

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
DOIS RESÍDUOS FINOS DE PEDREIRA PARA UTILIZAÇÃO
EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA SILVEIRA

ORIENTADOR: PROF. LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-187/10

BRASÍLIA/DF: JULHO/2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
DOIS RESÍDUOS FINOS DE PEDREIRA PARA UTILIZAÇÃO
EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA SILVEIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GILBERTO FERNANDES, D.Sc. (UFOP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 23 DE JULHO DE 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVEIRA, RAFAELA NAZARETH PINHEIRO DE OLIVEIRA	
Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização em pavimentos rodoviários. [Distrito Federal] 2010	
xxiv, 161 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2010)	
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Resíduo de pedra	2. Ensaio de laboratório
3. Pavimentação	4. Meio Ambiente
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVEIRA, R. N. P. O. (2010). Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização em pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-187/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização em pavimentos rodoviários.

GRAU / ANO: Mestre / 2010

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira Silveira
SHIN CA-05 Bloco N1 Apto 208- Lago Norte
CEP:71503-505 Brasília/DF- Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio e amor incondicional da minha família, Ewaldo Silveira (Papito), Regina Glória Silveira (mamita) e Renata Silveira (rena, mana, mana querida);

Agradeço pelo carinho, apoio, amor, paciência, compreensão, massagens e conversas do meu namorado Francisco Pereira. Que nos momentos de felicidades, tristezas, pressão e realização esteve sempre ao meu lado;

Aos meus parentes de Belém e Brasília que sempre foram solidários e atenciosos comigo;

A Deus que nos momentos mais difíceis, me deu força para vencer as dificuldades e terminar este sonho;

Aos meus amigos de Belém, Raquel, Sara, Roberta Lavareda, Cris, Bruno, Taís, Rita, Ubiratan, Roberta, Romilson, Geraldo, Rui, Klemerson, Newton, Fábio, Aluísio, Neto e tantos outros;

Em especial gostaria de agradecer pessoas/amigos que me ajudaram de maneira mais direta para realização desta dissertação, Rafaela Faciola, Lorena Cristina, Gilmar (Sete Engenharia), João Paulo, Janaína Lima, Marcus, Conceição, Josi, Cláudia Gurjão, Cláudia Gomez, Risete, Tâmara, Raimundo, Andrelisa, Gislaine, Elza, Professor Luis Fernando, Professora Neusa, Professor Camapum, Professor Manoel, Francisco Hélio, Gislaine, Janaína Tatto e Lucinei;

Agradeço aos “meus pupilos” que sempre se mostraram engajados com as missões dadas a eles, Aline de Melo Nascimento, André Glehn e Evelyn Lourenço;

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção/UnB;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Geotecnia/UnB;

As professoras Edi Mendes Guimarães e Carol, e o Aluno Rafael, ambos do Laboratório de Raios –X do Departamento de Mineralogia e Petrologia/IG/UnB;

Ao tio Maia, Professor Rômulo e técnicos do laboratório de DRX na Geociência/UFPA pelo apoio;

Ao meu orientador e professor Luis Fernando Martins Ribeiro pela dedicação nos momentos cruciais e que me ajudou com sua atenção, amizade e carinho;

Aos meus amigos do mestrado/doutorado, Paola, Jack, Resque, Hellem, Juliana, Paula, Luis, Marianna, Petrônio, Gregório, Alerrandra, Ivan, Éder, Toni, Elmagno, Carlos Eduardo, Igor, Pedro, Ângela, Carlos Medeiros, Marcinha, Bernardo, Fernando, Larissa e Paulo André;

Aos meus amigos do Exército Neliana, Ricardo, Priscilla, Fred, Samara, Patrick, Dani, Rossane, Carolina Cantanhede, Marcelo, Monique, Cynthia, Clebiana, Andrea, Regina, Dona Jozina, Luciana, Márcia, Michelly, Estavam, Cap Dutra, Cel Guilherme, Maj Ventorine, Suelen, Flávia, Medrado e Gomes. Muito obrigada pela paciência e amizade verdadeira.

Aos meus amigos do Basquete do Clube Vizinhança Carol, Lucille, Valessa, lú, Biba, Naná, Leila, Renata, Cris, Eula, Raquel, Amanda, Lucilla e Carlinhos. Muito obrigada pela amizade verdadeira e carinho.

Aos meus amigos do Studio MF. Obrigada pela dedicação e amizade sincera.

A Capes pela concessão da ajuda financeira.

RESUMO

O entorno da cidade de Goiânia apresenta grande quantidade de pedreiras produtoras de agregados graúdos e miúdos destinados ao mercado da construção civil nos estados do Goiás e Distrito Federal. A maioria destas pedreiras, inerente a produção dos agregados, gera como subproduto do processo de beneficiamento os resíduos finos. Esses resíduos são depositados na forma de pilhas ou barragens com baixo controle geotécnico, comprometendo a qualidade técnica destas estruturas devido ao grande volume de resíduos gerados. Uma possibilidade de minimizar estes problemas de estocagem estaria relacionada ao reaproveitamento destes resíduos associado aos solos naturais em aplicações rodoviárias. Neste sentido, esta pesquisa apresenta um estudo sobre a caracterização e a avaliação das potencialidades de dois resíduos finos provenientes do beneficiamento das rochas Micaxisto e Granito em camadas de pavimento. Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado, juntamente com os resíduos, um solo tropical típico da região de Goiânia/GO (Brasil). As misturas analisadas foram preparadas com adições de 10, 15 e 20% em massa de cada resíduo, resultando em seis misturas distintas. O programa experimental envolveu estudos de caracterização física, mecânica, química e mineralógica dos dois resíduos, do solo natural e das misturas solo e resíduos. Adicionalmente, foram realizadas investigações baseadas na metodologia MCT por meio dos ensaios de Mini-MCV, Mini-CBR, expansão e perda de massa por imersão. Além destes ensaios, também foram realizados ensaios de resistência a compressão simples, sucção utilizando a técnica do papel filtro e ensaios triaxial cíclico para avaliação do módulo de resiliência. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar a aplicabilidade dos resíduos em pavimentos rodoviários bem como estabelecer uma metodologia de ensaio para avaliar o comportamento destes materiais. O estudo revelou ainda que, em função das características específicas de cada resíduo, é possível determinar uma porcentagem ótima de resíduo associada ao solo natural capaz de promover o melhor desempenho mecânico da referida associação. Finalmente, a pesquisa comprovou a importância da reciclagem e reutilização de materiais como eficiente mecanismo para a minimização dos problemas gerados pelo acúmulo destes resíduos nas pedreiras.

ABSTRACT

The outskirts of the city of Goiânia presents a great quantity of stone quarry companies, producers of coarse and fine aggregates destined to civil engineering applications in the state of Goiás and in the Federal District. Most of these companies, inherent to the production of aggregates, generates as a sub product, fine grained residues. These residues are deposited in piles or dams with poor geotechnical control, affecting the technical quality of these structures due to the large volume of residues. In order to minimize these problems, it is possible to reuse these residues associated to the natural soils in pavement applications. In this regard, this research presents a technical study about the characterization and the assessment of the potentialities of two fine grained residues from the processing of the Micaxist and Granite rocks for their uses in pavement layers. For the development of this work, beside these residues, a typical tropical soil of the region of Goiânia/GO (Brazil) was used. The mixtures were prepared with additions of 10, 15 and 20% in mass of each residue, resulting in six different materials. The experimental program involved the study of physical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of the residues, natural soil and mixtures of soil and residues. Additionally, investigations based on MCT methodology were carried out through Mini-MCV, Mini-CBR tests, expansion and loss of mass due to immersion. In addition, the following tests were also carried out: unconfined compression tests, filter paper technique for measuring soil suction and cyclic triaxial tests in order to evaluate the resilient modulus. From these studies, it was possible to verify the applicability of the residues to pavement structures as well as to establish a testing methodology to assess the behavior of such materials. The study also revealed that, due to the specific characteristics of each residue, it is possible to determine an optimal percentage of residue associated to the natural soil capable to promoting a better mechanical behavior. Finally, the research proved the importance of recycling and reusing of materials as an efficient mechanism to minimize the problems generated by the buildup of these residues inside the quarries.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
1.1.JUSTIFICATIVA.....	4
1.2.OBJETIVO GERAL.....	4
1.3.ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
2.REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1.CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO DA PEDRA BRITADA	6
2.1.1.Lavra da Brita	7
2.1.2. Definição, terminologia, classificação e ensaios com os agregados	8
2.1.2.1. <i>Análise granulométrica e teor de materiais pulverulentos</i>	10
2.1.2.2. <i>Massa específica real e aparente e absorção de água</i>	12
2.1.2.3. <i>Teores de Argilas em torrões e materiais Friáveis</i>	13
2.1.2.4. <i>Índice de Forma</i>	14
2.1.2.5. <i>Abrasão Los Angeles</i>	14
2.1.3. Produção de agregados do Estado de Goiás	15
2.1.4. Resíduos Finos de Pedreira	17
2.1.4.1. <i>Normalização nacional de resíduos sólidos</i>	17
2.2.TRABALHOS ANTERIORES E APLICAÇÕES COM RESÍDUOS FINOS DE PEDREIRAS	19
2.3.DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO	21
2.3.1. Pavimento de Baixo Custo	22
2.4.PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DE SOLOS TROPICAIS	23
2.4.1.Classificação e Metodologia MCT	25
2.4.2.Mineralogia e química dos solos tropicais	31
2.5.ENSAIOS MECÂNICOS	35
2.5.1.Resistência à Compressão Simples	35

2.5.2.Ensaio de Sucção com papel filtro	37
2.5.3.Ensaio de Módulo de Resiliência	39
<i>2.5.3.1.Modelo para o cálculo do módulo de resiliência</i>	45
2.6.CONTROLE TECNOLÓGICO	47
3.MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1.LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS	50
3.1.1.Pedreira Araguaia	50
3.1.2.Pedreira Anhanguera	51
3.2.MATERIAIS	52
3.2.1.Resíduos Finos	52
3.2.2.Solo Natural de Goiânia	53
3.2.3.Misturas de solo natural e resíduo fino	56
3.2.4.Agregados	57
3.3.MÉTODOS	58
3.3.1.Caracterização física e classificação das amostras em estudo	59
3.3.2.Microscopia com lupa	60
3.3.3.Análises Mineralógicas e Químicas	60
3.3.4.Ensaio específicos para aplicação dos resíduos finos de pedreiras em pavimentação	61
<i>3.3.4.1.Ensaio de Mini- Compactação e ensaios de Mini-MCV</i>	61
<i>3.3.4.2.Ensaio de Mini-CBR</i>	63
<i>3.3.4.3.Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i>	70
<i>3.3.4.4.Ensaio de Sucção</i>	71
<i>3.3.4.5.Módulo de Resiliência</i>	72
3.3.5. Ensaio específicos para aplicação dos resíduos de pedreiras em pavimentação...	74
<i>3.3.5.1.Análise Granulométrica e Teor de Materiais Pulverulentos</i>	75

3.3.5.2.Determinação de massa específica real e aparente e absorção de água.....	75
3.3.5.3.Teores de argilas em torrões e materiais friáveis.....	75
3.3.5.4.Índice de Forma	75
3.3.5.5.Abrasão “Los Angeles”	77
4.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	79
4.1.CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO	80
4.1.1.Resíduos Finos	80
4.1.2.Solo Natural de Goiânia (SN).....	83
4.1.3.Misturas de solo natural e resíduos finos	86
4.1.4.Caracterização Estrutural dos resíduos finos.....	88
4.1.4.1.Resíduos Finos (<i>ARtotal</i> e <i>ANtotal</i>)	88
4.2.CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	89
4.2.1.Resíduos Finos	89
4.2.2.Solo Natural de Goiânia.....	91
4.3.CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	92
4.3.1.Resíduos Finos	92
4.3.2.Solo Natural de Goiânia.....	93
4.4.ENSAIOS ESPECÍFICOS PARA APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS FINOS EM PAVIMENTAÇÃO.....	94
4.4.1.Ensaio de Compactação em Miniatura.....	94
4.4.1.1.Resíduos Finos	94
4.4.1.2.Solo Natural de Goiânia	96
4.4.1.3.Misturas de solo natural e resíduos finos	97
4.4.2.Ensaio de Mini-MCV.....	100
4.4.2.1.Resíduos Finos	100
4.4.2.2.Solo Natural de Goiânia	102

4.4.2.3. <i>Misturas de solo natural e resíduos finos</i>	102
4.4.3. Ensaio de Mini-CBR e Expansão	105
4.4.3.1. <i>Resíduos Finos</i>	106
4.4.3.2. <i>Solo Natural de Goiânia</i>	107
4.4.3.3. <i>Misturas de solo natural e resíduos finos</i>	109
4.4.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples	114
4.4.4.1. <i>Resíduos Finos</i>	114
4.4.4.2. <i>Solo Natural de Goiânia</i>	117
4.4.4.3. <i>Misturas de solo natural e resíduos finos</i>	119
4.4.5. Ensaio de Sucção	125
4.4.5.1. <i>Resíduos Finos</i>	126
4.4.5.2. <i>Misturas de solo natural e resíduos finos</i>	127
4.4.6. Correlações de propriedades geotécnicas com o ensaio de sucção	130
4.4.7. Ensaio de Módulo de Resiliência	134
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
5.1. INTRODUÇÃO	139
5.2. CONCLUSÕES RELATIVAS À INVESTIGAÇÃO TÉCNICA	139
5.3. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
APÊNDICES-ENSAIOS REALIZADOS COM OS AGREGADOS DAS PEDREIRAS ARAGUAIA E ANHANGUERA.	153
A. ANÁSE GRANULOMÉTRICA E TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO	154
B. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL E APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA	158
C. TEORES DE ARGILAS EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS	159
D. ÍNDICE DE FORMA	160
E. ABRASÃO LOS ANGELES	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfico de abrasão em porcentagem. (modificado Ramiro, 2008).....	15
Figura 2.2. Panorama da Brita no estado de Goiás. (modificado Sindibrita, 2006).....	16
Figura 2.3. Panorama da areia artificial no estado de Goiás. (modificado Sindibrita, 2006)..	16
Figura 2.4. Representação esquemática de um perfil de solo.	24
Figura 2.5. Gráficos representativos dos resultados do ensaio de Mini-MCV e perda por imersão (Nogami & Villibor, 1995).	28
Figura 2.6. Gráfico de classificação do solo em laterítico e não laterítico.	29
Figura 2.7 . Classificação do solo quanto à concentração pH.....	35
Figura 2.8. (a) Variação do módulo de resiliência em função do Mini-CBR de alguns solos lateríticos e saprolíticos; (b) Classificação dos solos (Franzoi, 1990).	43
Figura 2.9. Modelo de comportamento resiliente de solos finos (Pinto & Preussler, 2002)....	44
Figura 3.1. Localização das pedreiras: 1- Pedreira Araguaia; 2- Pedreira Anhanguera (modificado Cuti, 2008).	48
Figura 3.2. Pilhas de resíduos finos na pedreira Araguaia.	49
Figura 3.3. Tanque de decantação da pedreira Araguaia.	50
Figura 3.4. Tipo de Lavra bancada na pedreira Araguaia.	51
Figura 3.5. Lavra da pedreira Anhanguera (Fonte: Cuti, 2008).	52
Figura 3.6. Pilha de resíduos finos da pedreira Araguaia.....	52
Figura 3.7. Pilha de resíduo fino da pedreira Anhanguera e o hidro-Ciclone (Batalione, 2007).	53
Figura 3.8. Local da coleta de solo natural de Goiânia.	54
Figura 3.9. Solo utilizado nas misturas.	54
Figura 3.10. Frações de britas e a areia artificial produzidas na pedreira Anhanguera.	57
Figura 3.11. Soquete pequeno e Cilindros utilizados no ensaio de Mini-MCV.....	62
Figura 3.12. Ensaio de perda por imersão com a amostra AN20.....	63
Figura 3.13. Corpo de prova com dimensão de 5cm de altura e 5cm de diâmetro da amostra ARtotal.	63

Figura 3.14. Compactação semi-estática na prensa do corpo de prova.....	64
Figura 3.15. Corpo de prova sendo extraído. (a) extração do corpo de prova; (b) corpo de prova extraído pronto para o ensaio propriamente dito.....	65
Figura 3.16. (a) Molde cilindro bipartido de PVC; (b) Molde cilindro bipartido de PVC com as Braçadeiras de Alumínio.....	65
Figura 3.17. Ensaio de Mini-CBR com a amostra ANtotal.	66
Figura 3.18. Ensaio de Mini-CBR com corpos de prova das misturas.	67
Figura 3.19. Material utilizado para a imersão do corpo de prova.....	67
Figura 3.20. Montagem do ensaio Mini-CBR: (a) Base com o primeiro papel filtro; (b) colocação do molde de PVC; (c) Colocação do molde com o CP sobre a base; (d) Colocação do extensômetro.	68
Figura 3.21. Corpos de prova imersos em tanque.	68
Figura 3.22. Determinação da Capacidade de Suporte Mini-CBR: (a) Prensa Utilizada, (b) Detalhe do Molde com o Corpo de Prova.	69
Figura 3.23. Detalhe do corpo de prova recebendo o carregamento.....	70
Figura 3.24. Detalhes da montagem do ensaio com papel filtro.	71
Figura 3.25. Etapas do Ensaio de Módulo de Resiliência no LER. (a) Soquete grande, base do cilindro, cilindro (10 x 20 cm); (b) Compactação do CP; (c) Extração do CP; (d) CP no interior da célula do triaxial e envolto pela membrana de borracha; (e) visão panorâmica do conjunto necessário para o ensaio de módulo de resiliência.....	74
Figura 3.26. Crivo I- (a) conjunto com crivo de abertura circular e suporte de peneiramento; (b) seqüências de crivos circulares.....	76
Figura 3.27. Crivo II- (a) conjunto com crivo II e suporte de peneiramento; (b) seqüências de crivos II.	77
Figura 3.28. Cilindro giratório do LER.....	78
Figura 4.1. Curvas granulométricas da amostra ARtotal.	81
Figura 4.2. Curvas granulométricas da amostra ANtotal.	81
Figura 4.3. Resultados da granulometria do solo natural de Goiânia com e sem defloculante.	83
Figura 4.4. Microscopia com lupa. (a) resolução 200X da amostra ARtotal; (b) resolução 400X da amostra ARtotal.....	88

Figura 4.5. Microscopia com lupa. (a) resolução 200X da amostra ANtotal; (b) resolução 400X da amostra ANtotal.....	88
Figura 4.6. Difrátogramas da amostra ARtotal.	89
Figura 4.7. Difrátogramas da amostra ANtotal.	90
Figura 4.8. Curvas de Mini-Compactação na energia do Proctor intermediário das amostras compostas apenas por resíduos finos.	95
Figura 4.9. Relação de e x W (%) com resíduos da pedraira Araguaia e Anhanguera.	95
Figura 4.10. Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária para o solo de Goiânia.	96
Figura 4.11. Relação de e x W (%) com resíduos da pedraira Araguaia e Anhanguera.	97
Figura 4.12. (a) Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária das misturas da pedraira Araguaia; (b) Curvas de e x W (%) das misturas da pedraira Araguaia.	97
Figura 4.13. (a) Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária das misturas da pedraira Anhanguera; (b) Curvas de e x W (%) das misturas da pedraira Anhanguera.	98
Figura 4.14. Curvas de Mini- compactação na energia do Proctor intermediária das seis misturas.	100
Figura 4.15. Ensaio de Mini-MCV da amostra ARtotal.	101
Figura 4.16. Ensaio de Mini-MCV da amostra ANtotal.	101
Figura 4.17. Ensaio de Mini-MCV do solo natural de Goiânia.	102
Figura 4.18. Ensaio de Mini-MCV da amostra AR10; (b) Ensaio de Mini-MCV da amostra AR15 e (c) Ensaio de Mini-MCV da amostra AR20.	103
Figura 4.19. (a) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN10; (b) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN15; (c) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN20.	103
Figura 4.20. Variação da inclinação do ramo seco para as seis misturas.....	104
Figura 4.21. Variação do coeficiente P_i com a adição de resíduos finos de pedraira para as seis misturas.	105
Figura 4.22. Resultados dos ensaios de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária dos resíduos finos ARtotal e ANtotal.	107
Figura 4.23. Resultados dos ensaios de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária do solo de Goiânia.....	108
Figura 4.24. Resultados dos Ensaio de Mini-CBR das misturas da pedraira Araguaia – Sem Imersão – Energia Intermediária.	110

Figura 4.25. Mini-CBR x e - misturas com resíduos finos da pedreira Araguaia.....	110
Figura 4.26. Resultados dos Ensaio de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária.	112
Figura 4.27. Mini-CBR X e - misturas com resíduos finos da pedreira Anhanguera.	113
Figura 4.28. Curvas de Mini- CBR versus teor de umidade das seis misturas.	114
Figura 4.29. Ensaio de compressão simples com a amostra ARtotal.....	115
Figura 4.30. Ensaio de compressão simples com a amostra ANtotal.	116
Figura 4.31. Correlações com o ensaio de compressão simples para as amostras ARtotal e ANtotal.(a) RCS x W (%); (b) RCS x e_0	116
Figura 4.32. Resultados do módulo de elasticidade em função da umidade de compactação das amostras ARtotal e ANtotal.	117
Figura 4.33. Curvas tensão-deformação para o solo Goiânia.	118
Figura 4.34. Correlações com o ensaio de compressão simples solo natural de Goiânia. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0	118
Figura 4.35. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação do solo natural.	119
Figura 4.36. (a) Ensaio de compressão simples com a amostra AR10; (b) Ensaio de compressão simples com a amostra AR15; (c) Ensaio de compressão simples com a amostra AR20.	120
Figura 4.37. Correlações com o ensaio de compressão simples para as três misturas composta pelo resíduo fino da pedreira Araguaia. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0	121
Figura 4.38. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação das amostras AR10, AR15 e AR20.	122
Figura 4.39. (a) Ensaio de compressão simples com a amostra AN10; (b) Ensaio de compressão simples com a amostra AN15; (c) Ensaio de compressão simples com a amostra AN20.	123
Figura 4.40. Correlações com o ensaio de compressão simples para as três misturas composta pelo resíduo fino da pedreira Anhanguera. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0	124
Figura 4.41. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação das amostras AN10, AN15 e AN20.....	125
Figura 4.42. Variação da Sucção em relação à umidade para as amostra ARtotal e ANtotal.	127

Figura 4.43. Relação entre Sucção Matricial (kPa) e W (%) das misturas AR10, AR15 e AR20.	128
Figura 4.44. Relação entre a Sucção Matricial (kPa) e W (%) das misturas AN10, AN15 e AN20.	129
Figura 4.45. Resultados de sucção matricial para as seis misturas compactadas na faixa ótima de umidade.	129
Figura 4.46. Relação de Mini-CBR x Sucção (kPa) para as seis misturas.....	130
Figura 4.47. Relação de Mini-CBR x pF/e para as seis misturas.....	131
Figura 4.48. Relação de RCS x Sucção (kPa) para as seis misturas.	131
Figura 4.49. Relação de RCS x pF/e para as seis misturas.	132
Figura 4.50. Relação de E_{50} x Sucção Matricial (kPa) para as seis misturas.	132
Figura 4.51. Relação de E x pF/e para as seis misturas.	133
Figura 4.52. Exemplo de planilha de regressão para a transformação dos parâmetros σ_3 , σ_d , σ_1 e σ_{oct} para o modelo universal proposto Uzan & Witczack (1998), aplicada à amostra AR10.	135
Figura 4.53. Exemplo de planilha de regressão para a transformação dos parâmetros σ_3 , σ_d , σ_1 e σ_{oct} para o modelo universal proposto Uzan & Witczack (1998), aplicada à amostra AN15.	136
Figura 4.54. Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a composição AR10.	136
Figura 4.55. Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a composição AN15.	137
Figura 4.56. Ensaio de módulo de resiliência em função da tensão confinante para as amostras AR10 e AN15.....	138
Figura 4.57. Ensaio de módulo de resiliência em função da tensão confinante para as amostras AR10 e AN15.....	138
Figura A.1. Análise granulométrica da areia artificial da pedreira Araguaia e Anhanguera..	154
Figura A.2. Análise granulométrica da brita 0 da pedreira Araguaia e Anhanguera.....	156
Figura A.3. Análise granulométrica da brita 1 da pedreira Araguaia e Anhanguera.....	156
Figura A.4. Análise granulométrica da brita 2 da pedreira Araguaia e Anhanguera.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Terminologia de acordo com a natureza dos agregados para construção civil (modificado da NBR 9935/2005).....	9
Tabela 2.2. Terminologia de acordo com as dimensões dos agregados para construção civil (modificado da NBR 7225/93).....	9
Tabela 2.3. Limites granulométricos do agregado miúdo (modificado da NBR 7217/87).....	11
Tabela 2.4. Limites granulométricos de agregados graúdos (modificado da NBR 7217/87)..	11
Tabela 2.5. Valores de massa específica de rochas mais comuns (Fonte: Silva, 2000).....	13
Tabela 2.6. Comparação dos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles (Modificado Junqueira, 1994).....	14
Tabela 2.7. Gráfico da Classificação MCT e dados dos grupos de solos (Nogami & Villibor, 1995).....	30
Tabela 2.8. Características dos principais argilos-minerais. (Costa, 1991).	33
Tabela 2.9. Classificação do solo em função da fração passada na peneira nº 200 (Pinto & Preussler, 2002).....	42
Tabela 3.1. Nomenclatura adotada para as diversas amostras desta pesquisa.	57
Tabela 3.2. Metodologia de classificação aplicada para cada amostra.	60
Tabela 3.3. Determinação da graduação do material após análise granulométrica (Modificado da ME 086, DNER 1994).....	76
Tabela 4.1. Quantitativo de ensaios de laboratório realizados com os resíduos finos, solo e misturas.	80
Tabela 4.2 Caracterização física dos resíduos finos das duas pedreiras em estudo.	81
Tabela 4.3. Caracterização física do solo natural de Goiânia, limites de consistências e peso específico dos grãos.	84
Tabela 4.4. Classificação tradicional MCT para o solo Goiânia.....	84
Tabela 4.5. Resultado dos ensaios de caracterização e classificação dos solos (Guimarães & Jacintho, 2008).	85
Tabela 4.6. Parâmetros da Metodologia MCT: Classificação Tradicional (modificado Guimarães & Jacintho, 2008).....	85
Tabela 4.7. Ensaio da metodologia MCT: classificação tradicional.	86

Tabela 4.8. Peso específico das seis misturas.	87
Tabela 4.9. Minerais Identificados nos Difractogramas.	91
Tabela 4.10. Minerais Identificados nos Difractogramas (modificado Jacinto, 2008).	91
Tabela 4.11. Resultados das análises químicas dos resíduos finos	92
Tabela 4.12. Resultados das Análises Químicas (Jacinto, 2008).	93
Tabela 4.13. Resultados dos Ensaios de Mini-compactação na energia do Proctor intermediária- Metodologia MCT para amostras da pedraira Araguaia.	98
Tabela 4.14. Resultados dos Ensaios de Mini-compactação na energia do Proctor intermediária - Metodologia MCT para amostras da pedraira Anhanguera.	99
Tabela 4.15. Resultados da inclinação média do ramo seco para a amostra ARtotal e ANtotal.	101
Tabela 4.16. Características de moldagem dos CPs das amostras ARtotal e ANtotal submetidos ao ensaio de Mini-CBR.	106
Tabela 4.17. Resultados de Mini-CBR sem imersão- Energia intermediária com amostra compostas apenas por resíduos finos de pedraira.	107
Tabela 4.18. Características de moldagem dos CPs do solo natural que foram submetidos ao ensaio de Mini-CBR.	108
Tabela 4.19. Resultados dos ensaios de Mini-CBR e expansão do solo natural de Goiânia.	109
Tabela 4.20. Características de moldagem dos CPs das misturas AR10, AR15 e AR20 submetidos aos ensaios de Mini-CBR.	109
Tabela 4.21. Resumo dos resultados, Mini-CBR e expansão para as misturas com resíduo fino da pedraira Araguaia.	111
Tabela 4.22. Características de moldagem dos CPs das misturas AN10, AN15 e AN20 submetidos aos ensaios de Mini-CBR.	112
Tabela 4.23. Resumo dos resultados, Mini-CBR e expansão para as misturas com resíduos finos da pedraira Anhanguera.	113
Tabela 4.24. Características de moldagem dos CPs das amostras ARtotal e ANtotal submetidos aos ensaios de compressão simples.	115
Tabela 4.25. Resultados dos ensaios de RCS para as amostras ARtotal e ANtotal.	117
Tabela 4.26. Características dos CPs do solo natural de Goiânia baseados no ensaio de compressão simples.	118

Tabela 4.27. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para o solo natural.....	119
Tabela 4.28. Características dos CPs relativos às misturas com resíduos finos da pedreira Araguaia utilizados no ensaio de compressão simples.....	120
Tabela 4.29. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para as misturas com resíduos finos da pedreira Araguaia.	122
Tabela 4.30. Características dos CPs relativos às misturas com resíduos finos da pedreira Anhanguera utilizados no ensaio de compressão simples.....	123
Tabela 4.31. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para as misturas com resíduos finos da pedreira Anhanguera.	125
Tabela 4.32. Resultados da moldagem das amostra ARtotal e ANtotal utilizados para o ensaio de sucção pelo método do papel filtro.....	126
Tabela 4.33. Características dos CPs das misturas com resíduos finos da pedreira Araguaia no ensaio de sucção pelo método do papel filtro.	127
Tabela 4.34. Características dos CPs das misturas com resíduos finos da pedreira Anhanguera utilizados no ensaio de sucção.	128
Tabela 4.35. Correlações da sucção com as propriedades mecânicas das seis misturas.....	133
Tabela 4.36. Características dos corpos de provas submetidos ao ensaio de módulo de resiliência.	134
Tabela A.1. Porcentagens das frações granulométricas e características básicas das areias artificiais produzidas nas pedreiras Araguaia e Anhanguera.....	155
Tabela A.2. Porcentagens das frações granulométricas para as amostras britas produzidas nas pedreiras Araguaia e Anhanguera.....	157
Tabela B.1. Ensaio realizado com a Brita 1 das duas pedreiras.....	158

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHO- American Association of State Highway.

