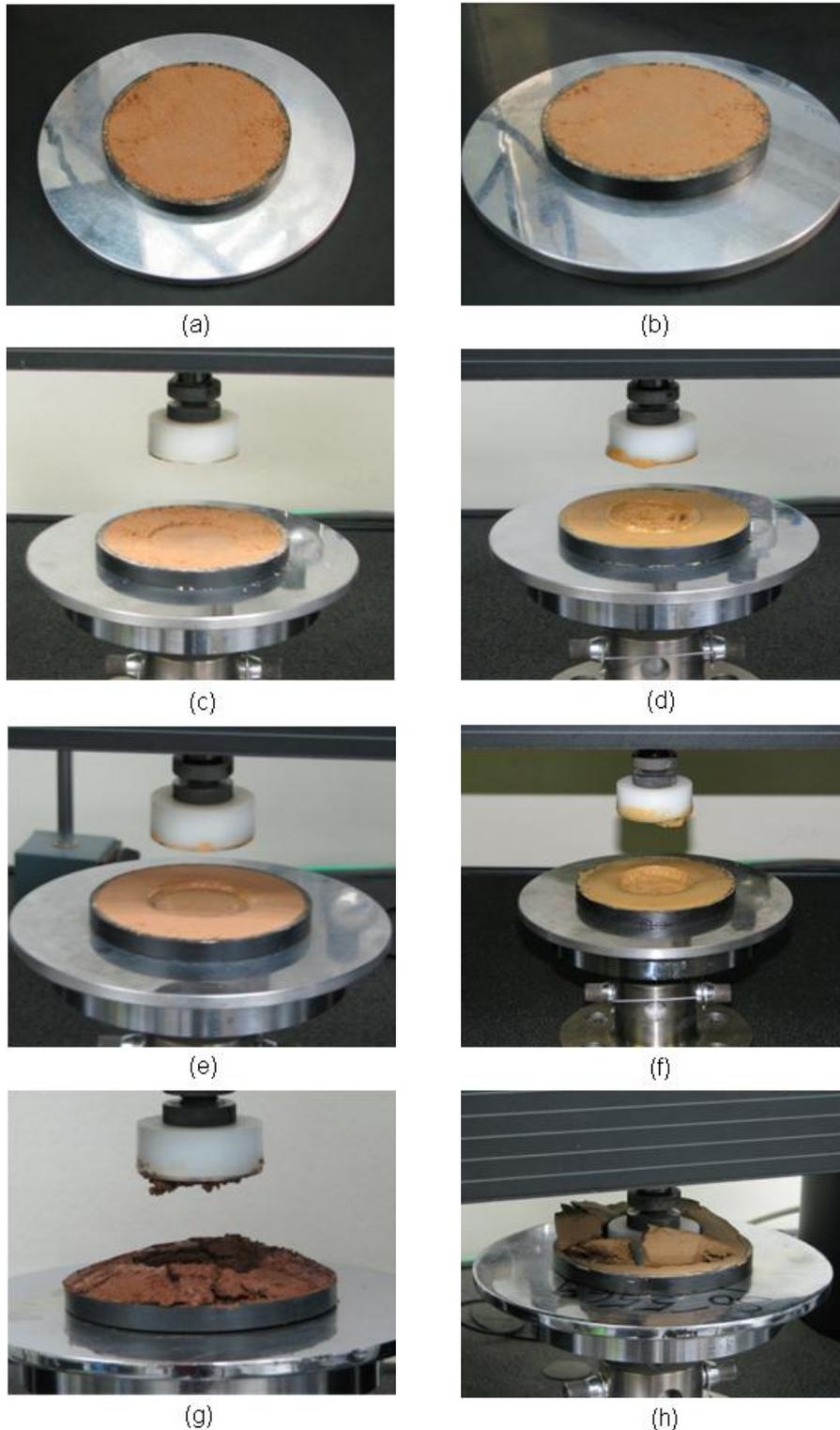


Figura 4.8. Formas dos corpos de prova dos Solos e Saibros ao final do ensaio: (a) e (b) Saibro J13A3 na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, (c) Saibro J8A1, na umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, Figuras (d), (e), (f), (g) e (h), nas umidades próximas correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros J9A4 e J24A1, e dos Solos, Bentonita, Laterítico e Bentonita, consecutivamente.

4.3 ANÁLISES DAS DECLIVIDADES DAS CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO DOS SOLOS E SAIBROS

As declividades da curva carga versus deslocamento dos Solos e Saibros foram determinadas para os deslocamentos (0, 2, 4, 6, 8, e 10) milímetro, e as cargas (0, 200, 400, 600, 800, e 1000) Newton, ver item 3.5 e Figura 3.7. Correspondentes às umidades dos Limites de Liquidez e de Plasticidade. Salvo os ensaios dos Limites de Liquidez da Bentonita e do Saibro J11A1, que não seguiram esses parâmetros, porém, seguem as divisões das regiões de maneira proporcional aos parâmetros descritos anteriormente. Os resultados encontram-se nas Tabelas 4.2 e 4.3, e nas Figuras do Apêndice A.1 a A.16.

Analisando a Tabela 4.2, observa-se que na primeira região, das umidades relacionadas aos Limites de Plasticidade ocorre declividades com maiores inclinações em comparação as inclinações da primeira região das umidades referentes aos Limites de Liquidez, entretanto, na última região, as umidades correspondentes aos Limites de Liquidez e de Plasticidade se assemelham. Entre a segunda e a quarta regiões, as umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade possuem em sua maioria declividades superiores as umidades correspondentes aos Limites de Liquidez.

Tabela 4.2. Declividades das Curvas Carga x Deslocamento dos Limites de Plasticidade e dos Limites de Liquidez dos Solos.

Solo	1° -	2° -	3° -	4° -	5° -
	Região	Região	Região	Região	Região
	WP - WL	WP - WL	WP - WL	WP - WL	WP - WL
Silte	7° - 7°	22° - 9°	59° - 18°	78° - 54°	79° - 80°
Caulim	46° - 9°	38° - 6°	38° - 7°	40° - 16°	45° - 46°
Mistura de bentonita (50%) + caulim (50%)	80° - 66°	46° - 3°	49° - 7°	64° - 12°	30° - 31°
Bentonita	81° - X	36° - X	7° - X	17° - X	44° - X
Solo Laterítico	70° - 0°	5° - 2°	1° - 16°	17° - 64°	41° - 74°

X = Sem Resultado

De acordo com a Tabela 4.3, na primeira região as declividades relacionadas às unidades dos Limites de Plasticidade apresentam angulações maiores em comparação às unidades relacionadas aos Limites de Liquidez, entretanto, os ângulos correspondentes aos Limites de Liquidez da quinta região se equiparam aos ângulos relacionados às unidades dos Limites de Plasticidade. Nas demais regiões, entre a segunda e a quarta regiões, os ângulos relacionados às unidades dos Limites de Liquidez desenvolvem suas declividades progressivamente, alguns Saibros, entretanto, apresentam um crescimento da declividade mais acelerado. Quanto aos resultados referentes às unidades dos Limites de Plasticidade, as angulações apresentam uma elevada declividade até a última região, exceto no Saibro J11A1.

Tabela 4.3. Declividades das Curvas Carga x Deslocamento dos Limites de Plasticidade e dos Limites de Liquidez dos Saibros.

Saibro	1° - Região WP - WL	2° - Região WP - WL	3° - Região WP - WL	4° - Região WP - WL	5° - Região WP - WL
J8A1	72° - 9°	73° - 64°	75° - 73°	77° - 76°	83° - 81°
J9A3	72° - 2°	61° - 3°	60° - 6°	51° - 22°	53° - 72°
J9A4	X - 10°	X - 31°	X - 63°	X - 72°	X - 77°
J10A1	84° - 2°	70° - 4°	76° - 8°	77° - 61°	73° - 86°
J11A1	87° - X	71° - X	54° - X	39° - X	27° - X
J12A1	81° - 7°	62° - 4°	71° - 5°	77° - 11°	80° - 59°
J13A3	84° - 15°	83° - 55°	83° - 77°	85° - 79°	83° - 83°
J19A3	69° - 3°	67° - 2°	65° - 2°	68° - 3°	66° - 65°
J24A1	X - 7°	X - 17°	X - 45°	X - 70°	X - 80°

X = Sem Resultado

4.4 ANÁLISES DAS CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS NO SQUEEZE-FLOW

As análises que serão expostas a seguir representam as unidades correspondentes aos ensaios dos Limites de Liquidez do aparelho Casagrande e do Limite de Plasticidade.

4.4.1 Para os Solos

Os cinco Solos estudados foram analisados de maneira geral neste primeiro momento, estas observações referem-se ao perfil ou semelhanças de comportamentos que alguns destes materiais possuem. As diferenças que esses Solos apresentam são resultados das porcentagens de umidades em cada material e das diferentes constituições geológicas existentes em cada Solo. A seguir os resultados das análises e características dos Solos estudados.

O comportamento curva versus deslocamento do Silte (Figura 4.9), que de acordo com a curva teórica estudada por PILEGGI (2001), ocorre a segunda e a terceira fases. Observa-se que o material possui um deslocamento plástico inicial, não ocorrendo à característica de um comportamento inicial de semi-sólido, quebrando a inércia inicial ou a tensão superficial, mas uma plasticidade inicial decorrente de uma progressiva tensão de endurecimento. No Silte, as curvas nas umidades correspondentes ao Limite de Plasticidade e ao Limite de Liquidez se assemelham devido à proximidade da porcentagem de umidade do WP quanto ao WL, que é de aproximadamente 16%. Para as demais umidades, as curvas apresentam comportamentos semelhantes.

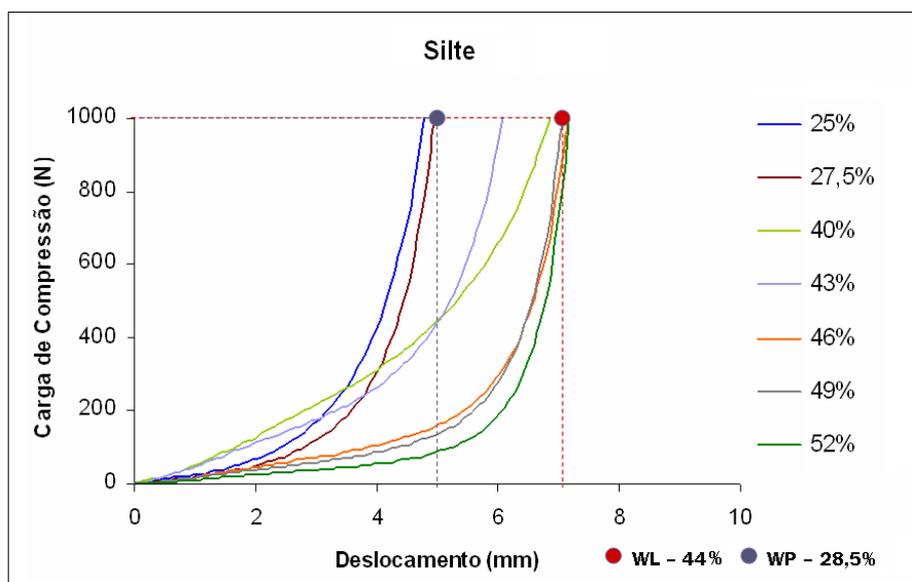


Figura 4.9. Curva carga versus deslocamento – Silte.

Nos Solos Caulim e na Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%), os comportamentos das curvas carga versus deslocamento em umidades correspondentes ou próximas ao WP são ligeiramente superiores. Só apresenta o primeiro estágio da curva teórica, Figuras 4.10 e 4.11. Com relação às curvas próximas aos Limites de Liquidez, os seus comportamentos apresentam de acordo com a curva teórica, os três estágios típicos, sendo eles: o primeiro refere-se a pequenas deformações, o material comporta-se como um semi-sólido, apresentando deformações elástico linear, no segundo estágio, o material é capaz de sofrer grandes deformações, sem aumento expressivo da força necessária para o deslocamento, e no último estágio, as forças de atrito apresentam-se predominantes, ocasionando um aumento significativo da força necessária para continuar a deformação do material até o termino do ensaio.

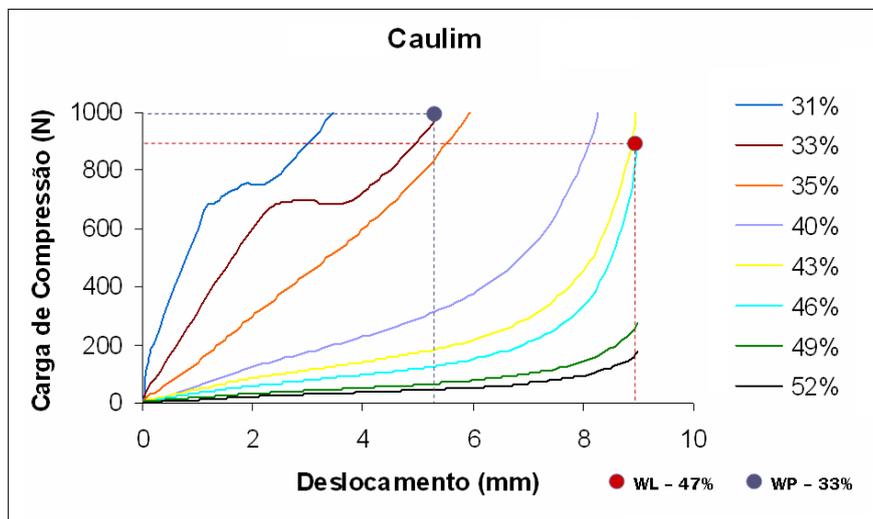


Figura 4.10. Curva carga versus deslocamento – Caulim.

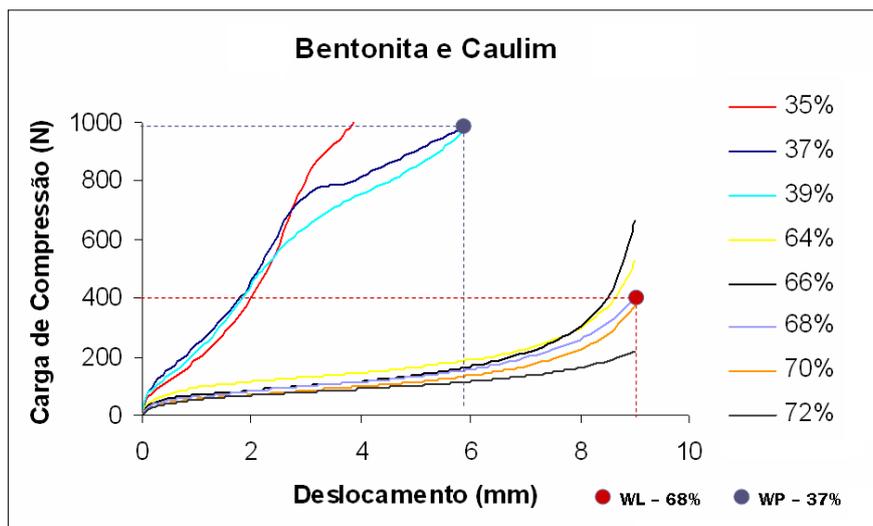


Figura 4.11. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (50%) + Caulim (50%).

No Solo Bentonita, as curvas carga versus deslocamento em umidades próximas ou correspondente ao WP, apresentam os três estágios da curva teórica, Figura 4.12 e 4.13. Em contrapartida, os Limites de Liquidez atingiram apenas o segundo e o terceiro estágios, de maneira mais visível, não sendo perceptível sem grandes ampliações, à existência do primeiro estágio, que apresenta pequenas deformações do material e comporta-se como um semi-sólido, possuindo deformação elástica linear.

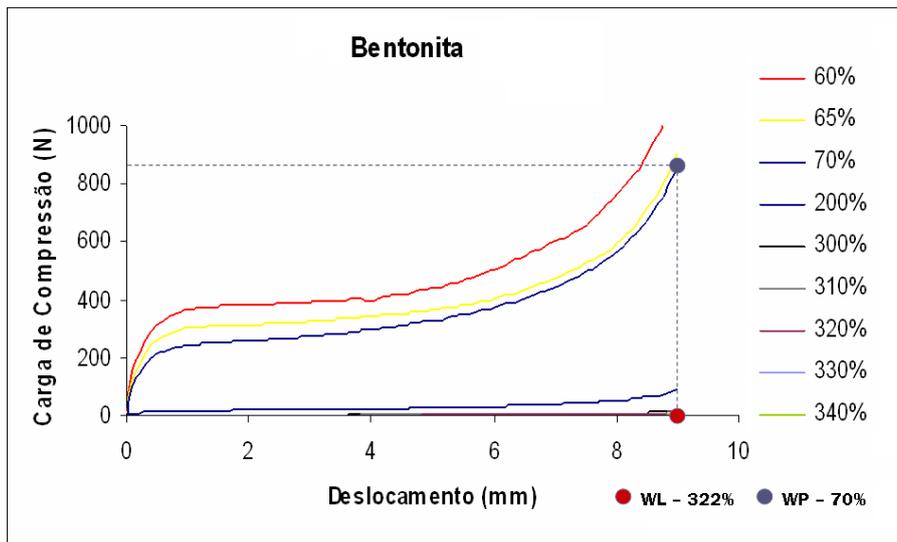


Figura 4.12. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (WP).

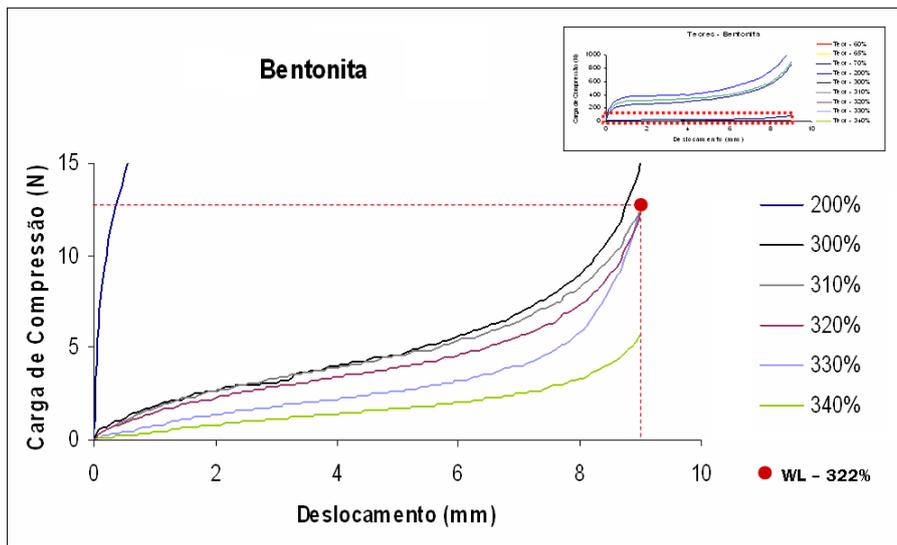


Figura 4.13. Curva carga versus deslocamento – Bentonita (WL).

No Solo Laterítico, as curvas carga versus deslocamento nas unidades próximas ao WP, Figura 4.14, são compostas pelos três estágios da curva teórica referida por PILEGGI (2001), sendo eles: o primeiro estágio o material comporta-se como um semi-sólido, apresentando deformação elástico linear, no segundo estágio, o material é capaz de sofrer grandes deformações, sem aumento expressivo da força necessária para o deslocamento, e no último estágio, as forças de atrito apresentam-se predominantes, ocasionando um aumento significativo da carga. O seu Limite de Liquidez apresenta as duas últimas fases da curva teórica mencionada.

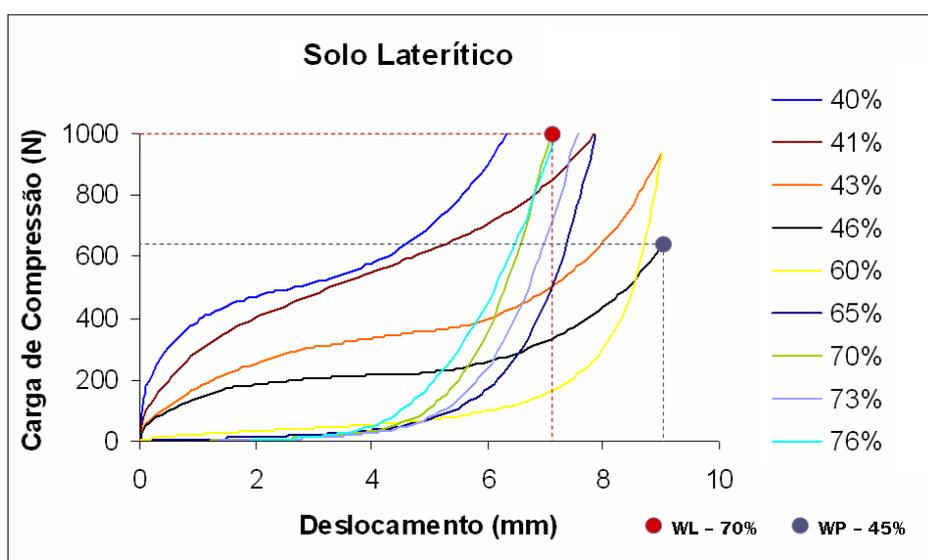


Figura 4.14. Curva carga versus deslocamento – Solo Laterítico.

4.4.2 Para os Saibros

Os nove tipos de Saibros estudados foram analisados de maneira geral neste primeiro momento. As diferenças que esses Saibros apresentaram são resultados das porcentagens de umidades em cada material e das diferentes constituições granulométricas e geológicas existentes em cada material. A seguir os resultados das análises e características dos nove tipos de Saibros.

O comportamento da curva carga versus deslocamento dos Saibros J8A1 e J13A3, Figuras 4.15 e 4.16, possuem nas umidades próximas aos Limites de Plasticidades o

primeiro estágio da curva teórica referida por PILEGGI (2001), onde o material se encontra em um comportamento elástico linear, em um estado semi-sólido. E nas umidades próximas aos Limites de Liquidez, os materiais possuem o segundo e o terceiro estágios da curva teórica, onde ocorre no segundo estágio à deformação plástica, entretanto, estes Saibros apresentam pouco deslocamento ou plasticidade, e o terceiro estágio pelo qual ocorre a tensão de endurecimento, onde as partículas passam por um processo de atrito que resulta em pouco deslocamento e no aumento da carga até o termino do ensaio.

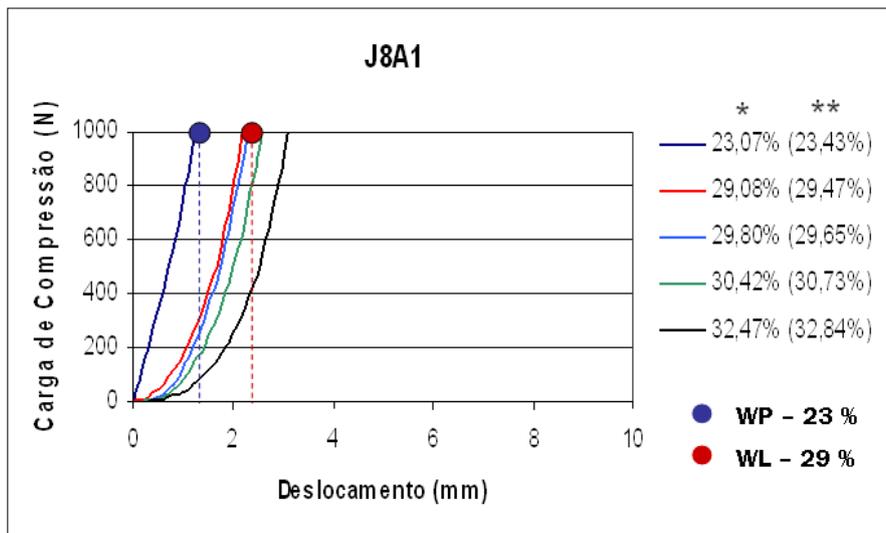


Figura 4.15. Curva carga versus deslocamento – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

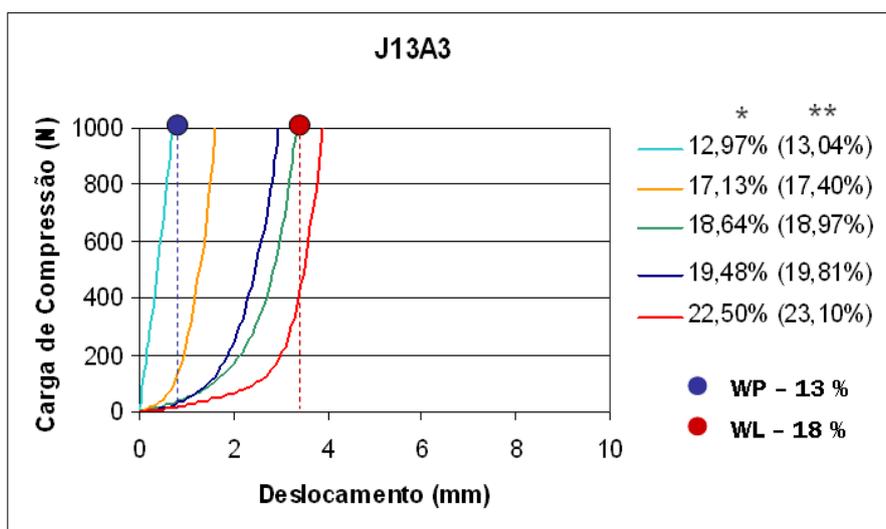


Figura 4.16. Curva carga versus deslocamento – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

Os Saibros J9A4 e J24A1, Figuras 4.17 e 4.18, possuem nas umidades próximas aos seus Limites de Liquidez, o segundo e o terceiro estágios da curva teórica, Ocorrendo um maior deslocamento plástico em detrimento da diminuição da carga, no segundo estágio da curva teórica referida por PILEGGI (2001), e no terceiro estágio uma tensão de endurecimento, devido ao atrito de partículas.

Com relação à umidade referente ao Limite de Plasticidade do Saibro J9A4, devido ao elevado número de ensaios realizados em um tempo reduzido (foram realizados aproximadamente mais de 160 ensaios, todos com uma pequena margem de diferenciação com relação às umidades retiradas dos índices de Atterberg), ocorreu apenas a falta de realização da reprodução de umidade referente ao Limite de Plasticidade deste solo.

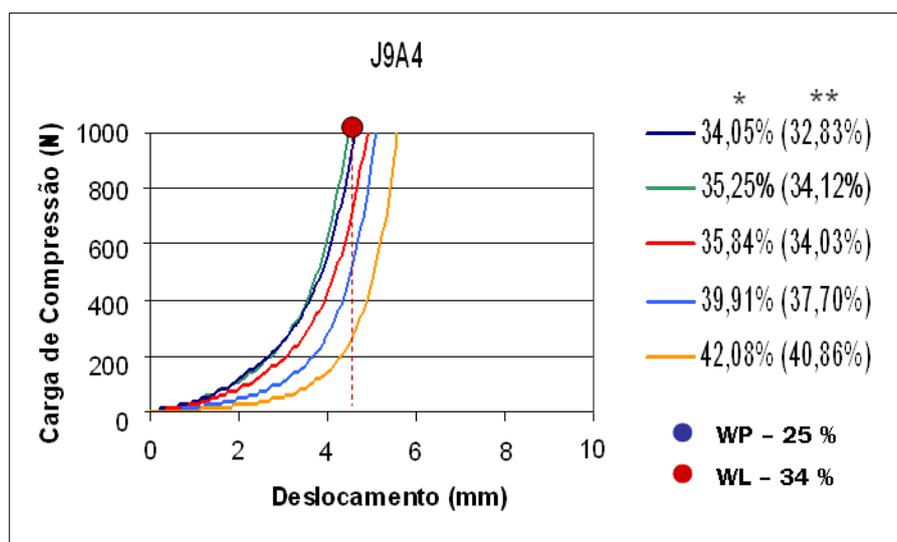


Figura 4.17. Curva carga versus deslocamento – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

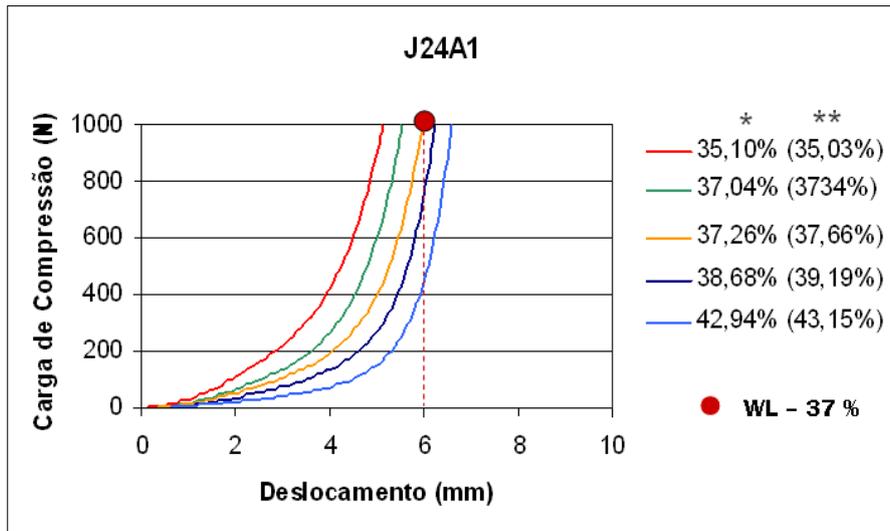


Figura 4.18. Curva carga versus deslocamento – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

No Saibro J11A1 (Figuras 4.19 e 4.20), o ensaio que mostra a umidade correspondente ao Limite de Plasticidade, apresenta o comportamento do primeiro e do último estágio da curva teórica referida por PILEGGI (2001), entretanto, a segunda fase dessa curva teórica não apresenta o comportamento descrito pelo autor, onde a segunda fase descreve que: o material é capaz de sofrer grandes deformações, sem aumento expressivo da força necessária para o deslocamento. Neste Saibro J11A1, o material desloca, e ao contrário do que ocorre na curva teórica, a capacidade de carga recebida aumenta expressivamente. A umidade próxima ao Limite de Liquidez deste Saibro apresenta com clareza o segundo e o terceiro estágios referidos por PILEGGI (2001), onde ocorre em um primeiro momento um amplo deslocamento plástico sem aumento expressivo da carga e no segundo momento uma tensão de endurecimento do material, terminando assim o ensaio.