AASHTO – American association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANtotal- 100% de resíduos da pedra Anhanguera.

AN10- Mistura composta por 10% de resíduos finos da pedra Anhanguera e 90% do Solo Natural de Goiânia.

AN15- Mistura composta por 15% de resíduos finos da pedra Anhanguera e 85% do Solo Natural de Goiânia.

AN20- Mistura composta por 20% de resíduos finos da pedra Anhanguera e 80% do Solo Natural de Goiânia.

ARtotal- 100% de resíduos finos da pedra Araguaia.

AR10- Mistura composta por 10% de resíduos finos da pedra Araguaia e 90% do Solo Natural de Goiânia.

AR15- Mistura composta por 15% de resíduos finos da pedra Araguaia e 85% do Solo Natural de Goiânia.

AR20- Mistura composta por 20% de resíduos finos da pedra Araguaia e 80% do Solo Natural de Goiânia.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

Cc- Coeficiente de Curvatura

CEASA- Centrais de Abastecimento de Goiás S.A

CBR – Califórnia Bearing Ratio.

CEFET GO – Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

C' – Coeficiente de deformabilidade da Classificação MCT.

CNU- Coeficiente de não uniformidade

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CP- Corpo de Prova.

CPs- Corpos de prova.

Cu- Coeficiente de Uniformidade.

d10- É o diâmetro da peneira na qual a porcentagem passante acumulada é de 10%.

d50- É o diâmetro da peneira na qual a porcentagem passante acumulada é de 50%.

d60- É o diâmetro da peneira na qual a porcentagem passante acumulada é de 60%.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT – Departamento Nacional de Infra Estrutura e Transporte.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral.

DRX - Diffractometria de raios X

d'- Inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação na metodologia MCT.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária.

E – Módulo de Elasticidade.

ε_r – Deformação resiliente.

e- Índice de vazios.

GC – Grau de Compactação.

GO- Goiás

HRB – Highway Reaserch Board.

h_0 - Comprimento inicial do corpo de prova

IG – Índice de Grupo.

IP – Índice de Plasticidade.

IPT/SP – Instituto de Pesquisas Tecnológica de São Paulo.

ISC – Índice Suporte Califórnia.

K_1, K_2, K_3, K_4 – Parâmetros de resiliência.

LVDT – Linear Variable differential Transformer.

L.A. - Abrasão Los Angeles

LA' - Solo arenoso lateritico

LG' - Solo argiloso lateritico

MCT Miniatura compactado tropical

MB – Método Brasileiro.

MCT- Miniatura Compactada Tropical.

MCV – Moisture Condition Value.

ME – Método de Ensaio.

Mini-MCV – Ensaio MCV da metodologia MCT.

Mini-CBR – Ensaio de suporte da metodologia MCT.

MPa- Mega Pascal.

M_R -Módulo Resiliente.

NBR- Norma Brasileira Registrada.

Pa- Pressão atmosférica

pH – Potencial hidroeonico.

Pi- Perda de Massa por Imersão, metodologia MCT.

pF- Logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

RCS – Resistência a Compressão Simples

SN – Solo Natural de Goiânia.

Sr – Grau de Saturação.

SUCS – Sistema Unificado de classificação dos Solos.

TRB – Transportation Reaserch Board.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UnB – Universidade de Brasília.

Wl – Limite de liquidez.

W_{ot} – Umidade ótima.

W_p – Limite de Plasticidade.

γ_d – Peso específico do solo seco.

$\gamma_{dm\acute{a}x}$ – Peso específico seco máximo.

γ_s – Peso específico dos sólidos.

σ_d – tensão desvio.

σ_1 - Tensão axial principal.

σ_3 – tensão confinante.

σ_{oct} – tensão octaédrica.

Δh - Deslocamento vertical máximo.

θ - Soma das tensões principais

1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais provocados pelas atividades antrópicas tendem a causar descaracterizações no meio ambiente que nem sempre são passíveis de recuperação. Neste sentido, é perceptível a alteração na qualidade de vida da população como reflexo da própria ação humana. Considerando a evolução destas intervenções, uma política de desenvolvimento sustentável tem se tornado necessária visando à melhoria da qualidade de vida e sobrevivência dos seres humanos.

Observa-se que apesar de fundamental para a economia e para a sociedade mundial, as atividades de extração mineral tendem, como subproduto dos processos de beneficiamento dos minérios, a produzir resíduos. Estes materiais, quando não tratados ou depositados de forma inadequada, podem gerar impactos ambientais. Um fator importante a ser considerado é o grande volume de resíduos produzidos e a necessidade de alocar grandes áreas para sua correta estocagem.

De uma maneira geral, a dimensão dos impactos causados ao meio ambiente por uma atividade de mineração está diretamente relacionada com o tamanho do empreendimento, a localização, as características sociais e ambientais do entorno, as propriedades da jazida e as tecnologias de lavras e tratamentos utilizados (Taveira, 1997).

Na atualidade, muitas pesquisas tem se desenvolvido com base na reciclagem de materiais e tem se tornado um eficiente mecanismo para solucionar e minimizar os problemas oriundos do deficiente gerenciamento dos resíduos gerados pela atividade humana. Aliado a isto, existe um grande apelo para aplicação de novos materiais que possam substituir as matérias-primas naturais. De acordo com a Resolução CONAMA 307 (CONAMA, 2002) o reaproveitamento de resíduos apresenta três características distintas: a reciclagem, que caracteriza o processo de um resíduo após ter sido submetido à transformação; a recuperação, que consiste na extração de algumas substâncias dos resíduos e a reutilização, que é a reaplicação do resíduo, sem envolver a sua transformação.

Em relação à utilização de agregados naturais para serem empregados na construção civil, percebe-se cada vez mais a dificuldade de explorar estes recursos pela escassez de jazidas e a degradação ambiental. Uma tendência para contornar este problema tem sido a utilização de

materiais oriundos do processo de exploração de pedreiras em substituição aos materiais naturais (cascalhos, areias naturais, solo). Aliado a estes materiais tem sido avaliada a utilização de resíduos advindos do processo de britagem e beneficiamento relacionados à produção de agregados. Esta proposta apresenta uma vantagem importante em vista da redução dos impactos ambientais relacionados principalmente a estocagem destes resíduos.

Considerando a produção de agregados, a extração deste tipo de matéria-prima gera resíduos nos mais variados tipos e volumes e no caso específico das pedreiras são produzidos resíduos finos que, de uma certa forma, são considerados subprodutos sem valor econômico e que tendem a causar significativos danos ao meio ambiente.

Mendes (1999) identifica alguns tipos de impactos ambientais associados à exploração de pedreiras devido à geração de finos:

- Poluição atmosférica através de emissão de materiais particulados presente nos depósitos;
- Alteração no regime hidrológico pelo turvamento, assoreamento e mudanças nas seções das calhas dos cursos d'água;
- Ocupação indevida de áreas devido à necessidade de estocagem de rejeitos gerados. Muitas vezes, estas pilhas tendem a esterilizar terrenos que poderiam servir para utilizações mais nobres;
- Ruídos e Vibrações gerados durante as explosões, trituração, esmagamento e transporte de rochas;
- Consumo excessivo de água para processar os agregados com perda em certos casos, de aproximadamente 80% do volume de água utilizado no processo.

Preocupada com os problemas relacionados à deposição destes resíduos, a comunidade científica tem desenvolvido trabalhos com a finalidade de reaproveitar os resíduos como materiais de construção, a fim de alcançar soluções dos problemas de estocagem e mitigar os impactos ambientais. Mais especificamente, vinculado à geotecnia ambiental, já existem inúmeros trabalhos relacionados ao aproveitamento dos resíduos industriais e/ou resíduos de construção e demolição em aplicações em obras de construção civil e geotécnicas

Os resíduos finos de pedreira ficam depositados nas áreas internas das mineradoras e/ou em pátios nas pedreiras sem perspectiva de utilização, sendo assim é de extrema importância o

estabelecimento de metodologias e formas de aproveitamento desses resíduos. Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas e fazem parte de um projeto de pesquisa em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, que visa avaliar o uso e caracterizar os resíduos em aplicações geotécnicas (Batalione, 2007; Costa, 2007 e Cuti, 2008).

Batalione (2007) desenvolveu uma investigação experimental, com ensaios de campo e de laboratório, com o objetivo de utilizar de resíduos finos de pedreira de uma rocha granítica para estabilização de quatro solos tropicais da região noroeste do estado de Goiás.

Costa (2007) propôs a utilização dos resíduos de pedreiras, como adição mineral na confecção de concreto auto-adensável, avaliando seu desempenho nos estados fresco e endurecido, tendo em vista sua utilização na confecção de estacas escavadas. Essa pesquisa tem como objetivo a verificação das possíveis melhorias alcançadas na execução, no desempenho estrutural e na durabilidade das estacas

Cuti (2008) em seu trabalho estabeleceu uma metodologia para o cadastro, mapeamento e caracterização de jazidas relativas às pedreiras de produção de agregados situadas no entorno da cidade de Goiânia, gerando um banco de dados que permite a consulta rápida de informações a respeito do seu processo produtivo. Além disso, realizou ensaios de laboratório com amostras de rocha coletadas nas frentes de lavra para caracterização dos maciços.

Seguindo esta linha de pesquisa, esta dissertação propõe a utilização de resíduo oriundos do processo de produção de agregados artificiais em obras de pavimentação de baixo volume de tráfego. Os resíduos estudados foram obtidos de duas pedreiras do entorno da cidade de Goiânia/GO, a Pedreira Araguaia responsável pela exploração de um micaxisto e a Pedreira Anhanguera com a exploração de uma rocha granítica. O volume médio de resíduos produzidos em cada pedreira é da ordem de 30 m³/dia e sua disposição é feita por empilhamento do material ainda bastante úmido e de forma empírica, sem uma avaliação rigorosa da estabilidade dos depósitos, assoreamento e erosões. Alguns destes resíduos por estarem em uma condição úmida são estocados inicialmente em barragens para retirada da água e em seguida removidos para as pilhas de estocagem.

É importante ressaltar que as duas pedreiras em estudo apresentam técnicas distintas de geração de finos, essas mais detalhadas no Capítulo 3. No entanto, o volume gerado de

resíduo fino é considerado um problema ambiental comum dentro das pedreiras considerando principalmente a produção da pedra britada e principalmente da areia artificial.

Ao considerar os custos, principalmente, questões relacionadas aos impactos ambientais e suas restrições legais envolvidas na destinação de grandes quantidades desse resíduo, esta pesquisa propõe a análise das propriedades dos dois resíduos de finos de pedra associados a um solo natural para utilização em aplicações geotécnicas. Além de buscar uma alternativa econômica para a produção de pavimentos urbanos denominados de baixo custo, a serem executados na região

Neste sentido, foram realizados os ensaios de caracterização física, mineralógica, avaliação do comportamento mecânico dos resíduos finos, solo natural de Goiânia e com as seis misturas (solo natural + resíduos finos de pedreiras), além de ensaios químicos que possibilitaram determinar os elementos constituintes dos dois resíduos finos e os percentuais de cada elemento.

1.1. JUSTIFICATIVA

Considerando os problemas relacionados à forma de disposição das pilhas dos resíduos finos somada à possibilidade de eventuais problemas de estabilidade assoreamento e erosões, propõe-se um sistema de reaproveitamento dos resíduos finos associados a materiais naturais (solo), a fim de melhorar as propriedades do mesmo e transformar o material sem valor econômico em um material ambientalmente viável em aplicações geotécnicas.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa consiste em estudar as propriedades de dois resíduos finos e misturas (solo natural + resíduos finos) como elemento alternativo para o emprego em aplicações geotécnicas.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Caracterizar geotecnicamente o resíduo fino proveniente da quebra e corte do micaxisto (pedreira Araguaia) e o resíduo oriundo processo de cominuição da rocha granítica (pedreira Anhanguera);

- Estudar a viabilidade técnica de utilizar os dois resíduos finos e misturas (solo natural + resíduo fino) como material componente para confecção de uma camada de pavimentação (subleito, reforço de subleito e sub-base);
- Comparar o desempenho dos diferentes materiais estudados;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em capítulos conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 é apresentado uma breve introdução à cerca do problema e a justificativa da realização da pesquisa, assim como, descreve o objetivo geral do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura citando o marco teórico, a fim de familiarizar ao leitor com o tema, de acordo com os conceitos básicos referentes o tema.

O Capítulo 3 descreve os materiais usados na execução da pesquisa. Assim como os procedimentos e metodologias que foram utilizadas para a execução de cada uma das etapas desenvolvidas durante o trabalho experimental da pesquisa.

O Capítulo 4 destaca os resultados obtidos durante a etapa experimental no laboratório. Também são realizadas as discussões relativas à modificação do comportamento mecânico das amostras compostas somente por resíduos finos e as seis misturas analisadas nesta pesquisa.

No Capítulo 5 são mostradas às conclusões obtidas a partir dos dados e discussões e as sugestões para futuras pesquisas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados alguns tópicos relevantes às peculiaridades da atividade de produção de agregados para construção civil e a geração de resíduos finos de pedra. Assim como a repercussão dessa atividade de mineração ao meio ambiente. Propõe-se, ainda a apresentação de alguns conceitos e metodologia de ensaios geotécnicos, químicos e mineralógicos fundamentais para avaliação do comportamento de materiais alternativos para fins geotécnicos.

2.1. CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO DA PEDRA BRITADA

A produção de brita teve início na Inglaterra em 1815, expandindo-se em 1858 com a invenção do britador mecânico. No início do século XX, já era possível verificar o uso da pedra britada misturada ao cimento na produção de concreto (Calaes, 2007).

Sabe-se que a mineração de brita consiste na exploração de agregados por meio de cortes e quebras de rochas, sendo neste caso importante um bom planejamento em relação às atividades de lavra. Este planejamento envolve desde questões relacionadas à quantidade de explosivos, tipos de lavra até a recuperação ambiental.

Para Araújo (2008) a mineração de brita pode ser identificada como uma estrutura industrial, uma vez que envolve a exploração de diversos recursos minerais, empregando diferentes metodologias de beneficiamento em suas linhas produtivas para obtenção dos agregados, envolvendo também vários efeitos sobre o meio ambiente.

Campos (2007) comenta que a opção pela lavra tipo descendente em pedreiras favorece a realização com êxito da programação previamente estabelecida, sendo considerada a melhor técnica para uma possível recuperação ambiental.

Muitas vezes a recuperação ambiental está ligada a boas práticas desse planejamento, além do estudo para avaliar se a lavra será em encosta ou em cava, ainda se ela será com bancada do tipo ascendente ou descendente.

2.1.1. Lavra da Brita

De acordo com Frazão (2002) a maior parte da lavra de brita é feita a céu aberto, em meia encosta. As operações se iniciam com a execução do plano de fogo para desmonte primário (perfuração + detonação por explosivos), que fragmenta cada trecho das bancadas da frente de lavra. Caso o material não esteja com dimensões adequadas para a entrada na planta de beneficiamento (fragmentos maiores que 1 metro), é efetuado o desmonte secundário, por fogacho, rompedores hidráulicos ou *drop ball*.

Em seguida, o carregamento dos fragmentos rochosos é realizado por meio de pás-carregadeiras em caminhões, que depositam o material nas proximidades às instalações de britagem. Esses locais são conhecidos como praças de alimentação, para armazenagem temporária e alimentação dos britadores em horários específicos. Existem casos em que o transporte de material é feito diretamente até os britadores primários sem a utilização dos pátios de estocagem.

As fases que compõem as operações de beneficiamento são puramente mecânicas e consistem em britagem primária, secundária e rebitagem em uma ou duas etapas (britagem terciária e quaternária) podendo ser realizada a seco ou a úmido. O britador primário, de mandíbulas, faz a fragmentação dos matacões e, neste ponto pode ou não ocorrer lavagem da rocha, para a diminuição de material pulverulento durante a cominuição e classificação da rocha. Após essa fase, ocorre a formação de pilhas-pulmão, que alimentam os britadores secundários. O britador secundário pode ser de mandíbulas ou do tipo cônico. Os britadores terciário e quaternário são cônicos ou de impacto, sendo os do tipo cônico atualmente usados na tentativa de reduzir a lamelaridade do agregado e o excesso de finos. O transporte de brita entre os britadores e ou rebitadores é feito, normalmente, por um sistema de correias transportadoras sempre procurando aproveitar o desnível topográfico para economia na planta de beneficiamento. Para diminuir o pó em suspensão, gerado pela atividade de britagem, algumas das pedreiras utilizam sistemas de aspersores de água, instalados nas bocas dos britadores e nas correias transportadoras (Frazão, 2002).

Regada (2007) comenta que o fator determinante para escolha do tipo de lavra da pedra britada é a morfologia dos afloramentos, o volume da reserva, o seu estado de fraturamento, a localização geográfica da área e características intrínsecas do material objeto da exploração.

Segundo Campos (2007), a forma mais racional de desmontar uma rocha consiste na execução de uma bancada, onde se otimiza a retirada do minério de maneira estável, obtendo-se uma maior produção, levando sempre em consideração o fator de segurança.

Silveira (2007) afirma que as propriedades de uma rocha são influenciadas, principalmente, pela composição mineralógica, textura (forma e tamanho do grão), denominado pelo autor de fabric (arranjo dos minerais e vazios) e grau de alteração da rocha.

2.1.2. Definição, terminologia, classificação e ensaios com os agregados

Muniz & Palmeira (2007) definem agregados como sendo fragmentos de rochas, popularmente denominados como “pedras” e “areias”. Esses fragmentos possuem tamanhos e propriedades adequadas e estão presentes na maioria dos setores da construção civil, como em edificações, pavimentação, barragens e saneamento. A faixa de tamanho desses fragmentos é bastante ampla, desde blocos com dezenas de centímetros, como os enrocamentos usados em barragens, até partículas milimétricas, como os “agregados” usados na confecção de concreto para a maioria das edificações.

Frazão & Paraguassú (1998) definem os agregados como materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Esses podem ser classificados quanto à sua origem (naturais/ artificiais); à densidade (leves/ normais/ pesados); e ao tamanho dos fragmentos (graúdos/ miúdos). A classificação quanto ao tamanho dos fragmentos é a mais importante para fins de utilização prática.

A NBR 9935 (ABNT, 2005) define agregados como um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassas e concreto. Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais terminologias de acordo com a natureza do agregado e a Tabela 2.2 mostra a classificação de acordo com suas dimensões.

Tabela 2.1. Terminologia de acordo com a natureza dos agregados para construção civil (modificado da NBR 9935/2005).

Agregados Naturais	Aquele que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, a menos de lavagem e seleção.
Agregados Artificiais	Aquele resultante de processo industrial, incluindo-se a britagem de rocha ou pedregulho.
Areia	Agregado Miúdo originado artificial ou naturalmente da desintegração de rochas ou de outros processos industriais. Podendo ser Areia natural, ou areia artificial.
Pedra Britada ou Brita	Agregado graúdo originado através de cominuição artificial de rocha.
Pedregulho	Agregado graúdo que pode ser utilizado no concreto tal e qual é encontrado na natureza, a menos de lavagem e seleção, também conhecido como cascalho ou seixo rolado.
Pedregulho Britado	Agregado graúdo originado da cominuição artificial de pedregulho.
Agregado Especial	Natural ou artificial, cujas propriedades podem conferir aos concretos um desempenho de acordo com as solicitações específicas não usuais.

Tabela 2.2. Terminologia de acordo com as dimensões dos agregados para construção civil (modificado da NBR 7225/93).

Matacão	Pedra Arredondada, encontrada isolada na superfície ou no seio de massas de solos ou de rochas alteradas, com dimensão nominal mínima de 10 cm.		
Pedra de Mão	Pedra Bruta, obtida por meio de marrão, de dimensão manuseada.		
Fíler	Material constituído de pó de pedra ou outros minerais inertes de dimensão máxima inferior a 0,075mm destinado a ser empregado com enchimento em pavimentações betuminosas.		
Agregado Graúdo	Pedregulho (Agregado Natural)	Muito Grosso	Dimensão nominal entre 100 e 50 mm
		Grosso	Dimensão nominal entre 50 e 25 mm
		Médio	Dimensão nominal entre 25 e 4,8 mm
		Fino	Dimensão nominal entre 4,8 e 2,0 mm
	Pedra Britada ou Brita (Agregado Artificial)	1	Dimensão nominal entre 4,8 e 12,5 mm
		2	Dimensão nominal entre 12,5 e 25mm
		3	Dimensão nominal entre 25 e 50 mm
		4	Dimensão nominal entre 50 e 76 mm
		5	Dimensão nominal entre 76 e 100 mm
	Agregado Miúdo	Pedrisco (Agregado Artificial)	Grosso
Médio			Dimensão nominal entre 2,0 e 0,42 mm
Fino			Dimensão nominal entre 0,42 e 0,075 mm
Pó de Pedra (Agregado Artificial)		Material proveniente do britamento da pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm	
Areia (Agregado Natural ou Artificial)		Grossa	Dimensão nominal entre 0,2 e 1,20 mm
		Média	Dimensão nominal entre 1,20 e 0,42 mm
		Fina	Dimensão nominal entre 0,42 e 0,075 mm

Materiais como a pedra britada em seus mais diversos tamanhos, sendo esta isolada ou combinada, são considerados os materiais de construção mais consumidos na engenharia civil.

Para Muniz & Palmeira (2007) é nítida a importância de classificar estes materiais, assim como determinar suas principais propriedades mecânicas, verificando se estão dentro do intervalo satisfatório para o emprego seguro das obras civis. Julga-se não ser uma tarefa simples determinar todos esses parâmetros, uma vez que dada propriedade que seja relevante para utilização de um agregado como componente de um concreto de cimento Portland, pode não ser relevante para aplicação como base rodoviária. Citam-se um exemplo que por mais que seja tratada uma mesma propriedade, a resistência, é necessário averiguar para as duas aplicações diferentes. Uma vez que há valores limite de aceitabilidade diferente em cada caso.

Diante do exposto, esta dissertação visou evidenciar as principais metodologias de ensaios realizadas com os agregados, esses ensaios visam averiguar as características e avaliar o desempenho dos agregados nos mais diversos empregos na construção civil.

2.1.2.1. Análise granulométrica e teor de materiais pulverulentos

Pelo fato dos agregados possuírem maiores proporções na utilização em argamassas e concretos, é de grande valia conhecer questões ligadas a sua composição granulométrica.

Para determinar a distribuição em porcentagens dos diversos tamanhos de grãos das britas utilizadas nesta pesquisa, o ensaio foi executado de acordo a norma técnica NBR 7217 (ABNT 1987). Os agregados admitem ser graduados em relação a limites granulométricos.

Os agregados denominados e classificados como miúdos (areia natural e areia artificial), ou seja, aqueles cuja maioria dos grãos (95%) passa na peneira com abertura de 4,8mm e ficam retidos na peneira de abertura de 0,0075mm. No Caso de areias, essas são graduadas em 4 (quatro) zonas: Zona 1 (areia muito fina), Zona 2 (areia fina), Zona 3 (areia média); Zona 4 (areia grossa).

Aqueles agregados cuja maioria dos grãos (95%) passam na abertura de 15,2 mm e ficam retidos na peneira de abertura 4,8mm são denominados agregados graúdos e são formados pelos materiais como pedregulho e britas. No caso de pedras britadas (agregados graúdos),

existem basicamente quatro tipos de brita com diferentes aplicações A brita 0 utilizada na fabricação de asfalto, lajotas, bloquetes, lajes, jateamento de túneis e acabamento em geral; brita 1 que é o produto mais utilizado pela construção civil, na fabricação de concreto, com diversas aplicações como na construção de pontes, edificações e grandes lajes; e as brita 2 e brita 3, voltadas para a confecção do concreto, principalmente, em formas mais pesadas. Também é comercializado o pó-de-pedra, muito utilizado no assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, além de fazer parte na composição de concreto e asfalto, substituindo com qualidade à areia de rio, sem danos ao meio ambiente.

A norma NBR 7217 (ABNT 1987) indica conforme a Tabela 2.3 os limites granulométricos para o agregado miúdos para utilização em concreto.

Tabela 2.3. Limites granulométricos do agregado miúdo (modificado da NBR 7217/87).

Peneiras ABNT	Porcentagem, em peso, retida acumulada na peneira ABNT.			
	Zona 1 (muito fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (média)	Zona 4 (grossa)
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8 mm	0 a 5 ^(a)	0 a 10 ^(a)	0 a 11 ^(a)	0 a 12 ^(a)
2,4 mm	0 a 5 ^(a)	0 a 15 ^(a)	0 a 25 ^(a)	5 ^(a) a 40
1,2 mm	0 a 10 ^(a)	0 a 25 ^(a)	10 ^(a) a 45 ^(a)	30 ^(a) a 70
0,6 mm	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3 mm	50 a 85 ^(a)	60 a 88 ^(a)	70 ^(a) a 92 ^(a)	80 ^(a) a 95
0,15 mm	85 ^(b) a 100	90 ^(b) a 100	90 ^(b) a 100	90 ^(b) a 100

(a) Pode haver uma tolerância de até um máximo de cinco unidades de por cento em um só dos limites marcados com a letra a ou distribuídos em vários deles; (b) Para agregado miúdo resultante de britamento, este limite pode ser 80.

A Tabela 2.4 mostra a graduação e os limites granulométricos referentes aos agregados graúdos.

Tabela 2.4. Limites granulométricos de agregados graúdos (modificado da NBR 7217/87).