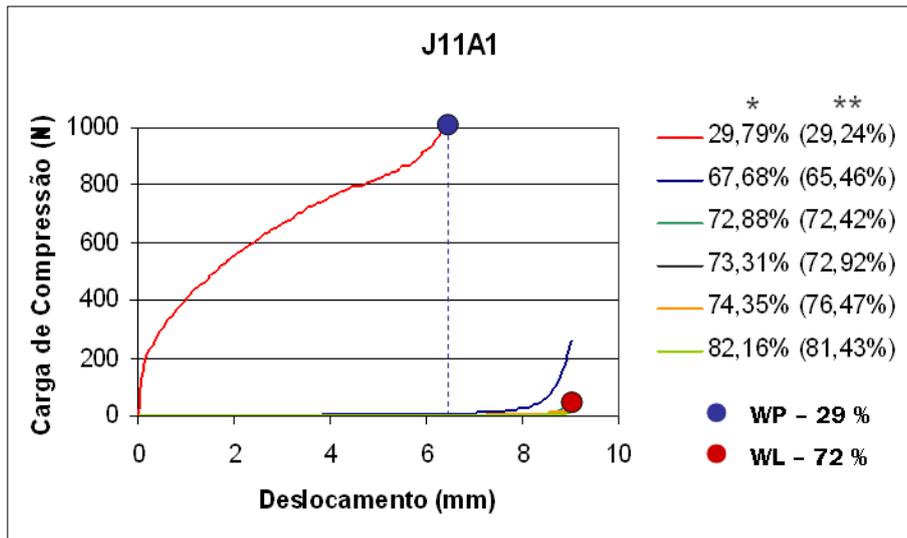


Figura 4.19. Curva carga versus deslocamento – Saibro J11A1 (WP) (* - Umidade do WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

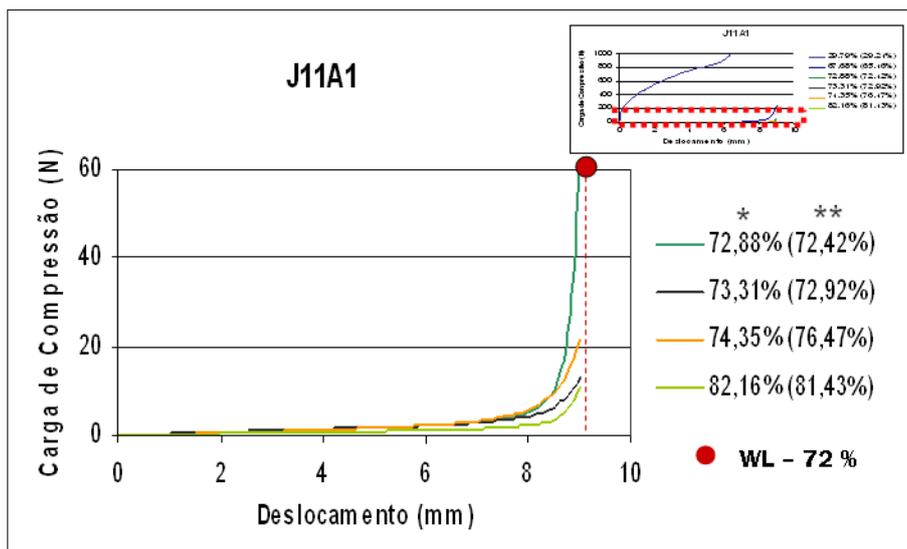


Figura 4.20. Curva carga versus deslocamento – Saibro J11A1 (WL) (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

Nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, nos ensaios referentes às umidades dos Limites de Plasticidade dos Saibros J10A1, J9A3, J12A1, e J19A3, ocorreu o primeiro estágio da curva teórica descrita por PILEGGI (2001), onde existe uma reação elástica linear e o material comporta-se como um semi-sólido. Nos Limites de Liquidez os materiais possuem a segunda e a terceira fases teóricas referidas por PILEGGI (2001), ocorrendo no primeiro momento um amplo deslocamento inicial sem aumento expressivo da carga, e no segundo momento ocorrem à tensão de endurecimento do material, devido à

tensão exponencial do atrito das partículas existentes, e conseqüentemente o termino do ensaio.

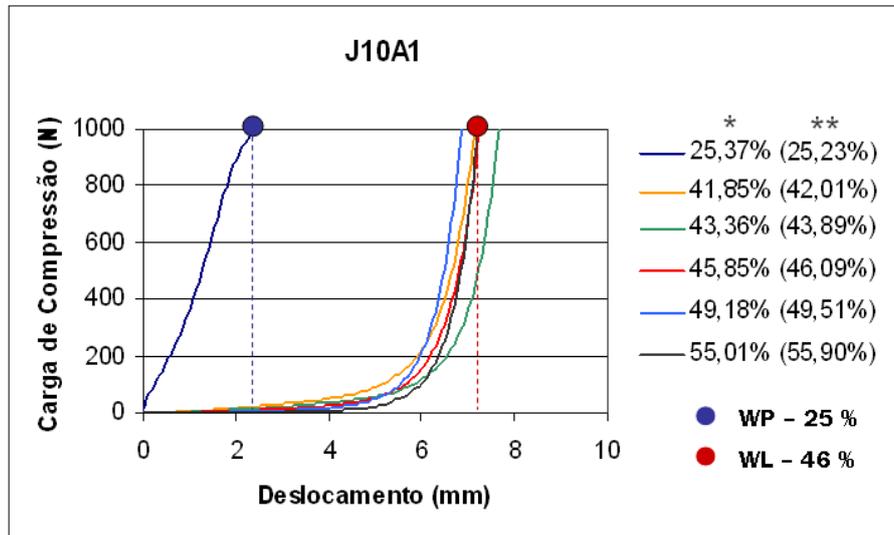


Figura 4.21. Curva carga versus deslocamento – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

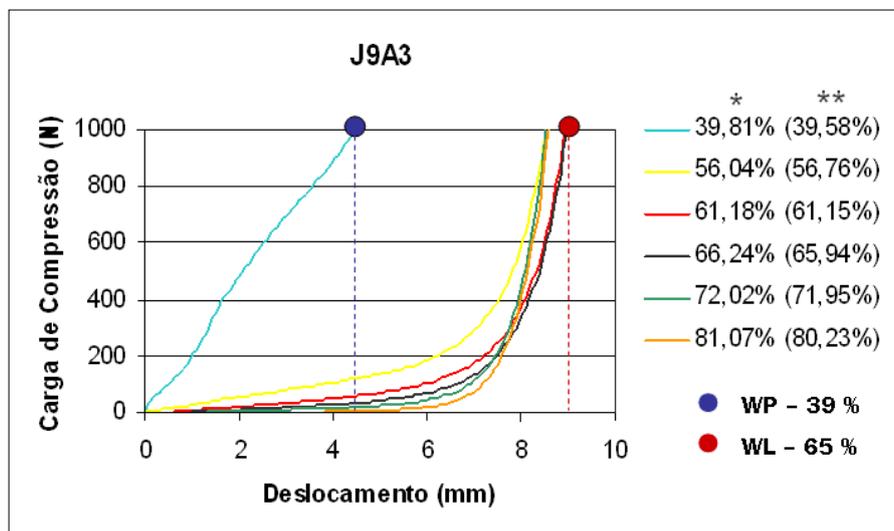


Figura 4.22. Curva carga versus deslocamento – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

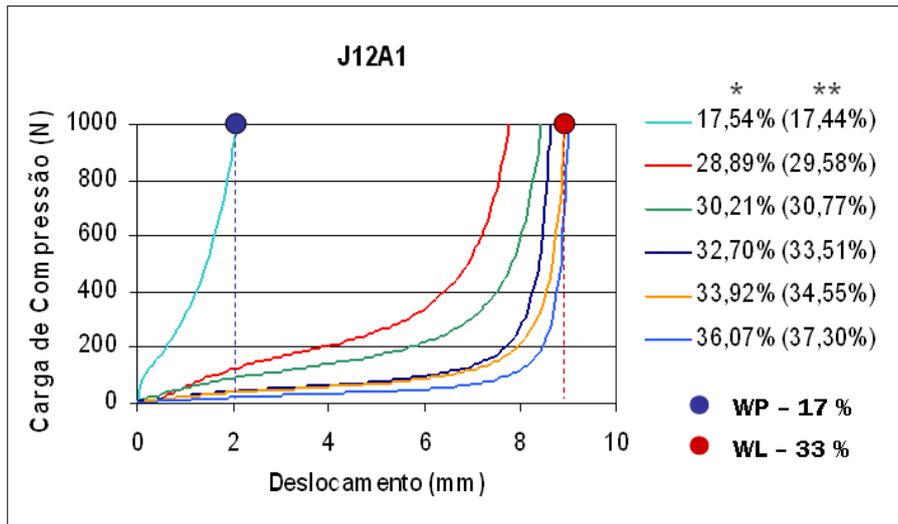


Figura 4.23. Curva carga versus deslocamento – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

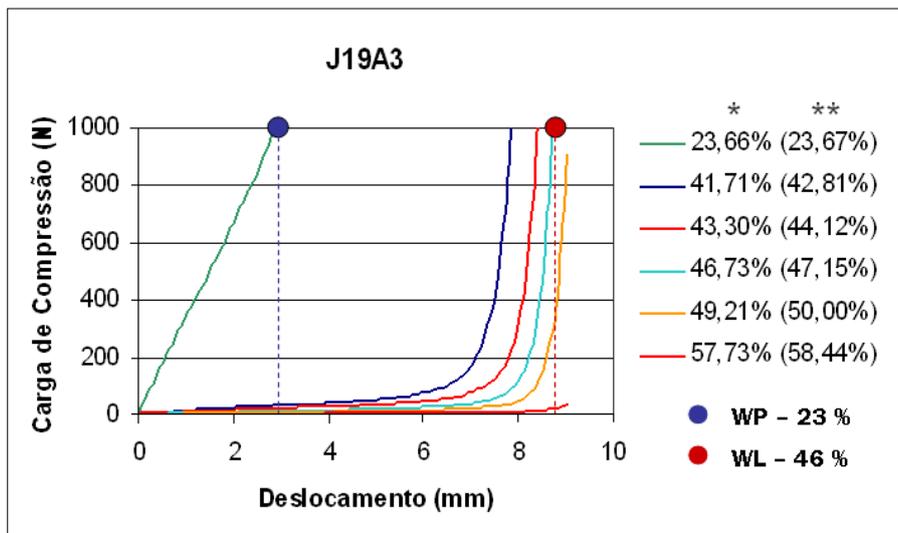


Figura 4.24. Curva carga versus deslocamento – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

4.5 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS DE GRANULOMETRIA, CONSISTÊNCIA E CURVAS DE CARGA X DESLOCAMENTO DOS SAIBROS.

Em uma avaliação integrada os nove Saibros foram analisados de acordo com as semelhanças obtidas quanto às curvas de carga x deslocamento nas umidades

correspondentes aos Limites de Plasticidade e aos Limites de Liquidez, quanto aos resultados granulométricos e de consistências.

Os Saibros J8A1 e J13A3 (Figuras 4.25 e 4.26), que são areias siltosas e argilosas, onde observa-se semelhanças nas curvas de carga x deslocamento e na quantidade de Silte + Argila contidas nos materiais que são menores do que 20% do total. Os deslocamentos nas umidades correspondentes aos Limites de plasticidade atingiram até 1,5 mm, e quanto aos Limites de Liquidez, eles atingiram um deslocamento máximo de aproximadamente 3,5 mm. As curvas correspondentes às umidades do WL apenas apresentaram uma pequena deformação plástica e uma tensão de endurecimento em um segundo momento (trechos II e III da curva teórica). Os ensaios foram concluídos pela carga máxima de 1000 Newtons.

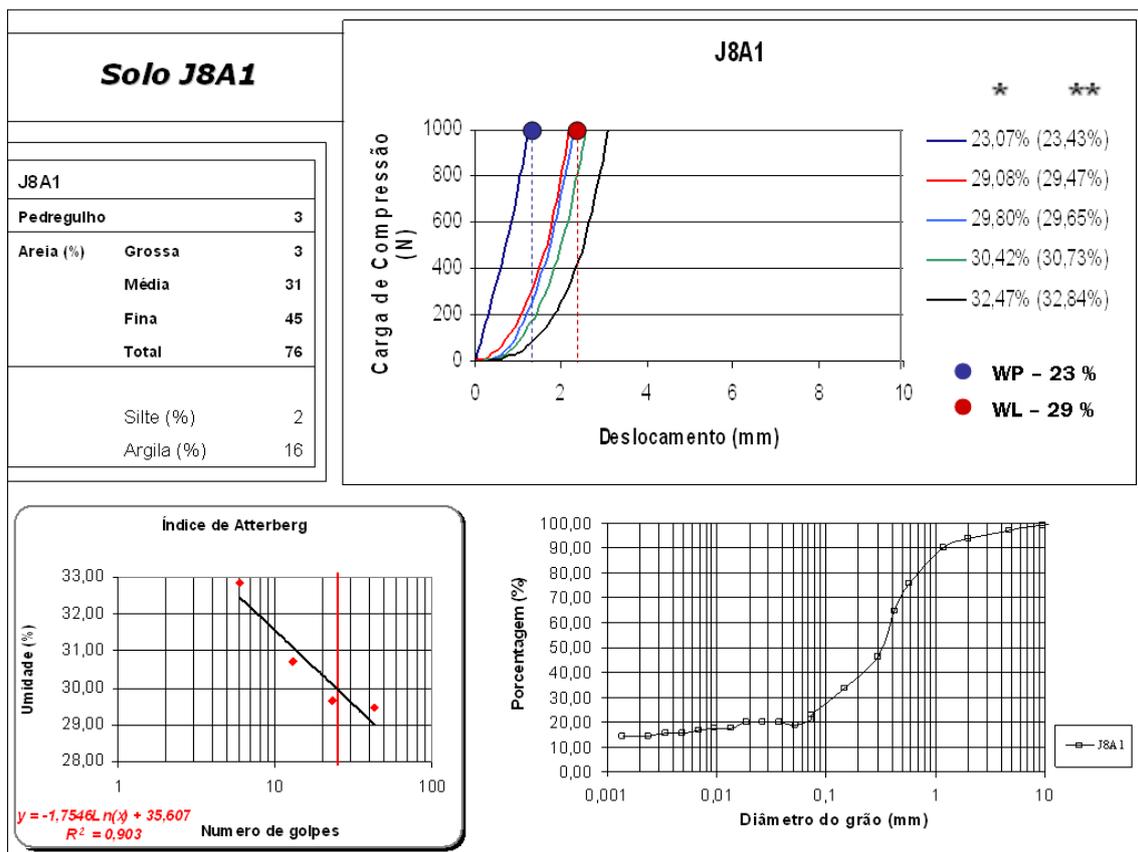


Figura 4.25. Análise integrada do Saibro J8A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

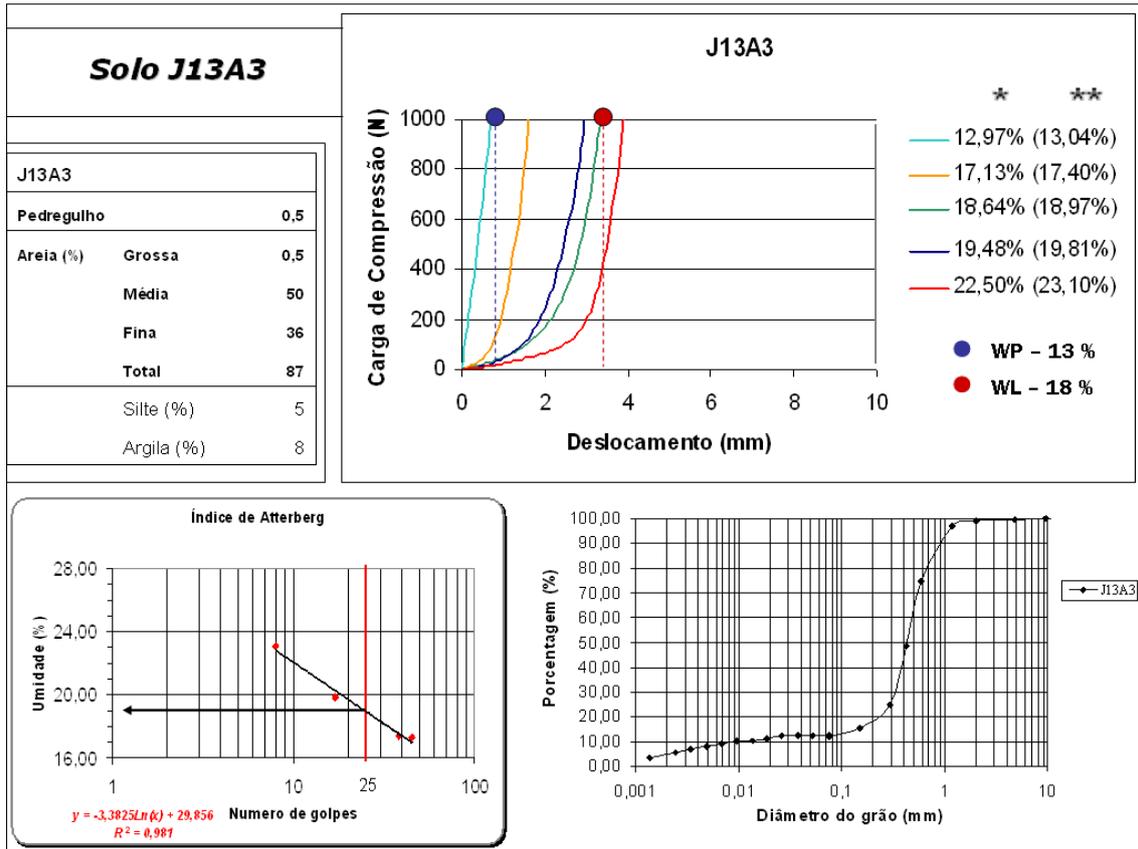


Figura 4.26. Análise integrada do Saibro J13A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

De acordo com as Figuras 4.27 e 4.28, dos Saibros J9A4 (areia argilosa) e J24A1 (areia siltosa), a quantidade de Silte + Argila nestes Saibros não ultrapassam 50%. A curva carga x deslocamento nas umidades correspondentes aos Limites de Liquidez atingiram um deslocamento máximo de 6 mm, onde o Saibro J24A1 possui o maior percentual de Silte + Argila e atinge o maior deslocamento em comparação ao Saibro J9A4 (4%). As curvas carga x deslocamento obtiveram comportamentos referentes aos trechos II e III da curva clássica na umidade correspondente ao WL.

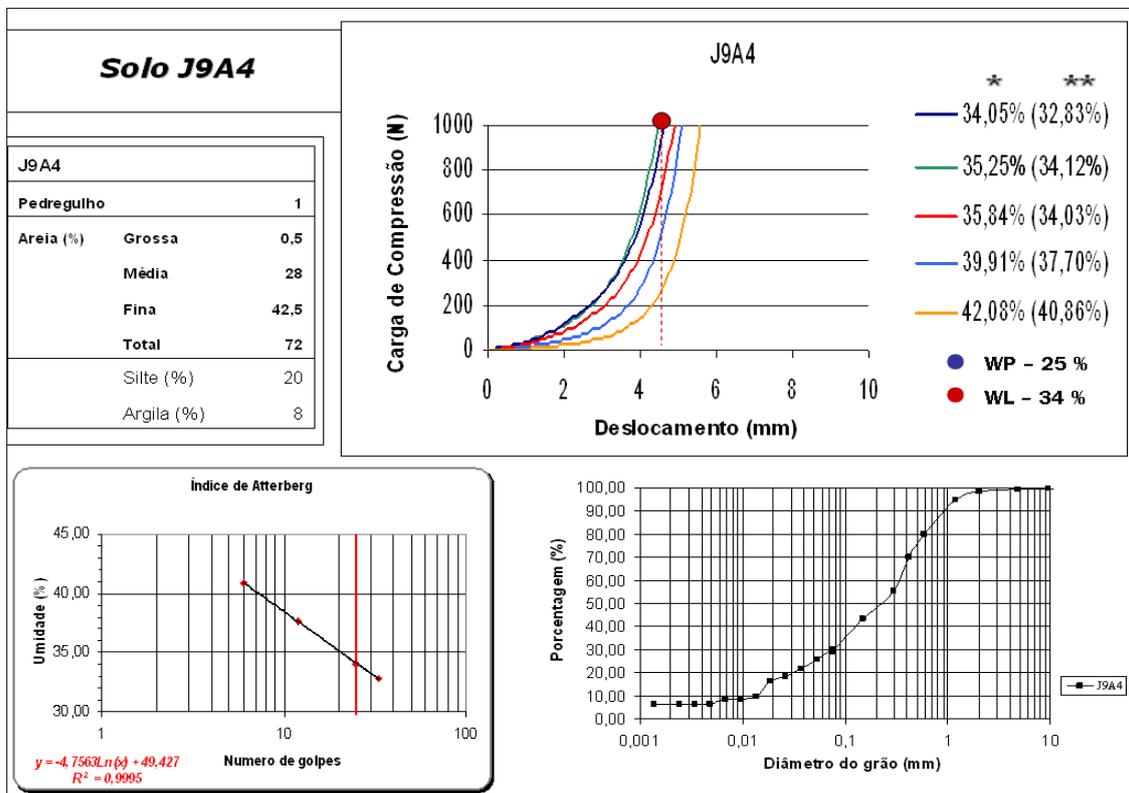


Figura 4.27. Análise integrada do Saibro J9A4 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

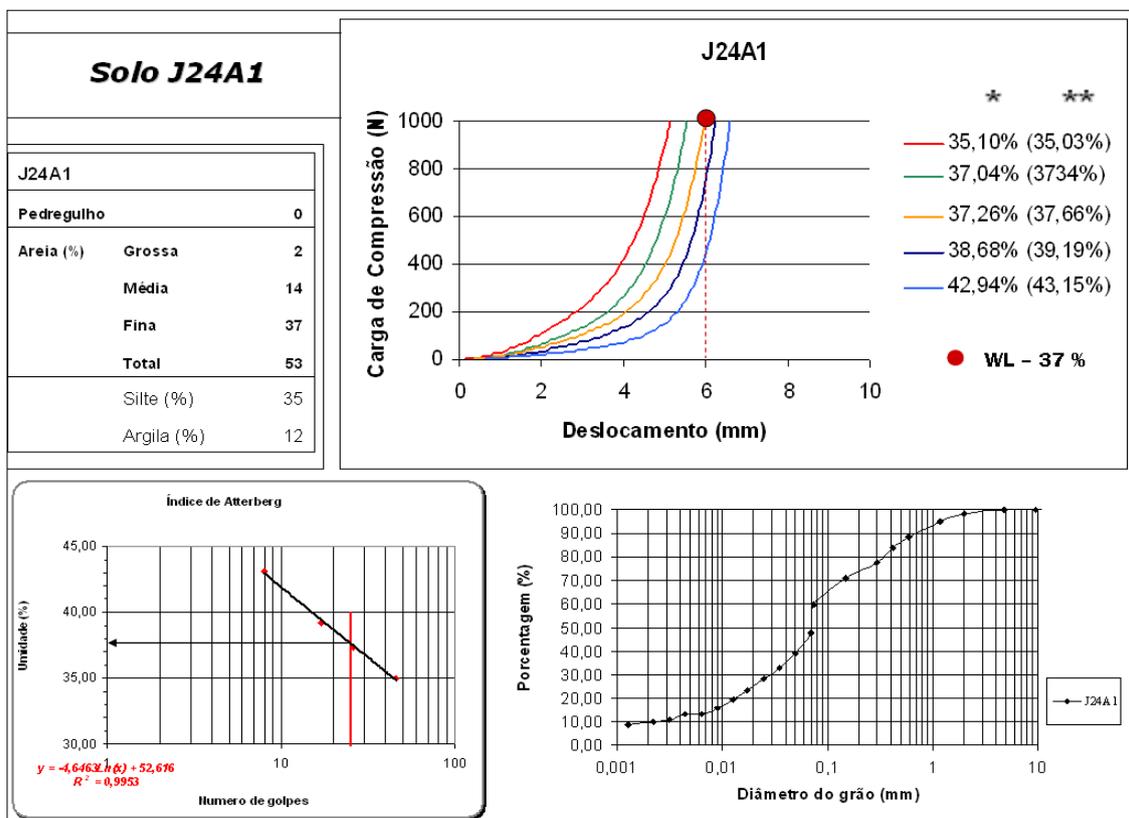


Figura 4.28. Análise integrada do Saibro J24A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

O Saibro J11A1 (Figuras 4.29 e 4.30), argila de alta compressibilidade (a quantidade de Silte + Argila é menor do que 75% e maior do que 50%), na curva carga x deslocamento referente ao Limite de Plasticidade, possui um amplo deslocamento de aproximadamente 6 mm, devido a quantidade de argila que esse material possui que é de 57%. A curva apresenta dois trechos na umidade correspondente ao Limite de Liquidez, onde possui um amplo deslocamento, maior do que o deslocamento referente à umidade correspondente ao seu Limite de Plasticidade, devido à porcentagem de argila e a quantidade de umidade que é maior do que o dobro da quantidade de umidade referente ao ensaio do percentual do WP. Nesta umidade, correspondente ao Limite de Liquidez, a curva apresenta os trechos II e III.

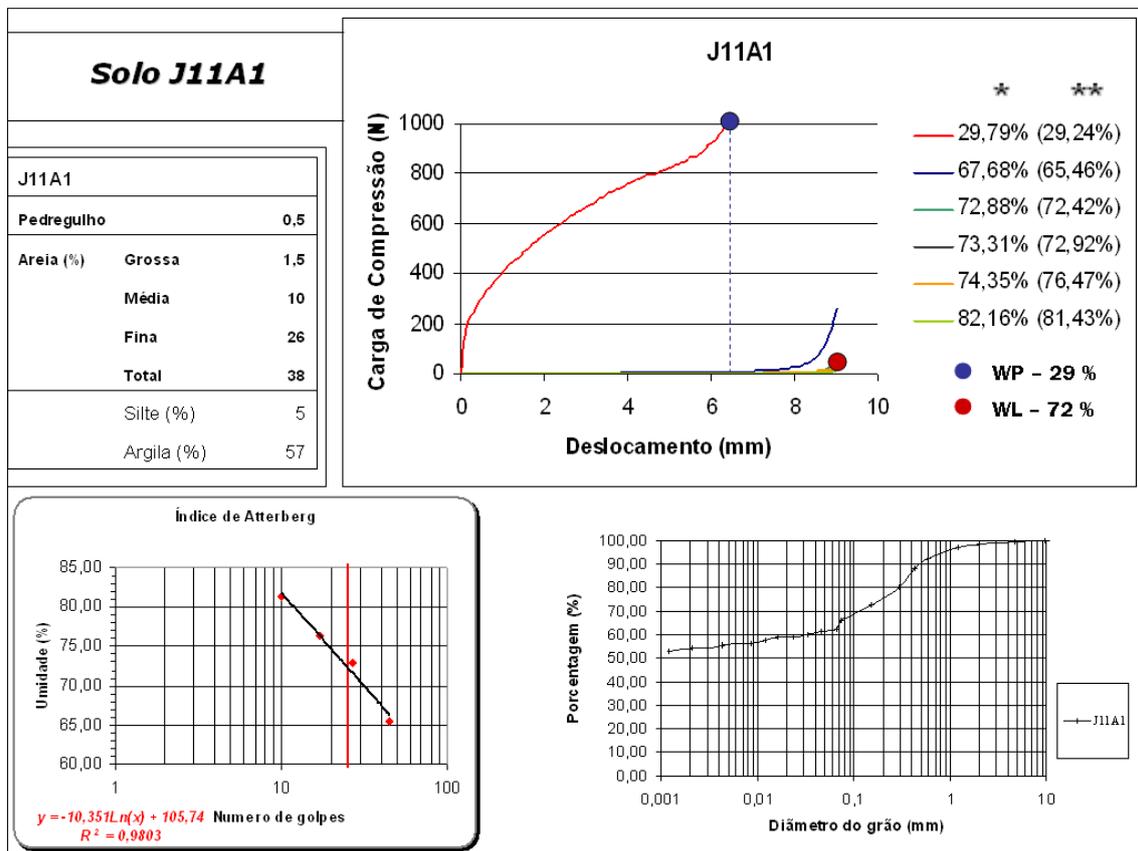


Figura 4.29. Análise integrada do Saibro J11A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

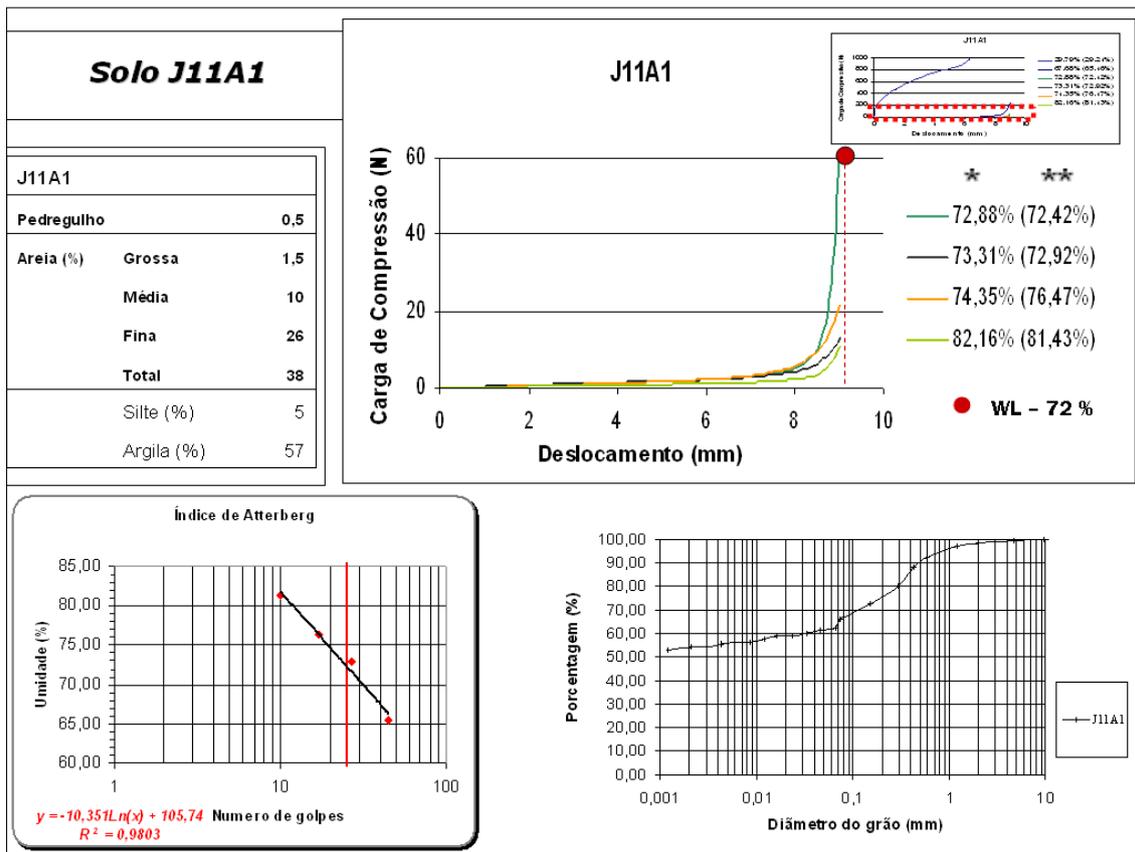


Figura 4.30. Análise integrada do Saibro J11A1 (WL) – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

De acordo com as Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34, dos Saibros J10A1, J9A3 e J19A3 (todos argilas de baixa compressibilidade), e do Saibro J12A1 (silte de alta compressibilidade). As porcentagens de Silte + Argila atingiram aproximadamente 75%. As curvas correspondentes as umidades dos Limites de Plasticidade atingiram o maior espaçamento em 4,5 mm, e os seus Limites de Liquidez atingiram o deslocamento máximo de 9 mm. Os pontos de umidades dos Limites de Liquidez dos Saibros J10A1 e J9A3, tiveram a característica de estarem agrupados, próximos uns dos outros. E os pontos de umidades dos Limites de Liquidez dos Saibros J12A1 e J19A3, tiveram a característica de estarem menos agrupados uns dos outros. O Saibro J12A1, possui 72% de argila e apresenta o menor deslocamento em seu Limite de Plasticidade, e um igual deslocamento em seu Limite de Liquidez quanto ao Saibro J19A3, que possui aproximadamente 28% de argila em sua composição.

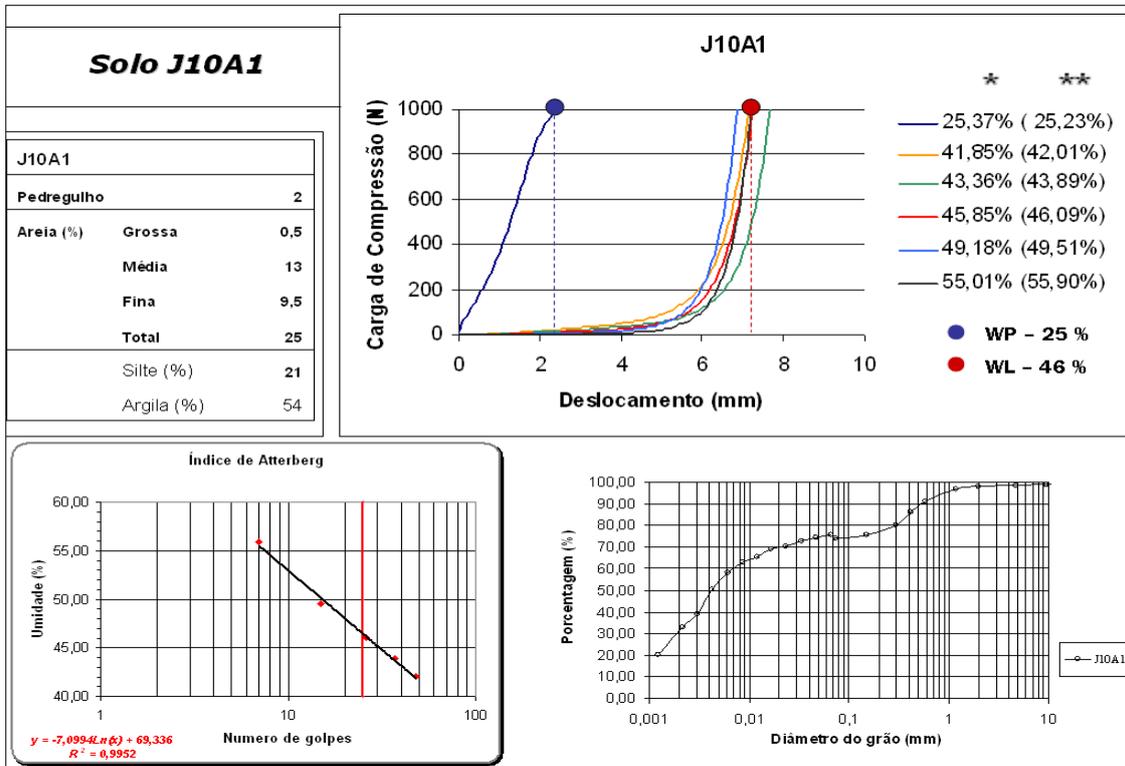


Figura 4.31. Análise integrada do Saibro J10A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

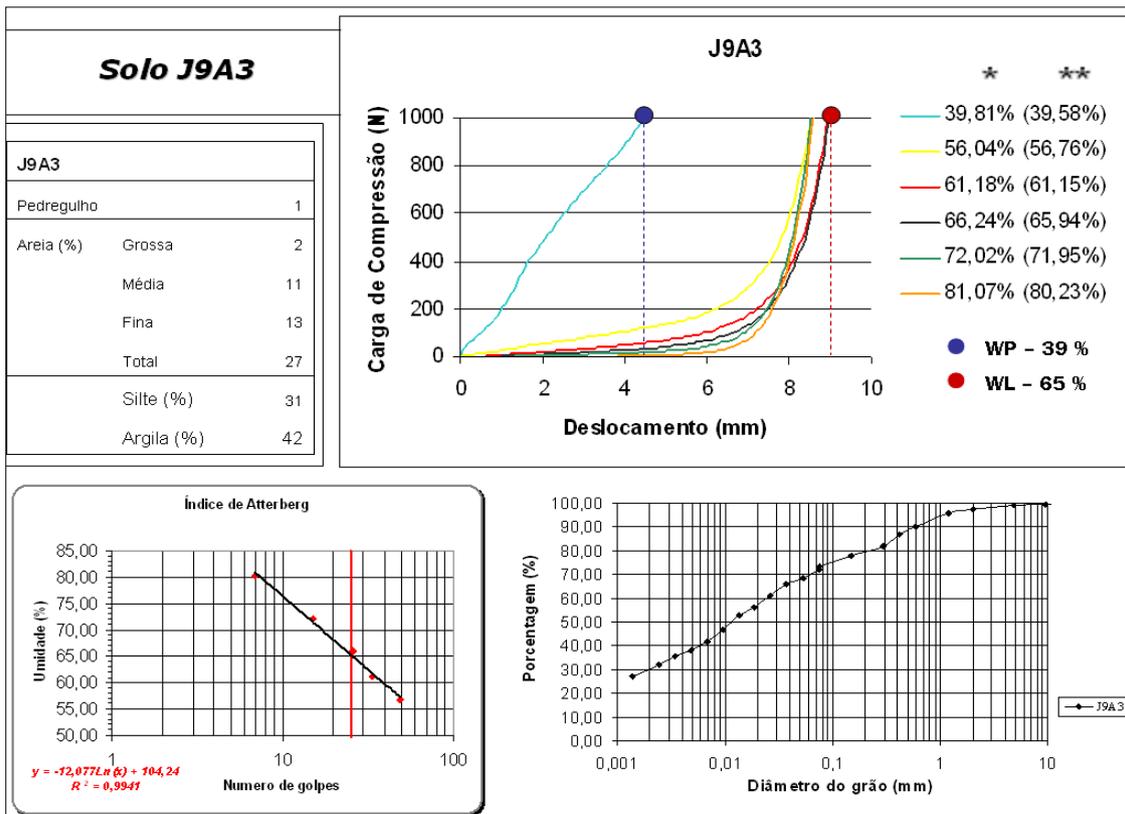


Figura 4.32. Análise integrada do Saibro J9A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

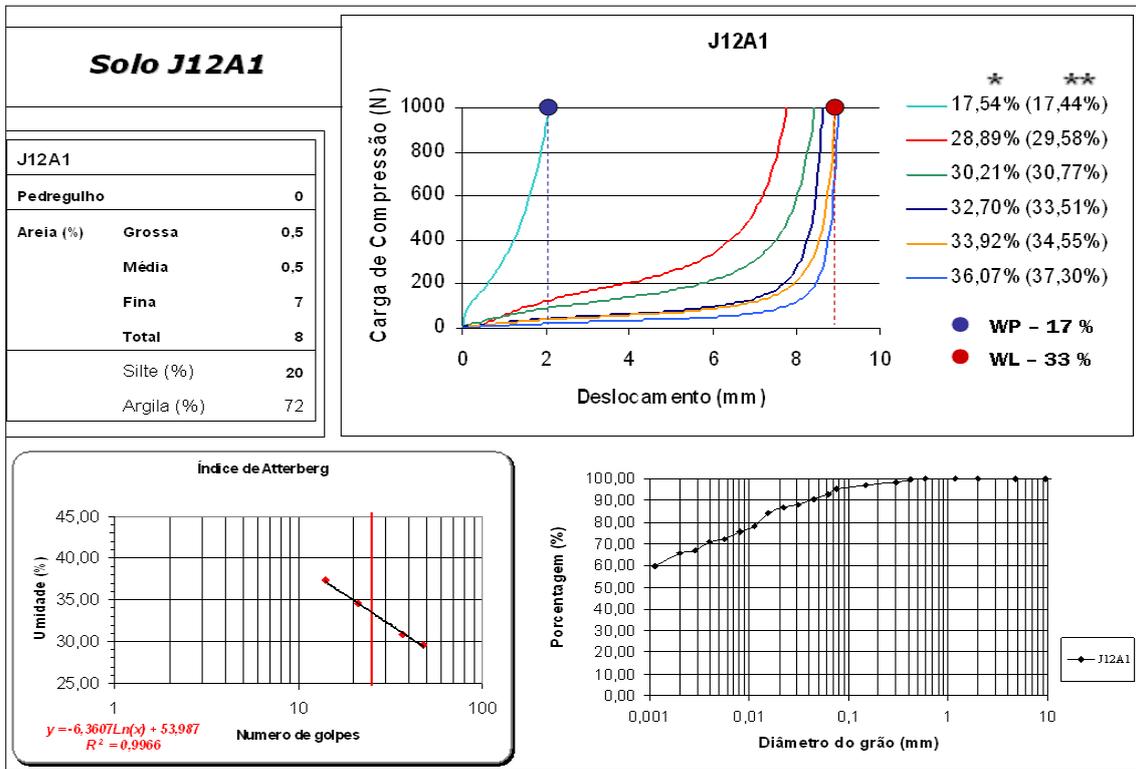


Figura 4.33. Análise integrada do Saibro J12A1 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

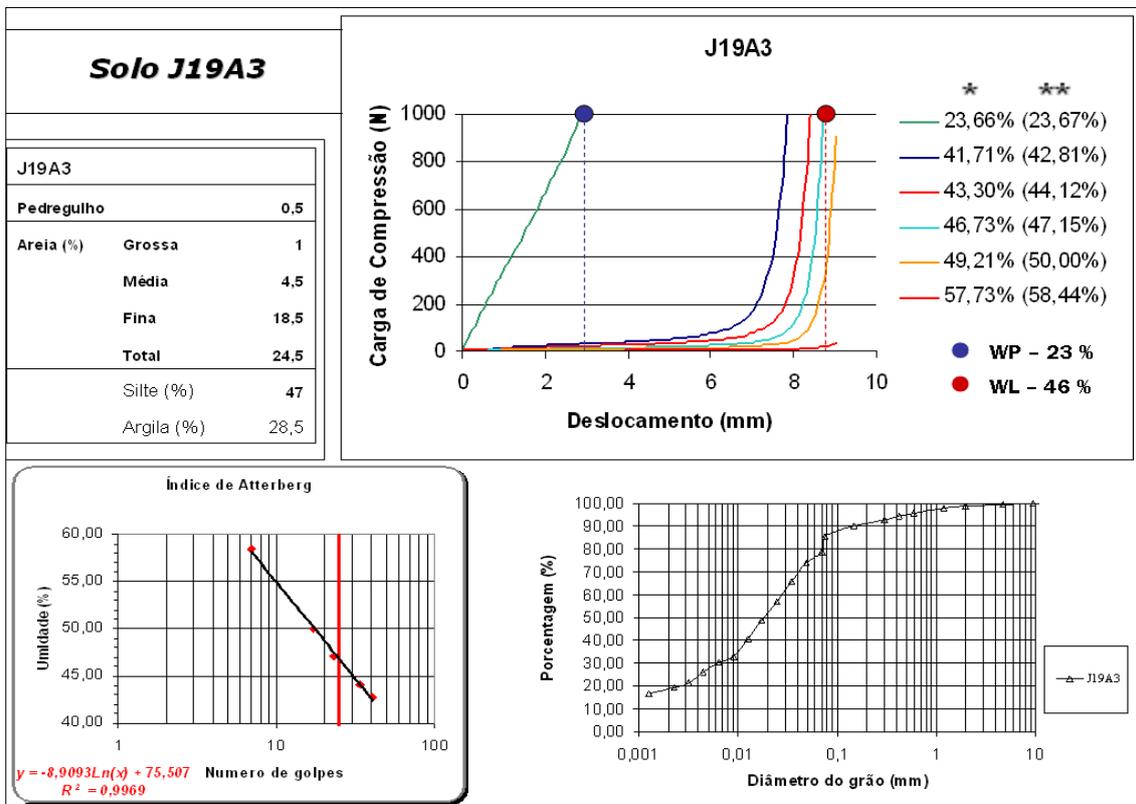


Figura 4.34. Análise integrada do Saibro J19A3 – Resultados granulométricos, consistência, e curva de carga versus deslocamento. (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

4.6 ANÁLISES DOS DADOS DOS ENSAIOS REOLÓGICOS DOS SOLOS E SAIBROS

As Tabelas 4.4 a 4.7, contém os dados dos ensaios reológicos dos Solos e Saibros estudados, referentes às umidades próximas aos Limites de Liquidez e aos Limites de Plasticidade, das curvas carga x deslocamento.

Os resultados dos ensaios reológicos apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, mostram o empacotamento de partículas (referente ao item 2.3.5), que são observados nos Solos e Saibros onde os resultados atingiram 1000 Newtons. Entre os Solos e Saibros referentes às umidades próximas aos Limites de Liquidez, estes resultados não ocorreram apenas nos Solos Caulim, Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%), Bentonita, e no Saibro J11A1. E entre os Solos e Saibros referentes às umidades próximas aos Limites de Plasticidade, estes resultados não foram observados nos Solos Bentonita e Laterítico. Existindo na maioria dos materiais o termino dos ensaios pela ocorrência do empacotamento de partículas.

A Tabela 4.4, mostra que a menor carga destes Solos é o da Bentonita, que atingiu 13 Newtons, o seu deslocamento atingiu 09 milímetros, e o seu Limite de Liquidez é de 322%. A umidade é um fator importante na influência da carga x deslocamento, porém, existem outros fatores de importância que também contribuem. A Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%), que possui 68% de umidade e atinge uma carga total de 400 Newtons, nos mostra que a plasticidade também influencia no maior deslocamento em milímetros, em detrimento de uma menor carga em Newtons.

Tabela 4.4. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Liquidez dos Solos.

Solos	Mistura – Bentonita +				
	Silte	Caulim	Caulim	Bentonita	Solo Laterítico
WL (%)	44	47	68	322	70
Carga (N)	1000	900	400	13	1000
Deslocamento (mm)	7,0	9,0	9,0	9,0	7,0

A Tabela 4.5, referente às umidades correspondentes aos Limites de Liquidez dos Saibros analisados, mostram que os deslocamentos variam entre 2,5 e 9,0 milímetros, isto apresenta uma ampla variedade de deslocamento desses Saibros. Quanto às cargas, elas atingem 1000 Newtons, exceto no Saibro denominado J11A1, que possui uma carga de 60 Newtons, apresentando este Saibro a maior umidade dos Limites de Liquidez dos nove materiais estudados que é de 72%. Isto reforça a análise que apresenta a relação de quanto maior a umidade, maior o deslocamento (milímetro) e menor a carga (Newton). Entretanto, o Saibro J9A3 possui uma umidade de 65%, atingiu a carga máxima em 1000 Newtons e um deslocamento máximo de 9,0 milímetros.

Tabela 4.5. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Liquidez dos Saibros.

Solos	J8A1	J13A3	J9A4	J24A1	J11A1	J10A1	J9A3	J12A1	J19A3
WL (%)	29	18	34	37	72	46	65	33	46
Carga (N)	1000	1000	1000	1000	60	1000	1000	1000	1000
Deslocamento (mm)	2,5	3,5	4,5	6,0	9,0	7,0	9,0	9,0	9,0

Nas umidades relacionadas aos Limites de Plasticidade dos Solos estudados, a Tabela 4.6, mostra uma variação de deslocamento entre 5,0 e 9,0 milímetros. A relação de umidade (%) x carga (Newton), que a partir de uma maior umidade, a carga diminui, serviu para a maior e a segunda maior umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, onde a Bentonita (70%) e o Solo Laterítico (45%), atingiram as menores cargas, a de 900 e 650 Newtons, consecutivamente. Quanto à relação de umidade x deslocamento, que corresponde a quanto maior a porcentagem de umidade, maior também o deslocamento. Os Solos que possuem as maiores umidades são, Bentonita (70%) e o Solo Laterítico (45%), obtiveram os maiores deslocamentos que foram de 9,0 milímetros, terminando os ensaios pelo deslocamento e não pela carga máxima.

Tabela 4.6. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Plasticidade dos Solos.

Solos	Mistura - Bentonita +				
	Silte	Caulim	Caulim	Bentonita	Solo Laterítico
WP (%)	28	33	37	70	45
Carga (N)	1000	1000	1000	900	650
Deslocamento (mm)	5,0	6,0	6,0	9,0	9,0

Nas umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade dos Saibros, os resultados mostraram variações nos deslocamentos em milímetros entre 1,0 mm (J13A3) – 6,5 mm (J11A1), o Saibro J24A1 não apresentou plasticidade (NP), e o Saibro J9A4, não possui o ensaio do Limite de Plasticidade. O Saibro J9A3, que apresenta a maior porcentagem de umidade (39%), possui o segundo maior deslocamento, o de 4,5 milímetros, e o segundo Saibro com a maior porcentagem de umidade, o J11A1, obteve o maior deslocamento, o de 6,5 milímetros, estes resultados estão de acordo com o esperado, visto que quanto maior a porcentagem de umidade, maior o deslocamento em milímetros, e quanto menor a porcentagem de umidade, menor o deslocamento, como pode ser observado na Tabela 4.7. Quanto à carga, entre todos os Saibros que possuem os resultados correspondentes aos Limites de Plasticidade, todos atingiram a capacidade máxima, a de 1000 Newtons.

Tabela 4.7. Valores de Carga e Deslocamento Máximos dos Limites de Plasticidade dos Saibros.

Solo	J8A1	J13A3	J9A4	J24A1	J11A1	J10A1	J9A3	J12A1	J19A3
WP (%)	23	13	25	NP	29	25	39	17	23
Carga (N)	1000	1000	-		1000	1000	1000	1000	1000
Deslocamento (mm)	1,5	1,0	-		6,5	2,5	4,5	2,0	3,0

4.7 CURVAS CARGA VERSUS DESLOCAMENTO OBTIDAS ATRAVÉS DO SQUEEZE-FLOW

Algumas características nas formas das curvas carga x deslocamento obtidas nos ensaios com Solos e Saibros em várias umidades antes e após as umidades referentes aos Limites de Liquidez associadas ao percentual de Silte + Argila, ao Índice de Plasticidade e ao deslocamento máximo atingido, são apresentados na Figura 4.35 e Tabela 4.8, e as umidades referentes aos Limites de Plasticidade são apresentadas na Figura 4.36.

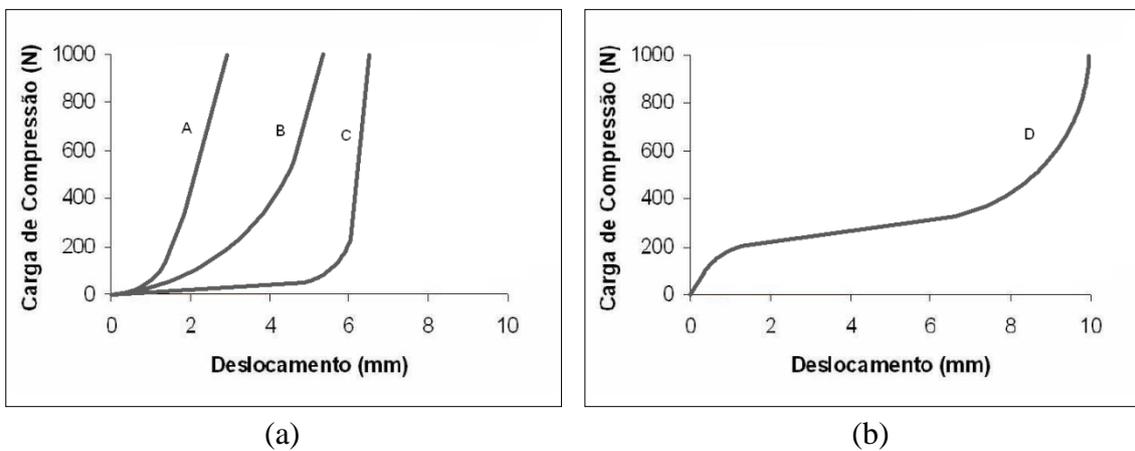


Figura 4.35. Curva carga x deslocamento correspondente à umidade no Limite de Liquidez.

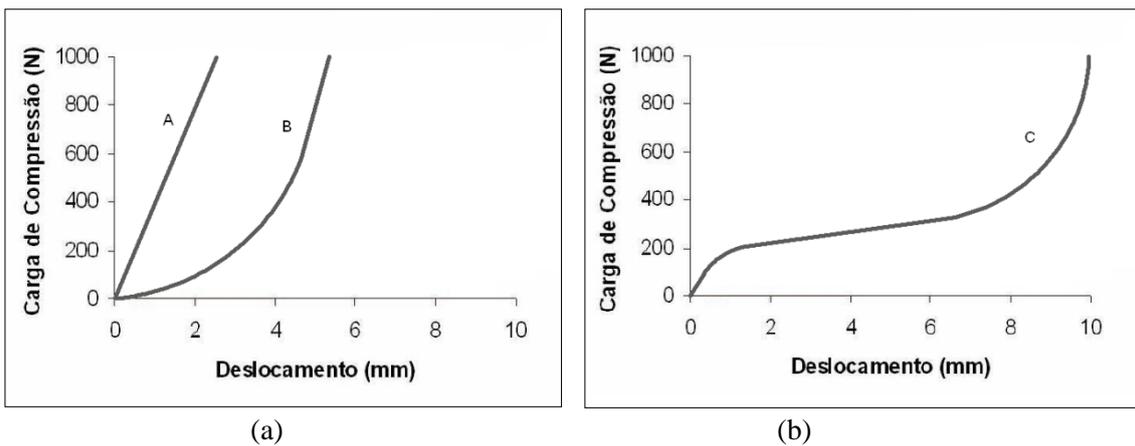


Figura 4.36. Curva carga x deslocamento correspondente à umidade no Limite de Plasticidade.

Tabela 4.8. Fatores influentes na forma da curva carga versus deslocamento em umidades correspondentes ao Limite de Liquidez.

Fatores	Curva A	Curva B	Curva C	Curva D
Trecho da Curva Clássica	II e III	II e III	II e III	I, II e III
% de Silte + Argila	< 20	20 < % < 50 %	50 < % < 75%	-
IP (%)	< 7	7 < IP < 15	> 15	-
WP (%)	-	-	-	> 45
Deslocamento Máximo – DM (mm)	< 3,5	3,5 < DM < 5	> 5	-
Exemplos Ocorridos	J8A1 e J13A3	Silte, Solo Laterítico, J9A4, J12A1 e J24A1	Caulim, J10A11, J11A1, J12A1 e J19A3	Bentonita, Mistura de Bentonita (50%) e Caulim (50%)

O formato da curva carga x deslocamento em umidades correspondentes aos Limites de Liquidez dependem dos fatores da porcentagem de Silte + Argila e consistência, que por sua vez influencia no deslocamento máximo atingido para que a carga máxima ocorra.

Observando a Figura 4.36, verifica-se que o formato da Curva A, que corresponde às umidades referentes aos Limites de Plasticidade, só apresenta o trecho I da curva clássica (Figura 2.5), e ocorre nos Solos Caulim e Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%), e nos Saibros J8A1, J9A3, J10A1, J12A1, J13A3 e J19A3. Na mesma Figura, a curva B só ocorre no Silte e apresenta os trechos II e III da curva clássica. A Curva C da Figura 4.36, apresenta os três trechos da curva clássica e foi observado na Bentonita, Solo Laterítico e no Saibro J11A1.

Em umidades correspondentes aos Limites de Liquidez, foi possível agrupar fatores que influenciaram no formato da curva, como por exemplo: porcentagem de Silte + Argila e consistência. O mesmo não foi possível fazer com relação às umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade, porque há uma predominância da curva Tipo A, em que a maioria dos Solos e Saibros apresentaram o trecho I da curva clássica.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas através dos experimentos realizados e dos resultados obtidos.

- Os Solos e os Saibros analisados apresentam uma grande variação quanto ao Índice de Plasticidade. Nos Solos, os índices de Plasticidade variaram de 14% no Caulim a 252% na Bentonita, sendo classificados como medianamente plástico a altamente plásticos. Nos Saibros a variação quanto ao índice de Plasticidade foi menor, variando da condição não plástica no J24A1 a 43%, e no J11A1, considerado altamente plástico ($IP > 15\%$).
- É grande a variação da distribuição granulométrica nos Saibros. Quatro são arenosos, contendo fração fina e são classificados como areia siltosa e argilosa (J8A1 e J13A3), areia argilosa (J9A4) e areia siltosa (J24A1). Quatro são argilosos (J10A1, J11A1, J12A1 e J19A3) e um siltoso (J9A3).
- A moldagem dos corpos de prova e o procedimento dos ensaios com o Squeeze-Flow são simples, entretanto, requer cuidados especiais na uniformidade da umidade das amostras ensaiadas e dos ajustes, para que os corpos de prova fiquem na altura do molde.
- A forma da curva carga versus deslocamento em umidades correspondentes aos Limites de Liquidez, apresenta o segundo e terceiro trechos da curva clássica para todos os Solos e Saibros ensaiados, exceto para a Bentonita e a Mistura de Bentonita (50%) + Caulim (50%), que apresentaram os três trechos. Os deslocamentos máximos atingidos para a carga máxima dependem das frações de Silte, Argila e da consistência dos Solos e Saibros.