Graduação	Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm.												
	152	76	64	50	38	32	25	19	12,5	9,5	6,3	4,8	2,4
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0-10	-	80-100	95-100
1	-	-	-	-	-	-	-	0-10	-	80-100	92-100	95-100	-
2	-	-	-	-	-	0	0-25	75-100	90-100	95-100	-	-	-
3	-	-	-	0	0-30	75-100	87-100	95-100	-	-	-	-	-
4	-	0	0-30	75-100	90-100	95-100	-	-	-	-	-	-	-
5	Porcentagens fixadas de acordo com o projeto												

A partir de dados encontrados na curva granulométrica se torna possível determinar a classificação, a graduação e ainda determinar características importantes como o diâmetro máximo característico, módulo de finura da pedra britada, diâmetro efetivo, diâmetro médio, coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura. Estes parâmetros possuem conceitos clássicos e conhecidos como:

- Módulo de finura: corresponde à soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100. Este número é interpretado como o tamanho médio ponderado da peneira na qual o material é retido. Quanto mais grosso for o agregado, maior o módulo de finura da curva. Este parâmetro é bastante usado nas especificações de agregados para concreto de cimento Portland;
- Dimensão máxima característica: corresponde à abertura nominal, em milímetro, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;
- Diâmetro efetivo (d_{10}): é o diâmetro da peneira na qual a percentagem passante acumulada é de 10%;
- Diâmetro médio (d_{50}): é o diâmetro da peneira na qual a percentagem passante acumulada é de 50%;
- Coeficiente de uniformidade (C_u): é definido pela razão $C_u = d_{60}/d_{10}$. Esta relação caracteriza o alongamento horizontal da curva granulométrica, ou seja, a “não uniformidade” da curva. No caso de areias que apresentam o C_u menores que 2 são consideradas uniformes.
- Coeficiente de curvatura (C_c): é definido pela razão $C_c = (d_{30})^2 / d_{10} \cdot d_{60}$.

Baseando-se na curva granulométrica, o coeficiente C_u define se a amostra é mal graduado ou bem graduado.

Segundo a NBR 7219 (ABNT, 1987), ainda é possível determinar o material pulverulento dos agregados miúdo e graúdo. O material pulverulento é conceituado como sendo qualquer partícula de diâmetro inferior a 0,075 mm. Quando essas partículas estão presentes em grande quantidade podem vir a prejudicar algumas propriedades das argamassas e dos concretos. Segundo a especificação brasileira, a quantidade de material pulverulento não deve exercer 1% do peso da total da amostra.

2.1.2.2. *Massa específica real e aparente e absorção de água*

Segundo a norma da NBR NM 53 (ABNT, 2003), a massa específica é definida pela relação entre a massa dos grãos e volume que estes ocupam. A ABNT normaliza a determinação da massa específica dos agregados pelas seguintes normas:

- Para os agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (NBR 9776, ABNT 1987)
- Para o agregado graúdo com o emprego da balança hidrostática (NBR NM 53, ABNT 2003)

Silva (2000) estabelece valores médios de massa específica e intervalos para grupos de rocha. A Tabela 2.5 abaixo apresenta esses dados:

Tabela 2.5. Valores de massa específica de rochas mais comuns (Fonte: Silva, 2000).

Grupo	Massa Específica do agregado (g/cm ³)	Intervalo de valores (g/cm ³)
Basalto	2,80	2,60-3,00
Granito	2,69	2,60-3,00
Arenito	2,69	2,60-2,90
Calcário	2,66	2,50-2,80
Quartzito	2,62	2,60-2,70

A qualidade e eficiência dos materiais de construção merecem atenção especial no que diz respeito à durabilidade e estruturas dos mesmos. No caso da absorção nos agregados que é a quantidade de água, ou líquido qualquer, capaz de preencher os poros define também uma propriedade importante das rochas. Essa propriedade representa a capacidade da rocha em absorver e reter a água nos seus poros. A máxima capacidade de absorção pode ser obtida pela diferença entre a massa saturada e a massa da rocha seca, relacionada à massa da rocha seca. As propriedades das rochas são muito influenciadas pela absorção d'água. Rochas com alta absorção apresentam aumento na massa específica aparente saturada, enquanto a resistência mecânica diminui (Frazão, 2007).

2.1.2.3. Teores de Argilas em torrões e materiais Friáveis

A determinação da quantidade de torrões de argila e partículas friáveis é normatizada na NBR 7218 (ABNT, 1987). Essas substâncias, quando em excesso, prejudicam os concretos por afetarem sua durabilidade e resistência mecânica. Os teores de argilas e materiais friáveis são considerados como sendo todas as partículas suscetíveis de serem desfeitas com a pressão dos dedos. A especificação brasileira que rege o ensaio de teor de argila em torrões não deve ser

maior que 1% em concretos cuja aparência é importante, 2% em concretos submetidos ao desgaste superficial e 3 % nos demais concretos.

2.1.2.4. Índice de Forma

A determinação do índice de forma em agregados é realizada de acordo com a ME 086 (DNER, 1994) quando se utiliza crivos. E a NBR 7809 (ABNT, 2006) Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.

Frazão & Paraguassu (1998) baseados nas normas da ABNT (NBR 7211; NBR 11803 e 11806), respectivamente, especifica que o limite máximo de índice de forma de agregados para concreto é de no máximo 3 e quando os agregados são destinados a pavimentos deverão possuir no máximo 2.

2.1.2.5. Abrasão Los Angeles

Muniz & Palmeira (2007) comentam que os agregados são sujeitos a esforços mecânicos de compressão, tração e flexão, transmitidos pelos carregamentos externos atuantes na estrutura na qual foram utilizados. E ainda, que os agregados utilizados em construção também estão sujeitos a esforços de impacto, esmagamento, desgaste e abrasão.

O ensaio mais utilizado no Brasil para verificar a resistência do agregado a essas solicitações é o de “Abrasão Los Angeles”, normatizado pela NBR 6465 (ABNT 1984) e ME 035 para aplicações rodoviárias (DNIT 1998). A Tabela 2.6 apresenta uma comparação feita por Junqueira (1994) sobre o índice de abrasão Los Angeles de algumas rochas do Distrito Federal, Goiás e São Paulo.

Tabela 2.6. Comparação dos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles (Modificado Junqueira, 1994).

Rocha	Localização	Índice L.A (%)	Fonte
Micaxisto	Luziânia-GO	28	DER-DF
Calcário	Brasília- DF	13-24	DER-DF
Basalto	Araçatuba-SP	15	EESC/USP
Basalto	Araraquara-SP	16	EESC/USP
Diabásio	Campinas-SP	20	EESC/USP
Diabásio	Assis-SP	20	EESC/USP
Granito	Baruari-SP	28	EESC/USP
Granito	Cajamar-SP	30	EESC/USP

É importante comentar que quanto menor o valor do desgaste Los Angeles, melhor é o material.

Frazão & Paraguassu (1998) baseados nas normas da ABNT (NBR 7211; NBR 11803 e 11806), respectivamente, especifica que o limite máximo de abrasão Los Angeles de agregados para concreto e pavimentos é de no máximo 40%.

Ramiro *et al.* (2008) desenvolveu um estudo com rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no Sudoeste de Minas Gerais. Dentro dos inúmeros ensaios que foi realizado o de abrasão Los Angeles foi um dos destacados pelo autor. A Figura 2.1 apresenta os resultados obtidos pelo autor em relação ao ensaio de abrasão.

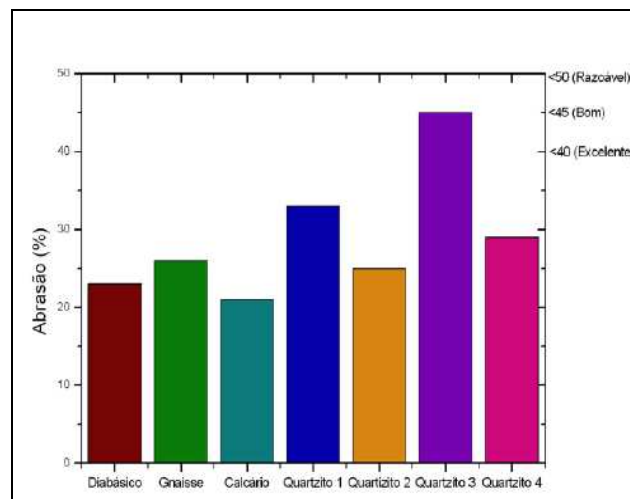


Figura 2.1. Gráfico de abrasão em porcentagem. (modificado Ramiro, 2008).

2.1.3. Produção de Agregados no Estado do Goiás

Segundo dados do DNPM (2005), o estado de Goiás, em 2004, produziu 3.584.241 m³ rochas britadas e cascalho, repercutindo em 8,36% da mão de obra empregada no setor mineral do estado, demonstrando o potencial deste segmento para o desenvolvimento do estado. Apesar da exploração desses materiais artificiais apresentarem impactos ambientais e custos de produção elevados (desperdícios de água, geração de ruídos, poluição do ar, depreciação de equipamentos e consumo elevado de energia); apresentam também vantagens quando comparados à exploração de recursos como areia natural e cascalho.

Atualmente, inúmeras pesquisas nacionais e internacionais já estudam a possibilidade do emprego dos finos de pedra como elemento de construção civil.

Segundo o Sindibrita (2006) o avanço na construção civil em Goiás, ampliou a demanda do calcário, cimento, brita, areia, cascalho e argila, utilizados nas cadeias produtivas da cerâmica, agregados minerais e outros. Durante os anos de 2004 e 2005 a demanda não se alterou, entretanto, no ano de 2006, como consequência da recuperação do setor da construção civil, a demanda por brita aumentou, o que também provocou uma variação de preços (Figura 2.2).

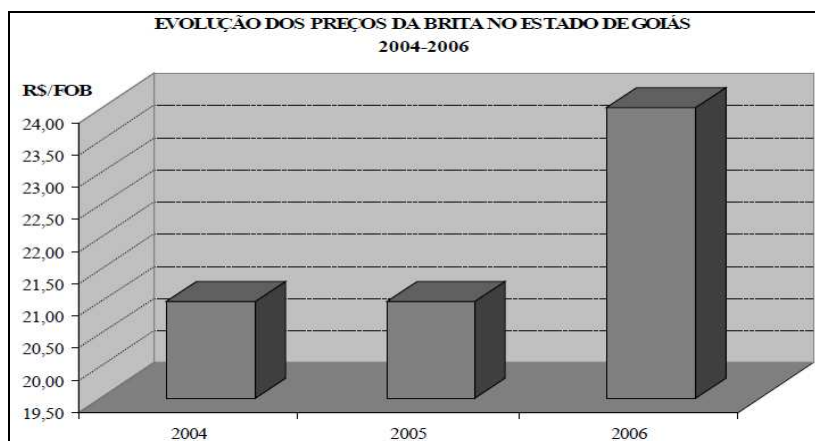


Figura 2.2. Panorama da Brita no estado de Goiás. (modificado Sindibrita, 2006).

Além do pó de pedra e as demais frações de brita, muitas pedreiras no estado de Goiás tem produzido a areia artificial com a função de substituir parcialmente e/ou totalmente a areia extraída dos leitos dos rios. Em relação ao panorama de preços e a produção da areia artificial em Goiás (Figura 2.3), houve variação dos preços médios da areia, no último ano do trimestre referido, quando se teve um aumento médio de 21,4%. Nos anos de 2003 e 2004 os preços médios se mantiveram na faixa dos R\$ 14,00, ou seja, estavam estáveis, e em 2006 ocorreu um aumento na demanda por areia, o que permitiu aos produtores um aumento dos preços, em função da recuperação do mercado, estagnado nos anos anteriores.

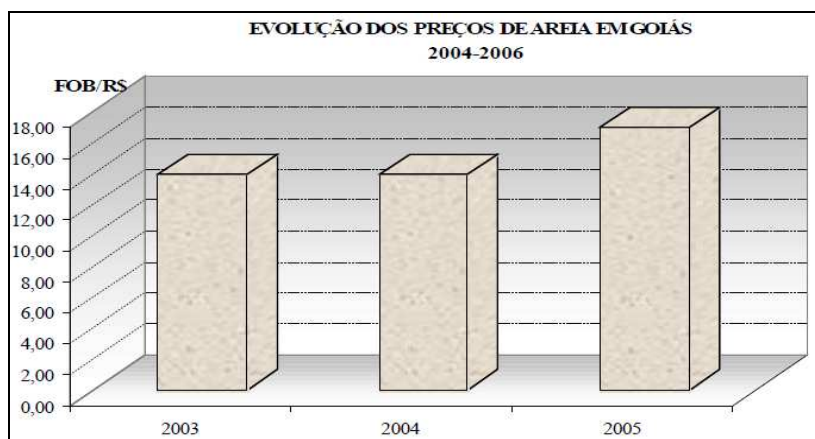


Figura 2.3. Panorama da areia artificial no estado de Goiás. (modificado Sindibrita, 2006).

2.1.4. Resíduos Finos de Pedreira

Devido, principalmente, a carência de areia natural, o setor mineral tem impulsionado a produção de areia artificial obtida por meio do peneiramento e/ou lavagem dos finos oriundos da britagem. Todavia, sabe-se que a exploração de areia artificial e pedra britada causam impactos ambientais associados, especialmente, a grande geração dos resíduos finos. Contudo, Bispo & Almeida (2005) acreditam que os finos das pedreiras devidamente processados podem vir a substituir a areia natural. Para isto eles devem possuir algumas características, tais como: distribuição granulométrica, forma e textura superficial adequadas, resistência mecânica, estabilidade das partículas e ausência de impurezas.

O processamento adequado dos finos, visando à geração da areia artificial com características adequadas para o uso na construção civil, requer um processamento específico que busca, não somente o tamanho, mas também a forma e a integridade das partículas, permitindo uma produção de forma competitiva e sustentável (Tonso, 1994).

Batalione (2007) comenta que, numa pedreira localizada no entorno de Goiânia, o resíduo fino oriundo do processo de cominuição da rocha granítica corresponde a 3% do volume total de materiais produzidos na pedreira, incluindo volume de agregados graúdos e miúdos. Esses finos ficam depositados em pilhas nos pátios dessas pedreiras, sem qualquer preocupação quanto à estabilidade e até então sem nenhuma utilização específica para o mesmo.

De acordo com Almeida & Sampaio (2002) a disponibilidade no mercado de novos equipamentos de britagem é um fator importante que contribui para substituição da areia natural pela artificial. Este fato supera a principal restrição apresentada pela areia artificial, que é a trabalhabilidade provocada pelo formato inadequado das partículas finas do pó de pedra. Vale ressaltar neste caso, que a obtenção de areia artificial para a construção civil utilizando finos de pedreiras, passa, essencialmente, pelo desenvolvimento de tecnologia que vai muito além das etapas unitárias de classificação e lavagem dos finos gerados nas pedreiras.

2.1.4.1. Normalização Nacional de Resíduos Sólidos

A CETESB (1993) classifica os resíduos sólidos em três categorias: sólidos industriais, semi-sólidos e sólidos urbanos, já a NBR 10.004 (ABNT, 2004) classificam os resíduos de acordo

com a sua periculosidade.

Classificação CETESB

Resíduos Sólidos Industriais: São os resíduos sólidos e semi-sólidos resultantes do processamento industrial, assim como determinados resíduos líquidos oriundos do mesmo processamento que, por suas características peculiares, não podem ser lançados na rede de esgoto ou em corpos de água e não são passíveis de tratamento pelos métodos convencionais. Incluem-se também os lodos provenientes das estações de tratamento de efluentes;

Resíduos Semi-Sólidos: Materiais, produtos e substâncias resultantes dos processos industriais e de estações de tratamento de efluentes que não são passíveis de reaproveitamento e apresentam características semi-sólidas;

Resíduos Sólidos Urbano (RSU): São todos os resíduos sólidos produzidos em edificações residenciais, em estabelecimentos públicos e do comércio em geral, assim como aqueles resultantes das diversas atividades de limpeza urbana. Excluem-se os resíduos sólidos industriais, conforme definidos acima, os resíduos produzidos em estabelecimentos hospitalares, portos e aeroportos que, por suas características peculiares e conforme legislação vigente exigem cuidados especiais quanto ao acondicionamento, coleta e disposição final.

Classificação ABNT

Resíduos perigosos - Classe I: São aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento da mortalidade ou incidências de doenças e/ou riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou destinados de forma inadequada; ou ainda apresentar características patogênicas, de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade.

Resíduos não inertes - Classe II: São todos os resíduos ou misturas de resíduos que não se enquadram nas classificações “Classe I - Perigosos” ou “Classe III - Inertes” e que podem apresentar propriedade como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Resíduos inerte - Classe III: São os resíduos não perigosos que quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não

apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água; por exemplo, rochas, tijolos, vidros, certos plásticos e outros.

Segundo Queiroz & Frascá (2008) os resíduos provenientes de comunicação de rochas estão classificados como um resíduo da Classe II - Inertes (ABNT, 2004), por serem compostos somente por fragmentos de rochas.

2.2. TRABALHOS ANTERIORES E APLICAÇÕES COM RESÍDUOS FINOS DE PEDREIRAS

Os resíduos finos de pedreiras têm sido estudados por diversos pesquisadores visando basicamente a sua utilização em obras civis. D'Agostino (2004) utilizou ensaios de resistência à compressão simples para avaliar o desempenho de argamassas preparadas com dois tipos de material: areia aluvionar e finos de pedreira de rocha granítica-gnáissica. Após a cura de 90 dias, a aplicação de finos de pedreira mostrou um valor maior de resistência à compressão, representando mais que o dobro do resultado obtido com a argamassa preparada com areia aluvionar. Este autor comenta também que o aprimoramento da qualidade das misturas podem atingir um bom padrão tecnológico de modo a serem aceitas no mercado da construção civil.

Rezende (2003) utilizou finos da pedreira de Contagem – DF em estrutura de pavimentos flexíveis. Essa pesquisa revelou que a utilização dos finos foi bastante satisfatória em curto prazo. Contudo, ao longo do tempo e com a variação do teor de umidade, os parâmetros obtidos inicialmente pioraram.

Luz *et al.* (2006) analisou a utilização de finos de pedreiras da região de Goiânia- GO na estabilização de um solo regional. Os resíduos utilizados eram provenientes da lavagem de finos de agregados de micaxisto. A pesquisa se desenvolveu considerando diversos cenários para diferentes graus de dosagem, que variaram de 0% a 100%, e submetendo-se as composições a energias de compactação intermediárias e modificadas. Para a energia intermediária constatou-se um melhor resultado no valor CBR para a mistura que recebeu a adição de 20% de finos de pedreira. Para a energia modificada, o resultado mais satisfatório foi obtido para a adição de 30% de finos.

Batalione (2007) desenvolveu uma investigação experimental, consistindo de ensaios de campo e de laboratório, com o objetivo de utilizar os rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica para estabilização de quatro solos tropicais da região noroeste do estado de Goiás. As conclusões relativas às análises técnicas dos materiais avaliados revelaram que a adição do rejeito aos solos naturais promoveu a redução do peso específico dos grãos de todas as amostras analisadas. Na maioria absoluta das observações, percebeu-se que aumentando o teor de rejeito ao solo natural maior foi a redução do peso específico dos sólidos da composição. Já com relação às características de plasticidade, foi verificada que a adição do rejeito aos solos naturais gerou uma redução no índice de plasticidade das amostras. Este pesquisador observou ainda que esta redução foi diretamente proporcional ao teor de rejeito adicionado ao solo natural. Esse comportamento se mostrou condizente com a alteração na composição granulométrica que o rejeito provocou ao solo natural, uma vez que o rejeito é composto de partículas de dimensões areia e silte, materiais que apresentam plasticidade nula ou muito baixa.

Em relação aos parâmetros encontrados nos ensaios de compactação na energia intermediária e modificados, Batalione (2007) verificou que a inclusão de rejeito de pedreira nos solos naturais produziu um aumento de peso específico seco máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$) e a redução do teor de umidade ótimo (W_{ot}) em relação aos resultados encontrados para os solos nas condições naturais. Em relação aos resultados dos ensaios de campo obtidos nas pistas experimentais, verificou que tanto as deformações, verificadas através das bacias de deflexões médias, como o coeficiente de rigidez (κ) da camada e o módulo de elasticidade do material não sofreram grandes alterações com a inclusão de 15% de rejeito ao solo para confecção da camada de subleito e da base.

O mesmo trabalho teve também por finalidade, avaliar a viabilidade técnica e econômica da adição do rejeito do beneficiamento da rocha granítica na produção da estrutura de um pavimento urbano com volume de tráfego leve ($N= 116,74 \times 10^5$, número de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas), construído na cidade de Inhumas no estado de Goiás. Foi observado um bom desempenho das estruturas de pavimento para adições de 15% resíduos aos solos naturais, bem como a comprovação da viabilidade econômica da utilização desse resíduo quando comparado a construção de um pavimento tradicional.

2.3. DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO

A norma brasileira de pavimentação, a NBR 7207 (ABNT, 1982) conceitua o pavimento como sendo uma estrutura construída após a execução da terraplenagem e que visa atender os seguintes requisitos:

- Resistir e distribuir os esforços verticais, em decorrência do tráfego, ao subleito;
- Melhorar as condições de rolamento em relação à segurança e comodidade;
- Resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento.

A NBR 7207 (ABNT, 1982) também define as camadas que compõe o pavimento:

- Subleito é uma camada de fundação do pavimento ou do revestimento.
- Reforço do subleito caracteriza-se por uma camada com a função de melhorar o solo de fundação do pavimento.
- Sub-base é uma camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem.
- Base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais sobre a qual se constrói um revestimento.
- Revestimento constitui a camada, o mais impermeável possível, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina, econômica e simultaneamente: melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Segundo Senço (1997) o reforço do subleito é uma camada que apresenta uma espessura pré-definida e é construída apenas se houver a necessidade de melhorar as características tecnológicas da camada de regularização.

Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), o pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis, os quais podem ser definidos:

- Pavimentos Rígidos: como sendo um pavimento constituído por placas de concreto portland assente sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária;
- Pavimentos flexíveis: como sendo aquele pavimento constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo que sofreu o processo de estabilização granulométrica.

Para Pinto & Preussler (2002) o pavimento é uma estrutura composta por uma ou mais camadas, que possuem características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de forma que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem o pavimento. Esses autores classificam os pavimentos em rígido, flexível e semi-rígido.

Observa-se que essa classificação é semelhante à proposta pelo manual de pavimentação do DNIT (2006), diferindo apenas por conter também a definição de um pavimento semi-rígido. Nesse caso, o pavimento semi-rígido caracteriza-se por uma base estabilizada quimicamente.

O manual de pavimentação do DNIT (2006) estabelece os critérios para o dimensionamento de cada camada do pavimento e a classificação dos materiais empregados no pavimento:

- Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio CBR, menor ou igual a 2% e um $CBR \geq 2\%$.
- Os materiais utilizados para reforço do subleito devem apresentar o CBR maior que o do subleito e uma expansão $\leq 1\%$;
- Os materiais para sub-base devem ter $CBR \geq 20\%$, $IG = 0$ e expansão $\leq 1\%$;
- Os materiais para base devem ter $CBR \geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, limite de liquidez $\leq 25\%$ e índice de plasticidade $\leq 6\%$.

2.3.1. Pavimento de Baixo Custo

No passado, o conceito de pavimento denominado de baixo custo era aquele que utilizava o solo fino laterítico para uma via de baixo a médio volume de tráfego. Hoje, considerando as pesquisas mais recentes, se percebe uma proposta mais abrangente, principalmente pela incorporação de materiais alternativos e possíveis misturas. Aliado a aplicabilidade desses materiais alternativos, como resíduos industriais ou de construção e demolição, percebe-se nestes trabalhos uma forte tendência de utilização de ensaios de laboratório mais específicos e voltados à verificação da eficiência e compatibilidade entre estes novos materiais como elementos constituintes do pavimento.

Nogami & Villibor (1995) demonstram que os pavimentos de baixo custo são apropriados, sobretudo para rodovias vicinais e ainda relatam que os pavimentos de baixo custo apresentam as seguintes características:

- As bases são constituídas de materiais que apresentam os custos de execução inferiores por m³ acabado, quando comparados às bases convencionais utilizadas convencionalmente pelo Departamento de Estradas e Rodagem do estado de São Paulo (DER-SP), na década de 70, que em na sua maioria eram dotadas de pedra britada ou solo-cimento.
- O tratamento superficial à prática do revestimento betuminoso, apresentando espessura de 1 a 3 cm;
- Tráfego do tipo leve, ou seja, na ordem de 500 veículos, com cerca de 30% a 40% de caminhões e ônibus.

Marangon (2004) abordou na sua pesquisa uma estrutura do pavimento solo fino laterítico e definiu-o, em relação ao tradicionais, como “pavimento de baixo custo”, indicando-o para vias com baixo volume de tráfego.

Thuler (2005) aponta como ponto positivo para rodovias municipais o fato do baixo volume de tráfego demandar estruturas de pavimento mais econômicas. Todavia, destaca-se como ponto negativo o fato de priorizar a economia em detrimento qualidade do pavimento.

Para Batalione (2007) pavimento de baixo custo deve ser construído por técnicas viabilizadas por meio de materiais alternativos e que, comparativamente aos pavimentos tradicionais, apresentam de redução de custo.

Santana & Gontijo (1987) conceitua pavimento de baixo como sendo aquele em que prioriza o uso de materiais locais, objetivando um custo mínimo, favorecendo assim a viabilidade econômica da obras. Segundo Santana (1993) esse tipo de pavimento é adequado para vias de tráfego leve ou limitado.

2.4. PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DE SOLOS TROPICAIS

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- EMBRAPA (1999) considera que os solos são formados por materiais minerais e orgânicos, ocorrendo sobre o manto superficial continental e possuindo como limite superior a atmosfera e inferior o substrato rochoso ou material originalmente inconsolidado. Esses materiais são influenciados diretamente pelos precursores genéticos e ambientais.

Teixeira *et al.* (2000) explica que os solos tropicais, em sua maioria, ocorrem com a evolução do manto de intemperismo, esse solos são localizados nas frações mais superficiais e que por meio de processos pedogenéticos é que surge a possibilidade de formação desse tipo de solo. Em casos especiais, ao empregar um conjunto de fatores neste processo, entre os quais condições relativamente agressivas de intemperismo, é formado um manto de alteração que apresenta horizontes enriquecidos em minerais de grande valor econômico, sendo conhecidos como depósitos lateríticos. No caso de solos tropicais, em função dos processos genéticos e do longo tempo envolvido na sua formação, eles são geralmente empobrecidos quimicamente, como reflexos de uma composição dominada por minerais desprovidos dos elementos solúveis. Em contrapartida, esses solos são solos ricos em argilo-minerais capazes de reter os elementos químicos necessários ao metabolismo vegetal.

É importante comentar que a pedogênese ocorre quando as modificações assumem também características estruturais além das químicas e mineralógicas comuns no processo de intemperismo.

Delgado (2002) afirma que os perfis de solos mais difundidos em sua maioria apresentam uma zonalidade vertical facilmente identificada no campo, constatando as estruturas em horizontes. No decorrer da transformação para um solo, o material que o originou vai se diferenciando em camadas mais ou menos paralelas à superfície, essas denominadas horizontes (Figura 2.4).

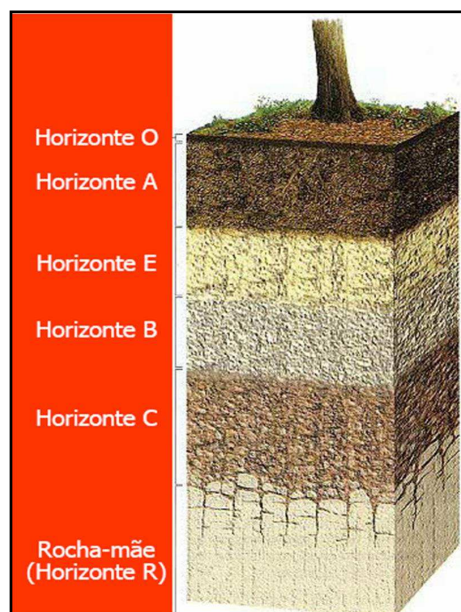


Figura 2.4. Representação esquemática de um perfil de solo.

No Brasil, um país de região tropical, cada tipo de solo possui propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas específicas. Sendo que em sua maioria, quanto à composição mineralógica simples apresentam: quartzo, caulinita, óxidos de ferro, hidróxidos de ferro e de alumínio. Seus horizontes são predominantemente amarelos e vermelhos, possuindo grandes espessuras. Sabe-se que o Brasil apresenta uma grande parte do seu território formado por latossolos sobre diferentes tipos de rochas. Os latossolos correspondem a um solo altamente evoluído, ou seja, laterizado e com grande quantidade de argilosminerais, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Gigigas (1976) citado por Muñetón (2009) descreve que os solos lateríticos são resultantes do intemperismo e suas características são influenciadas pelos processos de formação oriundo da rocha mãe, características morfológicas e grau de intemperização. A composição química e mineralógica é influenciada pelas condições de drenagem e topografia.

Segundo Muñetón (2009) com o decorrer do processo de intemperização as propriedades e comportamentos dos solos tropicais vão deixando paulatinamente de serem influenciados pela sua origem.

Nogami & Villibor (1995) ressaltam que dentre os solos tropicais destacam-se dois grupos: os solos lateríticos, mais intemperizados e mais desenvolvidos; e os solos saprolíticos, menos intemperizados.

2.4.1. Classificação e Metodologia MCT

A metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) foi desenvolvida por Nogami & Villibor (1981) utilizando corpos de prova compactados em miniatura, destinados a estudos dos solos tropicais. A utilização de corpos de prova em miniatura é vantajosa principalmente para casos em que o solo a ser analisado possui granulação fina e também para casos que necessitam preparar um grande número de corpos de prova. Essa técnica foi desenvolvida alternativamente às técnicas convencionais de classificação dos solos, as quais se baseiam exclusivamente em parâmetros granulométricos e índice de plasticidade. Essa metodologia é aplicada ao meio rodoviário com intuito de minimizar a quantidade de materiais e tempo despendidos na realização dos ensaios tradicionais.

A metodologia MCT foi introduzida inicialmente em 1972, como o ensaio de Mini-CBR baseado no procedimento desenvolvido pela *Iowa State University* (EUA), sendo adaptada às peculiaridades dos solos tropicais utilizados em aplicações rodoviárias existentes no Estado de São Paulo. Em 1976, Parson designou Mini-MCV (Moisture Condition Value) no Transportation and Road Research Laboratory da Grã-Bretanha. Associado a esta metodologia foi implementado o ensaio de Perda de Massa por Imersão (Pi), que permite avaliar o comportamento do solo sob influência da erosão hidráulica e classificar os solos tropicais.

É possível optar por dois métodos de compactação distintos, sendo o já mencionado Mini-MCV ou Mini-Proctor empregando o proposto pela metodologia de Nogami & Villibor (1995), fixando uma energia de compactação normal, intermediária ou modificada, e assim compacta-se uma série de corpos de prova em diferentes teores de umidade.

Para Nogami & Villibor (1981), a metodologia Mini-MCV e a introdução do ensaio de Perda de Massa por Imersão em Água permitiram além da classificação do solo, a obtenção de outros dados importantes, tais como:

- Família de curvas de compactação obtidas com energia variável, abaixo da correspondente à energia Proctor normal até além da intermediária;
- Relação entre o Mini-MCV e o teor de umidade, que permite determinar no campo o teor de umidade de compactação;
- Capacidade de suporte expressa pelo Mini-CBR, obtido em corpos de prova com e sem imersão e com a máxima densidade para determinado teor de umidade. Este valor é obtido mediante uso da correlação Mini-CBR x Mini-MCV para os principais grupos de solos;
- Características de expansibilidade e coesão do solo compactado sob condição de imersão total em água e com confinamento parcial;
- Classificação do solo, similar à desenvolvida por Parsons & Boden (1979) com base nos parâmetros a' e b' , que definem a curva de variação do teor de umidade (ordenada) em função do Mini-MCV (abscissas);
- Ordem de grandeza da permeabilidade do solo através da determinação do Mini-MCV correspondente à exsudação, na ocasião da compactação dos corpos de prova. Quanto mais elevado o Mini-MCV correspondente ao ponto de exsudação, menor a permeabilidade desse solo.

Esta metodologia é limitada para corpo de prova com diâmetro de 50 mm e apropriado para solos que passam integralmente na peneira de 2,00 mm ou para aqueles em que a influência da fração retida na peneira #200 não interfere expressivamente nas suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Além disso, essa classificação foi desenvolvida com objetivo de ser aplicada exclusivamente aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos.

Para determinação do Mini-MCV, Nogami & Villibor (1981) relatam que o equipamento de compactação que permite obter corpos de prova de 5 cm deve ser o soquete do tipo leve com cerca de 2,27 Kg. Sendo que esse equipamento é provido de um extensômetro que permite determinar a altura do corpo de prova (A_1), com precisão de 0,05mm, através da medida a posição da haste do soquete. Para a realização do ensaio coloca-se no cilindro de compactação, devidamente posicionado no aparelho de compactação com a quantidade padronizada de amostra (200 a 220g) com teor de umidade pré definido. Logo em seguida posiciona-se o soquete e inicia-se os sucessivos números crescentes de golpes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8... $n...4n$. Interrompe-se a compactação quando:

- As medidas sucessivas de sucessivas alturas tiverem uma diferença menor que 0,1mm;
- Atingir 256 golpes;
- Houver nítida exudação de água.

Repetir o mesmo procedimento para outros diferentes teores de umidades. Sendo adotadas pelo menos quatro amostras com umidade diferentes, compreendendo uma faixa um pouco mais ampla que normalmente é adotada no ensaio de compactação tradicional.

Em relação às curvas de compactação, essas são determinadas por meio do cálculo das alturas A_n dos corpos de prova, assim como a determinação das massas específicas aparentes secas. Com esses dados, é possível traçar a família de curvas de compactação (Figura 2.5c). Além das curvas de compactação, mencionada anteriormente, para determinação do coeficiente c' é necessário a confecção das curvas conhecidas como Mini-MCV ou de deformabilidade (Figura 2.5a). Ou seja, para cada teor de umidade de compactação, traçar a curva de n (número de golpes) em função de $a_n = A_n - 4A_n$, utilizando escala logarítmica. É importante comentar que o coeficiente c' utilizado na classificação geotécnica MCT, é o coeficiente angular da reta média à curva Mini-MCV. Outro coeficiente necessário para a classificação segundo a metodologia MCT é o coeficiente d' , esse é determinado pela inclinação da parte

retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio de Mini-MCV. Um exemplo da determinação destes coeficientes é apresentado na Figura 2.5.

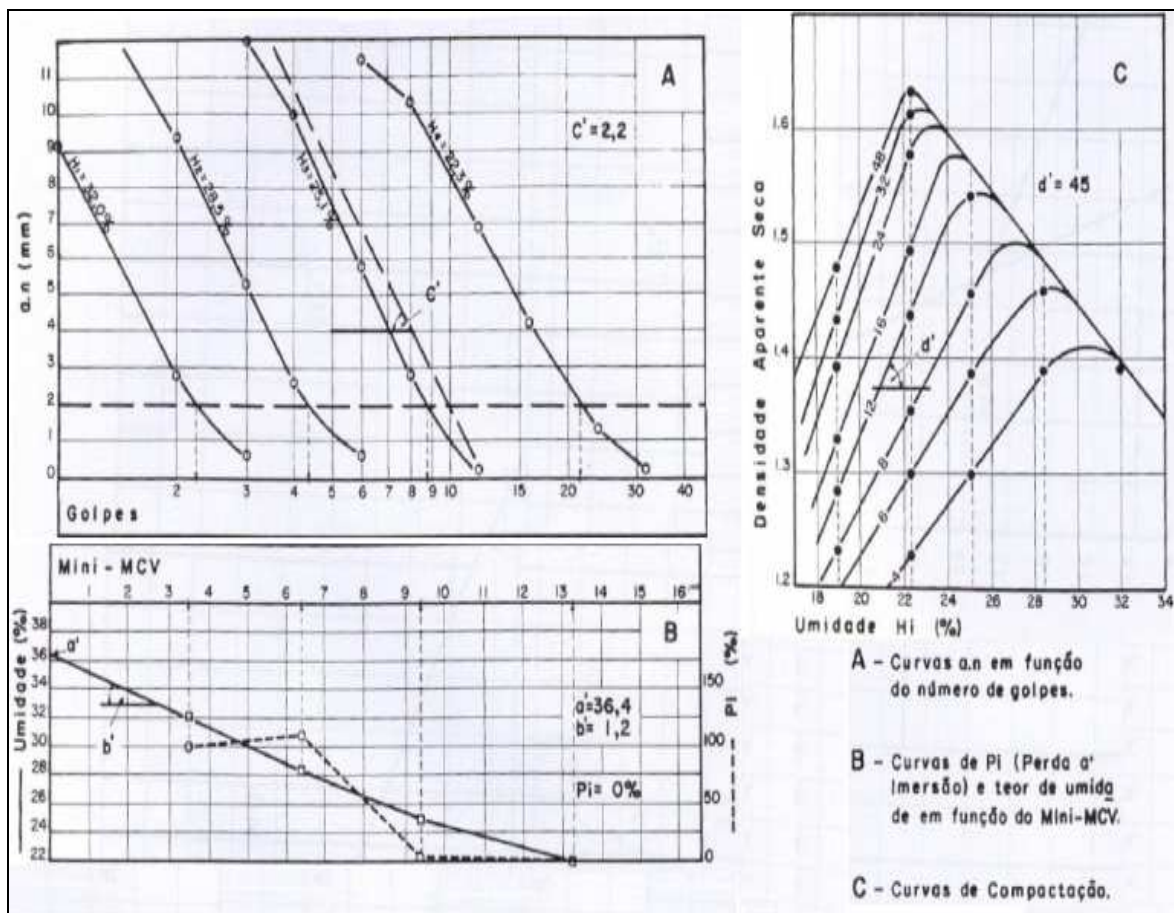


Figura 2.5. Gráficos representativos dos resultados do ensaio de Mini-MCV e perda por imersão (Nogami & Villibor, 1995).

A classificação do material dar-se-á por duas grandes classes: os de comportamento laterítico e os de comportamento não-laterítico, representados pelas letras L e N, respectivamente. Estas duas grandes classes se subdividem em sete grupos de solos. Para classificar nas duas classes representadas na Figura 2.6, inicialmente, deve-se calcular os coeficientes c' e e' . O coeficiente c' é obtido a partir das curvas de deformabilidade (Figura 2.5a) resultantes do ensaio de compactação Mini-MCV; e o índice e' é calculado em função da perda de massa por imersão (Figura 2.5b) e da inclinação do ramo seco da curva de compactação (Figura 2.5c), de acordo com a equação 2.2:

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}\right)} \quad 2.1$$

Onde:

Pi = perda de massa por imersão;

d' = inclinação do ramo seco da curva de compactação, ambos obtidos em condições padronizadas, pelo uso do ensaio de compactação Mini-MCV.

De acordo com Nogami & Villibor (1995), o comportamento laterítico inicia-se quando $d' > 20$ e $Pi < 100$, o que permitiu o desenvolvimento da linha horizontal principal (tracejada) que corresponde a $e' = 1,15$, que separa os solos de comportamento laterítico dos de comportamento não laterítico (Figura 2.6).

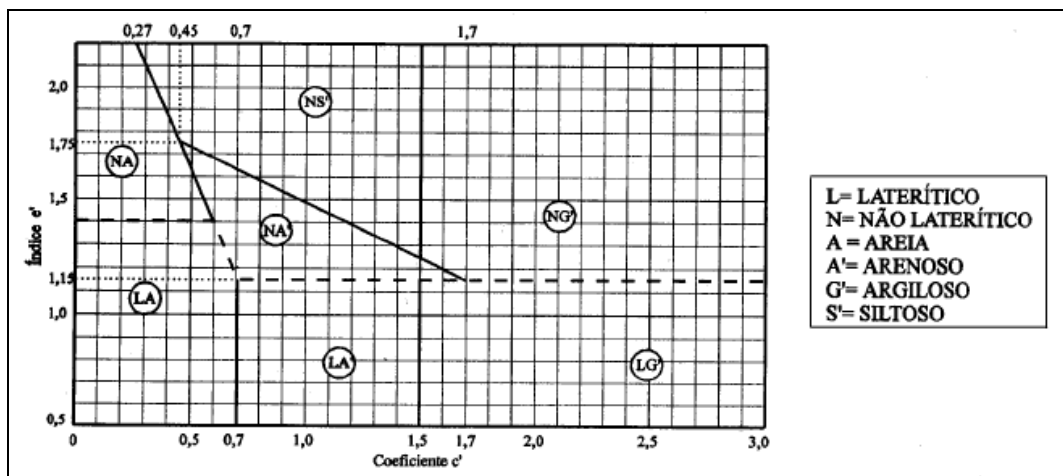


Figura 2.6. Gráfico de classificação do solo em laterítico e não laterítico.

Segundo Nogami & Villibor (1995) o coeficiente c' correlaciona-se com a granulometria, sendo desconhecida uma eventual correlação entre o c' e a propriedade de laterização. Um valor de c' elevado, acima de 1,5, caracteriza argilas e/ou solos argilosos, enquanto valores baixos, abaixo de 1,0, caracterizam areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos. Entretanto, valores de c' entre 1 e 1,5, correspondem às areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltosas, etc.

Nogami & Villibor (1995) comentam que as argilas lateríticas possuem geralmente valores de d' acima de 20, em contrapartida as argilas não lateríticas não atingem esse valor, apresentando valores de d' inferiores a 10. Esse comportamento também é característico de areias puras. Para as areias classificadas como areias finas argilosas o valor de d' é muito elevado, podendo ultrapassar até 100.

As condições de comportamento relacionadas às propriedades dos diferentes grupos da classificação MCT e as possíveis utilizações estão apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Gráfico da Classificação MCT e dados dos grupos de solos (Nogami & Villibor, 1995).

GRANULOMETRIAS TÍPICAS Designações do T1-71 do DER-SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA)			argilas siltos (q,s)	areias siltosas	siltos (k,m) siltos arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos	areias siltosas	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos		
k=caolínico s=sericítico	m=micáceo q=quartzoso										
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico				
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'		
Propriedades	MINI-CBR (%)	sem imersão perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B		
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B		
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E		
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B		
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B, M	E	M, E	B	B	B		
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal			EE = Muito Elevado (a) E = Elevado (a)		M = Médio (a) B = Baixo (a)		Vide Tabela III.3 para equivalente numérico				
Utilização	Base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°		
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°		
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°		
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°		
	Proteção à erosão		n	3°	n	n	n	2°	1°		
	Revestimento primário		5°	3°	n	n	4°	1°	2°		
n = não recomendado											
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas			USCS		SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
			AASHO		A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Nogami & Villibor (1995) e Moura *et al.* (2006) elencam que o ensaio de perda por imersão contribui para uma melhor diferenciação entre os solos tropicais lateríticos e dos não lateríticos, quando os mesmos possuem características similares no que se refere a:

- Inclinação do ramo seco da curva de compactação, correspondente à energia de 12 golpes, soquete leve (coeficiente d'). Ou seja, principalmente quando esta diferença não possa ser definida pelo coeficiente d';
- Inclinação da curva Mini-MCV (ou de deformabilidade), correspondente às condições padronizadas.

Nogami & Villibor (1995) comenta que o valor encontrado de perda de massa permite prever uma série de comportamento que, entretanto, só podem ser devidamente obtidos se o ensaio for considerado simultaneamente com os outros dados fornecido pela metodologia MCT.

É importante ressaltar a aplicabilidade deste sistema de classificação em estudos relacionados à utilização de resíduos de mineração em associações com os solos tropicais. Neste caso, a importância desta metodologia refere-se à obtenção de materiais compósitos (solo natural e resíduos) que possam se adequar nas aplicações propostas na Tabela 2.7 por meio do enquadramento nos grupos específicos da metodologia MCT.

Considerando esse tipo de aplicação, Batalione (2007) apresenta um importante estudo baseado na metodologia MCT para classificar as misturas de três solos tropicais associados a diferentes porcentagens de resíduos do beneficiamento de uma rocha granítica no entorno de Goiânia.

2.4.2. Mineralogia e química dos solos tropicais

Ressalta-se que a caracterização física dos solos de maneira isolada não consegue caracterizar e nem avaliar com precisão o comportamento dos solos nas suas diversas aplicações. Neste sentido, percebe-se que o estudo da composição química e mineralógica dos solos e resíduos é indispensável para complementar às investigações geotécnicas, independente da sua região de formação ou mesmo a sua condição natural ou artificial como o caso dos resíduos de mineração.

Camapum de Carvalho (2004) comenta que a composição mineralógica e química, assim como, a micro-morfologia impõem aos solos tropicais diferentes comportamentos, e que a análise do comportamento e das propriedades físicas destes solos não podem ser realizada de forma isolada. Segundo Camapum de Carvalho (2001) as características químicas mineralógicas podem determinar a expansão interna do mineral por aumento da distância interplanar basal.

Sousa Pinto (2002) constata que o mineral quartzo está presente na maioria das rochas e apresenta boa resistência à desagregação e forma os grãos de siltes e areias. Possui composição química bastante simples, SiO_2 . O autor comenta que o feldspato é considerado o mineral mais atacado pela natureza, dando origem aos argilos - minerais, que compõem a fração mais fina dos solos, geralmente com dimensão inferior a 2mm. Esse autor constatou também que não somente o reduzido tamanho, mas, principalmente, a constituição

mineralógica faz com que estas partículas tenham um comportamento divergente em relação aos dos grãos de siltes e areia.

Para Fookes (2004) a constituição mineralógica dos solos tropicais lateríticos apresentam em sua composição, minerais secundários tais como: anatásio, gipsita, hematita, goetita. E minerais primários tais como: quartzo, muscovita (mica) e biotita.

Para Santos (1975) as argilas constituídas por esmectitas geralmente possuem, em elevado grau, propriedade plásticas e coloidais, além de apresentarem grandes variações em suas propriedades físicas. Essas variações podem, na maioria das vezes, estarem vinculadas a variação na natureza dos cátions trocáveis que neutralizam a estrutura cristalina e a fatores estruturais octaédricos.

Para avaliar a mineralogia dos materiais utiliza-se a técnica da difração em Raios-X, que determina as distâncias entre íons ou átomos formadores dos cristais (distâncias interplanares). Essa distância é obtida através do ângulo formado pelo feixe de Raios-X incidente e o plano atômico que difrata, assim como, do comprimento de onda desses raios.

Segundo Dana (1969) o método de verificar a mineralogia de amostras por meio do difratômetro de raios-X é um poderoso instrumento de análise que utiliza a radiação- X monocromática sobre uma amostra finamente pulverizada.

Guimarães (1999) afirma que desde a década de 30 a difratometria de raios-X tem sido essencial para caracterização mineralógica dos argilominerais e de outros constituintes de granulação fina dos solos, dos sedimentos e das rochas pelíticas, bem como da determinação da estrutura de compostos orgânicos e inorgânicos naturais ou sintetizados.

Santos (1975) constatou ainda que a estrutura cristalina das cloritas é constituída por camadas estruturais do tipo mica, ou seja, uma camada de gipsita entre duas camadas de silicato e de brucita (hidróxido de magnésio). Geralmente, em cloritas na forma de argilo-minerais, existe uma apreciável substituição de ferro no lugar do magnésio na camada da brucita.

Grim (1962) mostra que a estrutura verdadeira da clorita consiste em camadas alternadas de micas e brucita, onde as camadas de mica são trioctaédrica com composição química geral $(OH)_4(SiAl)_8(MgFe)_6O_{20}$ e já a camada de brucita com a composição geral $(MgAl)_6(OH)_{12}$. O autor ainda comenta que a camada de mica é desequilibrada devido à existência da

substituição do alumínio pela sílica, e isso causa uma deficiência de carga no balanceamento devido ao excesso de carga da camada da brucita, como consequência da substituição do alumínio pelo magnésio. É de extrema importância observar que a espessura da camada constituída por uma camada de mica e brucita tenha 14 Å, que é apenas cerca do dobro da caulinita, e como consequência muitas vezes é extremamente difícil de diferenciar entre a caulinita e a da clorita com base nos dados de difração de raios-X. Como no caso da illita, a degradação da clorita ocorre por meio da alteração da camada de brucita. Como no caso da degradação da illita, a clorita pode vir a desenvolver algumas características de expansão (GRIM,1962).

Na Tabela 2.8 é apresentado um resumo dos principais argilos-minerais e suas características (Costa, 1991).

Tabela 2.8. Características dos principais argilos-minerais. (Costa, 1991).

Argilo-Mineral	Elementos principais e proporções	Distância Basal	Composição Química	Principais Características
Caulinita	Camada tetraédrica de sílica e uma octaédrica de alumínio. (1:1)	7Å	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	»Carga elétrica e poder de retenção fraca da água; »Praticamente não apresenta expansibilidade; »Tornam-se plásticas para teor de umidade relativamente baixo.
Esmectitas	Duas camadas tetraédrica de sílica e uma camada octaédrica de alumínio. (2:1)	9,4 a 10 Å ⁽¹⁾ 15Å ⁽²⁾ 17,5Å ⁽³⁾	$Al_4 Si_8 O_{20} (OH)_4 nH_2O$	»A fácil acessibilidade a moléculas de água (assim como íons) no espaço compreendido entre unidades estruturais faz com que em adição à superfície externa da partícula existam superfícies internas de apreciável extensão; » Caracterizada por carga elétrica e possui poder de reter água e causa expansibilidade elevada; »O valor da relação SiO_2/Al_2O_3 varia usualmente entre 3,0 e 7,0
Illitas	Duas camadas tetraédrica de sílica e uma camada octaédrica de alumínio central (2:1)	10 Å	$K_y (Al_4 Fe_x Mg_4 Mg_x) (Si_{8-y}) (Si_{8-y} Al_y) O_{20} (OH)_4$	»Os íons de potássio que figuram na estrutura parece atuarem como pontes que ligam as unidades umas as outras e, deste modo, ao contrário do que sucede com as esmectita, o reticulado das illitas é muito pouco expansível na presença de água e outros líquidos polares.
Cloritas	Camadas de micas que alternam com camadas de brucita (2:1:1 ou 2:2)	14 Å	Mica- $(MgAl)_6 (OH)_{12}$ Brucita- $(OH)_4 (SiAl)_8 (MgFe)_6 O_{20}$	»A estrutura apresenta freqüentes substituições isomórficas nas unidades micáceas e nas camadas de brucita- principalmente nas substituições de Si^{++++} por Al^{+++} nas primeiras camadas de sílicas, e de Mg^{++} por Al^{+++} nas camadas de brucita. Assim, as unidades de mica adquirem carga elétrica negativa e as da brucita carga positiva, o que determina ligação eletrostática relativamente forte entre umas e outras. As cloritas têm por isso o reticulado em geral não expansível, tal como as illitas, aproximando-se bastante destas nas suas propriedades gerais.

⁽¹⁾ Para o mineral aquecido a 400°C e mantido ao abrigo de águas;

⁽²⁾ Para o mineral Saturado com Cálcio e em contato com o ar;

⁽³⁾ Quando Saturado com glicerol

Os argilo-minerais tipo cloritas são relativamente mal organizados e finos, como consequência da forma polimorficada do mineral e com isso muitas vezes não é possível de determiná-lo. A maioria dos argilo-minerais do tipo clorita são trioctaédricos, mas algumas foram encontradas e identificadas na forma dioctaédricos. Na clorita também ocorre, freqüentemente, a substituição do ferro pelo magnésio nas camadas de brucita. Geralmente, os argilo-minerais do tipo cloritas possuem organização de camada de brucita parecendo ser mais fracas e com seqüência de empilhamento menos regulares do que nas formas bem cristalizadas.

Costa (1991) afirma que as formas cristalinas mais freqüentes e abundantes em solos são as gibsitas- $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, a goetita- $\text{FeO} \cdot \text{OH}$ ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e a hematita- Fe_2O_3 . Esses minerais possuem, respectivamente, o pH de 4,8; 3,2 e 2,1.

Segundo Batalione (2007), quando um solo é composto de diversos minerais adotam-se várias metodologias de investigações químicas e mineralógicas, o que visa maior precisão na caracterização. Esse autor ressalta também, que os diversos processos de investigações, podem apresentar fragilidade e interferência na determinação dos parâmetros mineralógicos e destaca que os principais métodos para avaliar as características químicas e mineralógicas dos solos, principalmente as frações finas, reportadas na literatura são:

- Análise do pH;
- Capacidade de Troca Catiônica;
- Análise Térmica Diferencial;
- Difração por Raios-X;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Ataque Sulfúrico.

O autor comenta ainda que foi realizado também outro ensaio químico bastante utilizado na área agrônômica para a caracterização dos solos incluindo a avaliação de seu grau de intemperismo é o ataque por ácido sulfúrico. Esse ensaio foi padronizado pela EMBRAPA (1997). Além de possibilitar a determinação dos teores de Sílica (SiO_2), Ferro (Fe_2O_3) e Alumínio (Al_2O_3), a solubilidade das amostras em ácido sulfúrico (H_2SO_4) visa determinar a relação molecular sílica / alumínio (Ki) e sílica / sesquióxidos (Kr); índices estes adotados por alguns pesquisadores na definição do grau de intemperismo do solo.

Santos (2004) comenta que o pH influencia significativamente a solubilidade de vários elementos, como por exemplo, o ferro e alumínio. A carga elétrica das partículas coloidais varia com o pH, influenciando de forma notável nos fenômenos de absorção e trocas iônicas, e nos fenômenos de dispersão e floculação.

Batalione (2007) indica que o potencial hidrogênio (pH) dos solos possui uma dependência direta com as forças que atuam na expulsão e na atração das partículas do solo. Conseqüentemente, o aumento desse potencial gera um incremento das forças de repulsão e vice-versa. No caso de solos tropicais apresentam valor de pH entorno de 5 a 6,5, e quando superiores a esse intervalo constata-se a presença de solos salinos e do elemento como o carbonato de cálcio.

Na Figura 2.7, Bigarella *et al.* (1996) introduz uma classificação sistemática dos solos em função do seu pH.

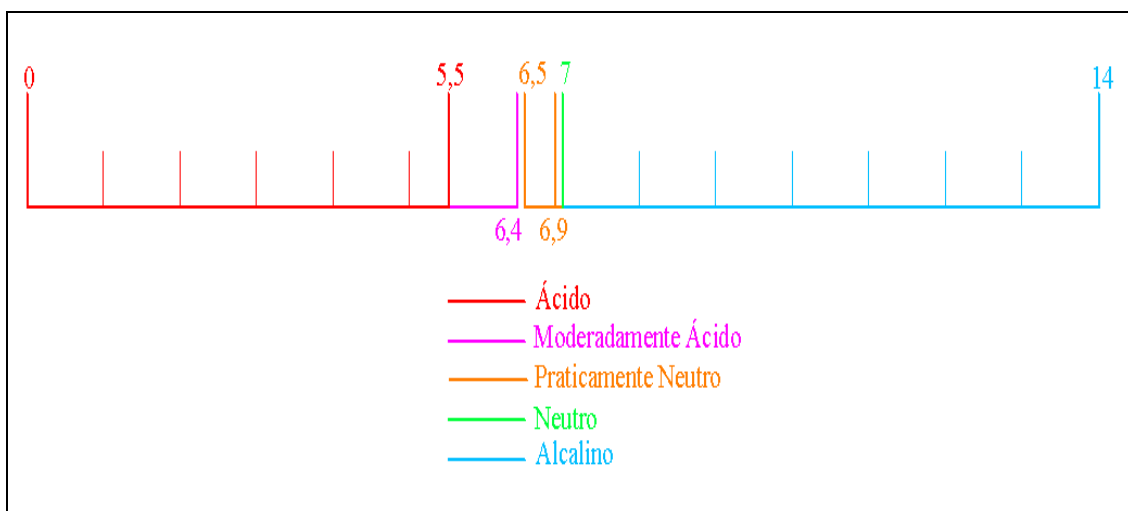


Figura 2.7 . Classificação do solo quanto à concentração pH.