- A forma da curva carga versus deslocamento em umidades correspondentes aos Limites de Plasticidade apresentou a predominância apenas do trecho I da curva clássica, para todos os Solos e Saibros, exceto para o Silte, que apresentou os trechos II e III, e os Solos Bentonita, Laterítico e o Saibro J11A1, que apresentaram os três trechos. Não ficou evidente uma relação entre a granulometria e a consistência.
- Os deslocamentos dos materiais (Solos ou Saibros) no final do ensaio com o Squeeze-Flow, apresentam-se em três formas. A primeira não há deslocamento perceptível no corpo de prova, e o ensaio é concluído por atingir a carga máxima, é observado em umidades próximas aos Limites de Plasticidade. A segunda, o material se desloca predominantemente para baixo, e ocorrem pequenos deslocamentos para cima, no entorno da punção. Na terceira fase, o material se desloca em todas as direções, com levantamento do solo no entorno da punção, existindo grande movimento do material.
- O ensaio Squeeze-Flow é uma técnica capaz de aferir com grande sensibilidade a variação e a forma da curva carga versus deslocamento dos materiais (Solos e Saibros) em umidades correspondentes as obtidas através dos ensaios referentes à utilização do aparelho de Casagrande. Para umidades menores do que o Limite de Liquidez, as curvas encontram-se localizadas a esquerda, em comparação às curvas das umidades do Limite de Liquidez, apresentam menores deslocamentos, os ensaios são concluídos por atingirem a carga máxima e apresentarem predominância de curvas com o trecho I, ou I e II da curva clássica. Para umidades acima do Limite de Liquidez, as curvas encontram-se a direita da correspondente curva na umidade do Limite de Liquidez, apresentam maiores deslocamentos, os ensaios são concluídos por atingirem a carga máxima, ou por atingirem o deslocamento máximo, estes resultados apresentam predominância das curvas com os trechos II e III, ou dos três trechos da curva clássica.

5.2 SUGESTÕES

- Realizar ensaios com as alturas dos corpos de prova contendo dimensões maiores do que 20 a 30 mm, e utilizar células de carga de maiores capacidade.
- Analisar a influência do tamanho das partículas dos solos em relação às dimensões das cargas de prova.
- Monitorar a variação de umidade dos corpos de prova antes e após o processo de carregamento.
- Relacionar a origem e formação, mineralogia, superfície específica, com a forma das curvas carga versus deslocamento obtidas no Squeeze-Flow.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

BARNES, Howard A.; HUTTON, J.F.(John Fletcher), 1924-.; WALTERS, Kenneth, 1934. **An introduction to rheology.** Amsterdam: Elsevier, c1989.. 199p. ((Rheology series ; v.3)) ISBN 0444874690 (enc.)

BRADY, Nyle C., **Natureza e propriedades dos solos.** 5. ed. -. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1979. 647p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed., rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1996. v. ISBN 8521605595

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico.** Tese Doutorado. Universidade de São Paulo Escola Politécnica, 2009.

COSTA, Joaquim Botelho da. **Caracterização e constituição do solo.** 2. ed. rev. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979. 527p.

CURI, N.; LARCH J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L.E. F. **Vocabulário de Ciência do Solo,** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, 1993. 90p.

FERREIRA, S. R. M. **Estudo das Características Físicas, Químicas e Mineralógicas de Saibros para uso em Argamassas de Revestimento e Análise de Patologias em Argamassas de Saibro.** Relatório de Estágio de Pós-doutorado. Universidade de São Paulo Escola Politécnica, 2010.

FUTAI, Marcos Massao. Comunicação pessoal, São Paulo, Universidade de São Paulo, 2010.

GAVANDE, Sampat A. **Física de suelos principios y aplicaciones** . Mexico D.F. : Lemusa-Wiley : A.I.D., 1972.. 351p.

GUSMÃO FILHO, Jaime de Azevedo. **Solos: da formação geológica ao uso na engenharia**. 2. ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2008.

MASSEY, B. S. **Mecânica dos fluidos / 2002 - Livros** - Acervo 127608. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 998 p.

NAVARRO, Rômulo Feitosa. **Fundamentos da reologia de polímeros**. Caxias do Sul: EDUCS, 1997. 264 p.

NASH, William A. **Resistencia dos materiais - 3. ed. / c1990 - Livros** - Acervo 31599. ed. Sao paulo: Makron books do brasil, c1990. 521 p. : il. -- (coleccion shaum).

NBR 6459. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

NBR 7180. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Solo – Determinação do Limite Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

NBR 7181 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

PAIVA, Sérgio Carvalho de. **Estudo químico do saibro coletado na região metropolitana do Recife para utilização nas argamassas de assentamento e revestimento de alvenaria**. 2008. 153, [2] f. : Dissertação (mestrado) - Universidade

Católica de Pernambuco. Pró-reitoria de Ensino, Pesquisa e Extensão. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2008.

PILEGGI, Rafael Giuliano. **Ferramentas para o Estudo e Desenvolvimento de Concretos Refratários**. Tese Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2001.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de textos, c2000. 247 p. ISBN 8586238120

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1993. 368 p. : il

RÊGO, Wellington Amorim . **Caracterização física dos saibros da região metropolitana do Recife utilizados em argamassa / 2008 - Dissertações - (Mestrado)** Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. Pró-reitoria de Ensino, Pesquisa e Extensão. Curso de Mestrado em Engenharia Civil, 2008.

SCHRAMM, Gebhard. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos** . 2. ed. São Paulo, SP: Artliber, 2006. 232, [2]p. ISBN 8588098342 (broch.).

SCHIOZER, Dayr. **Mecânica dos fluidos - 2. ed. / c1996 - Livros - Acervo 63229** . 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, c1996. 629 p. : il.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. **Determinação do Limite de Liquidez em dois Tipos de Solos, Utilizando-se Diferentes Metodologias**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.3, p.460-464, 2000.

STREETER, Victor Lyle. **Fluid Mechanics - 9. ed. / 1998 - Livros - Acervo 66633**; BEDFORD, KEITH W. Fluid mechanics. 9. ed. Boston: Wcb/mcgraw-hill, 1998. 740 p. il ISBN 0-07-115600-3.

APÊNDICE A

Entre as Figuras A.1 e A.16, estão às declividades das curvas carga versus deslocamento dos Solos e Saibros que foram determinadas para os deslocamentos (0, 2, 4, 6, 8, e 10) milímetro, e as cargas (0, 200, 400, 600, 800, e 1000) Newton, ver item 3.5 e Figura 3.7. Correspondentes às umidades próximas aos Limites de Liquidez e de Plasticidade. Salvo dos ensaios referentes às umidades dos Limites de Liquidez da Bentonita e do Saibro J11A1, que não seguiram esses parâmetros, entretanto, seguem as divisões das regiões de maneira proporcional aos parâmetros descritos anteriormente.

Solos

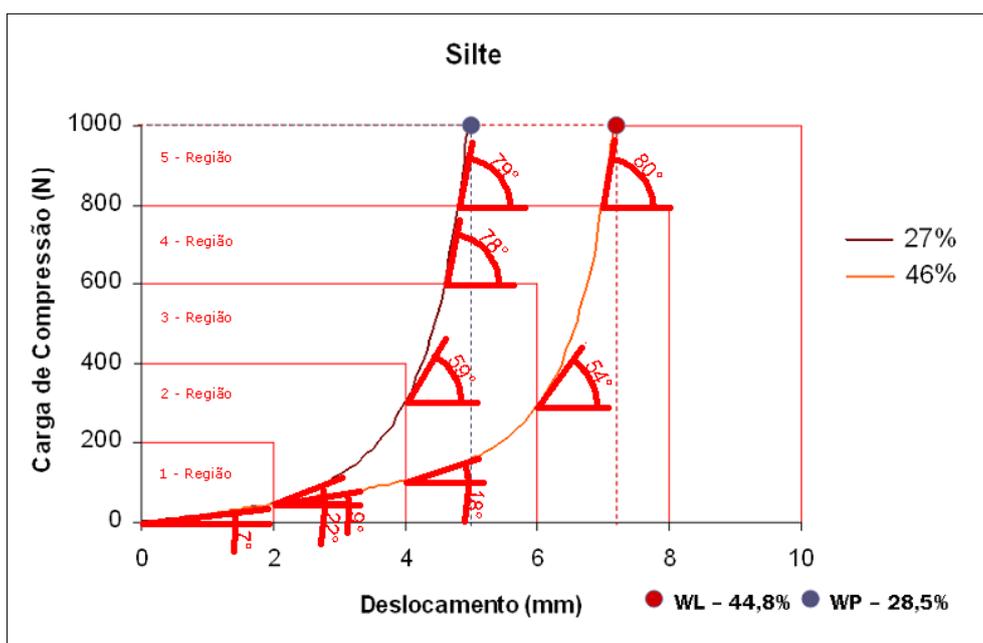


Figura A.1. Curva carga versus deslocamento das declividades – Silte.

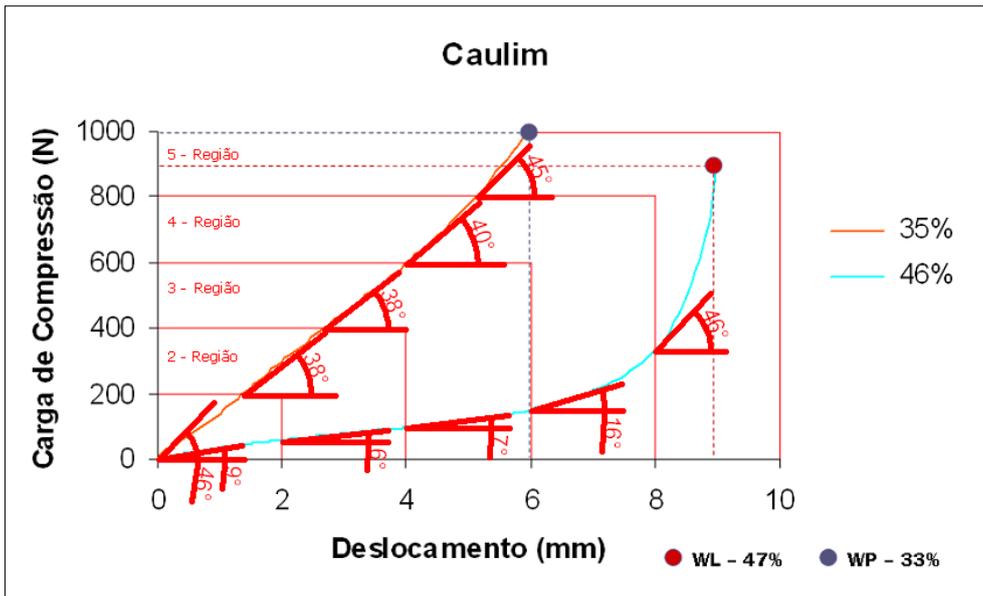


Figura A.2. Curva carga versus deslocamento das declividades – Caulim.

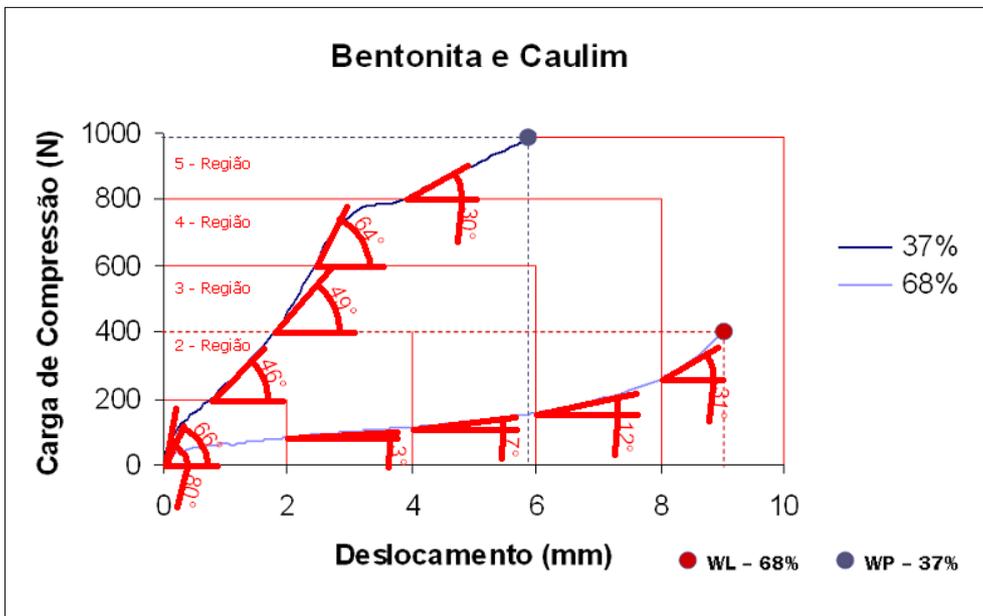


Figura A.3. Curva carga versus deslocamento das declividades – Bentonita (50%) + Caulim (50%).

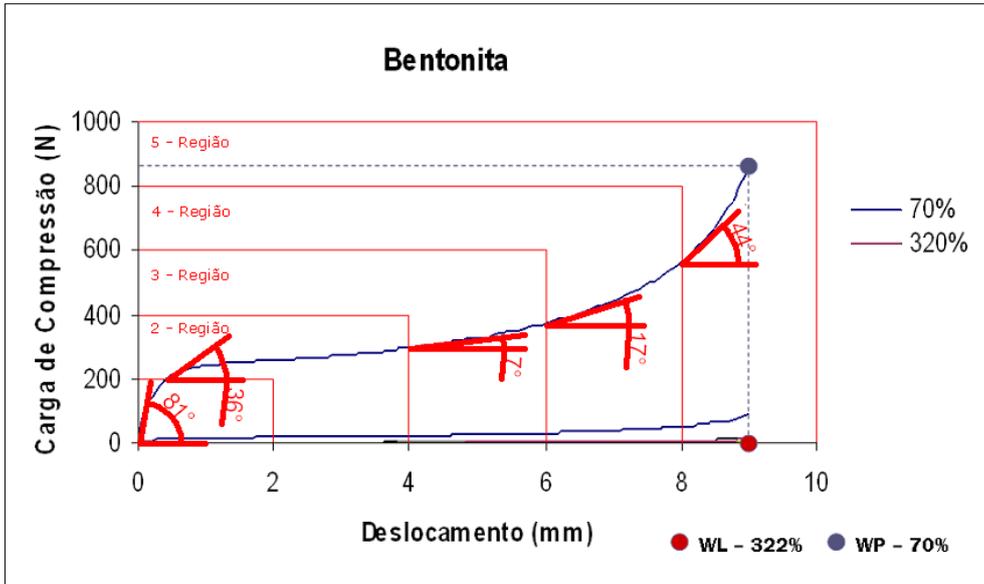


Figura A.4. Curva carga versus deslocamento das declividades – Bentonita (WP).

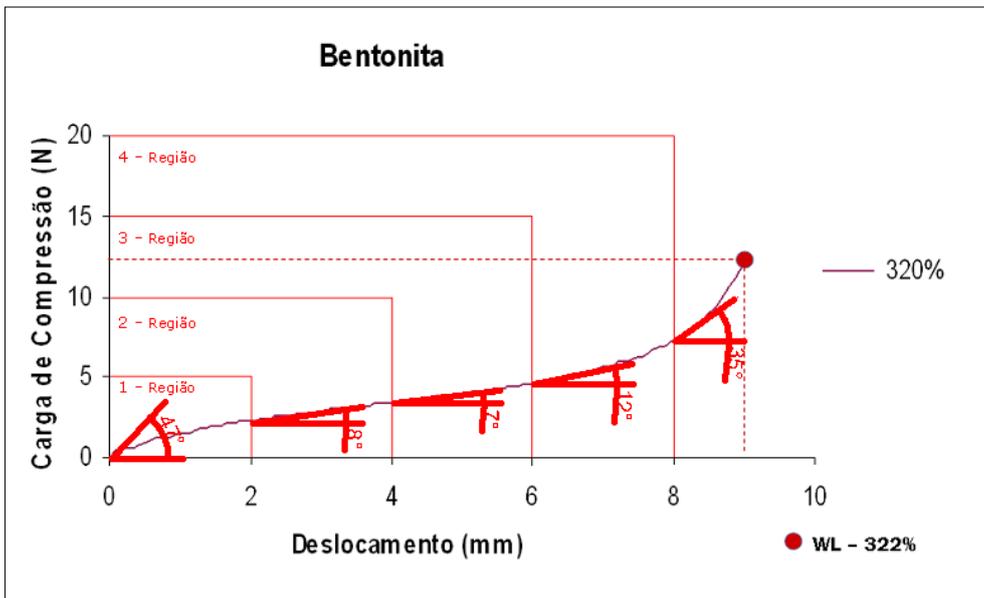


Figura A.5. Curva carga versus deslocamento das declividades – Bentonita (WL).

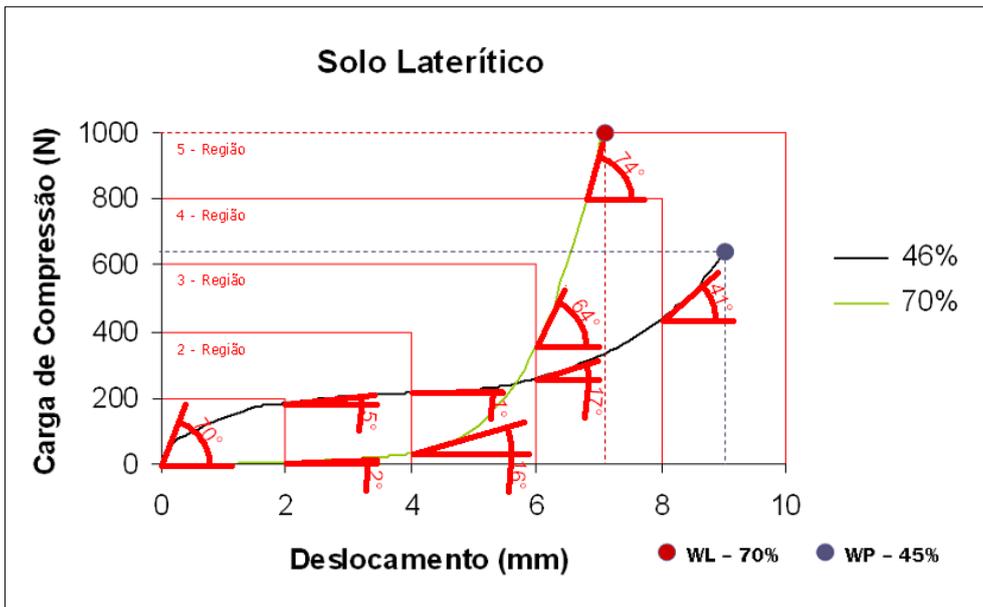


Figura A.6. Curva carga versus deslocamento das declividades – Solo Laterítico.

Saibros

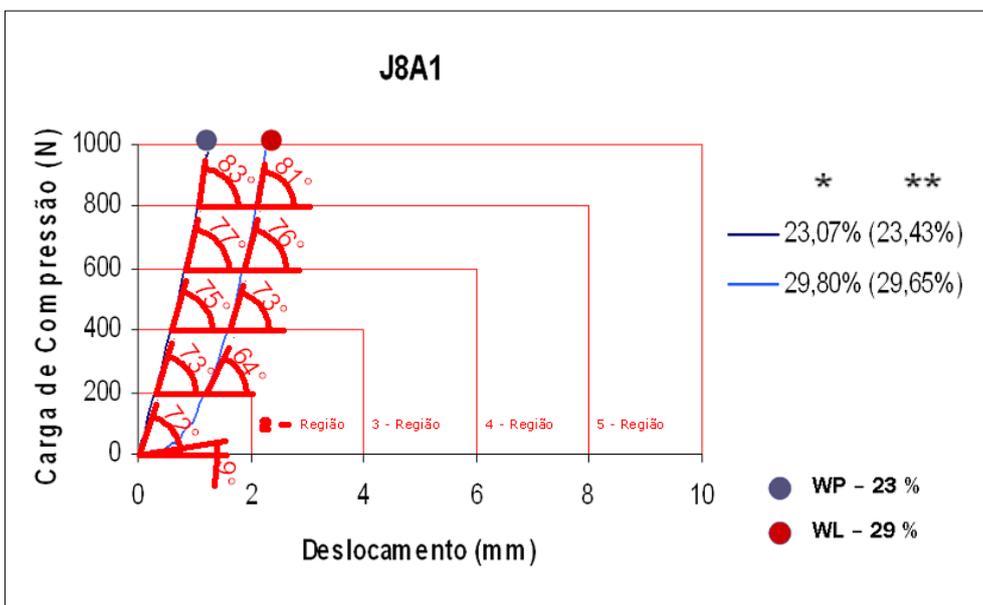


Figura A.7. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

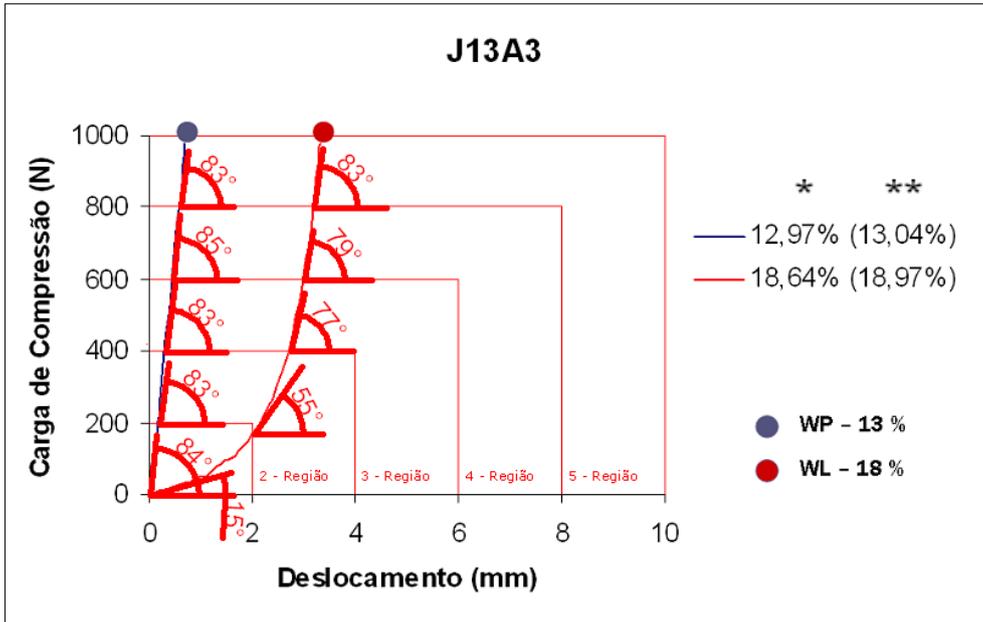


Figura A.8. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

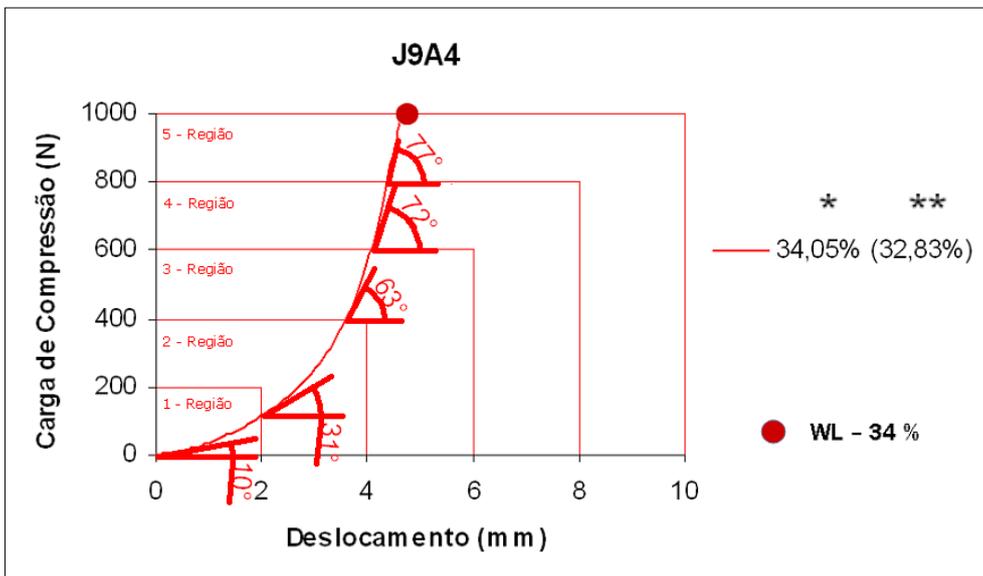


Figura A.9. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

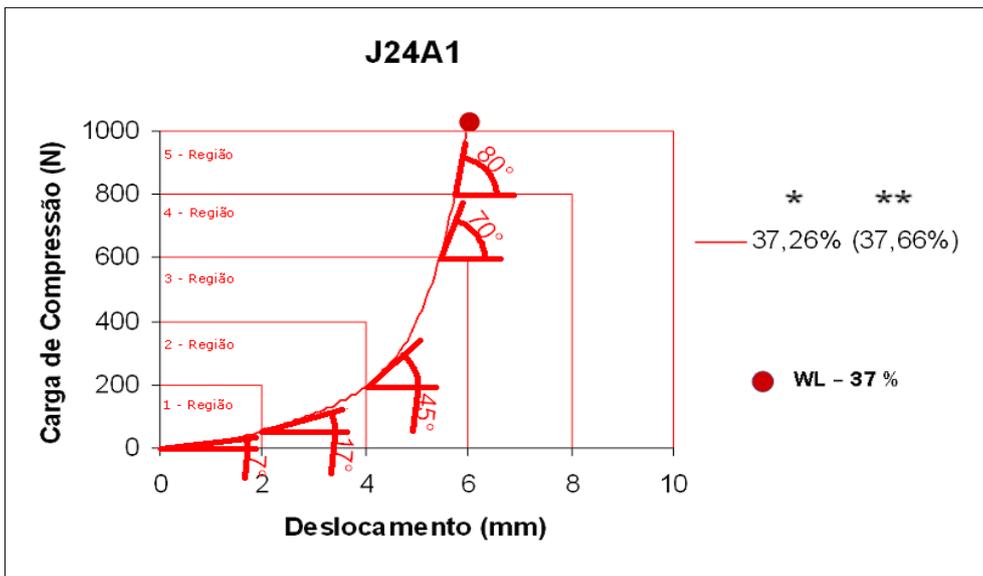


Figura A.10. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

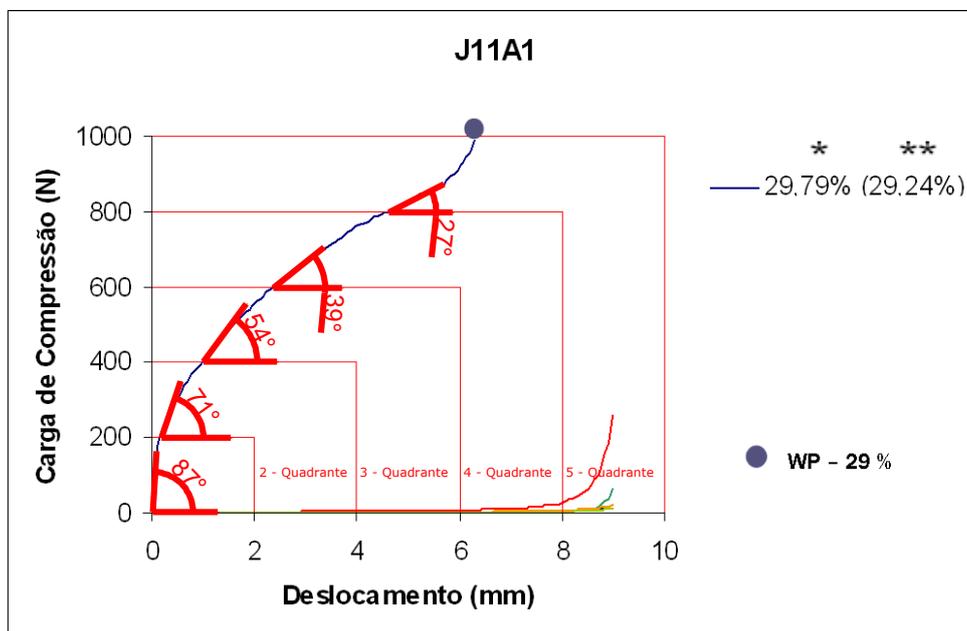


Figura A.11. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J11A1 (WP) (* - Umidade do WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

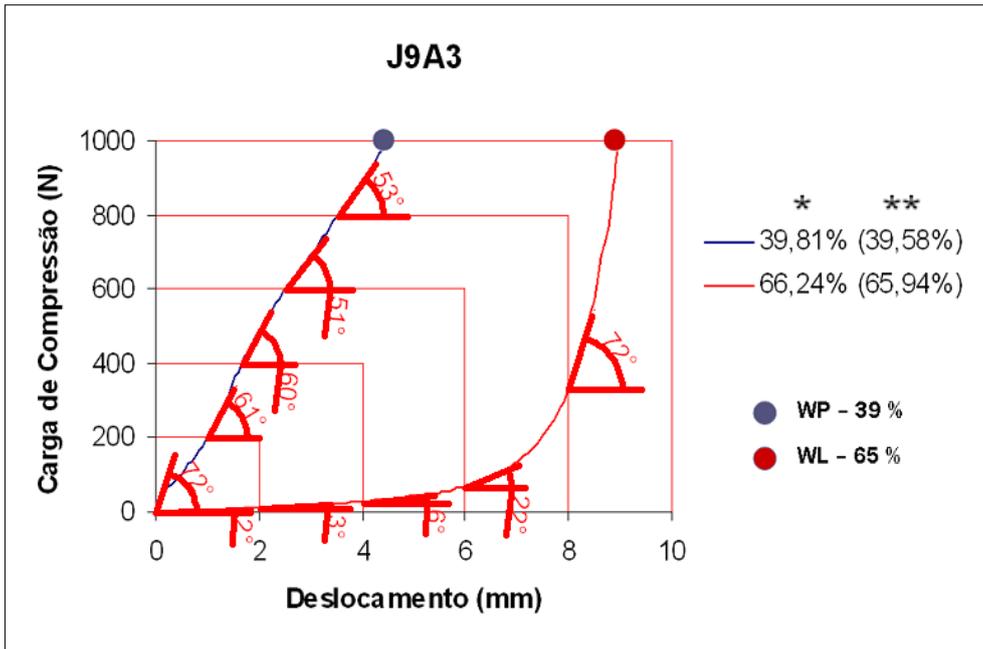


Figura A.14. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

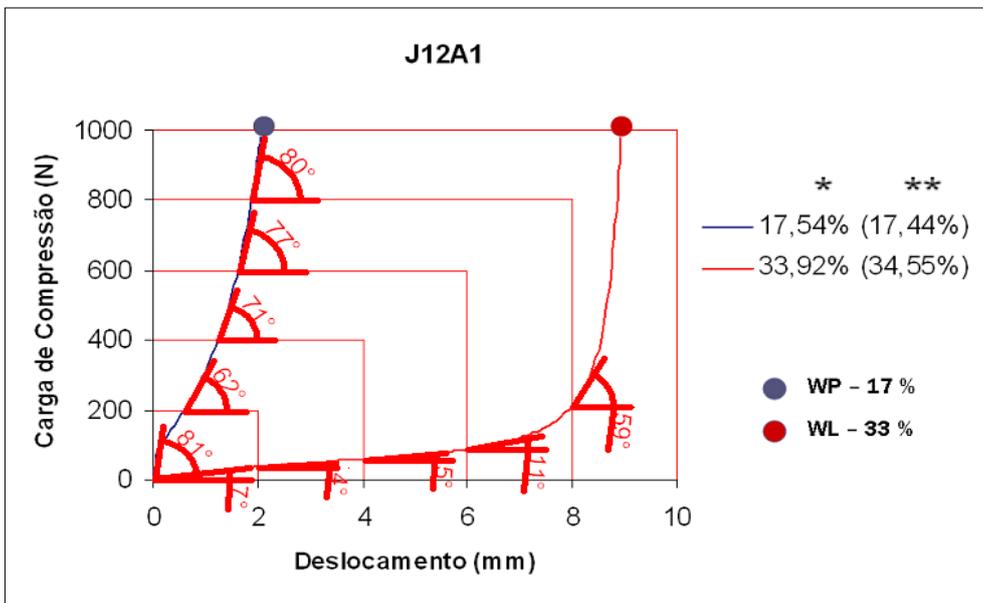


Figura A.15. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

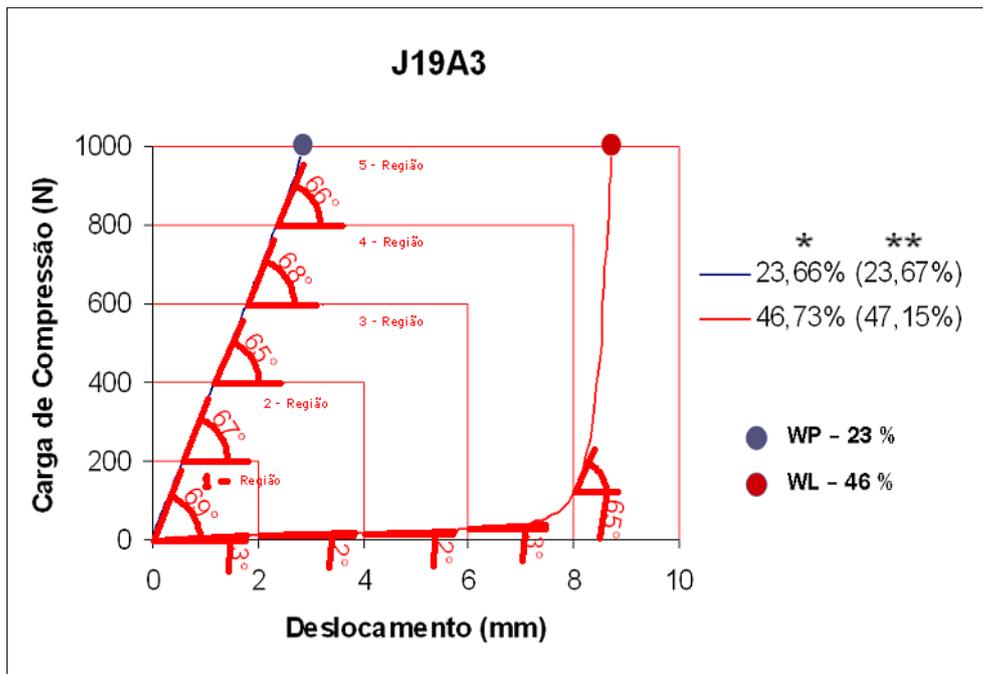


Figura A.16. Curva carga versus deslocamento das declividades – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

APÊNDICE B

Entre as Figuras B.1 e B.92, estão às curvas carga (Newton) versus deslocamento (milímetro) dos Solos e Saibros de todos os ensaios realizados na pesquisa, cada amostra contém no mínimo três ensaios similares às umidades abstraídas das técnicas tradicionais referentes aos Limites de Liquidez e de Plasticidade. Nos ensaios de todos os Saibros, foram verificados às Umidades Reais de todas as amostras correspondentes aos Limites de Liquidez e de Plasticidade. Salvo nos Solos, que não possuem estas Umidades Reais referentes às amostras.

Solos

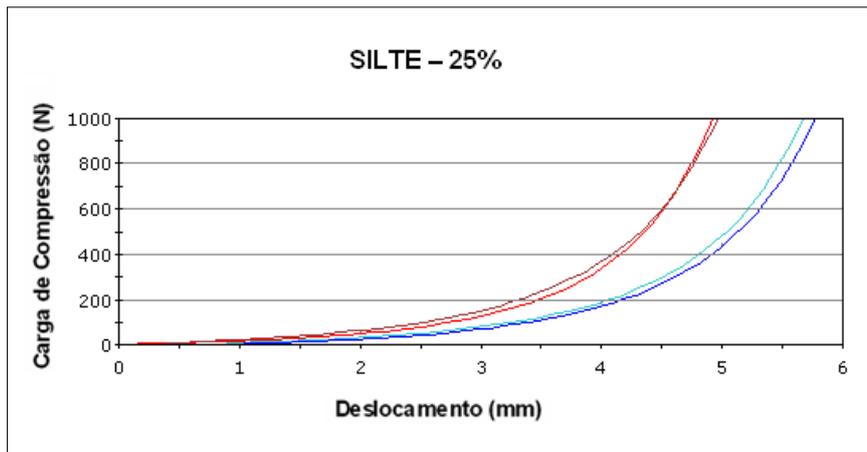


Figura B.1. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 25%.

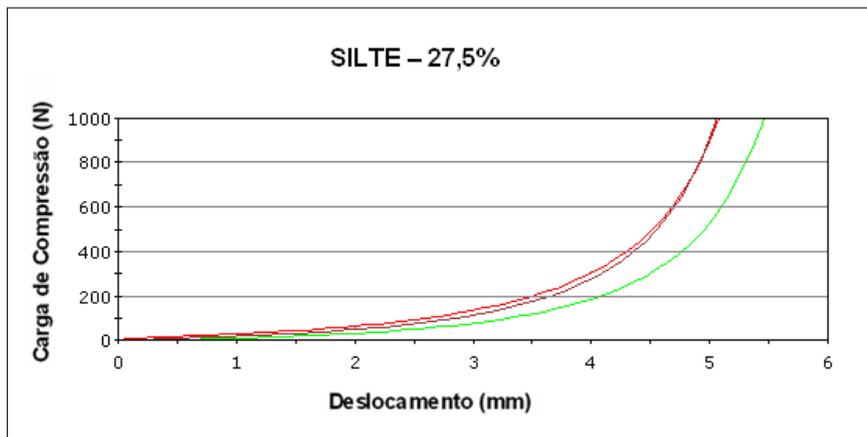


Figura B.2. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 27,5%.

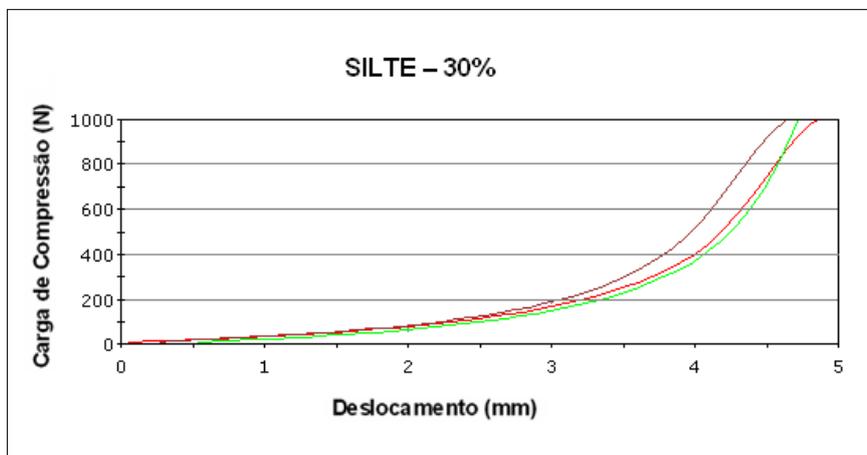


Figura B.3. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 30%.

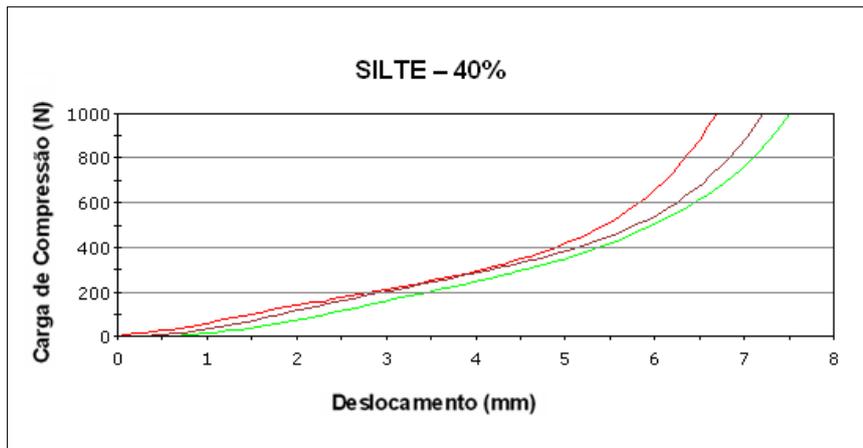


Figura B.4. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 40%.

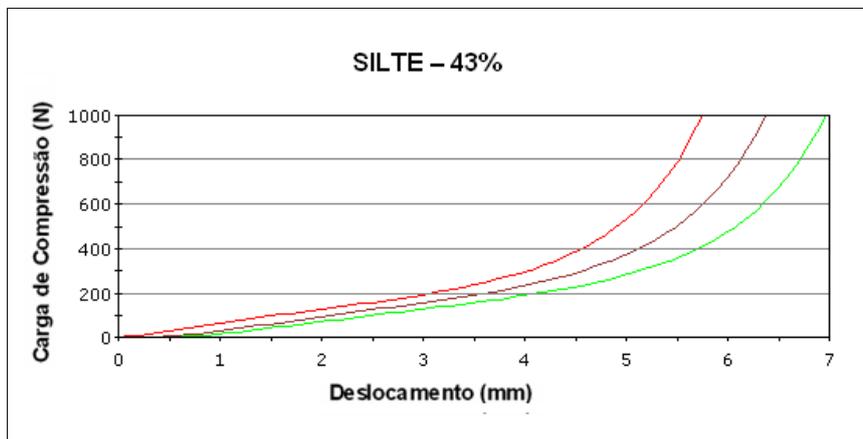


Figura B.5. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 43%.

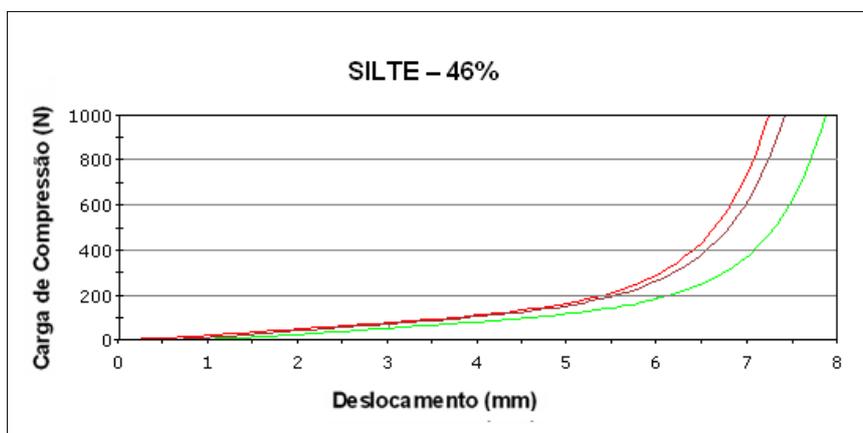


Figura B.6. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 46%.

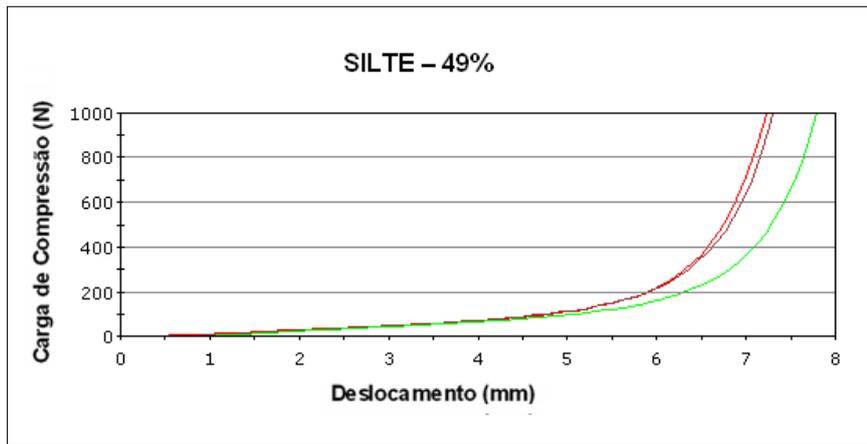


Figura B.7. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 49%.

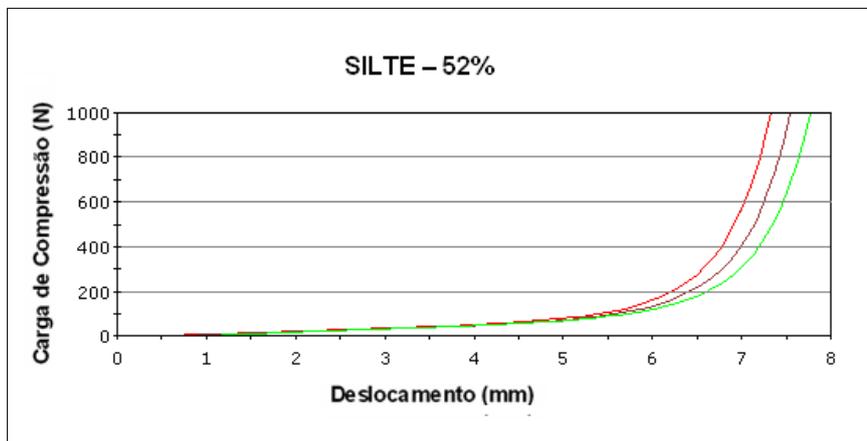


Figura B.8. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Silte. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 52%.

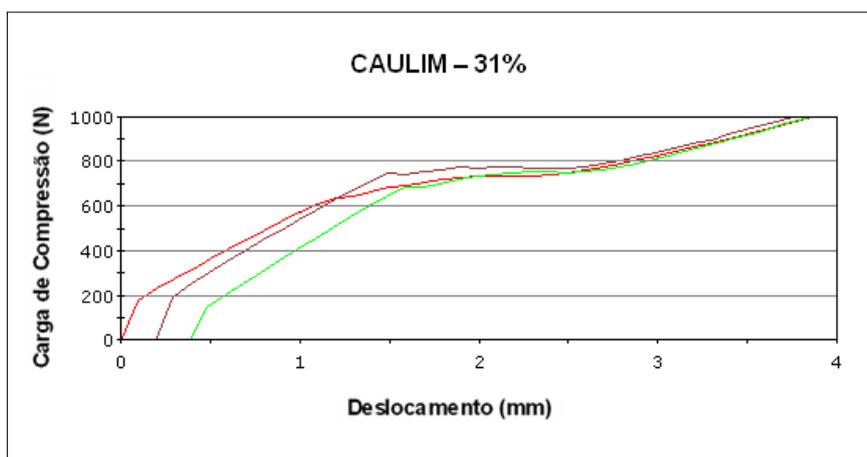


Figura B.9. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 31%.

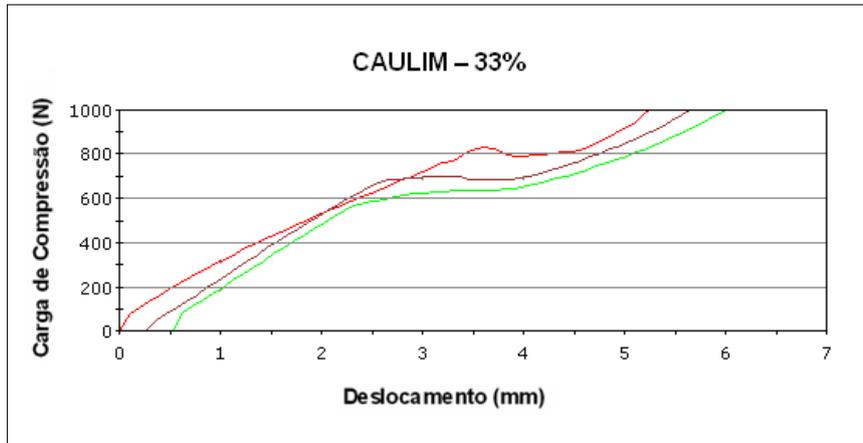


Figura B.10. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 33%.

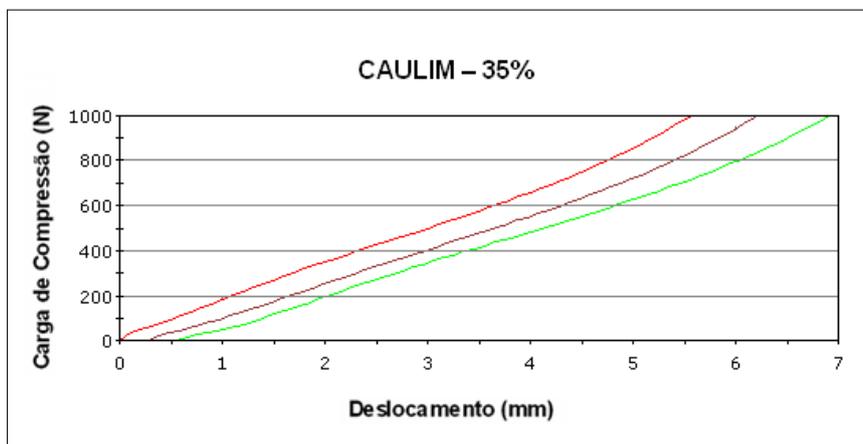


Figura B.11. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 35%.

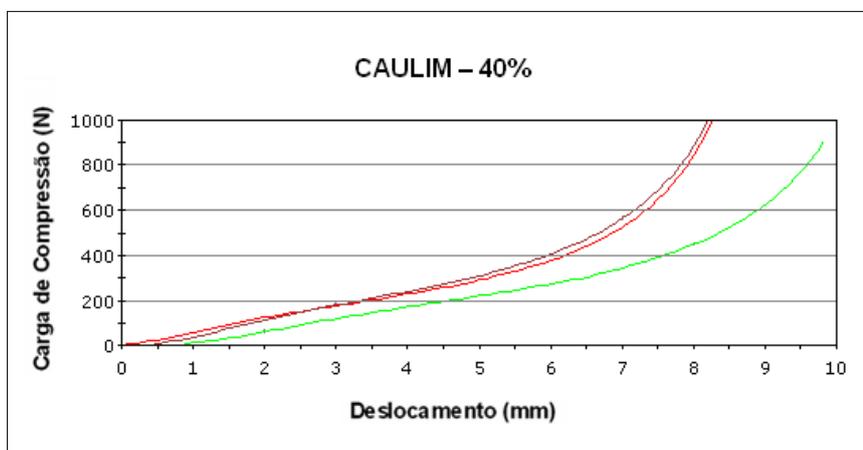


Figura B.12. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 40%.

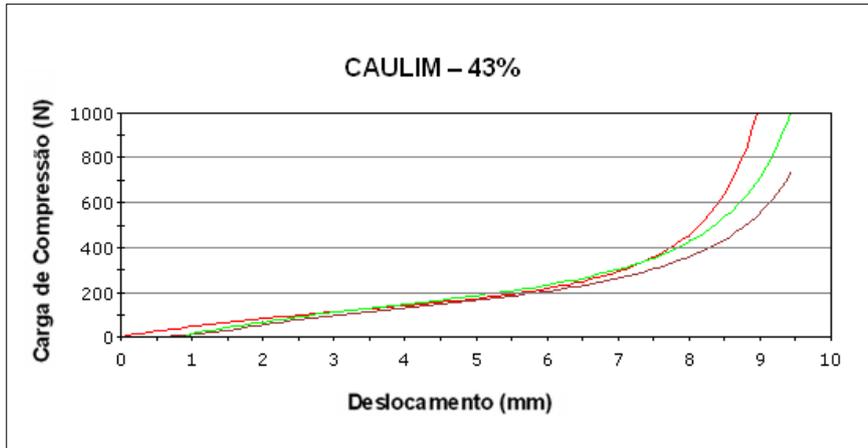


Figura B.13. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 43%.

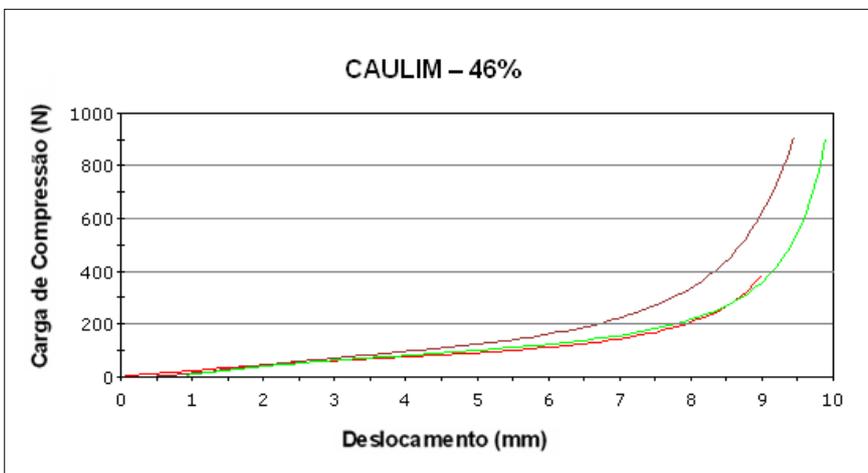


Figura B.14. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 46%.

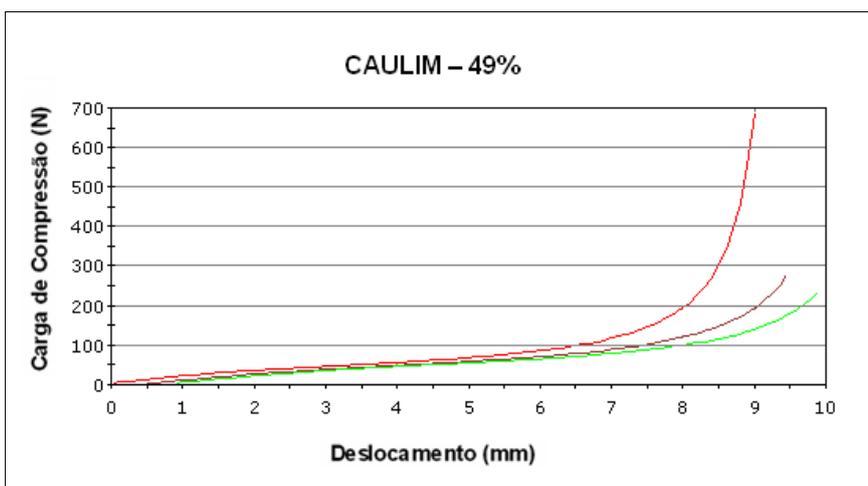


Figura B.15. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 49%.

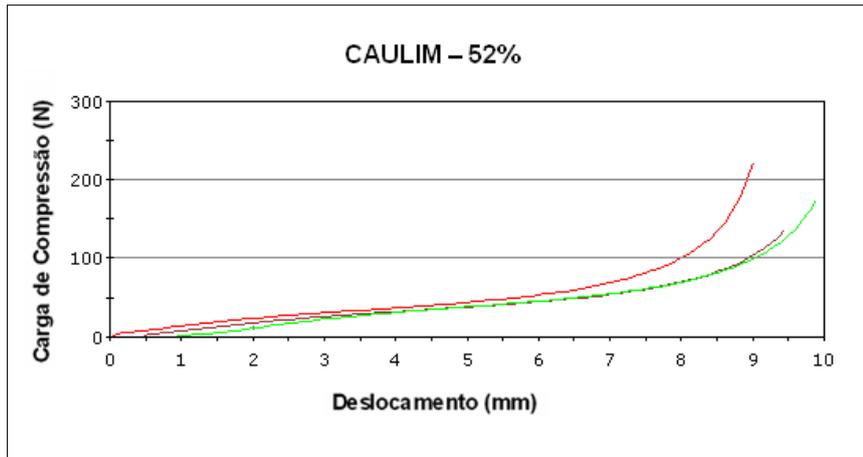


Figura B.16. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Caulim. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 52%.

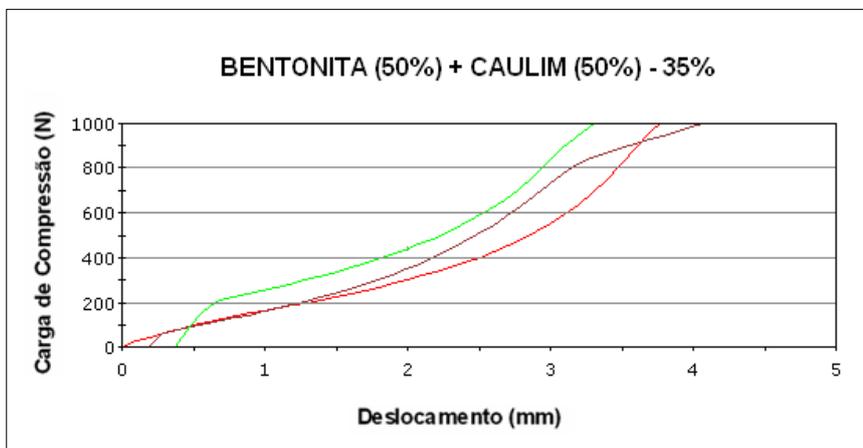


Figura B.17. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 35%.

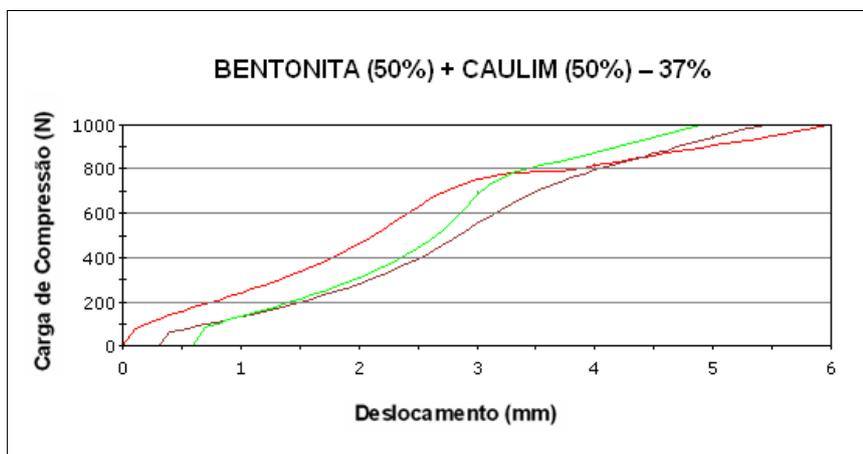


Figura B.18. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 37%.

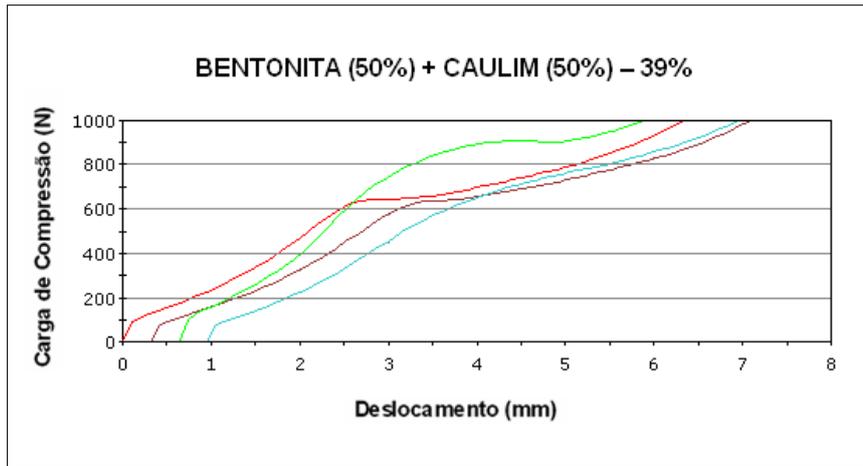


Figura B.19. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 39%.