2.5. ENSAIOS MECÂNICOS

2.5.1. Resistência à Compressão Simples

A resistência a compressão simples é a propriedade mais empregada na avaliação das propriedades de misturas de solo-cimento e tem-se mostrado bem aplicada na análise do comportamento preliminar de misturas utilizando resíduos. Delgado (2007) relata a importância destes ensaios na avaliação do tempo de cura de misturas de solo-cimento e solo-cal, evidenciando que resistência à compressão simples (RCS) aumenta com aumento da porcentagem de cal e/ou cimento.

Pereira *et al.* (2005) comenta ao realizar análises do comportamento de misturas de latossolo vermelho com resíduos do beneficiamento de minério de ferro que escolha do ensaio de resistência à compressão simples se justifica pela possibilidade de verificar de forma simples do ganho real de resistência das amostras submetidas à adição de rejeitos e cal, como também o estabelecimento de comparações com o solo laterítico em condições naturais. Além disso, consideram a importância deste ensaio por abordar a resistência dos materiais em uma condição crítica, justificada pela isenção de confinamento.

Vargas (1978) apresentou resultados do ensaio de resistência à compressão simples (RCS) sobre diversos corpos de provas do mesmo solo. Cada corpo de prova (CP) possuía uma umidade diferente. O autor observou que a relação entre a RCS e a umidade (w) fornece uma reta, na escala semilogarítmica e concluiu ainda que a RCS tende a diminuir com o aumento do incrementar teor de umidade. Vargas propôs estabeleceu uma relação entre a RCS e consistência do material:

- $RCS < 0,5 \text{ Kgf/cm}^2$ - Consistência Mole
- $0,5 \text{ Kgf/cm}^2 < RCS < 1,5 \text{ Kgf/cm}^2$ - Consistência Média
- $1,5 \text{ Kgf/cm}^2 < RCS < 4,0 \text{ Kgf/cm}^2$ - Consistência Rija
- $RCS > 4,0 \text{ Kgf/cm}^2$ - Consistência Dura

Inicialmente, os ensaios para medição da propriedade de consistência de solos eram feitos pelo ensaio do cone. Esse ensaio consistia no puncionamento de um cone sobre a superfície do corpo de prova, ou seja, a consistência era mensurada com a pressão necessária para fazer o cone penetrar o respectivo CP. Posteriormente, o ensaio de resistência à compressão simples predominou sobre o ensaio do cone.

Para executar o ensaio RCS são moldados corpos de prova cilíndricos com prévia homogeneização e com teor de umidade definido. Esses corpos de prova são submetidos a esforços de compressão axial por meio de uma prensa hidráulica de deformação controlada até o aparecimento das fissuras (ruptura). A carga de ruptura dividida pela área do corpo de prova é denominada de resistência a compressão simples. A ruptura pode ocorrer de duas maneiras: por cisalhamento ao longo de um plano de ruptura inclinado (solos mais duros e menos plásticos) ou por embarrigamento (solos plásticos), ou seja, ruptura por cisalhamento ao longo de vários planos paralelos (Vargas, 1978).

Segundo Vargas (1978) a coesão pode ocorrer em um solo devido a três fatores principais:

- Por efeito de ligação entre os grãos;
- Por efeito de tensões capilares;
- Presença de um material cimentante.

Percebe-se que muitas pesquisas no Brasil estão se enveredando para utilização de materiais cimentantes como cal e o cimento, esses aglutinam aos grãos do solo aumentando a sua coesão. Por esse motivo, a estabilização com cal e a estabilização com cimento gera uma melhoria do solo, repercutindo num aumento expressivo na sua resistência a compressão.

Para Costa (2005) os fatores como o tempo de cura e as condições em que os corpos de prova sofreram o processo de cura influenciam na realização do ensaio de RCS.

Sabe-se que a umidade de moldagem, módulo de elasticidade, o tipo de compactação e o arranjo dos grãos após a compactação dos corpos de prova são fatores importantes na avaliação da dos resultados de resistência a compressão simples.

No caso da misturas de resíduos de pedreira com solos naturais, os ensaios de RCS podem fornecer dados importantes a respeito da interação entre os grãos do resíduo e o solo natural. Estes ensaios permitem determinar o módulo de elasticidade de cada amostra, além de avaliar a compatibilidade destes materiais.

Seguindo esta linha Pereira *et al.*(2005) mostra o efeito da adição de resíduos de minério de ferro em um solo natural com base nos ensaios de RCS. Os resultados obtidos demonstram uma elevação nos valores de com o aumento do teor de rejeito misturado ao solo. A RCS, que apresentava inicialmente um valor de 1065,6 kPa, atingiu valores iguais a 1729,7 kPa para a adição de 25% de rejeito e 2056,0 kPa quando o teor de rejeito subiu para 50%. A RCS teve o seu valor aumentado de 70% quando se acrescentou um percentual de 25% de rejeito ao solo e praticamente dobrou quando as porcentagens de rejeito e do solo tropical mistura eram iguais.

2.5.2. Ensaio de Sucção com papel filtro

A sucção é uma pressão negativa, ou seja, inferior à pressão atmosférica, que resulta de forças capilares e de adsorção oriundas da interação entre a água e as partículas sólidas do solo.

Camacho & Bernucci (2000) afirmam que para um determinado incremento de umidade dado a uma amostra corresponde uma diminuição da sucção matricial e essa influi diretamente na sua capacidade de suporte. Estes autores acrescentam ainda que a sucção matricial contribui substancialmente no processo de perda ou ganho de resistência. Através de tensões de sucções, os autores explicam, em parte, a variação dos valores de Mini-CBR durante a imersão, isto é uma grande sensibilidade e perda de resistência no ramo seco da curva de compactação e uma menor influência no ramo úmido.

Para Marinho (1997) a sucção é considerada a pressão isotrópica da água intersticial, oriundo das propriedades física e condições químicas, resultando que o sistema água-solo absorva ou perca água. Esse ganho ou perda de água depende das condições ambientais e do grau de saturação de cada amostra.

De acordo com Gonçalves & Parreira (1999), as mudanças no teor de umidade de um solo, principalmente solos finos, causam grandes variações no valor do módulo de resiliência. Quanto mais baixo o teor de umidade, maior é o módulo de resiliência e este diminui à medida que se aumenta o teor de umidade.

A variação do teor de umidade de um solo natural depende da pluviosidade e da evapotranspiração. No caso de um solo artificialmente compactado em determinado teor de umidade é de se esperar algumas modificações do teor de umidade inicial de compactação até o solo entrar em equilíbrio hídrico. Verifica-se nos pavimentos de rodovias federais e estaduais bem projetadas e construídas com dispositivos de drenagem (superficial e profunda) eficiente, que a umidade de equilíbrio pode ser considerada igual, no máximo, ao teor de umidade ótimo do ensaio do Proctor normal (Medina, 1997).

O método do papel filtro é uma metodologia indireta de medida de sucção matricial ou sucção total do solo (Fredlund & Rahardjo, 1993). A medição indireta se dá pela medida da umidade relativa e é relacionada com a sucção atuante por meio de uma calibração do papel utilizado.

De acordo com Marinho (1997), este método baseia-se no princípio da adsorção e equilíbrio de material poroso com deficiência da umidade quando posto em contato com o papel filtro de menor umidade. Ou seja, a pressão de água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais.

O fluxo se dá, devido a uma energia disponível na água que está no interior do solo. Esta energia disponível que pode realizar o trabalho é denominada potencial total. Dentre todos os componentes têm-se dois como principais: o componente matricial resultante de forças capilares e de adsorção e o componente osmótico, ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo, ou seja, devida à diferença de concentração química entre a água e o solo (Ferreira, 2009).

Alguns autores consideram que somente a sucção matricial é relevante, enquanto a sucção osmótica é importante somente quando ocorre um aumento de concentração química ou sob umidades mais baixas.

Um método simples para determinação da sucção é o método do papel Filtro. Este método é regido pela norma da D 5298 (ASTM, 2003). O princípio do ensaio baseia-se no contato da amostra de solo com um papel filtro até atingir equilíbrio com a umidade do solo por meio do fluxo de vapor (sucção osmótica) ou do fluxo de líquido (sucção matricial). Após o período de equilíbrio, determina-se a umidade do papel filtro e, então, a sucção é conhecida por meio da curva de calibração do papel filtro utilizado.

Um tempo de sete dias é suficiente para o equilíbrio para realização das medições de sucção matricial, ou seja, quando o papel está em contato com o solo e, para medições totais, este tempo depende dos níveis de sucção (Marinho, 1997).

Batalione (2007) realizou avaliações de sucção utilizando o método do papel filtro em misturas de resíduos de pedreira e solo natural visando obter uma correspondência entre este parâmetro e a resistência do material. Esse autor concluiu que apesar das amostras apresentarem valores muito próximos de sucção, os resultados dos ensaios demonstram que a sucção influenciou no valor do CBR em condições não saturadas, ou seja, a amostra que apresentou maior valor de sucção apresentou também um maior valor de CBR. Destaca-se também que os valores de sucção foram diferentes para os solos naturais e para as misturas utilizando o rejeito nas diversas proporções, comprovando que o rejeito modificou o valor da sucção do solo natural, pois conduziu à formação de um novo material com comportamento distinto.

2.5.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

Segundo Medina & Motta (1997), o primeiro estudo desenvolvido relacionado à deformabilidade dos pavimentos foi proposto por Francis Hveem (1951). Hveem (1951) preconizava que o fenômeno do trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos ocorria devido às deformações resilientes das camadas adjacentes, e em especial a do subleito.

A Mecânica dos Pavimentos define a deformação resiliente como sendo a deformação elástica ou recuperável dos solos e das estruturas dos pavimentos sob a ação de cargas repetidas. A Mecânica dos Pavimentos define a deformação resiliente como sendo a deformação elástica ou recuperável dos solos e das estruturas dos pavimentos sob a ação de cargas repetidas. Para Medina & Motta (1997) o termo resiliência significa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações e corresponde à energia potencial de deformação.

Para Pinto & Preussler (2002) o termo deformação resiliente é a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas. A determinação do módulo de resiliência de solos é realizada em laboratório, por meio de ensaios triaxiais de carga repetida. Esse módulo é um tipo de módulo de elasticidade que difere do tradicional, pois as medidas são efetuadas após numerosas aplicações de sucessivas de cargas, que variam na ordem de centenas de milhares de repetições. Além disso, o tempo de aplicação é curto, da ordem de décimos de segundos (Nogami & Villibor, 1981).

Rezende (2003) comenta que geralmente, quando se aplicam as normas tradicionais (ABNT e DNER) é verificado apenas o comportamento do solo sobo ponto de vista dos ensaios de laboratório (granulometria, limites de liquidez e plasticidade, Índice de Suporte Califórnia - ISC), sendo na maioria dos casos a indicação que o solo laterítico não é adequado para a utilização em pavimentação. Porém, com o desenvolvimento das pesquisas a respeito do comportamento dos solos tropicais, a utilização desse material no campo e a definição de novos parâmetros (módulo resiliente e metodologia MCT – Miniatura, Compactado, Tropical) a utilização destes solos tem se mostrado viável.tem-se obtido um bom desempenho.

O comportamento de tensão versus deformação dos materiais sob aplicação de cargas repetidas pode ser representado pelo Módulo de Resiliência (M_R) e pelo Coeficiente de Poisson (ν). De acordo com Nogami & Villibor (1981) o Módulo de Resiliência ou Resiliente

(M_R) é definido, no caso particular de determinação com uso de corpos de prova cilíndricos e câmaras triaxiais, pela Equação 2.2.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.2)$$

Sendo:

M_R = módulo de resiliência, expresso em kgf/cm^2 ;

σ_d = tensão axial, ou tensão desvio (diferença entre a pressão vertical aplicada e a pressão da câmara), expressa em kgf/cm^2 ou kPa na unidade SI;

ϵ_r = deformação específica axial recuperável, adimensional, após números apropriados de ciclos de aplicação de carga.

E que:

$$\epsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.3)$$

Sendo:

Δh = deslocamento vertical máximo;

h_0 = comprimento inicial do corpo de prova ensaiado.

Como apresentado anteriormente, para obter o valor de módulo de resiliência utilizam-se ensaios triaxiais cíclicos, ou seja, cargas repetidas, que em laboratório procuram simular carregamentos de cargas de tráfegos na estrutura do pavimento. Para tanto, em 1986 a AASHTO passou a recomendar o uso de módulo de resiliência como propriedade para caracterização dos materiais empregados em pavimentos flexíveis.

Neste ensaio, a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de um valor zero até um máximo, voltando a anular-se ou atingir um valor mínimo definido para voltar a atuar após pequeno intervalo de repouso (fração de segundo), de maneira a reproduzir as condições de campo. Na prática, a amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que são calculadas as tensões e deformações ocorridas. A frequência representa o volume ou fluxo de veículos (Medina, 1997). Usualmente, os solos são agrupados em dois tipos de comportamento ao ser aludido em comportamento resilientes: os com comportamento granular e comportamento fino.

Os solos finos coesivos são encontrados com frequência em subleito ou camadas de subleito de rodovias. São classificados quanto à resiliência de acordo com os parâmetros determinados em ensaios triaxiais (Fortes, 1999):

- Solos tipo I: solos com baixo grau de resiliência – apresentam bom comportamento como subleito e reforço de subleito, com possibilidade de utilização em camadas de sub-base;
- Solos tipo II: solos com grau de resiliência intermediário – apresentam comportamento regular como subleito. Sua utilização como reforço de subleito requer estudos e ensaios especiais;
- Solos tipo III: solos com grau de resiliência elevado – não é aconselhável seu emprego em camadas de pavimentos. Como subleito requerem cuidados e estudos especiais.

Pinto & Preussler (2002) classificaram o solo em função da porcentagem de silte na fração fina (S), ou seja, a fração que passa na peneira com abertura de 0,075 mm e o valor de capacidade de suporte (CBR) . A Tabela 2.9 apresenta a classificação proposta por esse autor, sendo a Equação 2.4 utilizada para determinar a porcentagem de material passante na peneira 200.

Tabela 2.9. Classificação do solo em função da fração passada na peneira nº 200 (Pinto & Preussler, 2002).

CBR (%)	S (%)		
	< 35	35 a 65	> 65
> 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

$$S = 100 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right).100 \quad (2.4)$$

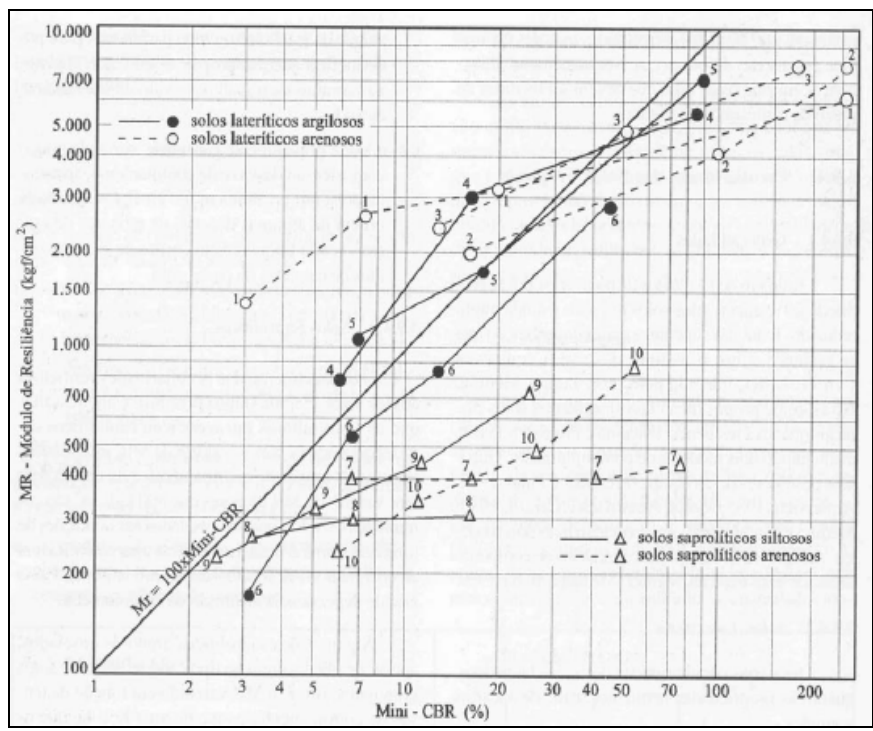
Onde:

S = porcentagem de silte na fração fina que passa na peneira número 200 (0,075 mm);

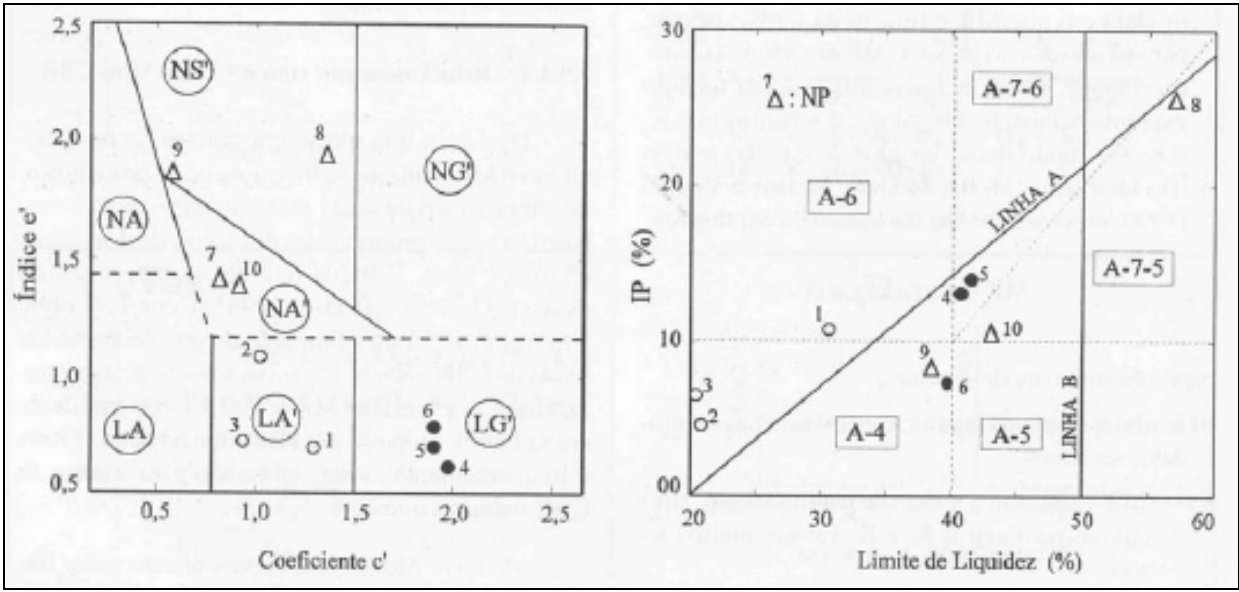
P1 = porcentagem em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,05 mm determinada na curva de distribuição granulométrica;

P2 = porcentagem em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,075 mm, determinada na curva de distribuição granulométrica.

Devido às dificuldades de determinar em laboratório o M_R , alguns autores utilizam correlações empíricas para a previsão aproximada com base em outras propriedades dos solos. Franzoi (1990) estudou o comportamento resiliente de amostras de solos saprolíticos e lateríticos e analisou com resultados obtidos a partir de ensaios CBR. A Figura 2.8 apresenta a correlação obtida pelo autor.



(a)



(b)

Figura 2.8. (a) Variação do módulo de resiliência em função do Mini-CBR de alguns solos lateríticos e saprolíticos; (b) Classificação dos solos (Franzoi, 1990).

A Figura 2.9 apresenta o modelo de comportamento resiliente de solos finos, de acordo com a classificação I, II e III.

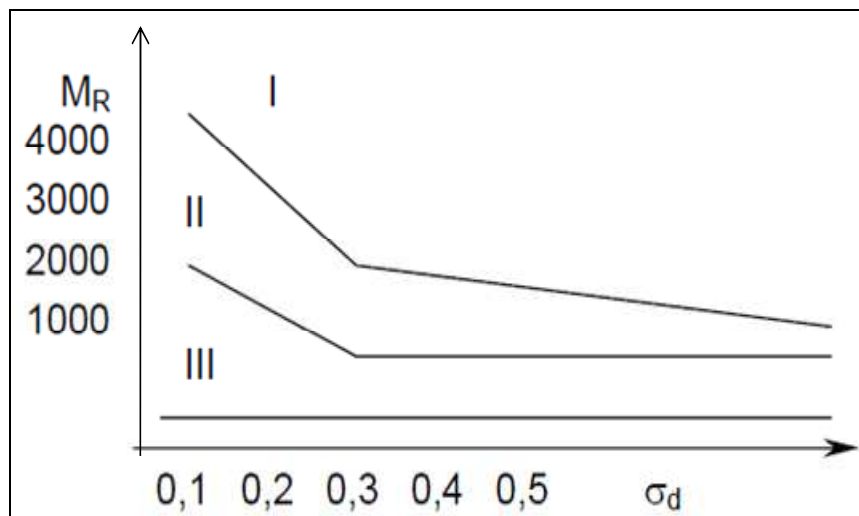


Figura 2.9. Modelo de comportamento resiliente de solos finos (Pinto & Preussler, 2002).

Fortes (1999) apresenta alguns fatores que afetam o módulo de resiliência dos solos finos coesivos:

- Número de repetição da tensão-desvio e história das tensões: com o carregamento repetido ocorre o rearranjo estrutural levando a um acréscimo do peso específico;
- Duração e frequência de aplicação das cargas: para frequências entre 20 e 60 aplicações por minuto e duração entre 0,86 e 2,86 segundos não exerce influência;
- Umidade e massa específica de moldagem: quanto maior o teor de umidade, menor é o módulo resiliente;
- Tixotropia dos solos argilosos: após algumas repetições de carga o ganho de rigidez não é significativo;
- Nível de tensão: no caso de solos coesivos varia muito pouco com a pressão confinante e muito com a de desvio.

Medina & Preussler (1980) informam que os solos arenosos têm módulo de resiliência influenciados diretamente pela tensão confinante, enquanto o seu valor é pouco afetado pela tensão desvio. Em contrapartida, para os solos argilosos o que influencia o módulo de resiliência é a tensão desvio, sendo pouco influenciado pela tensão confinante. Os solos arenosos têm deformações resilientes que diminuem com número de aplicações de cargas. Em geral, o módulo resiliente diminui muito com o aumento do teor de umidade.

Para Medina (1997), o módulo de resiliência é influenciado pela natureza da amostra ensaiada, umidade, densidade e estado de tensões. A natureza compreende em características de constituição mineralógica, textura e plasticidade da fração fina.

Parreira *et al.* (1998) desenvolveram um estudo que teve como base a obtenção do módulo de resiliência de sete solos do Brasil para fins de aplicação em pavimentação rodoviária e analisaram quais fatores influenciam o valor de módulo. Esses autores utilizaram vários modelos de representação do módulo de resiliência principalmente em função da tensão desvio, tensão confinante e combinações. E perceberam que no caso dos solos arenosos são bem mais influenciáveis e dependentes da tensão confinante e quanto aos solos argilosos são dependentes da tensão desvio.

Batista (2010) acredita que a deformabilidade resiliente das camadas do pavimento e do subleito condicionam à fadiga das camadas superficiais mais rijas (revestimento de concreto asfáltico, base de solo-cimento) sujeitas à flexão. Sendo que a fase de fadiga é caracterizada como a última etapa da vida útil do pavimento, que faz-se sentir por um crescimento acelerado de deflexões, que se caracteriza por meio de fissuras, trincas e acúmulo de deformações permanentes. Em sua pesquisa a autora objetivou analisar as características de deformabilidade dos materiais que compõem a estrutura dos pavimentos rodoviários sob condições que simulem as solicitações reais de tráfego.

Para Medina & Motta (2005) os ensaios de cargas repetidas em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido da compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso, procura reproduzir as condições de campo. Os elementos amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que calculam as tensões e deformações produzidas. A frequência caracteriza o fluxo de veículos.

2.5.3.1. Modelo para o cálculo do módulo de resiliência

Como descrito por Uzan (1985) e Uzan & Witczak (1998) apud (Mello, 2008) o módulo de resiliência do solo pode ser representado por diversos modelos matemáticos que geralmente são baseados nas tensões atuantes no solo. Contudo, a realização de análises estruturais de pavimentos mais precisa, existe a necessidade de saber quais são os modelos mais apropriados para representar o comportamento do módulo de resiliência.

Mello (2008) apesar de não realizar um estudo aprofundado sobre o estudo de camadas granulares como estrutura de um pavimento. O autor aludiu sobre um modelo muito conhecido e utilizado para modelagem de camadas granulares desenvolvido por Uzan & Witzczak (1998), sendo denominado por Modelo Universal, cuja relação é dada pela equação 2.5:

$$M_R = k_1.P_a.\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2}.\left(\frac{\sigma_{oct} + 1}{P_a}\right)^{k_3} \quad (2.5)$$

Onde: M_R é o módulo resiliente, θ é a soma das tensões principais, τ_{oct} é a tensão octaédrica, P_a é a pressão atmosférica e k_1 , k_2 e k_3 são coeficientes determinados experimentalmente.

Cabe comentar que o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) apresenta dois modelos para o cálculo do módulo de resiliência, sendo o primeiro aplicado ao cálculo de módulo de resiliência dos solos granulares e o segundo modelo para o cálculo do módulo de resiliência para solos argilosos. Para melhor entendimento dos dois modelos são evidenciadas as seguintes questões:

- Solos Granulares; para fins de classificação quanto à resiliência, são aqueles solos que apresentam menos de 35% em peso de material passando na peneira n° 200 (0,075) e o módulo de resiliência é calculado pelo modelo apresentado na equação abaixo.

$$M_R = k_1.\sigma_3^{k_2} \quad (2.6)$$

Sendo k_1 e k_2 os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões de confinamento, σ_3 , e M_R o módulo de resiliência determinado pelo ME 131(DNER,1994).

Ressalta-se que ao encontrar $k_2 \leq 0,50$ o material é considerado como de bom comportamento. Enquanto, para $k_2 > 0,50$; o comportamento depende da espessura da camada e da qualidade do subleito.

- Solos Finos; para fins de classificação quanto à resiliência, são aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira n° 200 (0,075mm).

O módulo de resiliência é calculado pelo modelo apresentado pelas seguintes expressões:

$$M_R = k_1 + k_3.(k_1 - \sigma_d) \quad \text{para } \sigma_d < k_1 \quad (2.7)$$

$$M_R = k_2 + k_4.(\sigma_d - k_1) \quad \text{para } \sigma_d > k_1 \quad (2.8)$$

Sendo k_1 , k_2 , k_3 e k_4 os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões de confinamento, σ_3 , e M_R o módulo de resiliência determinado pelo ME 131(DNER,1994). Ressalta-se que o Modelo Universal está associado à metodologia da ASSTHO e no Modelo do DNIT pelo procedimento da norma ME 131 do DNER.

2.6. CONTROLE TECNOLÓGICO

Para Batalione (2007) o controle tecnológico é primordial para o êxito das obras de pavimentação. O controle tecnológico se desenvolve desde a esfera do desempenho da estrutura de acordo com o projeto até a administração de recursos financeiros adequados por órgãos competentes. Por isso, a necessidade de desenvolver estudos para analisar possíveis erros que ocorre nas obras em relação às expectativas de projetos. Em geral, o controle tecnológico tem como objetivo principal definir quais são as propriedades e parâmetros elementares para a utilização do material de construção na engenharia e, concomitantemente, prever seu comportamento ao longo do tempo.

Mais especificamente, Rezende (1999) comenta que uma camada de pavimento é geralmente considerada com qualidade quando o grau de compactação é superior aos especificado em projeto e a compactação foi executada na faixa de umidade pré-fixada. No caso da camada compactada divergir das especificações preconizadas no projeto é comum que se efetue a abertura, gradeamento e recompactação do trecho.