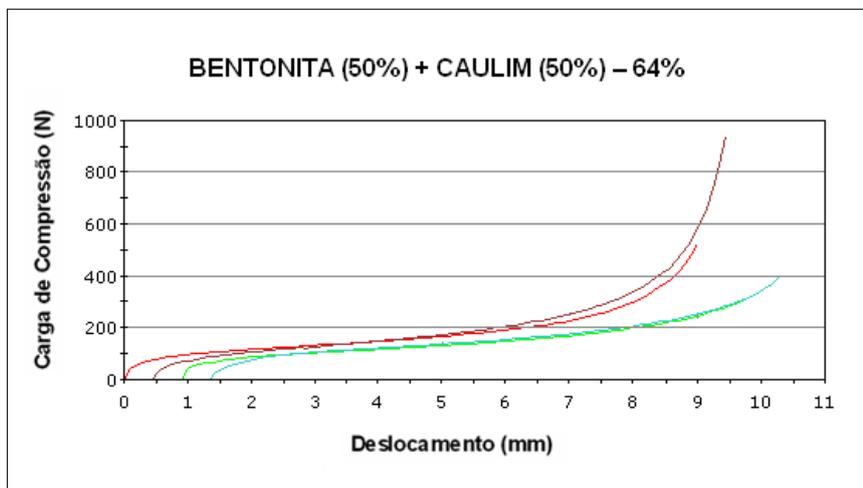


Figura B.20. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 64%.

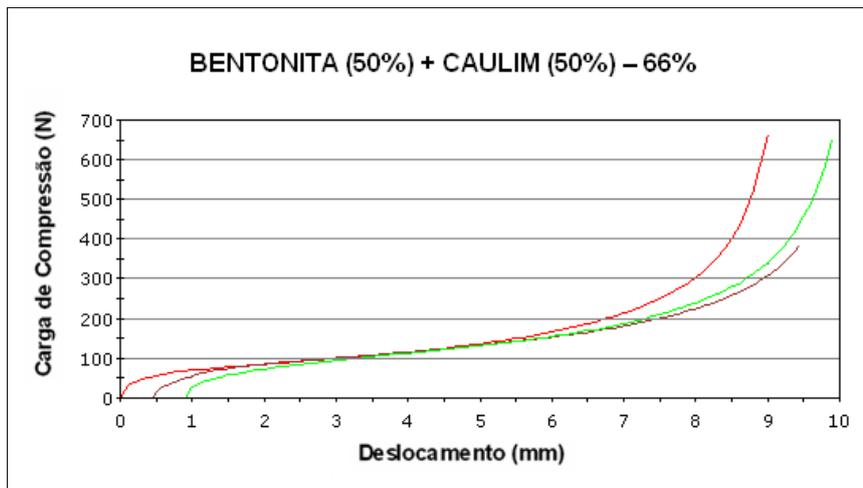


Figura B.21. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 66%.

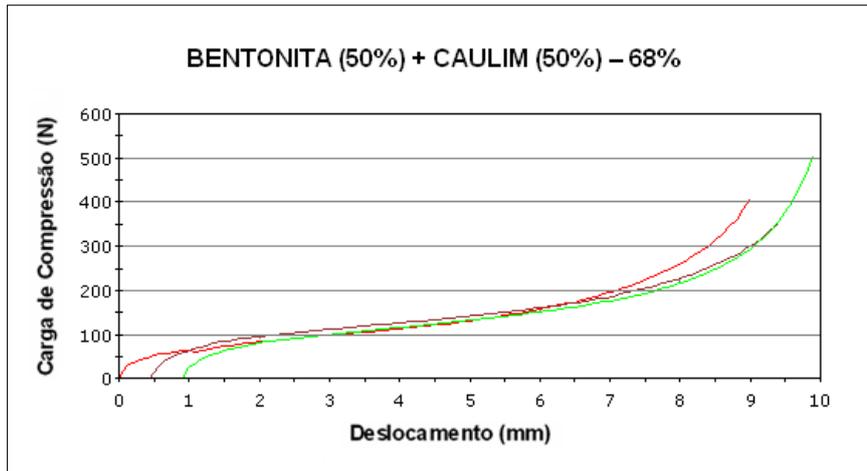


Figura B.22. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 68%.

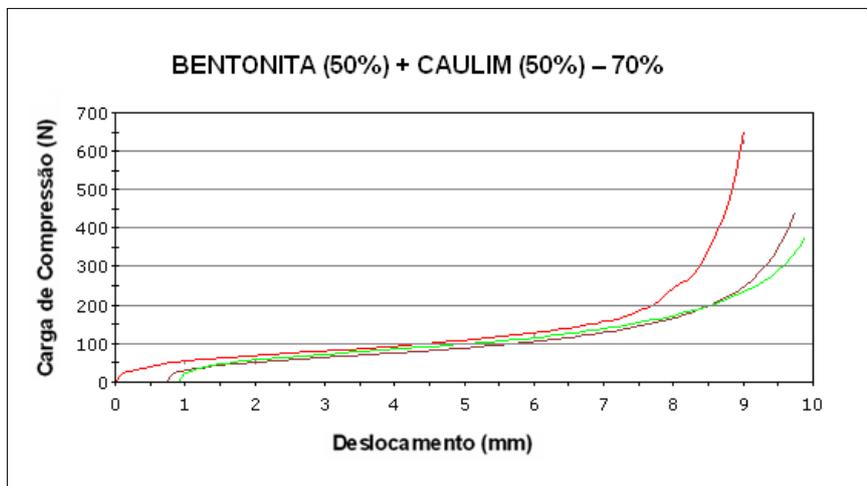


Figura B.23. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 70%.

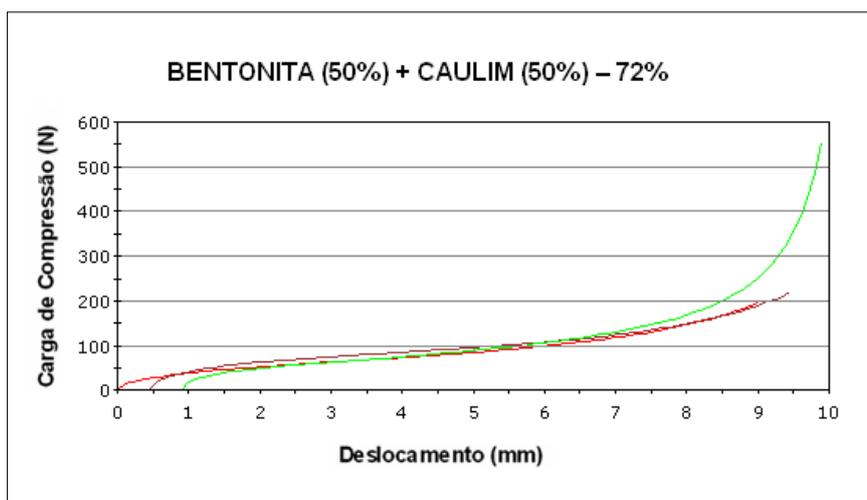


Figura B.24. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita (50%) + Caulim (50%). Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 72%.

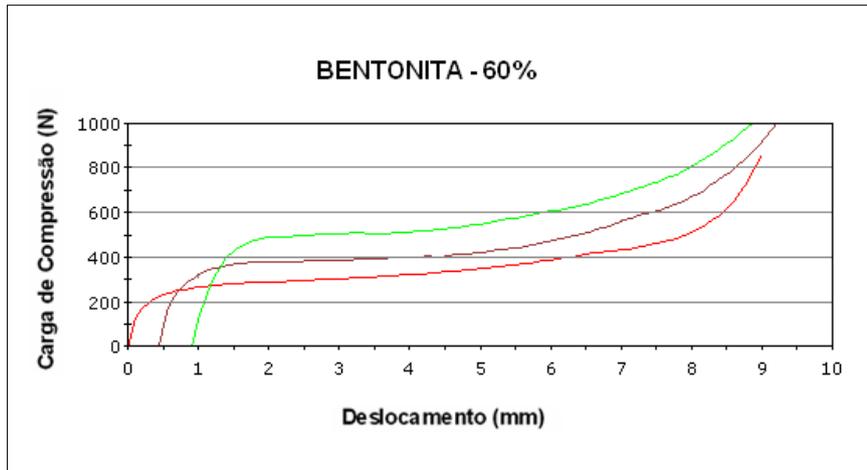


Figura B.25. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 60%.

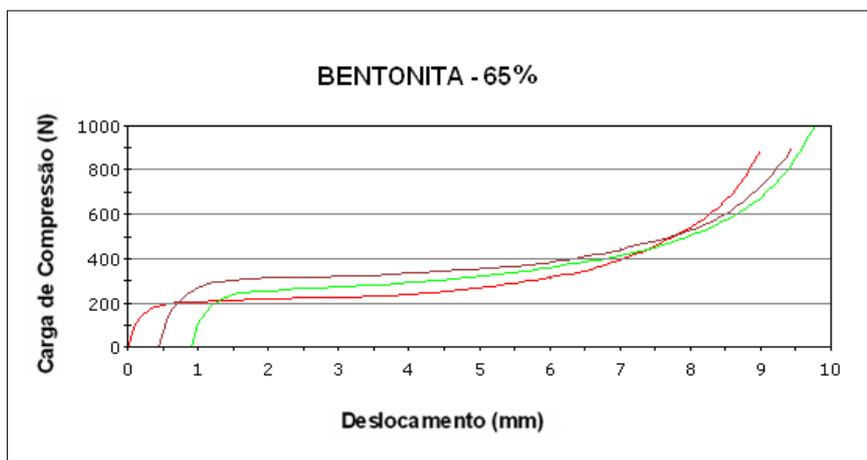


Figura B.26. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 65%.

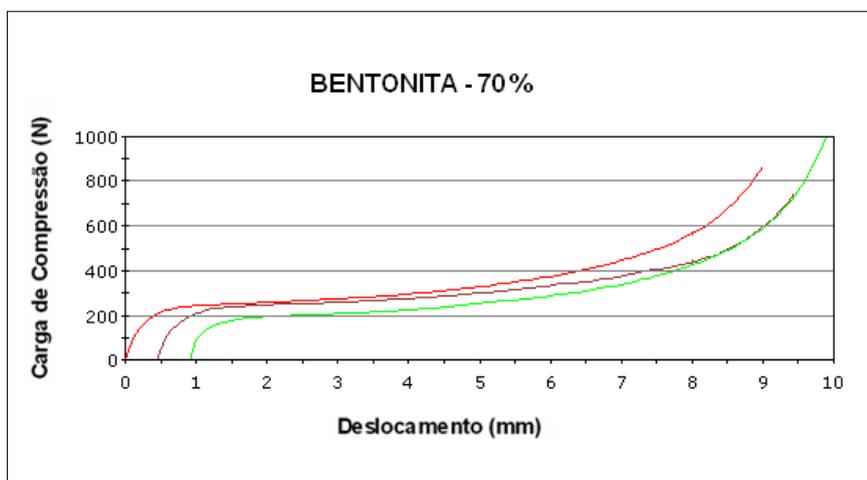


Figura B.27. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 70%.

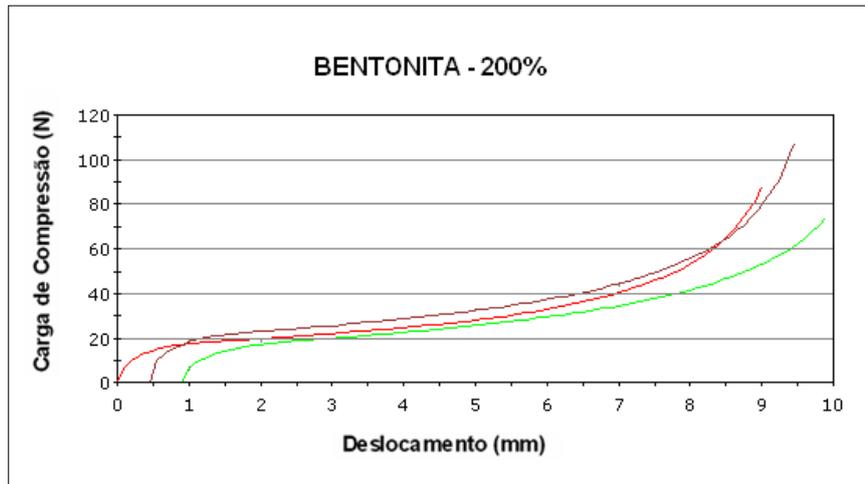


Figura B.28. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 200%.

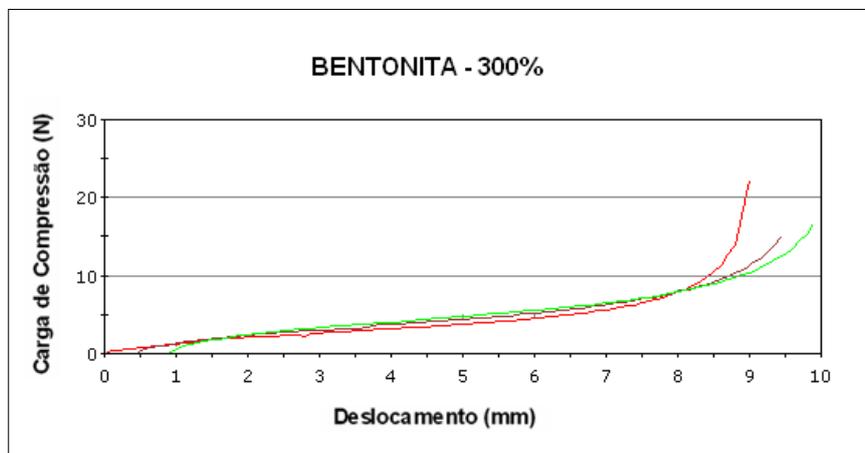


Figura B.29. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 300%.

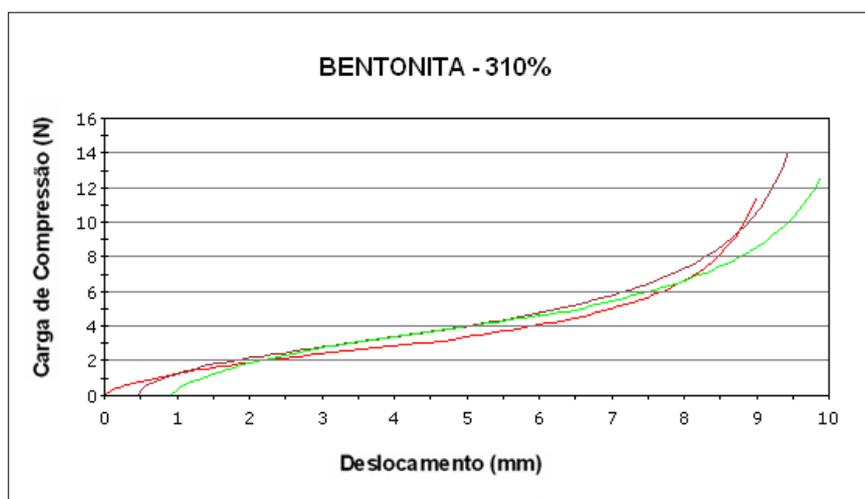


Figura B.30. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 310%.

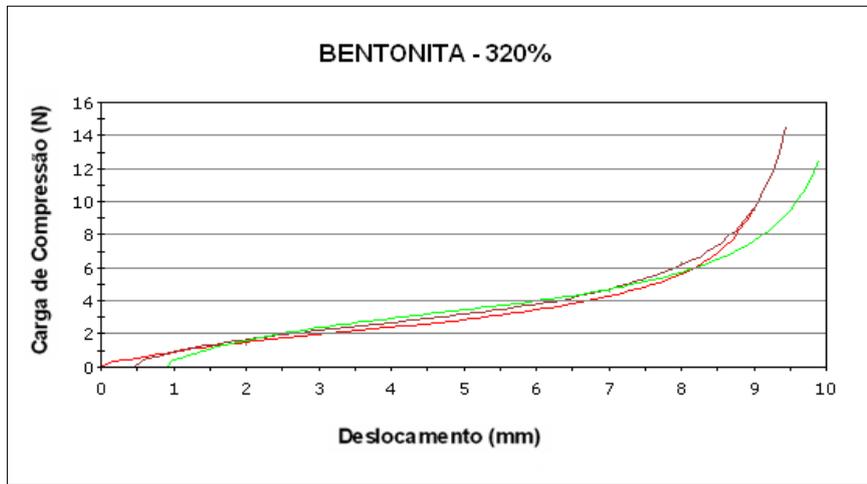


Figura B.31. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 320%.

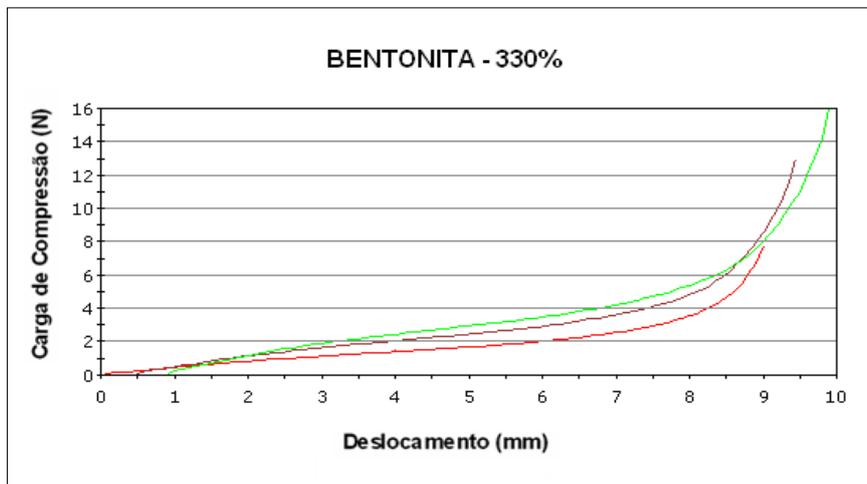


Figura B.32. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 330%.

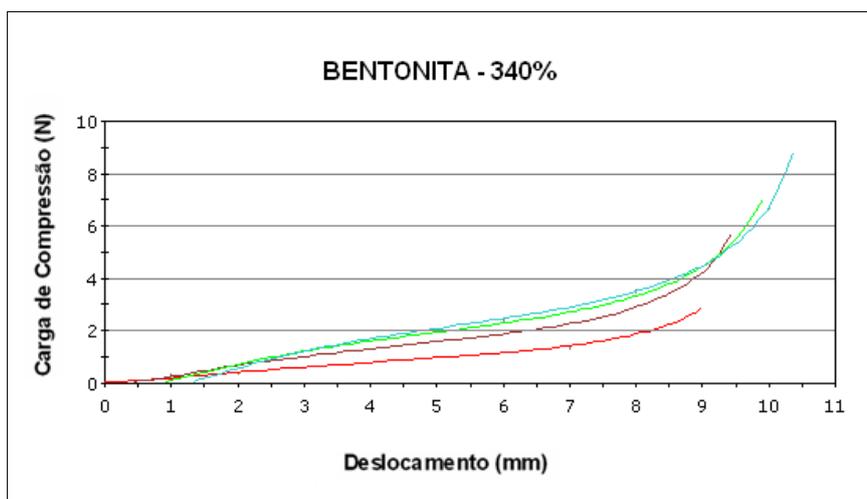


Figura B.33. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Bentonita. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 340%.

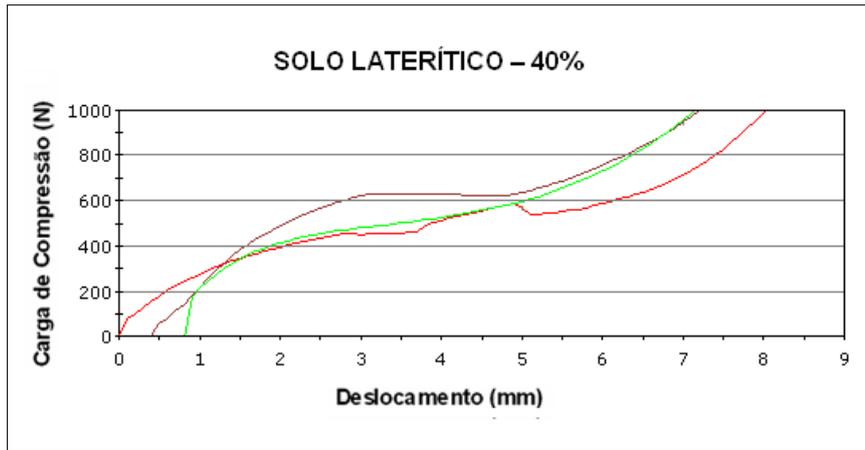


Figura B.34. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 40%.

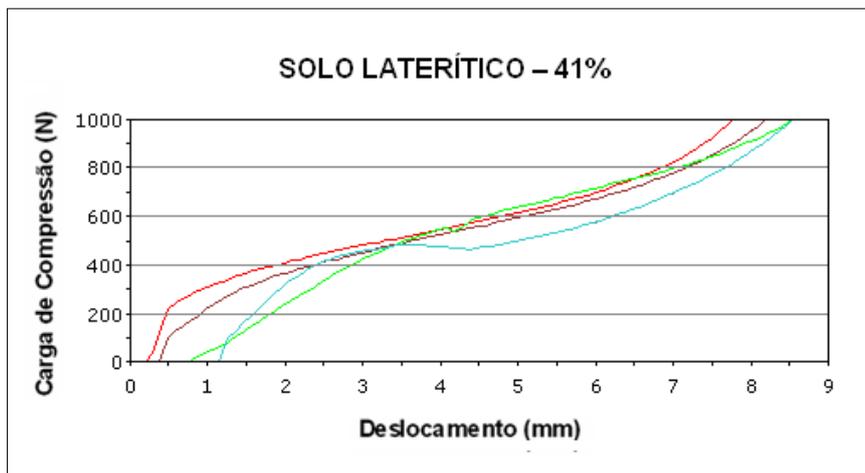


Figura B.35. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 41%.

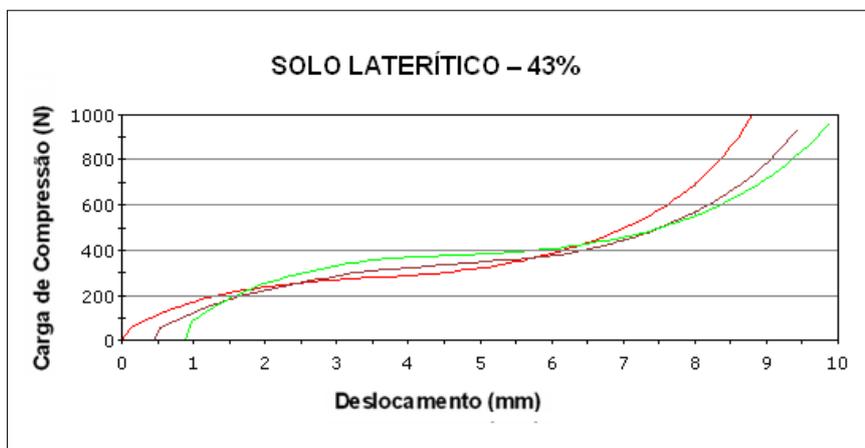


Figura B.36. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico. Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 43%.

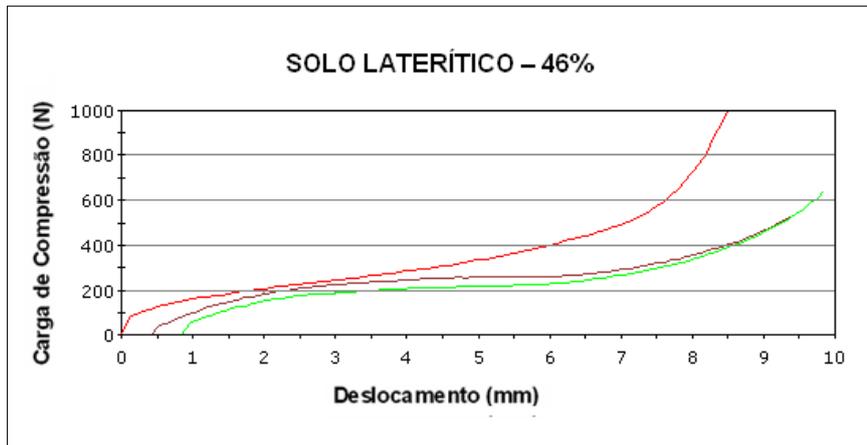


Figura B.37. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 46%.

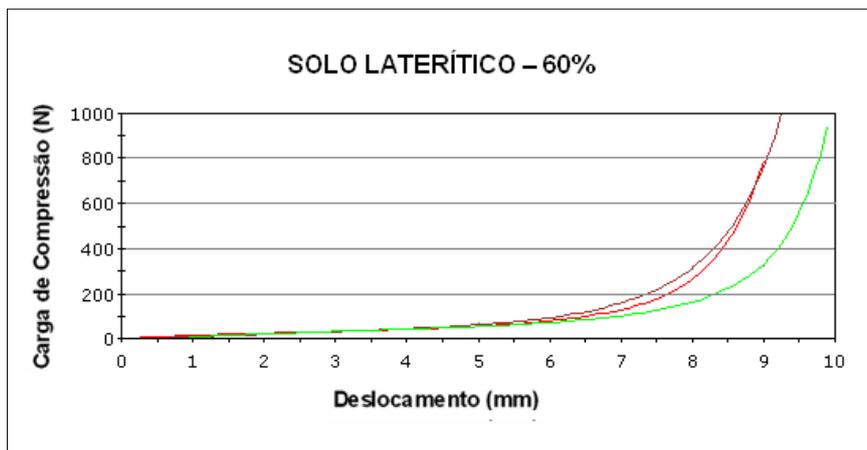


Figura B.38. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 60%.

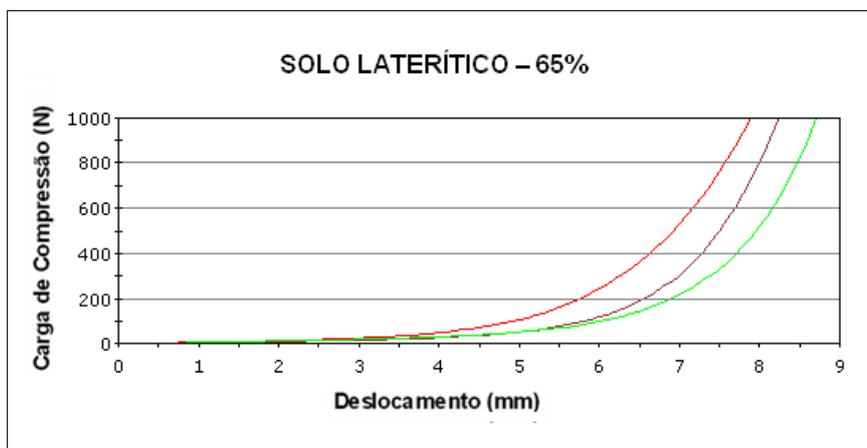


Figura B.39. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 65%.

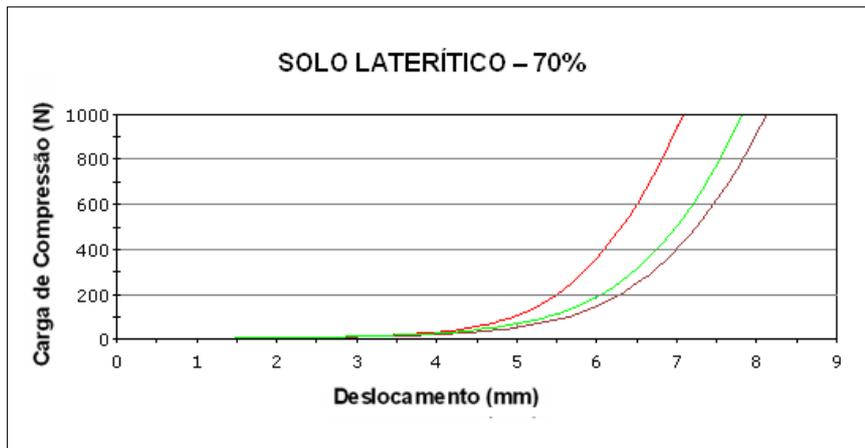


Figura B.40. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 70%.

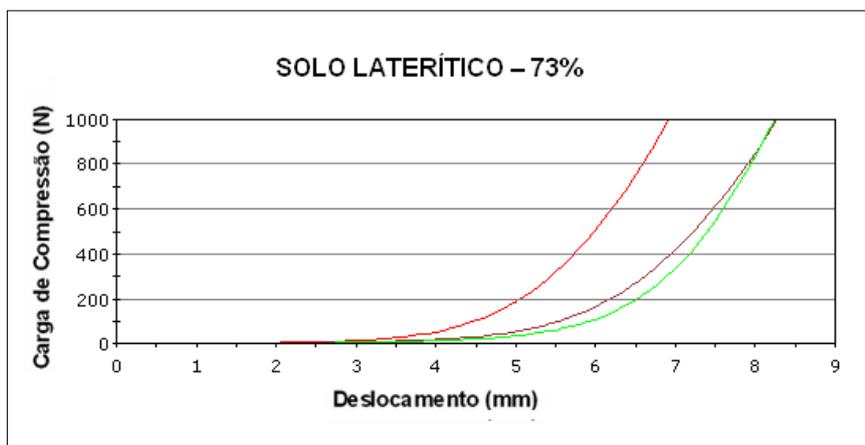


Figura B.41. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 73%.

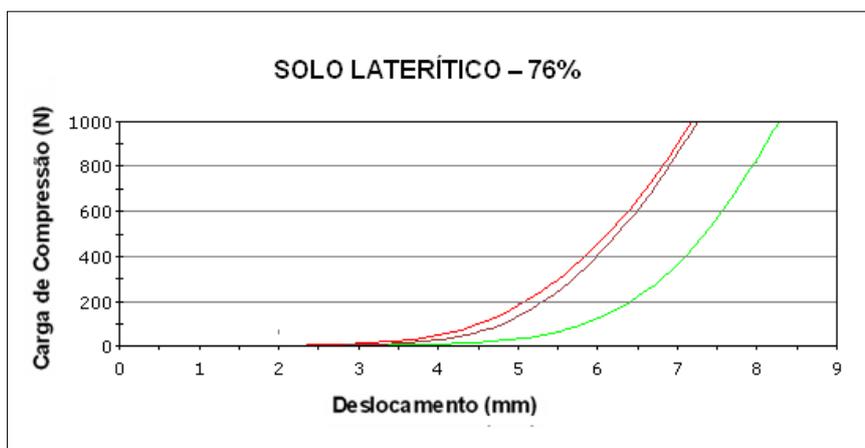


Figura B.42. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Solo Laterítico.
Referentes aos três ensaios com umidades próximas a 76%.

Saibros

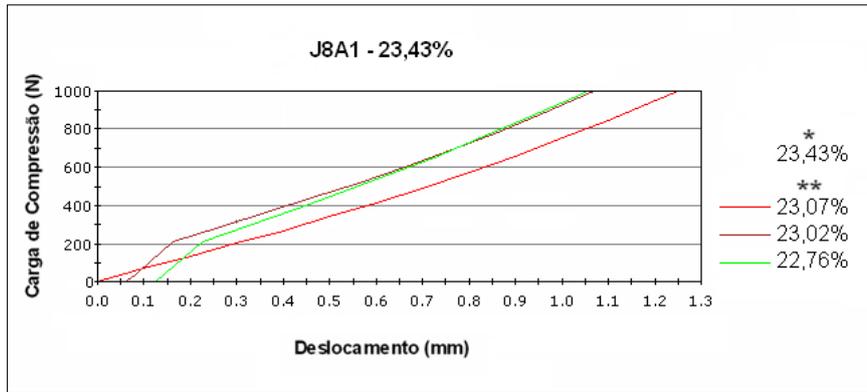


Figura B.43. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

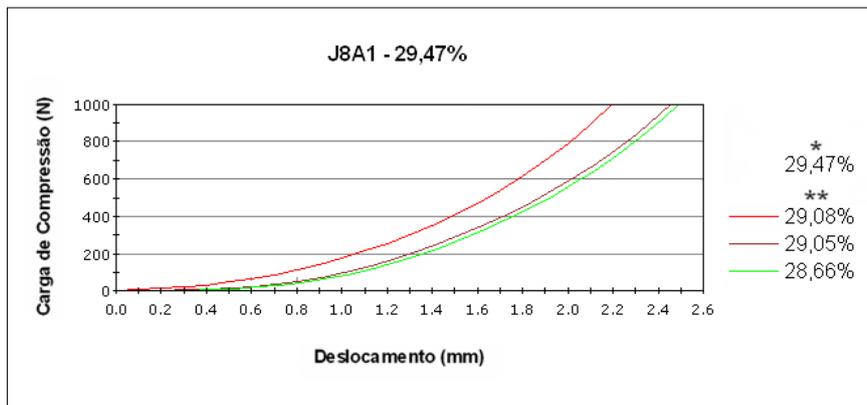


Figura B.44. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

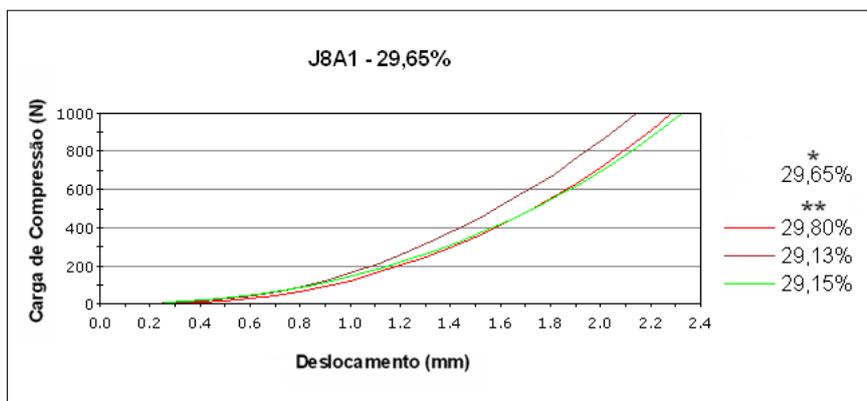


Figura B.45. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

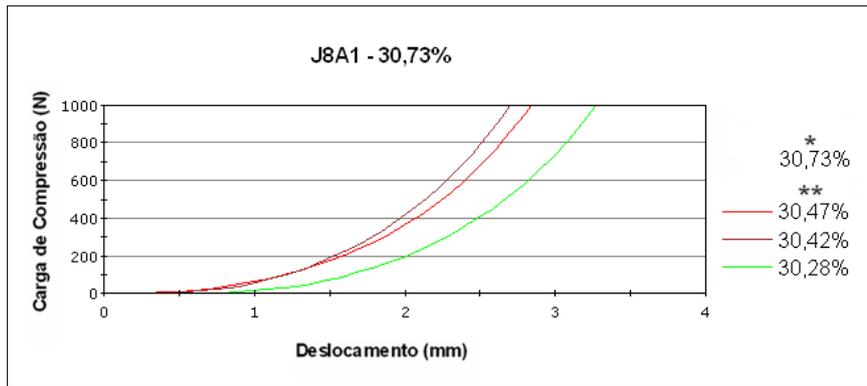


Figura B.46. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

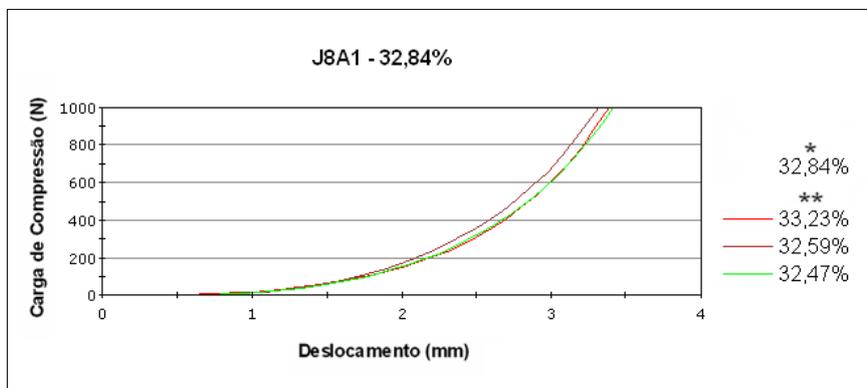


Figura B.47. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J8A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

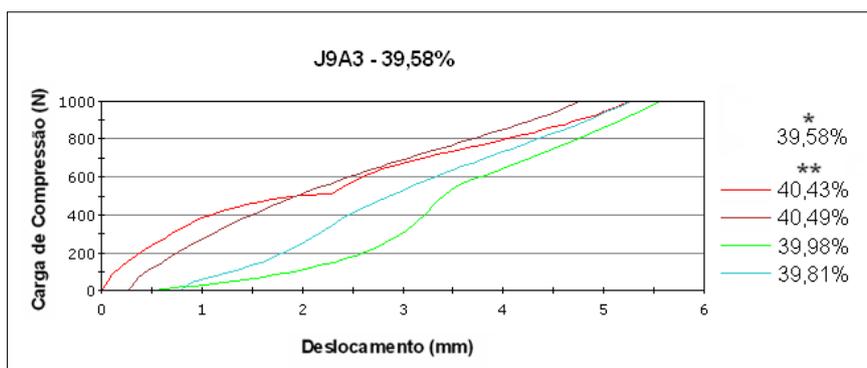


Figura B.48. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

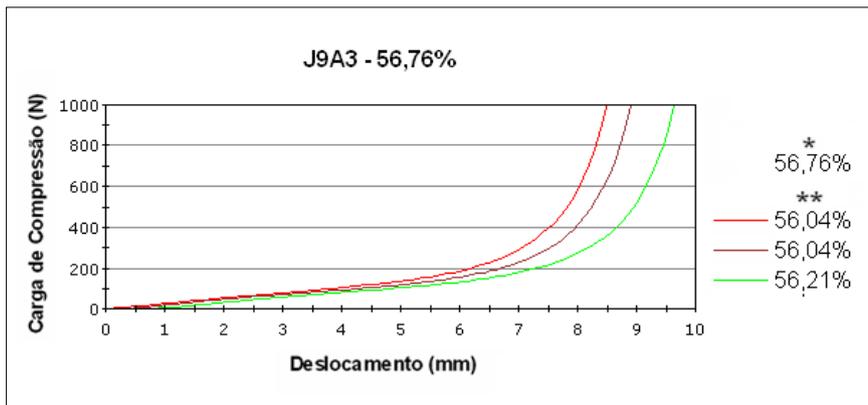


Figura B.49. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

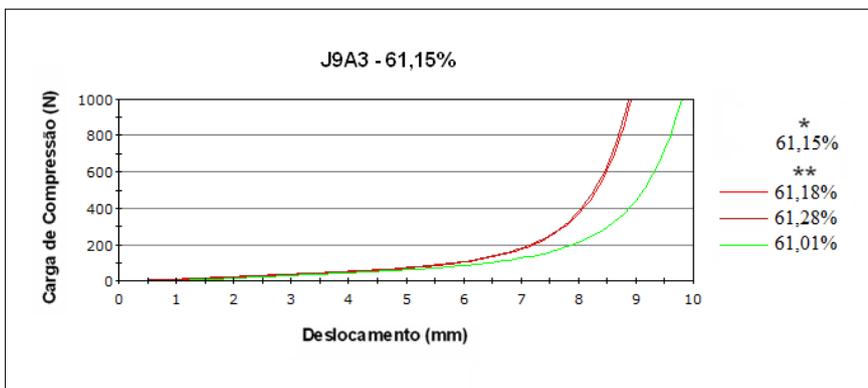


Figura B.50. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

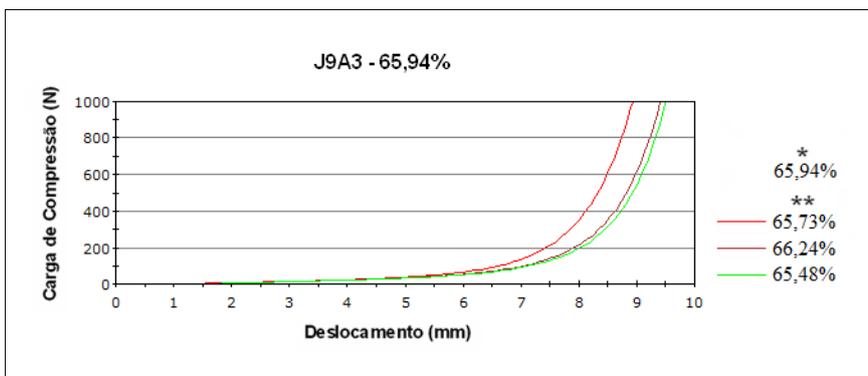


Figura B.51. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

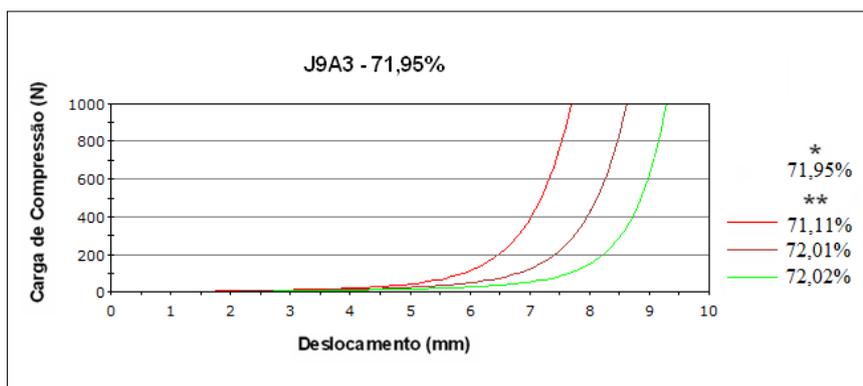


Figura B.52. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

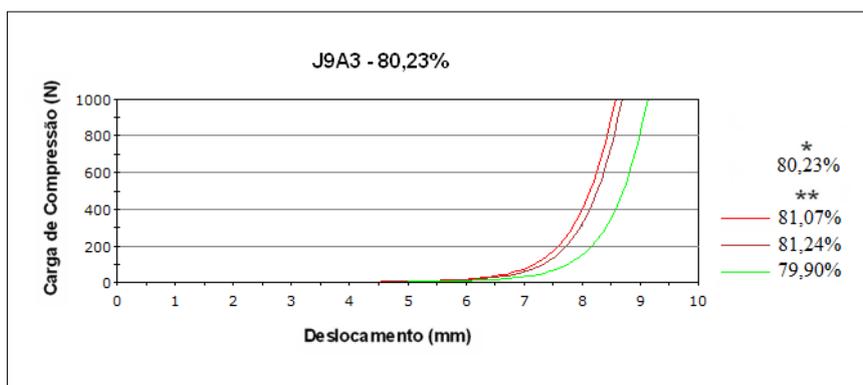


Figura B.53. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

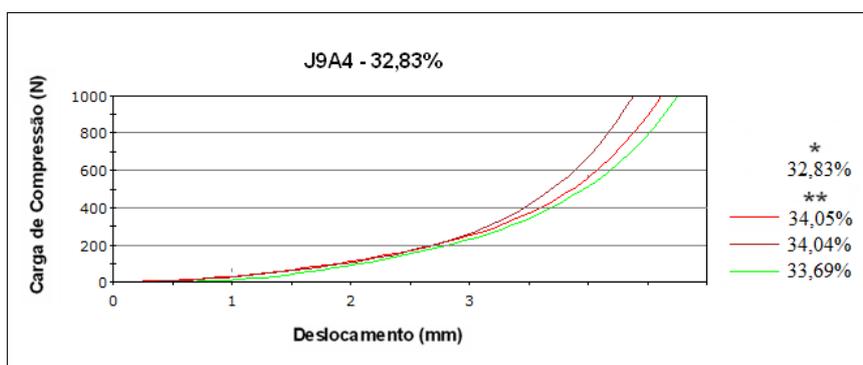


Figura B.54. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

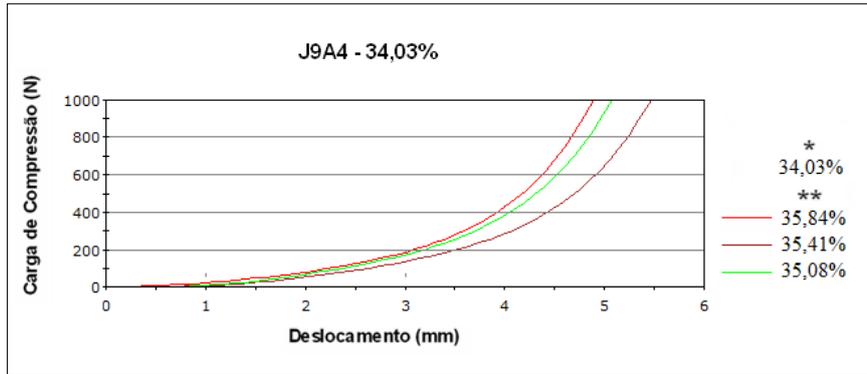


Figura B.55. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

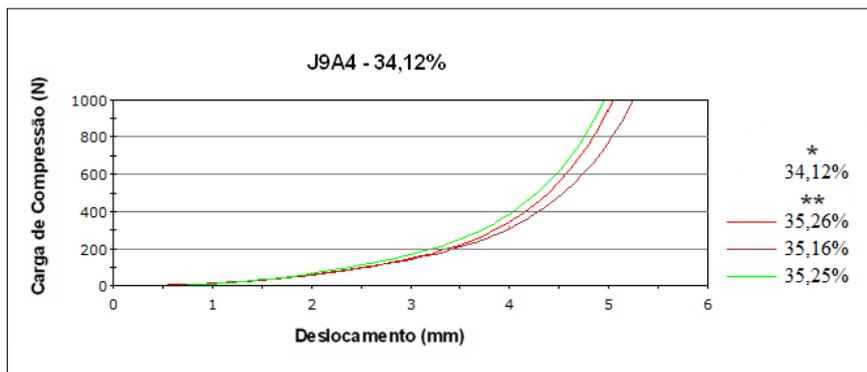


Figura B.56. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

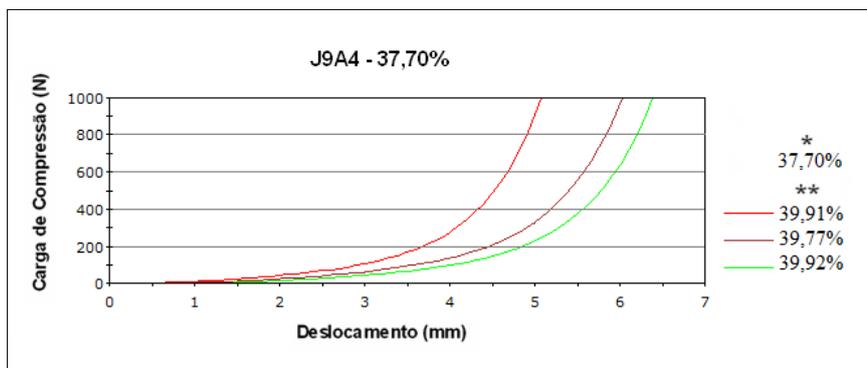


Figura B.57. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

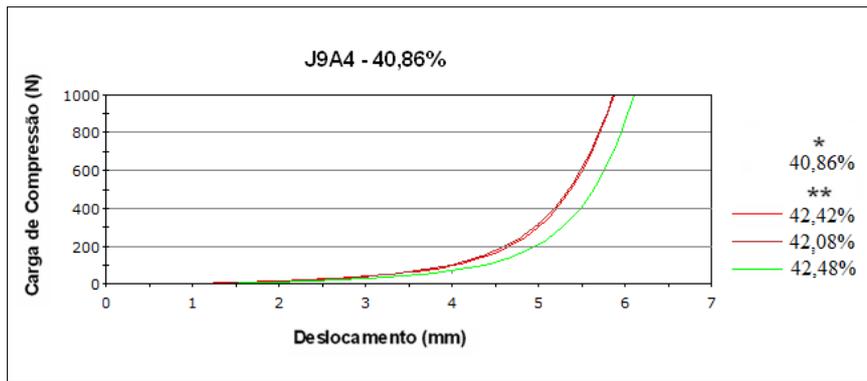


Figura B.58. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J9A4 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

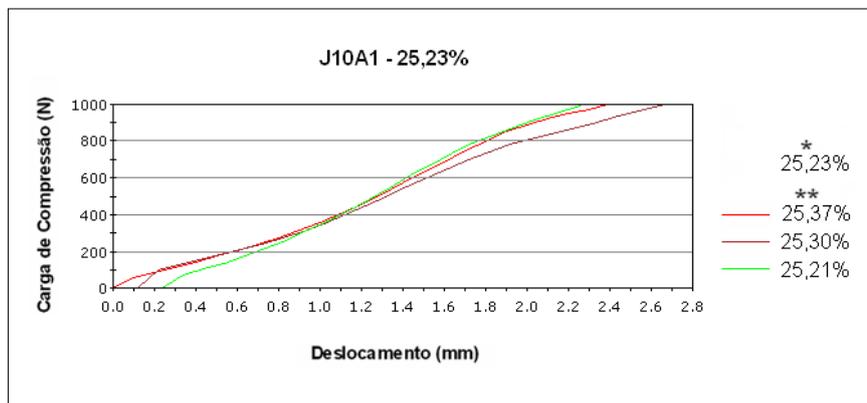


Figura B.59. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

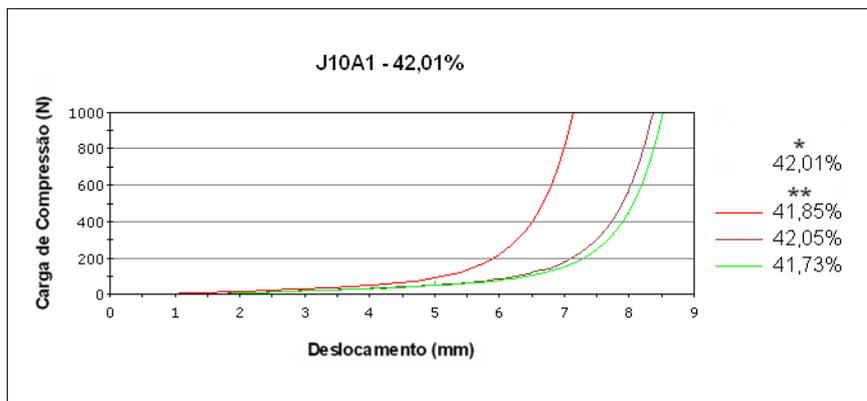


Figura B.60. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

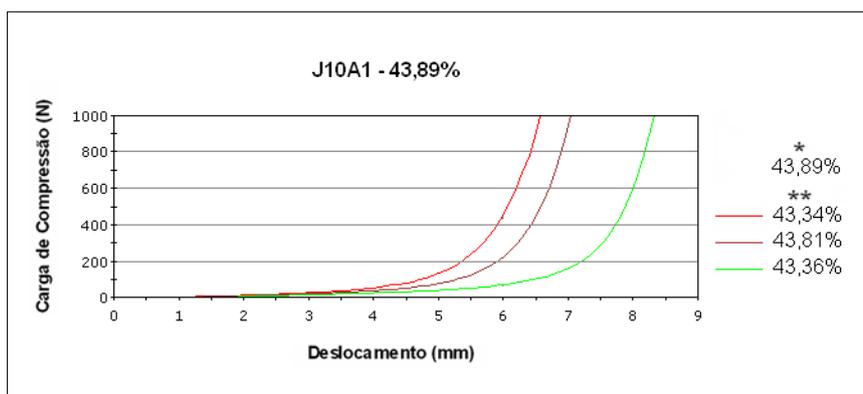


Figura B.61. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

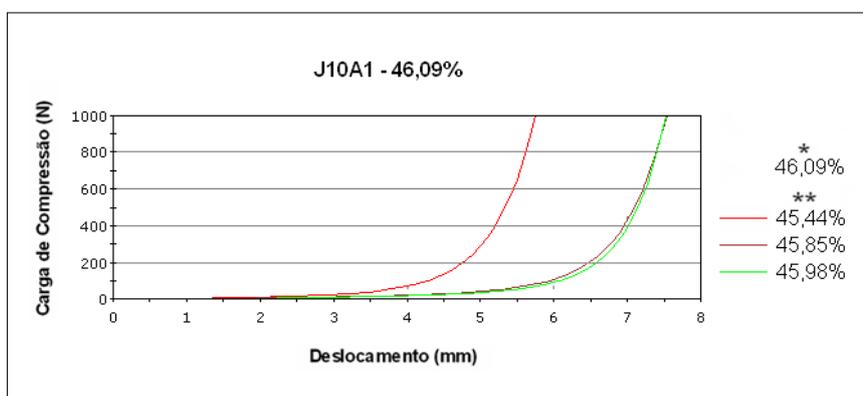


Figura B.62. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

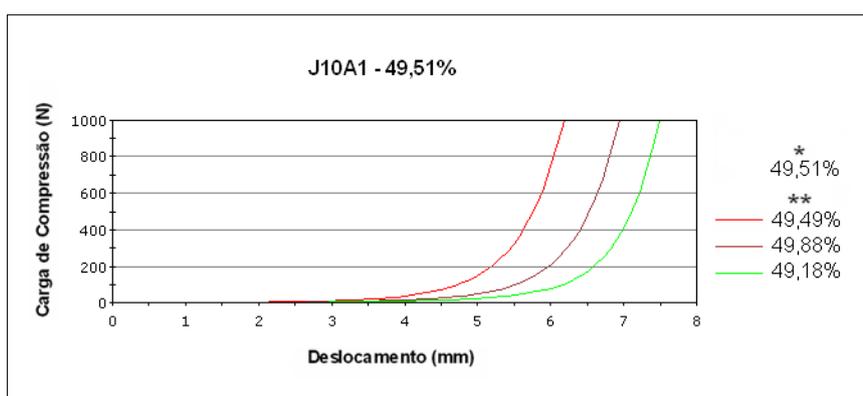


Figura B.63. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

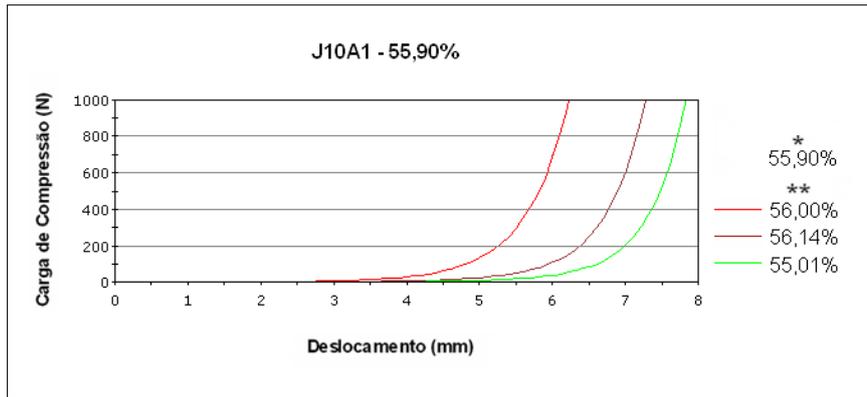


Figura B.64. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J10A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