De acordo com Preussler (2007) os processos empregados no controle tecnológico das obras de pavimentação ainda mantêm procedimentos e metodologias convencionais. Estas metodologias são utilizadas desde muito tempo e não fornecem informações técnicas satisfatórias para uma avaliação não direta das propriedades mecânicas das camadas do pavimento e da sua estrutura como um todo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi selecionada uma região do entorno de Goiânia/GO, local onde estão implantadas as duas pedreiras Araguaia e Anhanguera. A pedreira Araguaia está localizada na cidade de Aparecida de Goiânia e a pedreira Anhanguera na cidade de Caturai. A Figura 3.1 apresenta a localização das pedreiras Araguaia e Anhanguera.

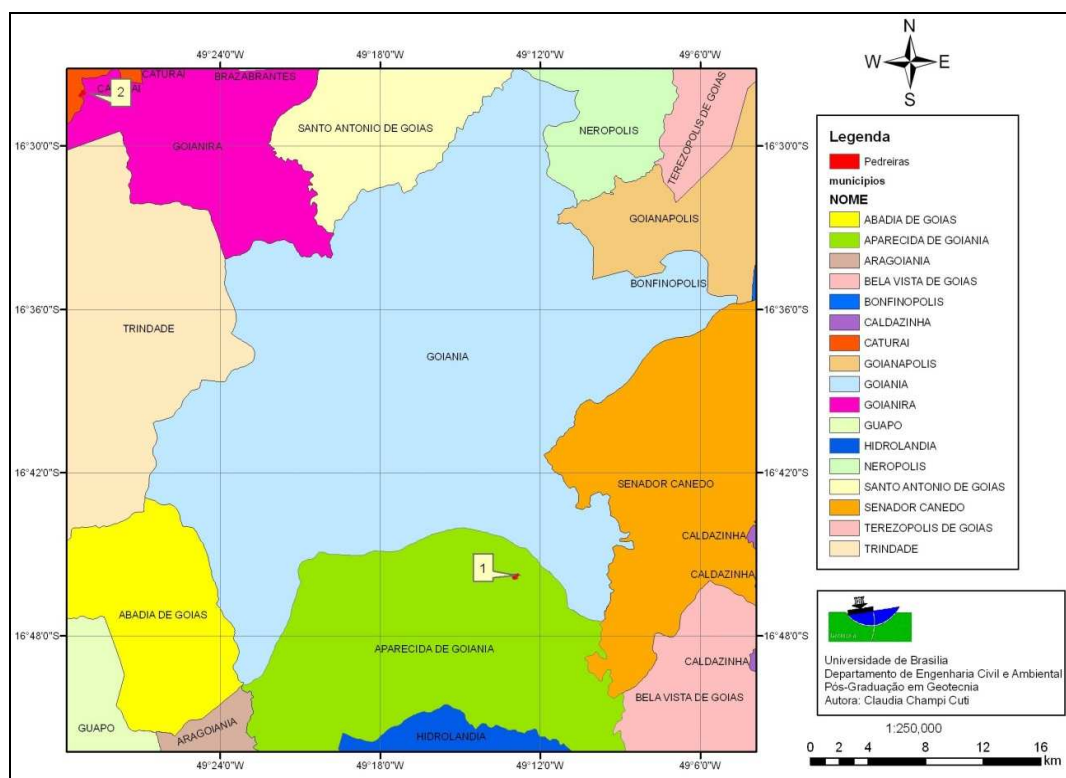


Figura 3.1. Localização das pedreiras: 1- Pedreira Araguaia; 2- Pedreira Anhanguera (modificado Cuti, 2008).

A justificativa da escolha das duas pedreiras se baseou, principalmente, por essas pedreiras apresentarem um elevado volume de produção de brita e, conseqüentemente, a geração de resíduos finos em grandes quantidades. Somado a esta escolha, houve interesse por ambas as partes, ou seja, pelas duas pedreiras e o programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, em realizar as investigações conjuntas pelo objetivo comum em dar um aproveitamento economicamente viável correto para os resíduos finos gerados no processo de lavra das britas.

Apesar das duas pedreiras apresentarem técnicas distintas de geração de finos, o volume de resíduos finos gerado é considerado um problema ambiental comum dentro das pedreiras produtoras de britas.

Nessas pedreiras são gerados, em média, 30 m³/dia de resíduos finos. A Figura 3.2 destaca a disposição do grande volume desses resíduos finos nos pátios da pedreira Araguaia, cuja disposição é feita por empilhamento do material ainda úmido e com pouca preocupação quanto à estabilidade da pilha, assoreamento e erosões.



Figura 3.2. Pilhas de resíduos finos na pedreira Araguaia.

Porém, a partir da geração dos resíduos finos, existe a possibilidade de aproveitamento em associações com materiais naturais (solo), melhorando suas propriedades e possibilitando a transformação de um material sem valor econômico em um material ambientalmente e tecnicamente utilizável em aplicações geotécnicas.

As pedreiras Araguaia e Anhanguera exploram seus potenciais minerais por meio da técnica de lavra a céu aberto. Nessas pedreiras são realizados planos de fogos com auxílio de explosivos que são dimensionados de modo a propiciar uma exploração em bancadas. Antecedendo aos explosivos é feita toda a limpeza e retirada da camada de matéria orgânica.

Essas pedreiras têm uma frequência de detonação média de quinze em quinze dias, uma vez realizado o desmonte detonado inicia-se a coleta de rochas de diversas dimensões. Essas são transportadas por caminhões fora de estrada para o circuito de britagem, localizados no interior das pedreiras. As rochas advindas da detonação da frente de lavra passam pelo britador primário e os materiais passantes seguem para o britador secundário e posteriormente vão ao britador terciário por meio de esteiras transportadoras de agregados.

3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

3.1.1. Pedreira Araguaia

A pedreira Araguaia está localizada no município de Aparecida de Goiânia/GO, com coordenadas geográficas de 49° 12' 43'' W e 16° 45' 58''S. É uma empresa pertencente ao mesmo grupo da Pedreira Anápolis que possui uma área média de 144.070 m² e equipamentos modernos no segmento da mineração no Centro-Oeste.

A produção é feita pela combinação de três britadores (primário, secundário e terciário); esteiras transportadoras; e processo de lavagem nas peneiras.

A areia artificial é gerada após o circuito de britagem e encaminhada até os tanques de decantação. Esses tanques de decantação têm a função de separar o material granular (areia artificial) do material fino (resíduo fino). Os tanques de decantação são constituídos por sistemas de recirculação de água que auxiliam na separação final (resíduo e areia), uma vez que o material granular se deposita no fundo do tanque e os resíduos finos permanecem suspensos, conforme pode ser observado na Figura 3.3.



Figura 3.3. Tanque de decantação da pedreira Araguaia.

Após a recirculação de água intermitente, que permite a lavagem do material granular, há uma parada estratégica para que o material fino suspenso seja separado e depositado nas pilhas de estocagem. Cabe ressaltar, que essas pilhas de estocagens são formadas com baixo ou nenhum controle geotécnico, favorecendo a ocorrência de possíveis acidentes de cunho ambiental.

A Figura 3.4 evidencia a exploração mineral dos agregados na pedreira Araguaia, essa ocorre do tipo céu aberto e a lavra em bancada. A rocha explorada na pedreira Araguaia é o micaxisto, pertencente ao grupo Araxá datado Proterozóico Médio.



Figura 3.4. Tipo de Lavra bancada na pedreira Araguaia.

A pedreira Araguaia produz cerca de 100 mil toneladas/mês de agregados do tipo brita 2, brita 1, brita 0, areia artificial e 30 m³ por dia de resíduos finos.

3.1.2. Pedreira Anhanguera

A pedreira Anhanguera, localizada no município de Caturai/GO, com coordenadas geográficas de 49° 29' 11'' W e 16° 28' 05'' S, é de propriedade da empresa Redimix e possui uma área média de 174.354 m².

A produção de agregados é similar à produção empregada na pedreira Araguaia, ou seja, por meio de seqüência de britadores. Porém, diferentemente da pedreira Araguaia, na pedreira Anhanguera o material fino é gerado no equipamento denominado hidrociclone, onde ocorre à separação final dos finos de pedreira, sendo encaminhados até as barragens. Os finos depositados nas barragens sofrem um processo natural de secagem e, posteriormente são levados até as pilhas de estocagem, onde permanecem sem vida útil definida.

A Pedreira Anhanguera produz agregados do tipo brita 2, brita 1, brita 0, areia artificial e resíduos finos a partir de uma rocha granítica constituída por quartzo, biotita, muscovita e feldspato, fazendo parte do grupo Granitos Sintectônicos datados do Proterozóico Inferior a Arqueano (Cutí, 2008).

A Figura 3.5 mostra a exploração mineral a céu aberto e pelo método de bancada. Antecedendo a exploração é realizado o decapeamento e desmatamento.



Figura 3.5. Lavra da pedreira Anhanguera (Fonte: Cuti, 2008).

3.2. MATERIAIS

3.2.1. Resíduos Finos

As amostras de resíduos finos da pedreira Araguaia foram coletadas em vários pontos das pilhas de resíduos. As amostras de resíduos foram acondicionadas em sacos plásticos resistentes e enviadas ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília-UnB. A Figura 3.6 mostra o aspecto de uma pilha de resíduos finos, onde foram coletados os finos da pedreira Araguaia.



Figura 3.6. Pilha de resíduos finos da pedreira Araguaia.

Os resíduos finos da pedreira Anhanguera são produzidos mediante sua passagem no hidrociclone, conforme pode ser observado na Figura 3.7. O hidrociclone tem a função de separação final dos resíduos finos dos demais agregados produzidos na pedreira. A coleta das amostras de resíduos foi realizada na barragem de decantação. É importante ressaltar que a coleta destes materiais ocorreu em diferentes pontos da barragem de resíduo visando obter uma melhor representatividade do material fino. A metodologia de coleta foi semelhante à adotada por Batalione (2007).

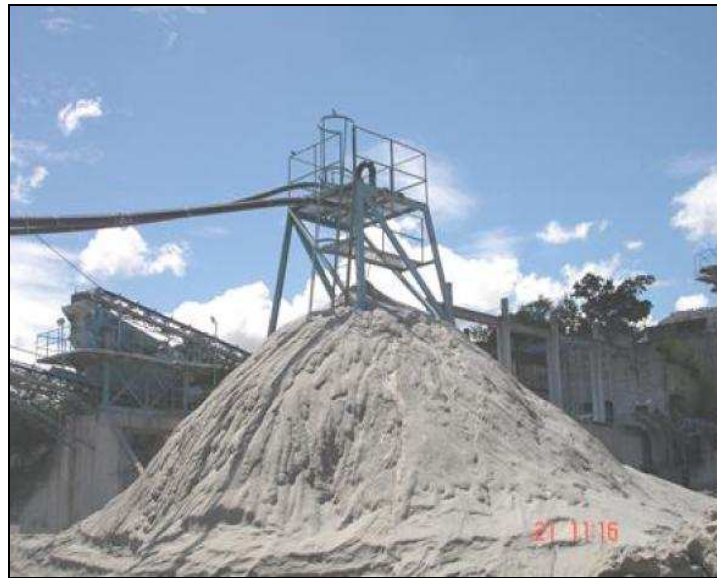


Figura 3.7. Pilha de resíduo fino da pedreira Anhanguera e o hidro-Ciclone (Batalione, 2007).

3.2.2. Solo Natural de Goiânia

O solo natural utilizado nesta pesquisa foi da região do aeroporto internacional de Goiânia/GO. Por meio de análise tátil visual de campo, o solo natural apresentava coloração avermelhada e em sua maioria dotada de frações finas.

A coleta das amostras do solo natural de Goiânia foi feita por uma empresa especializada e o local dessa coleta foi denominado de Poço-01, conforme pode ser visto na Figura 3.8.

Cabe ressaltar que a escolha deste solo foi relacionada a inúmeras pesquisas realizadas com solos similares e a sua importante aplicação nos estudos propostos nesta dissertação. Pode destacar as pesquisas desenvolvidas por Jacintho (2008) e Guimarães & Jacintho (2008) que utilizaram solo da região da CEASA/GO (Centrais de Abastecimento de Goiás S/A), localizada em frente ao Aeroporto Internacional de Goiânia local de coleta das amostras.

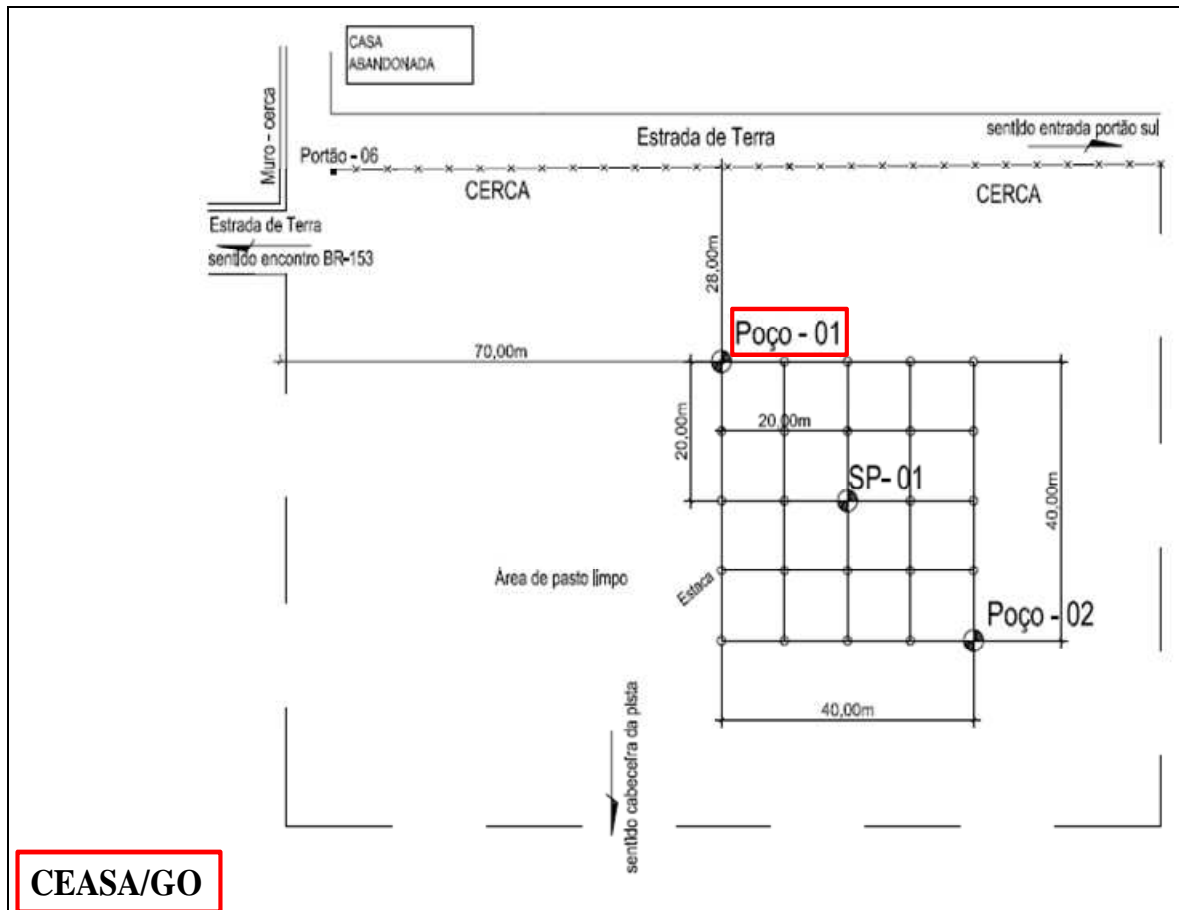


Figura 3.8. Local da coleta de solo natural de Goiânia.

O solo natural foi coletado na profundidade de 2,0m a 4,0 m em relação à superfície original do terreno. As amostras de solo foram embaladas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), onde foram dispostas em lonas para secar ao ar e à sombra (Figura 3.9).



Figura 3.9. Solo utilizado nas misturas.

Além de Jacintho (2008) e Guimarães & Jacintho (2008), o solo da região do CEASA/GO foi objeto de outros estudos e pesquisas tecnológicas para fins de pavimentação rodoviária. Dentre as principais bibliografias que tem como referência o solo pode-se citar: Angelim (2005), Aquino (2008) e Aguiar (2008).

A escolha deste solo e dessa região foi devido à proximidade da localização do objeto principal desta pesquisa, que são os resíduos finos. A intenção foi a confecção de misturas de solo natural de Goiânia + resíduos finos em diferentes proporções. Cabe ressaltar, que inicialmente esta pesquisa tinha a intenção de coletar amostras de solo da própria região do CEASA/GO, porém em visita ao local detectou-se que não era mais permitida a coleta de solo no local. Diante disso, foi necessário procurar uma maneira de coletar amostras de solos finos similares aos da região da Ceasa. Por intermédio da empresa Sete Engenharia Ltda., que naquele momento estava desenvolvendo um trabalho de sondagem a percussão no interior do aeroporto, foi possível coletar as amostras de solo. O aeroporto internacional de Goiânia dista cerca de 100m da Ceasa/GO, os dois locais são separados apenas pela BR-153.

Jacyntho (2008) utilizou o solo proveniente da região próxima do aeroporto de Goiânia (CEASA) com objetivo de averiguar a interação solo-ligante. A autora constatou que para redução da permeabilidade não era preciso o incremento de aditivos. A pesquisa também avaliou o efeito da emulsão asfáltica para impedir a entrada de água nos sistemas solo-asfalto. Jacintho (2008) realizou ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica, compactação, compressão simples e permeabilidade. Com o auxílio da caracterização foi possível verificar que solo de Goiânia é bastante intemperizado. E nos ensaios de compressão simples foram verificados aumentos de resistências crescentes com o teor de emulsão, no entanto tal resultado está condicionado à umidade de ruptura.

Aquino (2008) avaliou o comportamento mecânico de dois solos residuais, um residual jovem e outro residual maduro (solo da região da CEASA), ambos na condição compactada, por meio do estudo da variação de seus parâmetros de resistência. Nesse trabalho o objetivo foi de verificar os efeitos das mudanças de três fatores relacionados à compactação dos corpos de prova: grau de compactação, desvio de umidade e método de compactação. Salienta-se que ainda foram analisadas as interferências destes fatores nos parâmetros de resistência desses solos.

Aguiar (2008) pesquisou com mesma amostra de Aquino (2008) e avaliou o comportamento das curvas características de solos compactados muito presente da cidade de Goiânia. Este autor caracterizou o comportamento dos solos quanto à compactação com a variação da umidade (ramo seco, umidade ótima e ramo úmido), variação do método de compactação (dinâmica e semi-estática) e variação no grau de compactação. Para análise de sucção, foram utilizados dois métodos de ensaio (câmara de Richards e papel filtro).

Angelim (2005) realizou um trabalho experimental relacionado ao comportamento de solos estabilizados com cal hidratada e ainda relacionou com os fatores intervenientes no processo de estabilização. Ainda no estudo Angelim (2005) focalizou o uso de amostras de solo natural e estabilizado com teores de 3% e 6% de cal. A cal utilizada foi em pó (método convencional) e outro adicionando-se a cal diluída na água de compactação (método proposto). A amostra utilizada na pesquisa de Angelim (2005) foi solo fino laterítico, retirada da CEASA, em Goiânia. Foram realizados ensaios como caracterização granulométrica, limites de consistência, compactação, expansão, CBR e classificação MCT. Constatou-se a por meio da análise de resultados, que a mistura da cal ao solo diluída na água de compactação foi muito mais satisfatória que a forma convencional de mistura. Pelo exposto acima, observa-se a importância e aplicabilidade deste solo em obras geotécnicas, principalmente aquelas relacionadas aos pavimentos rodoviários.

3.2.3. Misturas de solo natural e resíduo fino

As misturas foram constituídas de uma parcela constante que foi o solo natural de Goiânia e duas variáveis, sendo a primeira o resíduo fino advindo da pedreira Araguaia e a segunda o resíduo fino gerado na pedreira Anhanguera. As proporções de resíduos finos em relação ao solo escolhido foram adotadas seguindo as orientações dos diversos estudos realizados com associações com resíduos já realizados (Batalione, 2007; Rezende, 2003 e Araújo, 2008). Assim, as misturas normalmente utilizadas para a aplicabilidade como material componente de uma camada de pavimentação de baixo custo são: 10, 15 e 20% de resíduos finos em relação ao solo natural.

Definida as proporções da quantidade de resíduos em relação ao quantitativo de solo, iniciou-se a preparação das misturas para cada ensaio geotécnico. Tal condição possibilita avaliar e comparar os resultados de cada ensaio para diferentes misturas (solo+resíduo fino).

Com o objetivo de simplificar as denominações das amostras constituídas por misturas (solo+resíduo), para amostras dotadas integralmente por resíduos e aquela formada apenas pelo solo natural de Goiânia, a Tabela 3.1 apresenta a denominação adotada nesta pesquisa:

Tabela 3.1. Nomenclatura adotada para as diversas amostras desta pesquisa.

Amostras	Nomenclatura Adotada
Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	SN
Resíduos finos da Pedreira Araguaia	ARtotal
10% Resíduos finos da pedreira Araguaia + 90% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AR10
15% Resíduos finos da pedreira Araguaia + 85% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AR15
20% Resíduos finos da pedreira Araguaia + 80% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AR20
Resíduo Fino da pedreira Anhanguera	ANtotal
10% Resíduos finos da pedreira Anhanguera + 90% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AN10
15% Resíduos finos da pedreira Anhanguera + 85% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AN15
20% Resíduos finos da pedreira Anhanguera + 80% Solo natural do aeroporto internacional de Goiânia/GO	AN20

3.2.4. Agregados

Para realização dos ensaios com as britas e areia artificial foram coletados cerca de 30kg de cada tipo de agregado produzido pelas duas pedreiras, Araguaia e Anhanguera. Todas as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. A Figura 3.10 mostra a preparação das frações de britas e areia artificial para o ensaio de granulometria.



Figura 3.10. Frações de britas e a areia artificial produzidas na pedreira Anhanguera.

3.3. MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa consistiu na investigação dos resíduos finos, solo natural e das seis misturas (solo+resíduos). Procurou-se primeiramente investigar o comportamento individual dos resíduos puros e do solo natural, posteriormente foram estudadas as características das seis composições, nas proporções de 10, 15 e 20% de resíduos em relação ao solo natural.

Numa seqüência cronológica, para as amostras compostas apenas pelo solo natural (SN) e para as amostra de resíduos puros almejou-se realizar a classificação tipo SUCS HRB/TRB e MCT. Para as misturas houve apenas a classificação segundo a metodologia MCT tradicional, propostas por Nogami & Villibor (1995), uma vez que o objetivo era verificar se as misturas apresentariam um comportamento similar ao de uma amostra arenosa laterítica, essa muito utilizada para fins rodoviários.

A caracterização do comportamento mecânico das seis misturas visou avaliar o comportamento para diversas proporções de resíduos em relação ao solo natural, a fim de evidenciar quais das misturas apresentariam melhores resultados geotécnicos para fins rodoviários.

Os corpos de prova utilizados para a caracterização do comportamento mecânico foram compactados nas condições de umidade ótima e peso específico seco máximo. Esses parâmetros foram obtidos por meio do ensaio de compactação em miniatura, empregando a energia intermediária.

Cabe ressaltar, que a energia intermediária foi adotada para confecção todos os corpos de provas utilizados para os ensaios de Mini-CBR, resistência à compressão simples, sucção e módulo de resiliência. Adotou-se para os corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, Mini-CBR e sucção com papel filtro o processo de compactação semi-estático, ou seja, a compactação foi realizada em uma prensa hidráulica do Laboratório de Geotecnia da UnB.

Ressalta-se que a escolha do tipo de compactação semi-estático, dentre outros fatores, foi devido ao número elevado de corpos de provas submetidos aos ensaios presentes nesta investigação.

A escolha pela energia intermediária é fundamentada pelo fato de que o total de amostras trabalhadas possuem características de solos finos e também com o objetivo de obter melhores parâmetros de resistência.

Por meio da execução do ensaio de Mini-MCV foi possível determinar para cada amostra uma família de curvas de compactação, além de avaliar a inclinação média do ramo seco de todas as amostras.

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados apenas com duas misturas: AR10 e AN15. Essas duas misturas foram escolhidas, pois apresentaram melhores resultados no ensaio de Mini-CBR dentre as misturas estudadas.

Adicionalmente, a investigação técnica foi realizada análise mineralógica e análise química dos dois resíduos finos e do solo natural.

Para complementar os estudos com as amostras resíduos de pedreiras, foram realizados ensaios de caracterização física dos agregados que produzem os respectivos resíduos da pedreira Araguaia e Anhanguera. Cabe ressaltar, que os resultados e suas respectivas análises serão encaminhados até as duas pedreiras, em contrapartida ao apoio da liberação na coleta das amostras de agregados e resíduos finos utilizados nesta pesquisa.

Desta forma, foram realizados os ensaios de granulometria, teor de material pulverulento, massa específica real, massa específica aparente, absorção de água, teores de argilas em torrões e materiais friáveis, índice de forma e abrasão “Los Angeles” com os agregados produzidos nas pedreiras em estudo. Esses ensaios tiveram o objetivo de analisar se estas pedreiras estão produzindo britas dentro dos limites preconizados pela norma de agregado para concreto, NBR 7211(ABNT, 1983).

3.3.1. Caracterização física e classificação das amostras em estudo.

Para a realização dos ensaios de caracterização física, as amostras dos resíduos finos e do solo natural foram preparadas segundo o procedimento recomendado pela NBR 6457 (ABNT, 1986).

No laboratório, foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise Granulométrica, com e sem uso de defloculante, executada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984) e a NBR 13602 (ABNT, 1996), respectivamente. O processo de utilizar o defloculante permite verificar a ocorrência de cimentações das partículas das amostras;
- Limites de liquidez e plasticidade, respectivamente, NBR 6454 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984);
- Peso específico dos grãos conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984).
- Todos esses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Posteriormente a realização dos ensaios de caracterização, as amostras foram efetuadas as metodologias de classificação para cada material, conforme pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Metodologia de classificação aplicada para cada amostra.

Amostra	Metodologia de Classificação
SN	MCT,SUCS, HRB/TRB
Resíduos Finos	MCT,SUCS, HRB/TRB
Misturas	MCT

3.3.2. Microscopia com lupa

Os resíduos finos das duas pedreiras possuem particularidades em sua estrutura interna, uma vez que são provenientes de rochas-mães distintas, o qual reflete no comportamento mecânico e nas características físicas. Por isso, é de grande valia observar a estrutura interna dos finos com o objetivo de compreender às possíveis variações e diferença entre os dois resíduos em estudo.

Para visualização das partículas constituintes dos dois resíduos, foi utilizado o microscópio ProScope HR “Hight Resolution”. Esse microscópio possibilita capturar imagens em tempo real, com ampliação de até 400X por meio de suas diferentes lupas e as imagens são armazená-las em formato PICT e JPEG.

3.3.3. Análises Mineralógicas e Químicas

As análises mineralógicas foram realizadas com os dois resíduos de pedreiras em estudo por meio da difração de Raios-X, no laboratório de DRX do Instituto de Geociência da

Universidade do Pará e foram executados segundo o método de amostra total. As análises foram realizadas em difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (θ/θ), tubos de raios X cerâmico e anodos de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino longo (2200 W- 60 kV), filtro $K\beta$ de níquel e Co ($K\alpha_1=1,789 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino longo (1800 W- 60 kV), filtro $K\beta$ de ferro.

Dana (1969) afirma que naquela época o equipamento utilizado para determinar a mineralogia nas diversas amostras era por meio do difratômetro. Esse equipamento era construído de tal forma que a lâmina contendo a amostra espalhada uniformemente sobre a superfície, quando preso no lugar apropriado, girava no percurso de um feixe de raios-X para frente e para trás enquanto o tubo Geiger, montado sobre um braço, girava entorno dele para colher os feixes de raios-X refletidos. A montagem da lâmina de vidro e o tubo de Geiger movem-se por meio de um motor mediante engrenagens distintas de modo que, enquanto a lâmina e o espécime giram um ângulo de θ , o tubo de Geiger gira um ângulo 2θ . O objetivo deste arranjo consiste em manter uma relação entre a fonte de raios-x, a amostra e o tubo de Geiger.

As análises químicas foram realizadas com o resíduo fino das pedreiras Araguaia e Anhanguera. As análises químicas realizadas foram tipo química total, uma vez que esse método nos permite identificar os elementos constituintes de cada resíduo fino. Esses ensaios foram realizados no laboratório Soloquímica- Análises de Solo Ltda, localizada em Brasília/DF. Os ensaios realizados foram teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , teor de umidade, perda ao fogo, pH em água, pH em KCl, álcalis disponíveis e resíduo insolúvel.

3.3.4. Ensaios específicos para aplicação dos resíduos finos de pedreiras em pavimentação

Para avaliação do comportamento dos resíduos de pedreira, solo natural e das seis misturas foram realizados ensaios de Mini-Compactação, Mini-MCV, perda por imersão, Mini-CBR, expansão e resistência a compressão simples. Adicionalmente foram realizados ensaios de sucção matricial pelo método do papel filtro e módulo de resiliência.

3.3.4.1. Ensaios de Mini- Compactação e ensaios de Mini-MCV

Os ensaios de Mini-Compactação foram realizados conforme o que prescreve na ME 228 (DNER, 1994) e em virtude de ter adotado para todas as amostras a energia intermediária, foi

realizado 6 golpes com soquete pesado (em cada lado). Ao final deste ensaio foi possível obter a curva de compactação de cada amostra, e conseqüentemente, foram determinadas as umidades ótimas e os pesos específicos aparentes secos máximos das amostras. De posse desses valores, foi possível calcular o peso da amostra e a quantidade de água necessária para corpos de provas estarem na condição ótima para os ensaios de Mini-CBR, resistência a compressão simples, sucção e módulo de resiliência.

Os ensaios de Mini-MCV foram realizados conforme o que prescreve na ME 258 (DNER, 1994). Os ensaios de Mini-MCV foram realizados com as amostras ARtotal, ANtotal, SN e com as seis misturas anteriormente citadas. Foram executados também os ensaios de perda de massa por imersão para o solo natural e para as seis misturas. Cabe comentar que para as amostras ARtotal e ANtotal não foi possível realizar a perda por imersão, pois ao imergir os corpos de prova (CPs) o material desprende-se em sua totalidade e dissolveram na água. Com os dados obtidos no ensaio de Mini-MCV e perda de massa por imersão, foram determinados os coeficientes c' , d' e e' , permitindo assim a classificação das amostras de acordo com a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), proposta por Nogami & Villibor (1995).

A Figura 3.11 mostra a aparelhagem utilizada para o ensaio de Mini-MCV e a Figura 3.12 ilustra o ensaio de perda por imersão sobre a mistura AN20.



Figura 3.11. Soquete pequeno e Cilindros utilizados no ensaio de Mini-MCV.



Figura 3.12. Ensaio de perda por imersão com a amostra AN20.

As dimensões de cada corpo de prova em média foram de 5,0 cm de altura por 5,0 cm de diâmetro (Figura 3.13).

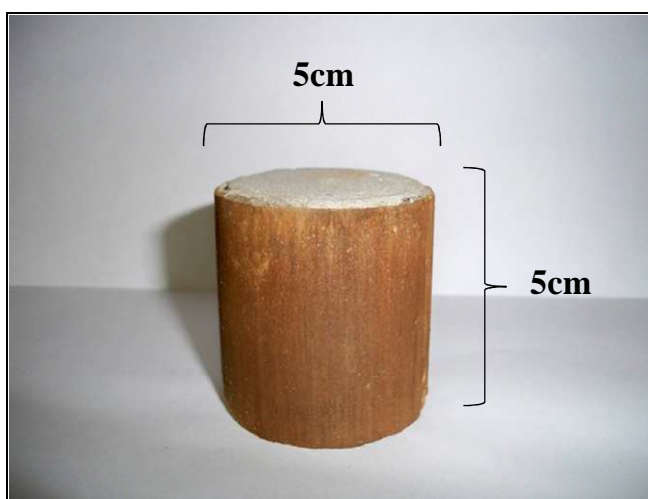


Figura 3.13. Corpo de prova com dimensão de 5cm de altura e 5cm de diâmetro da amostra ARtotal.

3.3.4.2. *Ensaio de Mini-CBR*

Com o objetivo de avaliar a capacidade de suporte das amostras foram realizados ensaios de Mini-CBR. Optou-se pelo ensaio de Mini-CBR, pois são realizados com corpos de prova com dimensões reduzidas. Eles medem, em média, 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura.

Para Muñetón (2009) ao executar o ensaio de Mini-CBR existe a possibilidade de uma grande flexibilidade nas variáveis que influenciam o parâmetro de suporte, podendo-se realizar com

diferentes tipos de sobrecarga, umidades e energias de compactação, e com isso possibilita entender melhor as peculiaridades dos solos tropicais.

Para obter resultados mais representativos e eliminar possíveis dispersões optou-se por realizar para cada amostra um número de quatro corpos de prova.

Os resultados obtidos foram analisados, sendo então calculada uma média simples de capacidade de suporte por amostra. Todos os corpos de prova foram moldados por compactação semi-estática na prensa hidráulica na energia do Proctor intermediário.

Os ensaios de Mini-CBR foram realizados com as amostras de ARtotal, ANtotal, solo natural (SN) e com as seis misturas.

Para realização dos ensaios de Mini-CBR em corpos de prova na umidade ótima foram consideradas as seguintes etapas:

1ª Etapa: Preparação das amostras para compactação semi-estática: A partir do material passante na peneira 2,00 mm, foi calculada a umidade higroscópica para determinar o volume de água para atingir a umidade ótima da amostra. De posse dos dados necessários para compactação, com o volume de água e quantidade de solo seco total para cada corpo de prova, adicionou-se água e homogeneizaram-se cada amostra.

2º Etapa: Compactação dos corpos de prova: O equipamento utilizado nesta etapa compreende molde cilindro, vaselina, funil e prensa hidráulica (Figura 3.14).



Figura 3.14. Compactação semi-estática na prensa do corpo de prova.

Iniciou-se o procedimento com a colocação da vaselina nas paredes dos cilindros e com auxílio do funil foi adicionada a quantidade total da amostra. Os CPs possuíam 5cm de altura e 5 cm de diâmetro. A moldagem foi executada via compactação semi-estático. Com o término da compactação procedia a extração de cada CP, conforme ilustrado na Figura 3.15.



(a)



(b)

Figura 3.15. Corpo de prova sendo extraído. (a) extração do corpo de prova; (b) corpo de prova extraído pronto para o ensaio propriamente dito.

Após a extração, o corpo de prova era pesado e medido com auxílio de um paquímetro pequeno e depois transferido para o molde cilindro bipartido de PVC e travados com duas braçadeiras de alumínio (Figura 3.16). Ressalta-se que o molde de PVC apresenta as mesmas dimensões do cilindro utilizado na confecção das amostras MCT.



(a)



(b)

Figura 3.16. (a) Molde cilindro bipartido de PVC; (b) Molde cilindro bipartido de PVC com as Braçadeiras de Alumínio.

A extração e a transferência para o cilindro bipartido foi realizada apenas com os corpos de prova composto pelas misturas. Para os corpos de provas com 100% resíduo fino não foi realizada a extração, executou-se o ensaio de Mini-CBR no próprio cilindro metálico padrão (Figura 3.17).



Figura 3.17. Ensaio de Mini-CBR com a amostra ANtotal.

3º Etapa: Medições na prensa para obter a curva tensão x penetração: O equipamento utilizado nesta etapa compreende em uma prensa, uma célula de carga de 200kgf, pistão e display de leitura de tensões aplicadas. Cada corpo de prova composto pelas misturas pré-definidas e também para a amostra de solo natural foi posicionado sobre a base da prensa. A base do prato foi elevada até que a ponta do pistão, com 16 mm de diâmetro e comprimento mínimo de 15 cm, encostasse no topo do corpo de prova. Um extensômetro foi acoplado ao conjunto para a determinação das penetrações.

A velocidade de penetração do pistão nos corpos de prova foi de 1,14 mm/min. As leituras no display digital ligado a célula de carga foram efetuadas quando corresponderam às penetrações de 0,0; 0,20; 0,50; 0,70; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 mm. Estas leituras obtidas são multiplicadas pela constante da célula de carga que é igual a 1,777Kgf/div.

Para os corpos de provas do solo natural e das misturas executou-se o ensaio de Mini-CBR no cilindro bipartido de PVC e travados com duas braçadeiras de alumínio (Figura 3.18).



Figura 3.18. Ensaio de Mini-CBR com corpos de prova das misturas.

Para o ensaio de Mini-CBR, para corpos de prova após a imersão, pode-se descrever em quatro etapas importantes:

1º Etapa: Montagem do conjunto principal: O material utilizado nesta etapa compreende molde cilindro bipartido de PVC (dimensões – 10,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro), extensômetro (graduado em 0,01mm), dois discos de papel filtro, sobrecarga padrão, base e assentador como pode ser visto na Figura 3.19. Os moldes de PVC, com os corpos de prova, foram colocados sobre uma base com um disco de papel filtro e outro na parte superior do corpo de prova (Figura 3.20 Montagem do ensaio de Mini-CBR: (a) Base com o primeiro papel filtro (b) Colocação do molde de PVC (c) colocação do molde com o corpo de prova Sobre a Base (d) Colocação do extensômetro).



Figura 3.19. Material utilizado para a imersão do corpo de prova.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.20. Montagem do ensaio Mini-CBR: (a) Base com o primeiro papel filtro; (b) colocação do molde de PVC; (c) Colocação do molde com o CP sobre a base; (d) Colocação do extensômetro.

2ª Etapa: Medição da expansão: Após determinar a altura inicial do CP por meio do extensômetro, o conjunto principal foi submerso por um período de 24 horas (Figura 3.21), ficaram imersos por 24 h. Obteve-se a expansão verificando a variação da altura do CP após este período de imersão em água.



Figura 3.21. Corpos de prova imersos em tanque.

Ao final do processo de imersão os CPs foram retirados do tanque e colocados em uma bandeja metálica, inclinados durante 15 minutos com intuito de escorrer a água.

3ª Etapa. Determinação da capacidade de suporte Mini-CBR: Após dissipação da poropressão, cada corpo de prova foi posicionada na prensa, cuja capacidade foi de 200 kgf. A base da prensa foi elevada até que a ponta do pistão, encostasse no topo do corpo de prova. Um extensômetro foi acoplado ao conjunto para a determinação da evolução das penetrações. A Figura 3.22 destaca a aparelhagem utilizada no ensaio.

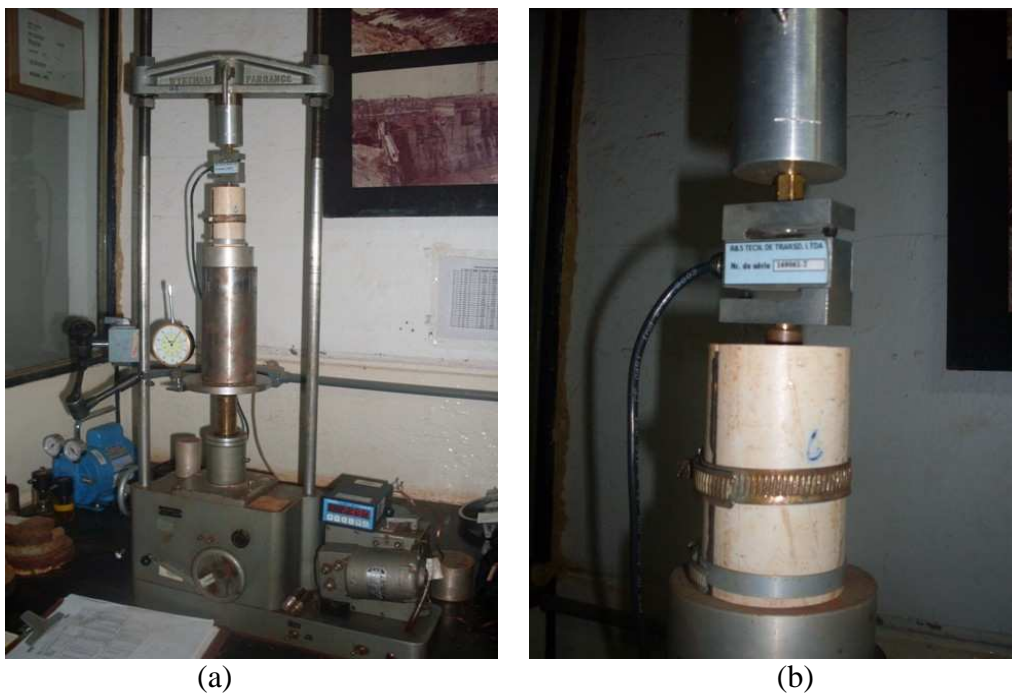


Figura 3.22. Determinação da Capacidade de Suporte Mini-CBR: (a) Prensa Utilizada, (b) Detalhe do Molde com o Corpo de Prova.

Igualmente aos ensaios sem imersão, a velocidade de penetração do pistão nos corpos de prova foi de 1,14 mm/min. As leituras no display digital ligado à célula de carga foram efetuadas quando corresponderam às penetrações de 0,0; 0,20; 0,50; 0,70; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 mm. Estas leituras obtidas são multiplicadas pela constante da célula de carga de 200 Kgf que é igual a 1,777kgf/div.

Após a realização das leituras, o prato foi abaixado para a retirada do molde e em seguida, foi retirado o corpo de prova para determinação do teor de umidade da amostra ensaiada. Determinou-se o valor da expansão e Mini-CBR com os dados obtidos durante a execução do ensaio.

3.3.4.3. *Ensaio de Resistência à Compressão Simples*

A metodologia de preparação dos CPs para o ensaio de resistência a compressão simples foi semelhante aos utilizados nos ensaios de Mini-CBR, divergindo-se apenas no número de camadas por corpo de prova e altura do corpo de prova. Uma vez que o corpo de prova destinado para o ensaio de Mini-CBR era composto por única camada, com aproximadamente 5,0 cm de altura. Para os CPs que foram submetidos ao ensaio de compressão simples, foram utilizadas camadas de alturas iguais. Os CPs foram compactados semi-estaticamente, na faixa ótima de umidade e na energia intermediária. Os CPs compactados apresentavam aproximadamente 5,0 cm de diâmetro por 10,0 cm de altura.

A velocidade de aplicação da carga durante o ensaio foi de 0,305 mm/min, o que possibilitava uma leitura satisfatória e ainda o tempo gasto para 1 (um) corpo de prova não ultrapassaria os 15 minutos.

Os ensaios de compressão simples foram realizados de acordo com os procedimentos prescrito na norma NBR 12.770 (ABNT, 1992).

A Figura 3.23 mostra o ensaio de compressão simples sendo executado com célula de carga de 200 kgf.



Figura 3.23. Detalhe do corpo de prova recebendo o carregamento.

Simultaneamente a leitura da carga observava-se o esquema das trincas formadas nos CPs. Com base nestas observações era realizado um desenho esquemático do processo de ruptura e

posteriormente era possível comparar os diversos tipos e formatos das trincas presentes para cada amostra ensaiada.

Igualmente aos ensaios de Mini-CBR foram confeccionados quatro CPs para cada amostra, na condição de umidade ótima e utilizando energia do Proctor intermediário, obtendo assim uma maior representatividade dos resultados. Foi determinada também a umidade de cada corpo de prova objetivando avaliar os desvios de umidades em relação à umidade ótima.

3.3.4.4. *Ensaio de Sucção*

Com o objetivo de buscar informações complementares e ao mesmo tempo que viabilizasse entender as peculiaridades de cada amostra nos demais ensaios mecânicos foi realizado o ensaio de sucção matricial. Esse foi realizado no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB).

Para determinar a sucção matricial de todas as amostras adotou-se a técnica do papel filtro (Whatman n° 42.), seguindo a D 5298 (ASTM, 1992). Para realizar cada determinação da sucção foram utilizados três papéis filtro, sendo dois de diâmetro maior e um de diâmetro menor situado entre os dois maiores. Na Figura 3.24 é apresentado o conjunto de papéis filtro colocados em contato direto com o corpo de prova para a realização do ensaio de sucção.

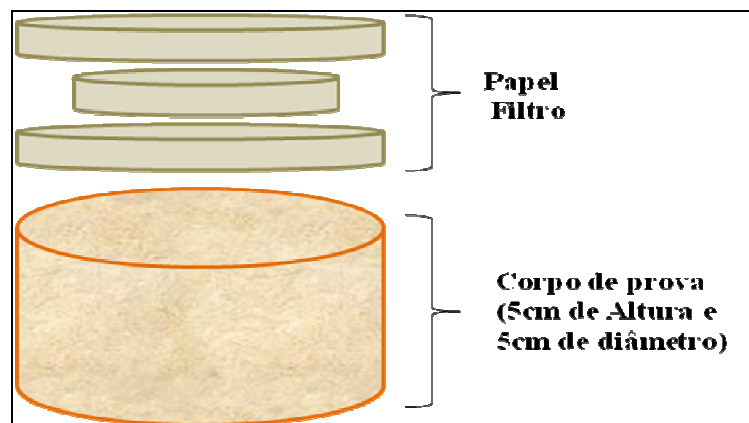


Figura 3.24. Detalhes da montagem do ensaio com papel filtro.

Após a montagem, o conjunto composto pelo corpo de prova e os papéis filtros foram envolvido com um papel filme de PVC bem firme e embalado com folha de alumínio. Todos os conjuntos receberam identificação compatível com a respectiva amostra e iniciou-se o processo de cura. Os corpos de prova foram armazenados em caixas de isopor e colocados na câmara úmida, durante um período de 15 dias, conforme a norma.

Decorrido os 15 dias relativos à cura, realizou-se, para cada corpo de prova, a pesagem em balança de precisão (0,0001g) do papel filtro com o diâmetro menor e do papel filtro de diâmetro maior (que não estava em contato direto com o corpo de prova). Os papéis filtro foram submetidos à secagem em estufa, numa temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 3 horas e após isso pesou-se novamente todos os papéis filtro.

Os corpos de provas foram compactados igualmente aos corpos de provas compactados utilizados para os ensaios de Mini-CBR, ou seja, apresentavam 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura e compactados na faixa de umidade ótima. Foram compactados um total de 4 (quatro) corpos de provas por amostra.

3.3.4.5. Módulo de Resiliência

Para Medina & Motta (2005) o termo resiliência significa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações e corresponde à energia potencial de deformação. No caso de misturas asfálticas, o módulo de resiliência é conceituado como a razão entre a tensão de tração aplicada no corpo-de-prova e a deformação de tração elástica produzida. Assim, visando obter maiores informações a respeito da utilização do resíduo em obras viárias propõe-se a realização de ensaios de módulo de resiliência nas misturas que apresentaram melhor desempenho nas análises anteriores.

O ensaio de módulo de resiliência tem o objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos solos submetidos a carregamentos cíclicos e este foi executado de acordo com os procedimentos preconizados pela T 307 (AASHTO, 1999). O critério adotado para a escolha das amostras para realização do ensaio de módulo de resiliência foi baseado nos resultados dos ensaios de Mini-CBR, sendo escolhidas àquelas que apresentaram melhores desempenhos. As amostras selecionadas para o ensaio de módulo de resiliência foram: AR10 e AN15. O ensaio foi executado no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) da Universidade de Brasília. .

No âmbito da compactação dos CPs, este ensaio foi realizado de acordo com a técnica empregada no laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transporte (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Portanto, os CPs foram obtidos pela compactação em cinco camadas considerando os parâmetros de umidade ótima e

peso específico máximo obtido para cada amostra. Para que os CPs estivessem sendo compactados na energia intermediária foi necessário 19 golpes por camada, com soquete grande. Essa compactação foi realizada dentro do cilindro padrão com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na umidade ótima.

Na Figura 3.25 são mostrados os procedimentos detalhados desde a execução da compactação do corpo de prova até a montagem dos corpos de prova na célula triaxial cíclica.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.25. Etapas do Ensaio de Módulo de Resiliência no LER. (a) Soquete grande, base do cilindro, cilindro (10 x 20 cm); (b) Compactação do CP; (c) Extração do CP; (d) CP no interior da célula do triaxial e envolto pela membrana de borracha; (e) visão panorâmica do conjunto necessário para o ensaio de módulo de resiliência.

Após a compactação cada corpo de prova foi extraído do cilindro padrão e depois envolvido por uma membrana de borracha e montada na célula triaxial cíclica. Cabe ressaltar, que a locação dos LVDT foi na parte externa da célula triaxial. Após terminada a montagem da célula, iniciou-se a aplicação do pares de tensões confinantes e desviadoras.

3.3.5. Ensaio realizados com os agregados das pedreiras Araguaia e Anhanguera

Além dos ensaios com os resíduos finos e misturas destinado ao aproveitamento para fins rodoviários, esta pesquisa focou também o estudo dos agregados que produzem os respectivos resíduos finos da pedra Araguaia e Anhanguera. Cabe ressaltar, que os resultados dos ensaios realizados com os agregados estão apresentados no apêndice A, B, C, D e E.

A partir de ensaios realizados em laboratório, gerou-se um banco de dados contendo as principais características da pedra britada proveniente do micaxisto (pedreira Araguaia) e da rocha granito (pedreira Anhanguera). Adicionalmente, foi verificado se as características (granulometria, teor de material pulverulento, índice de forma, abrasão “los Angeles”, absorção, teores de argilas em torrões e materiais friáveis) das britas produzidas nestas pedreiras estão dentro do limites propostos relacionado aos agregados para o concreto, NBR 7211 (ABNT, 1983).

O ensaio de análise granulométrica foi realizado com todas as frações de britas (brita 2, brita 1, brita 0) e areia artificial das duas pedreiras. Os demais ensaios foram realizados com a brita 1 de cada pedreira. A utilização de apenas da brita 1 de cada pedreira se deu pela indisponibilidade de tempo e local físico pra realização dos demais ensaios.

3.3.5.1. Análise Granulométrica e Teor de materiais pulverulentos

O ensaio de análise granulométrica foi executado de acordo com os procedimentos prescrito na norma NBR NM 248 (ABNT, 2001) e foi realizado no Laboratório de Ensaaios de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília. O teor de material pulverulento foi realizado de acordo com a NBR 7219 (ABNT, 1987).

3.3.5.2. Determinação de massa específica real e aparente e absorção de água

Para a determinação das massas específicas e absorção de água utilizou-se a norma NBR NM 53 (ABNT, 2003). Este ensaio foi executado no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

3.3.5.3. Teores de argilas em torrões e materiais friáveis

Para determinar a quantidade de torrões de argilas e partículas friáveis foi realizado o ensaio proposto pela NBR 7218 (ABNT, 1987). Este ensaio foi executado no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Na norma de agregados para concreto, NBR 7211 (1983), estabelece em termos percentuais de teores de argilas em torrões e materiais friáveis, os seguintes limites em concreto: para o agregado graúdo é limitado a 1% para concreto aparente, 2% para concreto sujeito ao desgaste superficial e 3% para os demais concretos.

3.3.5.4. Índice de Forma

Esse ensaio é de grande importância para avaliação preliminar dos agregados e resíduos finos quanto à resistência e trabalhabilidade, quando utilizados em concreto.

Esse ensaio foi realizado para se determinar a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado, definindo-a pelo índice de forma. Esse método é

baseado na norma ME 086 (DNER, 1994) e foi executado no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) da Universidade de Brasília.

Para realização deste ensaio, realizou inicialmente uma avaliação das características granulométricas do material e verificar sua correspondência com as graduações apresentadas pela norma ME 086. Após a compatibilização da graduação, foram selecionadas as quantidades respectivas a cada uma das frações correspondentes, indicadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Determinação da graduação do material após análise granulométrica (Modificado da ME 086, DNER 1994).

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Pesos das frações de amostra (g)	Crivos redutores correspondentes (mm) **	
	Passando*	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76	63,5	3000	38	25
	63,5	50	3000	32	21
	50	38	3000	25	17
	38	32	3000	19	12,7
B	32	25	2000	16	10,5
	25	19	2000	12,7	8,5
	19	16	2000	9,5	6,3
C	19	16	2000	9,5	6,3
	16	12,7	2000	8	5,3
	12,7	9,5	2000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1000	4,8	3,2

* Tamanho da diretriz ** Abertura em tamanhos comerciais

Com auxílio da Tabela 3.3 foi possível verificar quantidade de amostra necessária para realização do ensaio e também verificou-se a seqüência de peneiras do tipo crivo I e crivo II. Os dois tipos de crivos utilizados podem ser observados nas Figuras 3.26 e 3.27.



(a)



(b)

Figura 3.26. Crivo I- (a) conjunto com crivo de abertura circular e suporte de peneiramento; (b) seqüências de crivos circulares.



(a)



(b)

Figura 3.27. Crivo II- (a) conjunto com crivo II e suporte de peneiramento; (b) seqüências de crivos II.

O procedimento foi feito com todas as frações que compõem a graduação escolhida. De acordo com a ME 086 (DNER, 1994), o cálculo do índice de forma é dado pela equação:

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{(100 * n)} \quad (3.1)$$

Sabe-se que:

f – índice de forma

P1 – soma das percentagens retidas no crivo I

P2 – soma das percentagens retidas no crivo II

n – número de frações que compõem a graduação escolhida.

3.3.5.5. *Abrasão “Los Angeles”*

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi executado no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) da Universidade de Brasília. Nesse ensaio trabalhou-se apenas com a fração brita n° 1 da pedreira Araguaia e da pedreira Anhanguera.

O ensaio objetivou avaliar a resistência do agregado ao choque com bolas de aço dentro de um cilindro giratório (Figura 3.28), verificando desse modo se o agregado é resistente ou não a quebra. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ME 035 (DNER, 1998).



Figura 3.28. Cilindro giratório do LER.

Com base na distribuição granulométrica foram obtidas amostras de graduações entre as peneiras 19 mm e 12,5mm; 12,5mm e 9,5mm com 2500g, totalizando 5000g de amostra lavada e, posteriormente colocada na estufa (à temperatura entre 105°C e 110°C) até a constância de peso.

A carga abrasiva a ser utilizada também baseou-se na distribuição granulométrica das amostras e definiu-se a utilização de 11 esferas de aço totalizando 4584g.

O material selecionado foi então pesado (m_n) e colocado juntamente com as esferas dentro do tambor giratório, e submetido a 500 rotações do tambor a uma velocidade 30rpm. Em seguida, todo o material foi retirado do tambor e lavado na peneira 1,7mm, rejeitando-se o material passante. O material restante foi levado à estufa e após seco e resfriado foi pesado (m'_n). A fórmula utilizada para calcular a abrasão “Los Angeles” (A_n) é:

$$A_n = \frac{(m_n - m'_n)}{m_n} * 100 \quad (3.2)$$

Praticamente todas as especificações de serviços relacionadas à confecção de misturas asfálticas recomendam esse ensaio para o controle de qualidade dos agregados minerais envolvidos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de laboratório, esses foram executados de acordo com as metodologias explicitadas no capítulo anterior.

Com o objetivo de facilitar a metodologia da análise, esses resultados serão apresentados de acordo com a seguinte seqüência:

- Caracterização física e classificação das amostras ARtotal, ANtotal, SN e das seis misturas (AR10, AR15, AR20, AN10, AN15 E AN20);
- Caracterização estrutural básica por meio microscopia com lupa dos resíduos finos da pedreira Araguaia (ARtotal) e Anhanguera (ANtotal);
- Caracterização mineralógica das amostras ARtotal, ANtotal e SN;
- Caracterização química das amostras ARtotal, ANtotal e SN;
- Resultados dos ensaios de Mini-MCV, perda por imersão, Mini-CBR, expansão, compressão simples e sucção com papel filtro das amostras ARtotal, ANtotal, SN e das seis misturas;
- Correlações entre os dados obtidos no ensaio de sucção e os demais ensaios mecânicos realizados;
- Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com as duas misturas que apresentaram melhores desempenhos no ensaio de Mini-CBR;

Considerando o programa experimental proposto, a Tabela 4.1 apresenta o quantitativo de ensaios realizados nesta pesquisa para as amostras de resíduos finos da pedreira Araguaia (ARtotal), resíduos finos da pedreira Anhanguera (ANtotal), solo natural de Goiânia (SN) e as seis misturas.