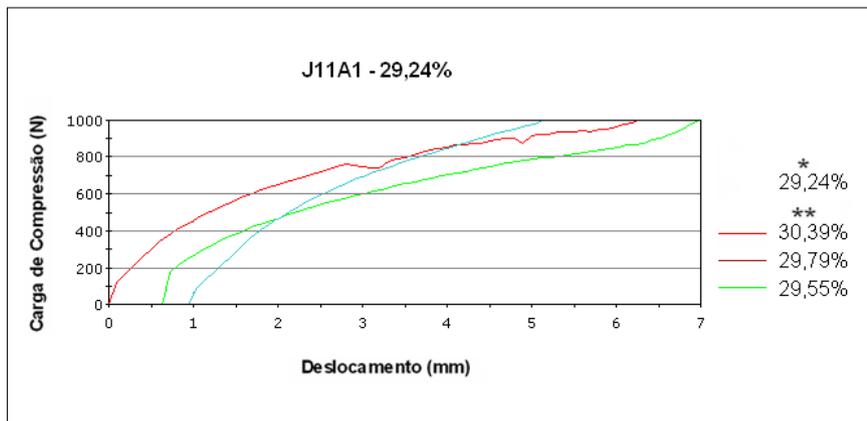


Figura B.65. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

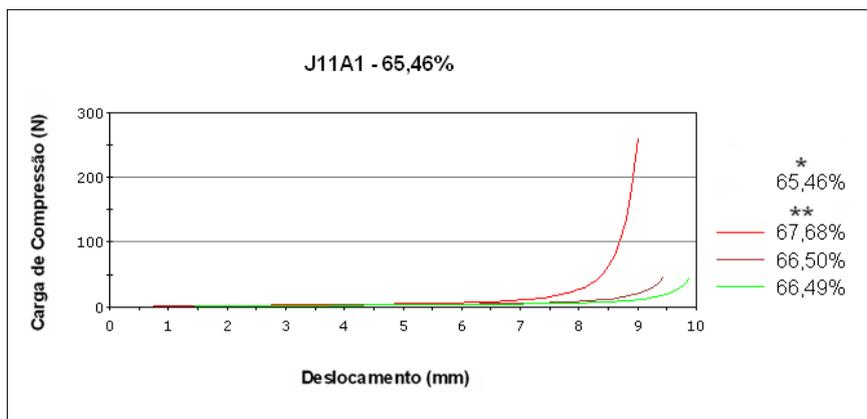


Figura B.66. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

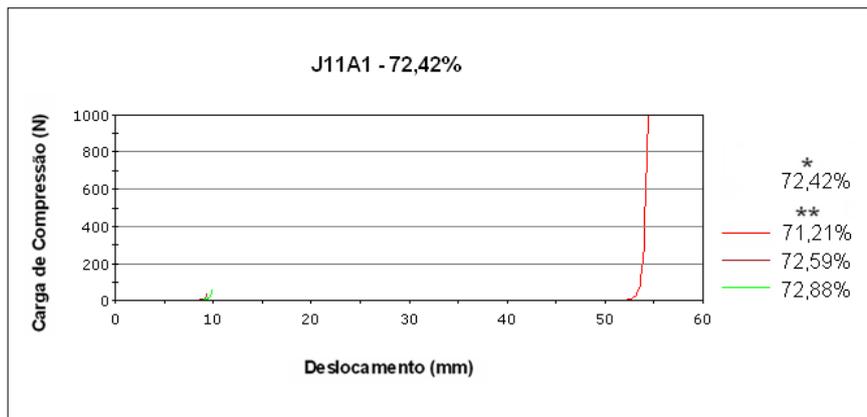


Figura B.67. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

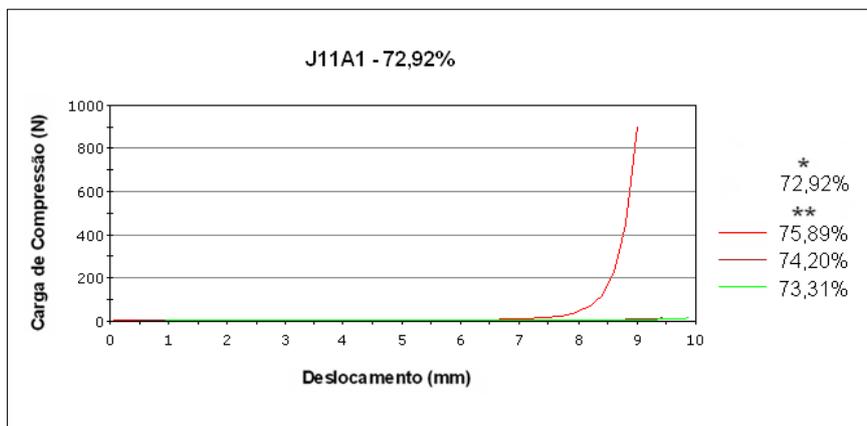


Figura B.68. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

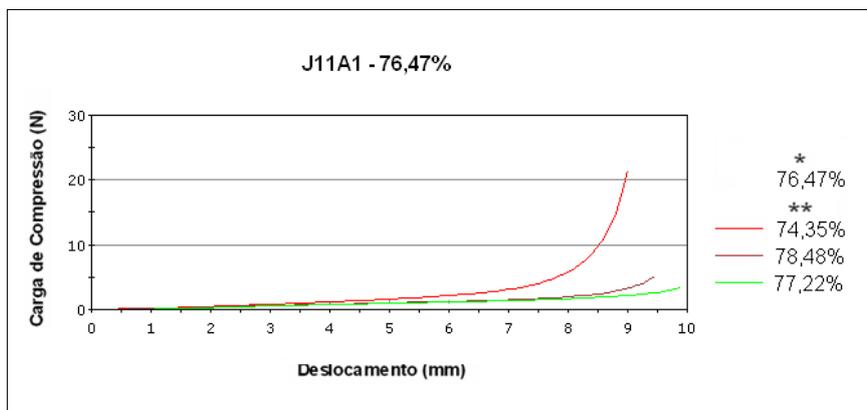


Figura B.69. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

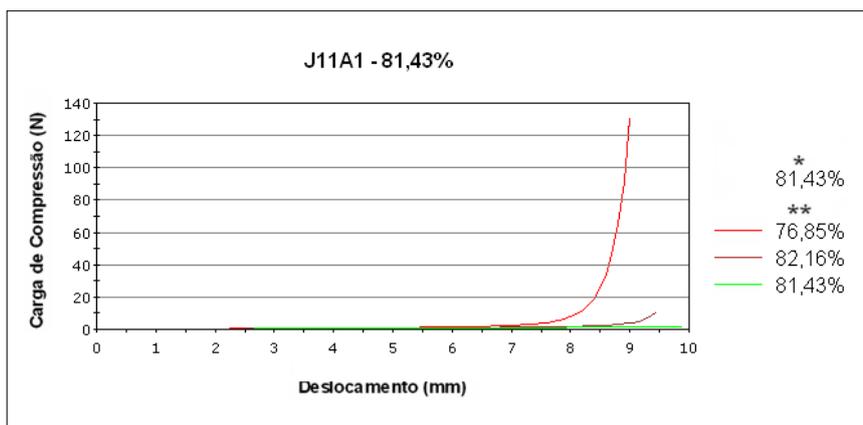


Figura B.70. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J11A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

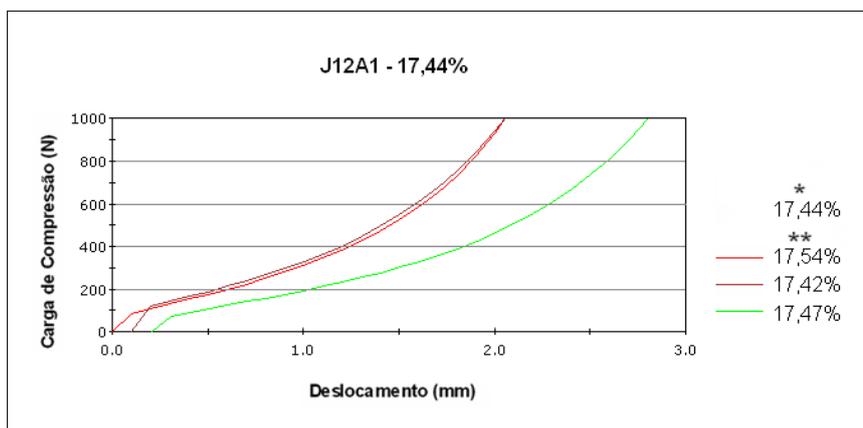


Figura B.71. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

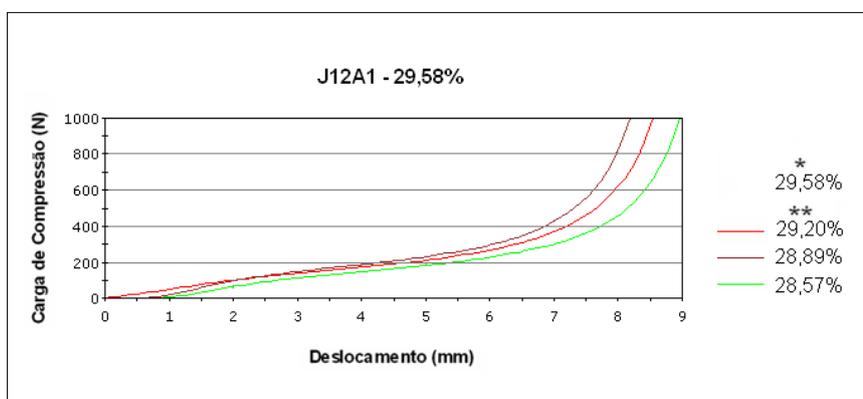


Figura B.72. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

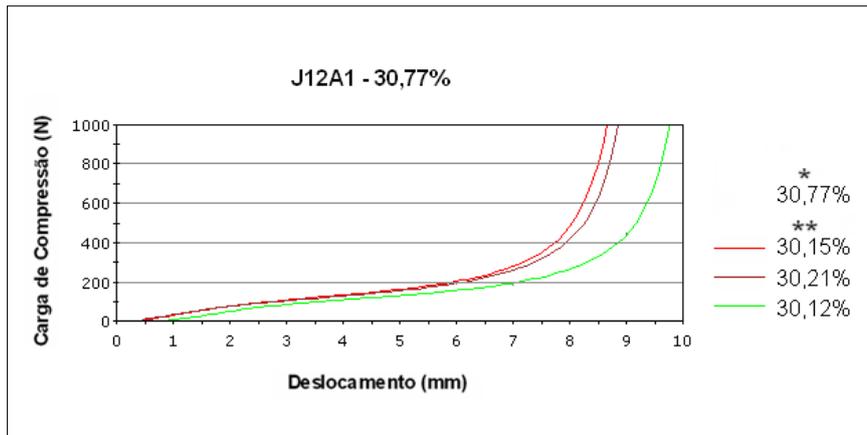


Figura B.73. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

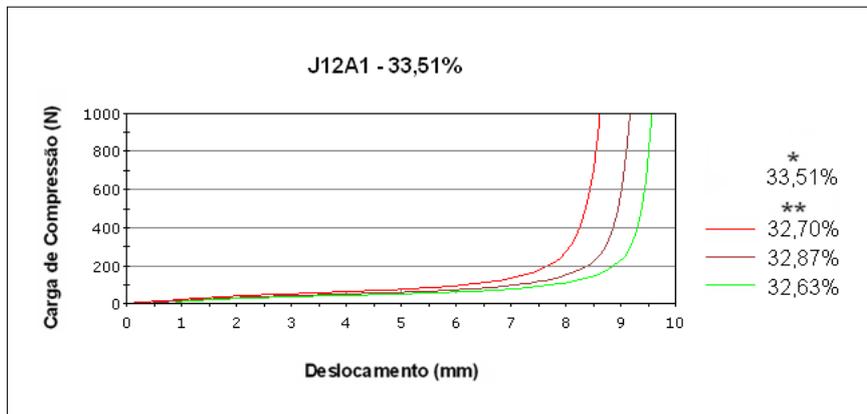


Figura B.74. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

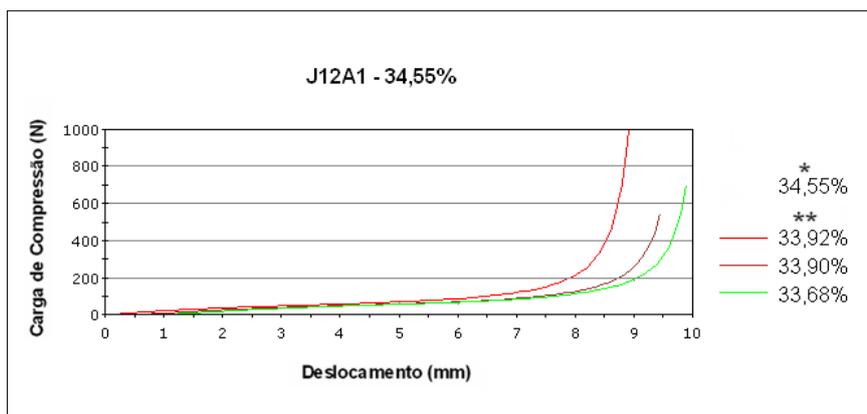


Figura B.75. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

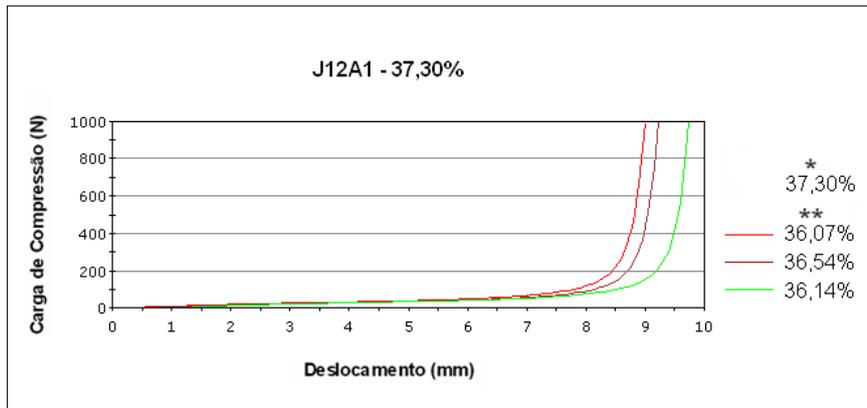


Figura B.76. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J12A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

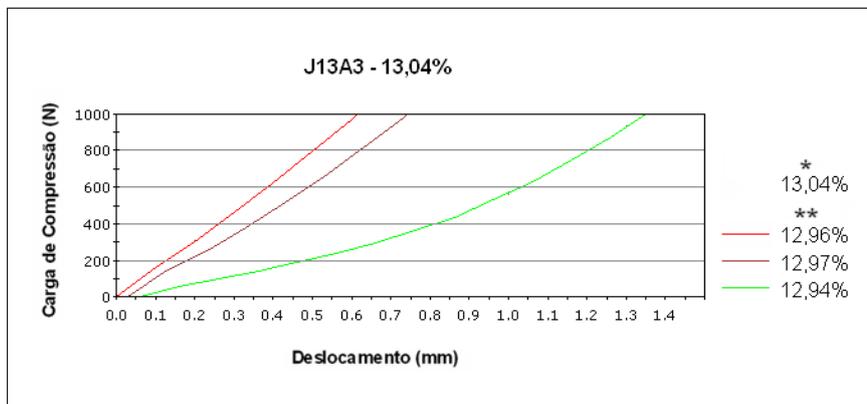


Figura B.77. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

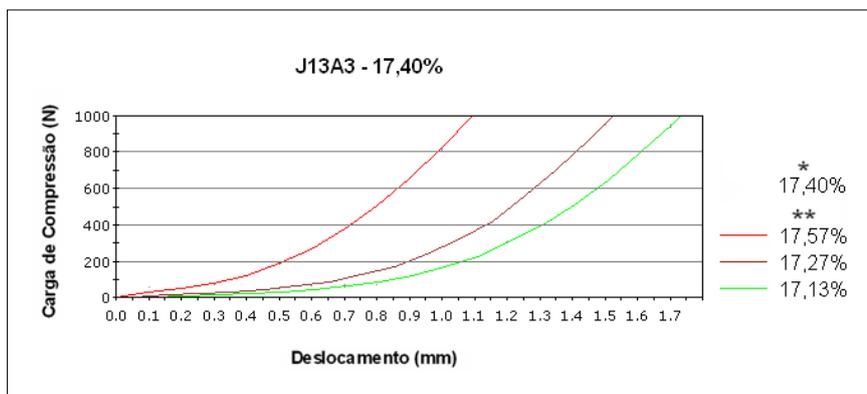


Figura B.78. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

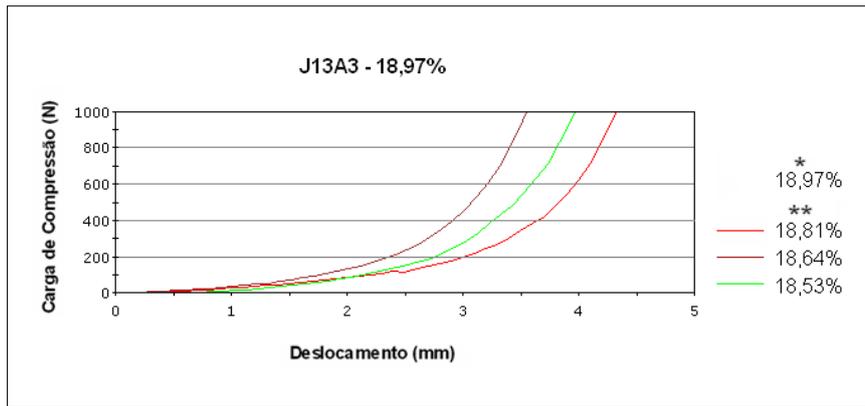


Figura B.79. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

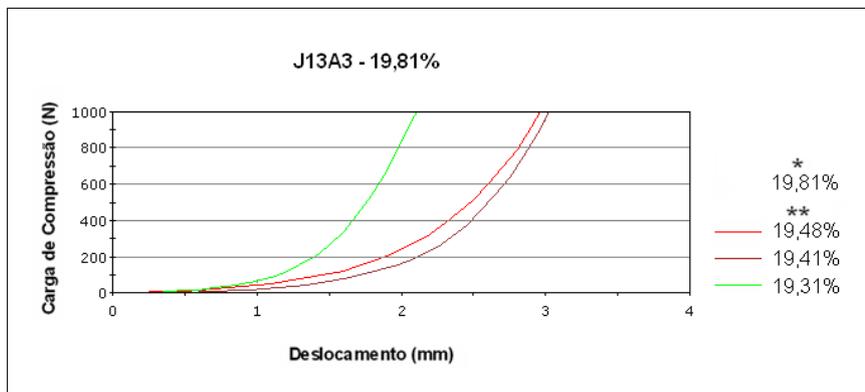


Figura B.80. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

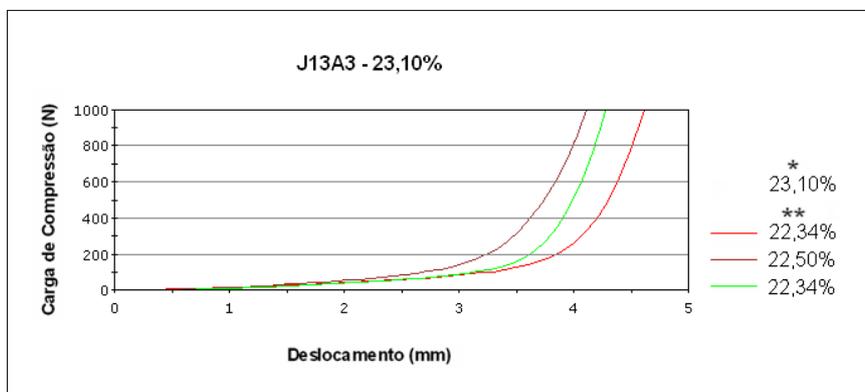


Figura B.81. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J13A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

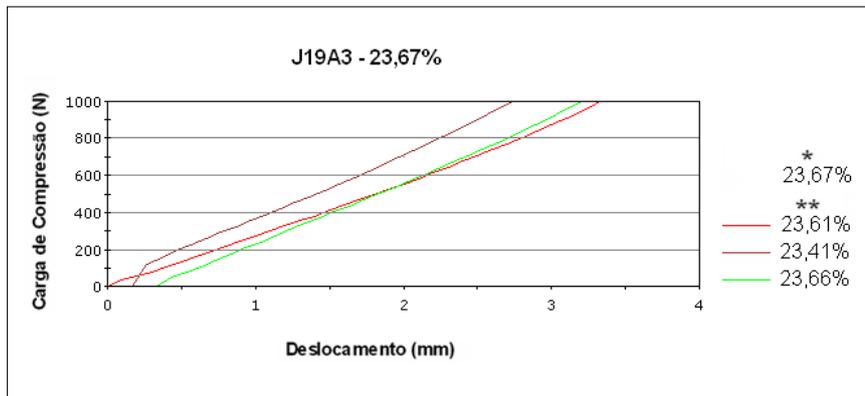


Figura B.82. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

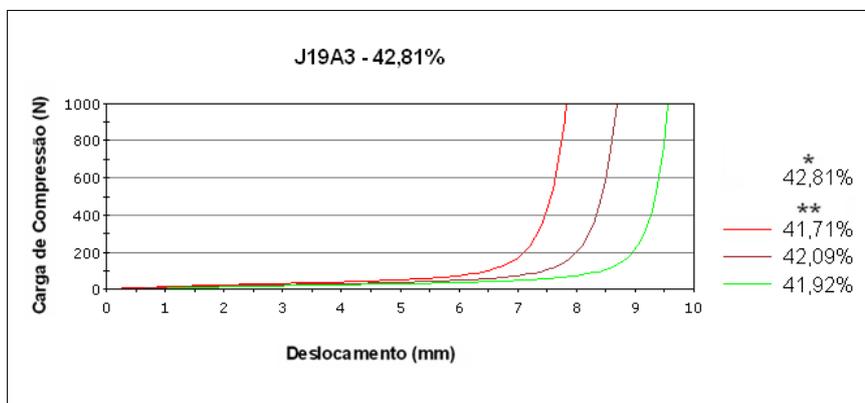


Figura B.83. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

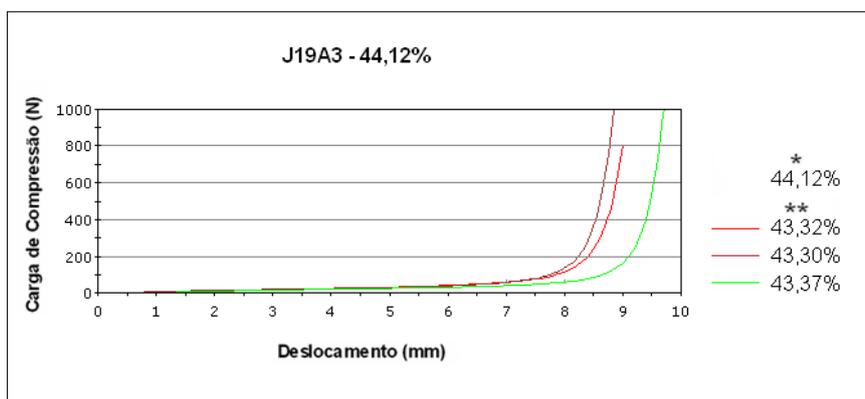


Figura B.84. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

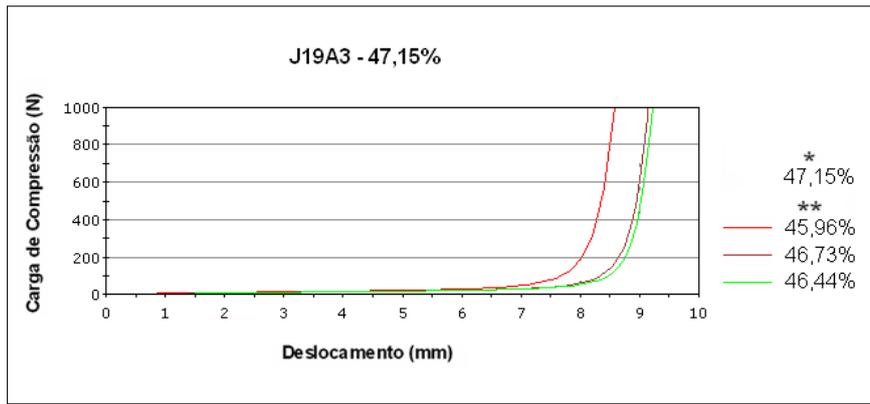


Figura B.85. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

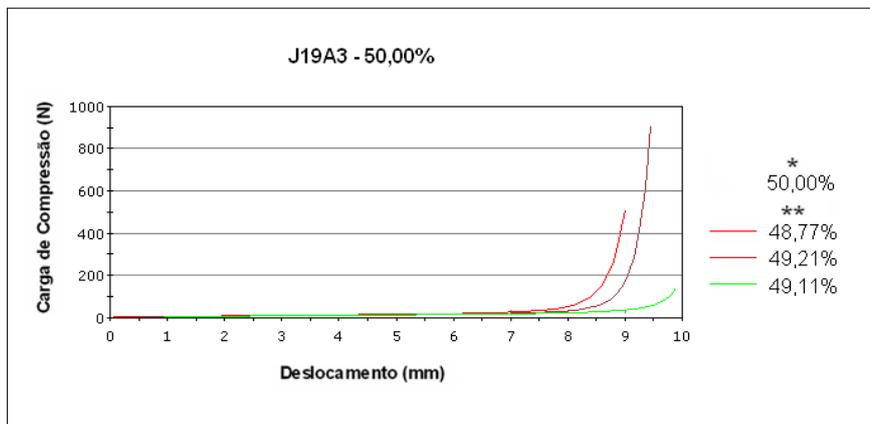


Figura B.86. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

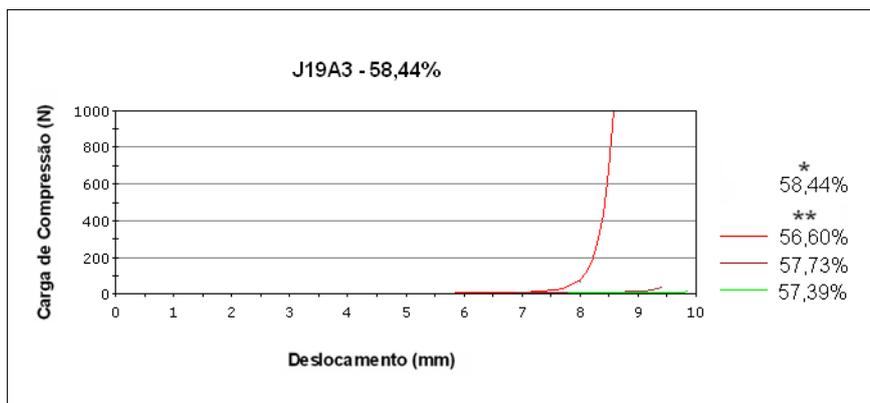


Figura B.87. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J19A3 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

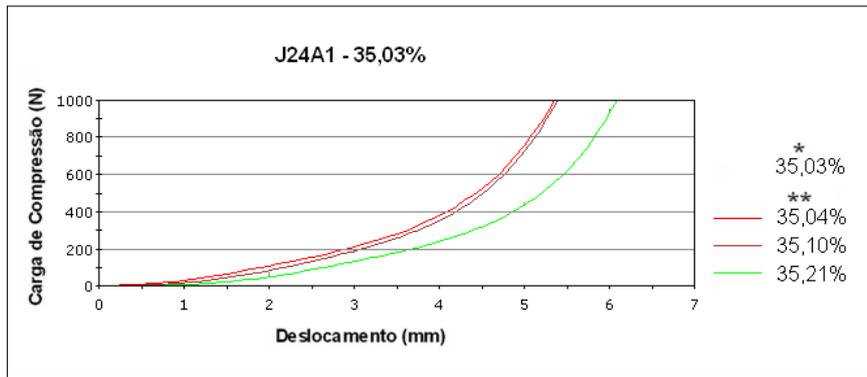


Figura B.88. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

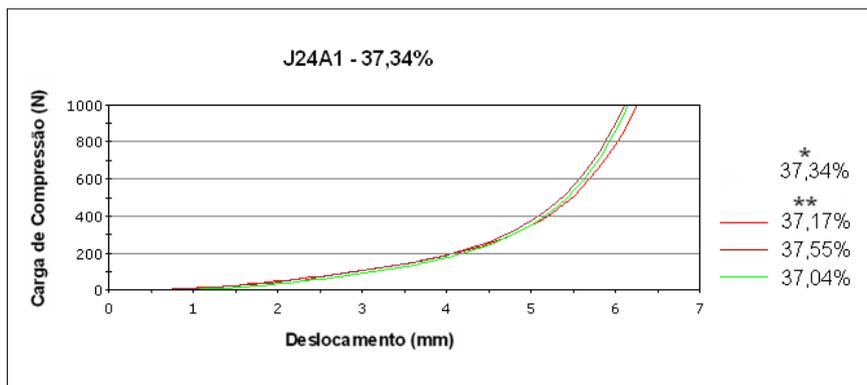


Figura B.89. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

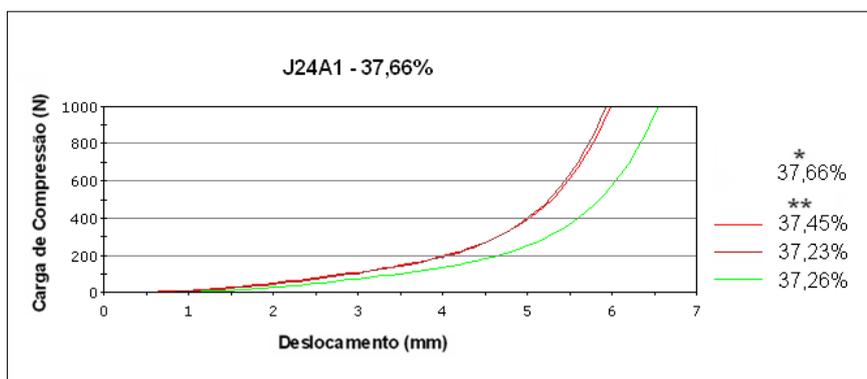


Figura B.90. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

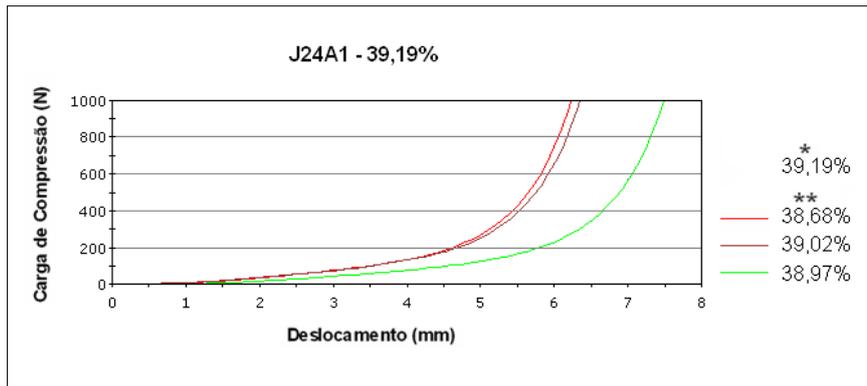


Figura B.91. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).

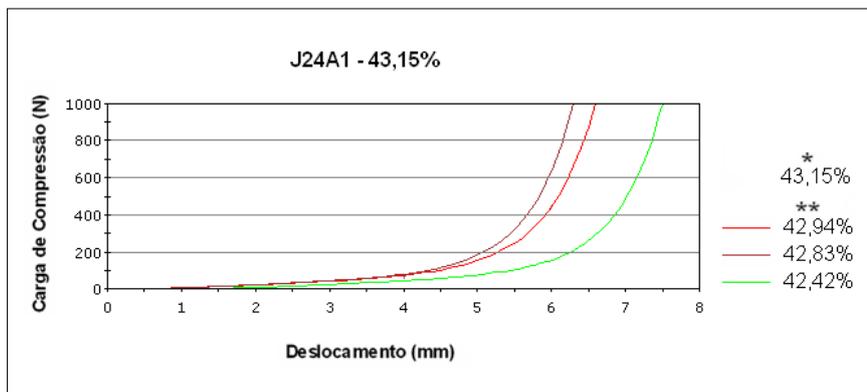


Figura B.92. Curvas cargas (Newton) versus deslocamentos (milímetro) – Saibro J24A1 (* - Umidade do WL e WP; ** - Umidade do Ensaio Reológico).