Cabe ressaltar que as seis misturas utilizadas nesta pesquisa foram 10, 15 e 20% de resíduos finos em relação quantidade de solo natural de Goiânia.

Tabela 4.1. Quantitativo de ensaios de laboratório realizados com os resíduos finos, solo e misturas.

Ensaio	Quantidade por amostras					Total
	ARtotal	ANtotal	SN	Misturas (AR10, AR15 e AR20)	Misturas (AN10, AN15 e AN20)	
Granulometria	2	2	2			6
Peso específico dos Grãos	2	2	2	3	3	12
Limite de liquidez	1	1	1			3
Limite de Plasticidade	1	1	1			3
Mini-MCV	1	1	1	3	3	9
Perda de Massa por imersão	1	1	1	3	3	9
Mini-CBR	1	1	1	3	3	9
Expansão	1	1	1	3	3	9
Compressão Simples	1	1	1	3	3	9
Sucção	1	1		3	3	8
Módulo de Resiliência				1	1	2
Microscopia com Lupa	1	1				2
Raios-X	2	2				4
Análise Química	1	1				2
TOTAL						87

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO

4.1.1. Resíduos Finos

Para a caracterização física dos resíduos finos foram realizados ensaios de granulometria, com e sem uso do defloculante (NBR 7181/1984 e NBR 13602/1996, respectivamente), limites de consistências e peso específico dos grãos de acordo com a metodologia proposta pela ABNT. Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para cada uma das amostras de resíduos finos da pedreira Araguaia e da pedreira Anhanguera, respectivamente.

Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados dos ensaios de caracterização física das amostras ARtotal e ANtotal. Vale ressaltar que também para obtenção da curva granulométrica dos resíduos finos foi adotado procedimento de realizar a fase de sedimentação sem o uso de defloculante.

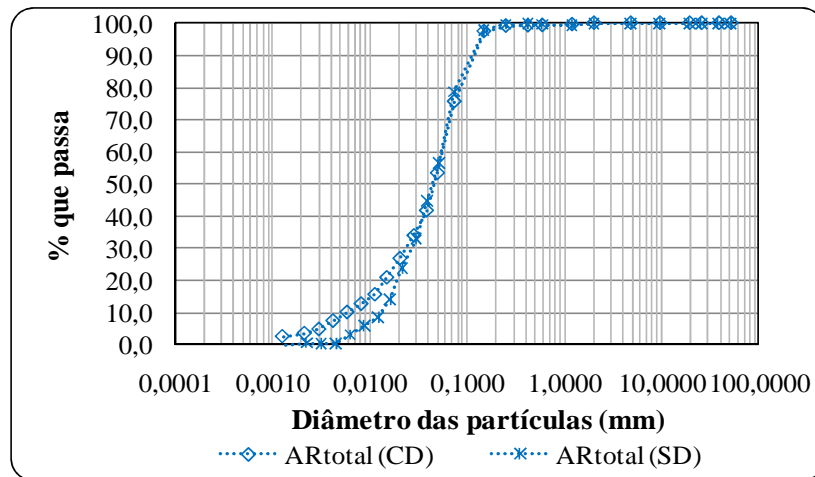


Figura 4.1. Curvas granulométricas da amostra ARtotal.

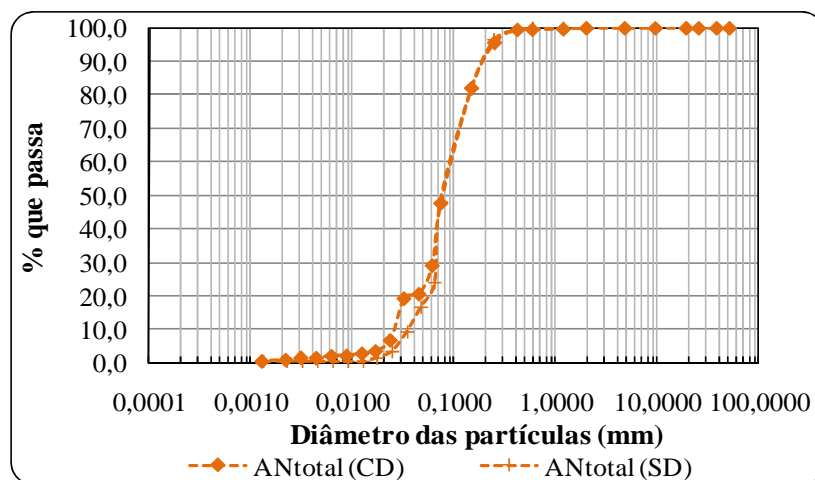


Figura 4.2. Curvas granulométricas da amostra ANtotal.

Tabela 4.2 Caracterização física dos resíduos finos das duas pedreiras em estudo.

Amostras	Distribuição Granulométrica (%)						Índice Granulométricos		Limites de Consistências			Peso Específico dos Grãos (kN/m³)
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila	CNU	CC	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)	
		Grossa	Media	Fina								
ARtotal (CD)	0	0,7	1	34	59,5	4,4	10,91	1,89	NP	NP	NP	28,20
ARtotal (SD)	0	0,3	0,8	33	64,5	1	-	-	NP	NP	NP	28,20
ANtotal (CD)	0	0,4	10,6	60	27,4	1,2	3,60	1,60	NP	NP	NP	27,40
ANtotal (SD)	0	0,4	10,5	67	21,1	0,7	-	-	NP	NP	NP	27,40

CD = com defloculante, SD = sem defloculante

Observando a Figura 4.1, pode-se perceber que as curvas granulométricas obtidas para a amostra ARtotal não apresentou variações significativas com ou sem uso de defloculante. Esse comportamento pode ser explicado devido o resíduo ter pouca agregação entre as

partículas. A mesma tendência foi observada nas curvas granulométricas da amostra ANtotal (Figura 4.2). Avaliando as porcentagens obtidas para as diferentes frações constituintes dos resíduos apresentada na Tabela 4.2 segundo a escala da ABNT, constatou-se que a amostra ARtotal trata-se de uma amostra com granulometria típica de um silte arenoso e a amostra ANtotal por apresentar maior porcentagem na fração de areia, pode ser considerada como um solo areno-siltoso.

Ainda, ao avaliar a textura destes resíduos, percebeu-se que a amostra ANtotal apresentou maior porcentagem de fração grossa do que a amostra ARtotal. A amostra ANtotal apresentou 71,3 % de fração grossa e 28,7 % de fração fina, enquanto ARtotal tem 36,1% de fração grossa e 63,9 % de fração fina. É importante ressaltar que estes valores foram obtidos com base nas análises realizadas com o uso de defloculante no ensaio de sedimentação.

O peso específico dos grãos da amostra ARtotal (resíduo proveniente do beneficiamento de um micaxisto) apresentou o valor médio de 28,20 kN/m³ e já para o material ANtotal (resíduo proveniente do beneficiamento de uma rocha granítica) foi encontrado o valor médio de 27,40 kN/m³, sugerindo assim uma pequena diferença entre os minerais principais predominantes nos dois resíduo finos analisados.

Os resíduos finos das duas pedreiras em estudo não apresentaram características de plasticidade, e foram classificados como amostras não-plásticas. Apesar das amostras dos resíduos finos serem formadas por uma porcentagem significativas de partículas finas, esses não possuem as mesmas propriedades de um solo natural formado por materiais finos (siltes e argilas). Ressalta-se que os finos presentes nos resíduos são materiais oriundos de uma seqüência de britagem e lavagem de rochas.

Em relação às amostras de ARtotal e ANtotal constatou-se que o índice de grupo obtido foi negativo. A tentativa de proceder à classificação segundo o proposto pela metodologia SUCS e TRB foi dificultada, uma vez que os critérios das duas classificações para materiais com porcentagem de finos maiores que 35% estão relacionados à propriedade de plasticidade. Assim estas classificações foram penalizadas, principalmente, devido ao alto teor de partículas com diâmetro correspondente a fração de silte presente nos dois resíduos finos. Embora, acredita-se que as amostras ARtotal e ANtotal possam ser classificadas como A-4 no sistema de classifica TRB e ML no sistema SUCS.

Primeiramente com o objetivo de classificar as amostras ARtotal e ANtotal, segundo a metodologia MCT, foram realizados os ensaios de Mini-MCV de acordo com o proposto por Nogami & Villibor (1995). Esses ensaios foram fundamentais para a determinação dos parâmetros c' e d' . Cabe ressaltar que a classificação MCT das amostras ARtotal e ANtotal também foram prejudicadas uma vez que não foi possível realizar com êxito o ensaio de perda por imersão, pois ao tentar imergir os corpos de provas (CPs), em questão de segundos, os resíduos finos se desprenderam em sua totalidade do molde e estes orientaram-se para a superfície d'água. Sendo assim, não foi possível a determinação do P_i e, conseqüentemente, não houve condições de calcular o coeficiente e' . Ressalta-se que ainda assim foram calculados os coeficientes c' e d' obtidos para as duas amostras de resíduos. A amostra ARtotal apresentou $c'=0,6$ e $d'=0,5$ e a amostra ANtotal $c'=0,4$ e $d'=0,32$. A diferença dos coeficientes d' encontrados para os dois resíduos estudados está diretamente relacionada com a distribuição granulométrica de cada resíduo. Maiores detalhes da metodologia desses ensaios estão apresentados no capítulo anterior.

4.1.2. Solo Natural de Goiânia (SN)

Para a caracterização física do solo de Goiânia foram realizados os ensaios de granulometria, com e sem o uso de defloculante, limites de consistências e peso específico dos grãos. Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para a amostra SN.

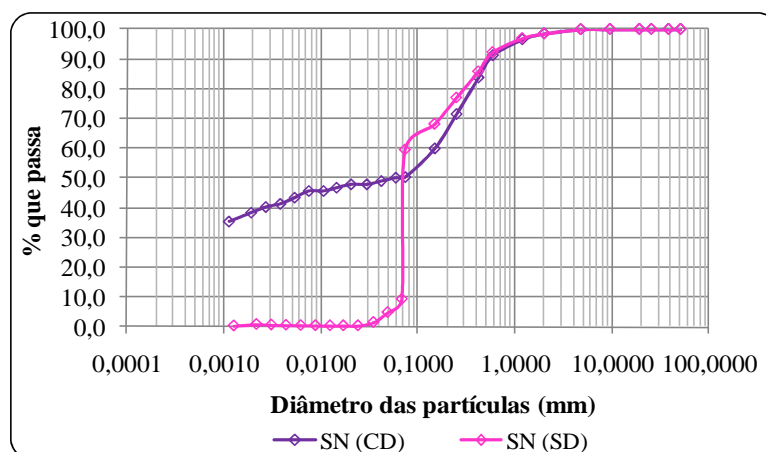


Figura 4.3. Resultados da granulometria do solo natural de Goiânia com e sem defloculante.

Considerando a distribuição granulométrica obtida pela amostra de solo natural, a Tabela 4.3 apresenta um resumo das porcentagens das diferentes frações presentes nesse solo. Essa tabela também mostra os limites de consistências e o peso específico dos grãos do solo de Goiânia.

Tabela 4.3. Caracterização física do solo natural de Goiânia, limites de consistências e peso específico dos grãos.

Amostras	Distribuição Granulométrica (%)					Limites de Consistências			Peso Específico dos Grãos (kN/m ³)	
	Pedregulho	Areia			Silte	Argila	WL (%)	WP (%)		IP (%)
		Grossa	Media	Fina						
SN (CD)	1,4	7,3	25,5	15,6	8,5	41,7	48	27	21	27,78
SN (SD)	1,4	6,2	19,7	65,3	6,1	1,2	48	27	21	27,78

CD = com defloculante, SD = sem defloculante

Conforme os dados obtidos da Figura 4.3 e Tabela 4.3, o solo natural de Goiânia pode ser classificado pelas metodologias SUCS e TRB, respectivamente, em CL e A-7-6, condizente com as análises táctil-visuais previamente realizadas em campo. O peso específico dos grãos encontrado foi de 27,78 kN/m³. De acordo com a Figura 4.3, a análise granulométrica mostra que o solo de Goiânia, sem defloculante, possui 92,6% de fração grossa e 7,4% de frações finas. Ao utilizar o defloculante hexametáfosfato de sódio no ensaio de sedimentação, percebe-se um aumento significativo da porcentagem de frações finas, obtendo valores de 49,8 % para a fração grossa e 50,20 % para as frações finas. Evidenciando o alto grau de agregação deste material.

É importante comentar que para a classificação MCT tradicional do solo natural de Goiânia foram realizados os ensaios de Mini-MCV e perda por imersão. Os coeficientes encontrados e a classificação MCT do solo natural estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Classificação tradicional MCT para o solo Goiânia.

Amostra	Solo Goiânia	
Tradicional	c'	1,7
	d'	68
	Pi (%)	45
	e'	0,91
	Grupo MCT	LG'
	Classificação	Solos Argilosos Lateríticos

De acordo com o que foi apresentado no capítulo anterior, o solo natural utilizado nesta pesquisa foi obtido na região do aeroporto internacional de Goiânia. Os fatores preponderantes para esta escolha foram relacionados ao grande volume de material disponível, proximidade às duas pedreiras e a conseqüente viabilidade de utilização.

Acrescenta-se ainda grande número de investigações realizadas em solos com características bastante semelhantes e identificados em diversas regiões da cidade de Goiânia.

Ilustrando este comportamento típico pode-se destacar as pesquisas realizadas por Guimarães & Jacintho (2008) com o solo da Região da CEASA/GO, essa região da CEASA é muito próxima ao aeroporto de Goiânia. Na Tabela 4.5 são evidenciadas as principais características físicas e a classificação desse solo segundo a metodologia SUCS e TRB.

Tabela 4.5. Resultado dos ensaios de caracterização e classificação dos solos (Guimarães & Jacintho, 2008).

Amostra		Solo Goiânia
Peso específico dos Grãos (kN/m ³)		27,78
Com defloculante (1)	Pedregulho (%)	0,9
	Areia (%)	37,2
	Silte (%)	23,6
	Argila (%)	38,3
Sem defloculante	Pedregulho (%)	0,9
	Areia (%)	70,6
	Silte (%)	28,5
	Argila (%)	0
Limite de Liquidez (%)		45
Limite de Plasticidade (%)		25
Índice de Plasticidade		20
Índice de Atividade (2)		0,48
Classificação SUCS		CL
Classificação TRB		A-7-6

(1) Classificação granulométrica realizada segundo NBR 6502 (ABNT, 1995);

(2) Considerando % menor que 0,42 mm com defloculante.

Na Tabela 4.6 são apresentados os índices e coeficientes utilizados na classificação MCT tradicional obtidos por Guimarães & Jacintho (2008) utilizando os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão. Essa tabela também apresenta a classificação final obtida considerando esta metodologia.

Tabela 4.6. Parâmetros da Metodologia MCT: Classificação Tradicional (modificado Guimarães & Jacintho, 2008).

Amostra		Solo Goiânia
Tradicional	c'	1,80
	d'	74,4
	Pi (%)	34
	e'	0,85
	Grupo MCT	LG'
	Classificação	Argilosos Lateríticos

É importante observar que os resultados obtidos por Guimarães & Jacintho (2008) são semelhantes aos obtidos nesta pesquisa, mostrando assim que há características comuns entre estes dois solos.

4.1.3. Misturas de solo natural e resíduos finos

Nessas avaliações foi utilizado, como descrito anteriormente, o solo natural típico da região de Goiânia. Este procedimento visou avaliar as potencialidades do aproveitamento desses resíduos finos em associações com um solo natural típico da região onde são gerados os resíduos para utilizá-los em aplicações geotécnicas, minimizando os custos de transporte.

Considerando as associações solo-resíduos propostas e detalhadas no Capítulo 3, foi considerado também o método de classificação MCT tradicional proposto por Nogami & Villibor (1995). É importante ressaltar que no caso das misturas, como se trata de um solo produzido artificialmente, a classificação proposta visava basicamente relacionar o comportamento típico do material dentro da proposta de classificação via metodologia MCT, uma vez que se buscava um material com comportamento laterítico e adequado a utilização em pavimentação. Na Tabela 4.7 é apresentada a classificação das seis misturas realizada mediante os métodos MCT tradicional.

Assim de acordo com a Tabela 4.7 pode-se observar que as seis misturas em estudo foram classificadas pela metodologia MCT como amostras arenosas lateríticas - LA'. E, conseqüentemente, poderiam baseados nesta proposta serem utilizados como materiais apropriados em obras viárias.

Tabela 4.7. Ensaio da metodologia MCT: classificação tradicional.

Amostra		AR10	AR15	AR20	AN10	AN15	AN20
Tradicional	c'	1,4	0,9	0,95	0,77	0,73	1,00
	d'	57,32	91,14	109,72	43,91	59,50	55,56
	Pi (%)	85	75	112	95	95	13
	e'	0,67	0,99	1,09	1,12	1,09	0,79
	Grupo MCT	LA'	LA'	LA'	LA'	LA'	LA'
	Classificação	Arenosos Lateríticos	Arenosos Lateríticos	Arenosos Lateríticos	Arenosos Lateríticos	Arenosos Lateríticos	Arenosos Lateríticos

Analisando a Tabela 4.7, percebe-se que o coeficiente c' apresentou-se abaixo de 1,5 caracterizando, segundo Nogami & Villibor (1995) como um solo arenoso siltoso. Esses autores comentam que valores baixos de c' , isto é menores que um, caracterizam areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos.

Foram obtidos também valores elevados do coeficiente d' . Esses valores encontrados denotam, segundo Nogami & Villibor (1995), amostras areias finas argilosas, corroborando a classificação encontrada.

Cabe comentar que os valores obtidos em porcentagens da perda por imersão para as misturas AR10, AR15, AR20, AN10 e AN15 foram superiores ao P_i encontrado para o solo natural.

De forma a complementar estes estudos foram determinados os pesos específicos dos grãos de todas as misturas. Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados dos pesos específicos dos grãos das seis composições.

Tabela 4.8. Peso específico das seis misturas.

Amostras	Peso Específico (kN/m³)
AR10	27,82
AR15	27,84
AR20	27,86
AN10	27,74
AN15	27,72
AN20	27,70

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 4.8, percebe-se que ao incluir uma maior porcentagem de resíduos finos da pedreira Araguaia às misturas, houve um pequeno aumento no valor do peso específico dos grãos das composições, evidenciando o efeito da composição mineralógica deste resíduo, pois a amostra ARtotal apresentou um peso específico dos grãos levemente superior quando comparado ao do solo natural. Em contrapartida, ao incluir nas associações maior porcentagem do resíduo da pedreira Anhanguera, houve um leve decréscimo do peso específico dos grãos nas misturas. Isto ocorreu pelo fato do peso específico dos grãos da amostra ANtotal ser um pouco inferior ao do solo.

4.1.4. Caracterização Estrutural dos resíduos finos

4.1.4.1. Resíduos Finos (*ARtotal* e *ANtotal*)

As amostras de resíduos finos das pedreiras Araguaia e Anhanguera, respectivamente, *ARtotal* e *ANtotal*, foram submetidas a microscopia com lupa por meio do microscópio ProScope HR “Hight Resolution”. A análise teve o objetivo de observar a estrutura encontrada nos resíduos finos estudados. Nas Figuras 4.4 e 4.5 são apresentadas imagens em tempo real com ampliação de 200X e 400X obtidas para as amostras, em estado solto, *ARtotal* e *ANtotal*, respectivamente.

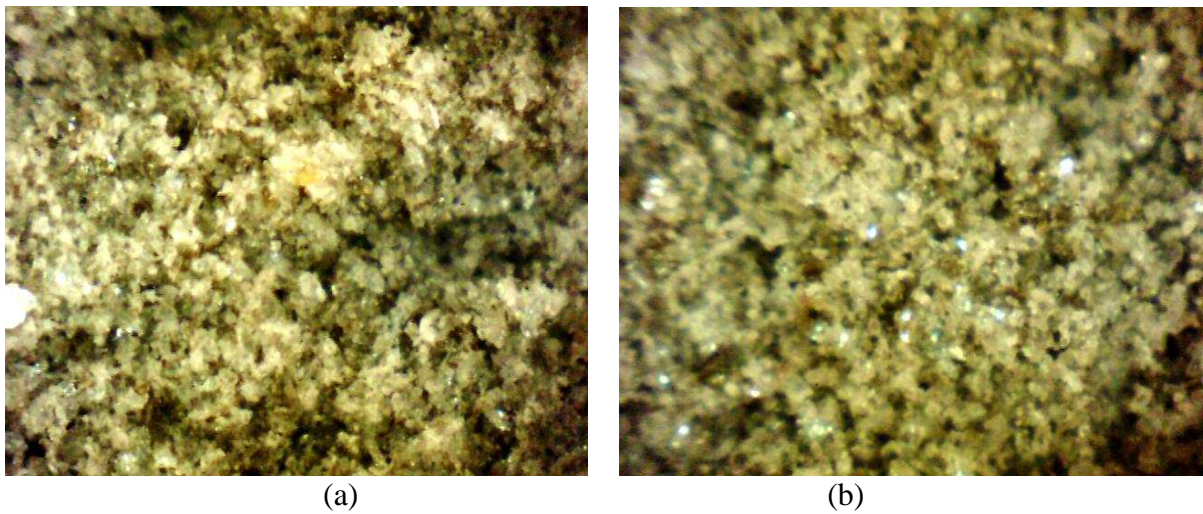


Figura 4.4. Microscopia com lupa. (a) resolução 200X da amostra *ARtotal*; (b) resolução 400X da amostra *ARtotal*.

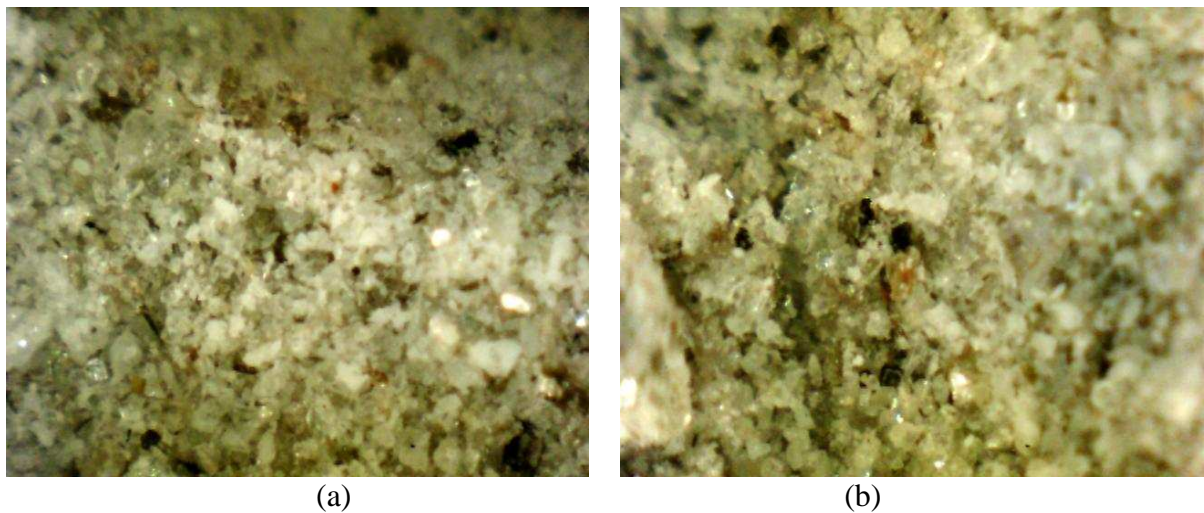


Figura 4.5. Microscopia com lupa. (a) resolução 200X da amostra *ANtotal*; (b) resolução 400X da amostra *ANtotal*.

Ao observar a Figura 4.4 fica evidente a presença de quartzo e mica nas amostras de ARtotal e na Figura 4.5 percebe-se também que a matriz da amostra ANtotal é formada por quartzo e mica. Sendo assim, para os resíduos ocorre a predominância de minerais primários.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

4.2.1. Resíduos Finos

Para avaliação da composição mineralógica dos resíduos finos foram realizados ensaios de difração de raios-X. A metodologia adotada foi à análise da amostra integral. Os procedimentos relativos à execução destes ensaios encontram-se descritos em detalhe no Capítulo 3. As análises mineralógicas objetivaram mostrar a composição mineral dos dois resíduos estudados. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4.6 e 4.7.

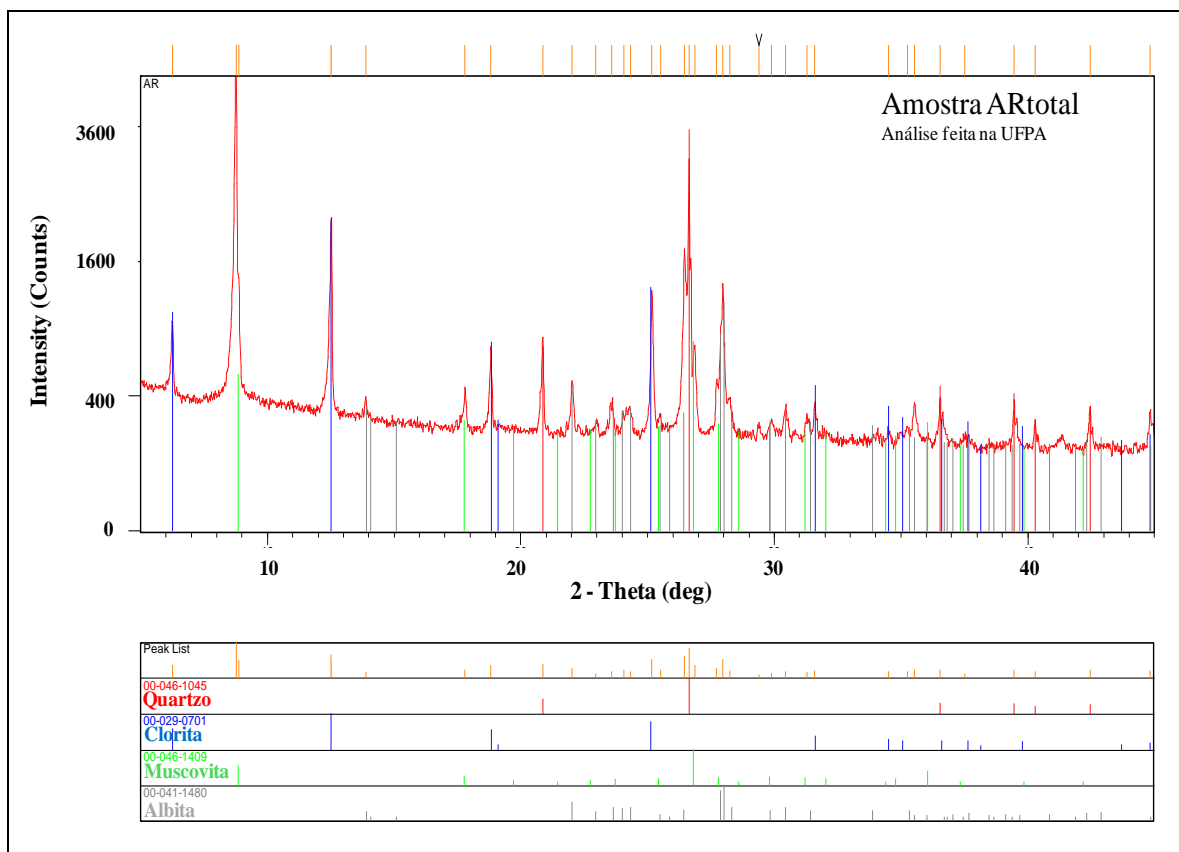


Figura 4.6. Difrátogramas da amostra ARtotal.

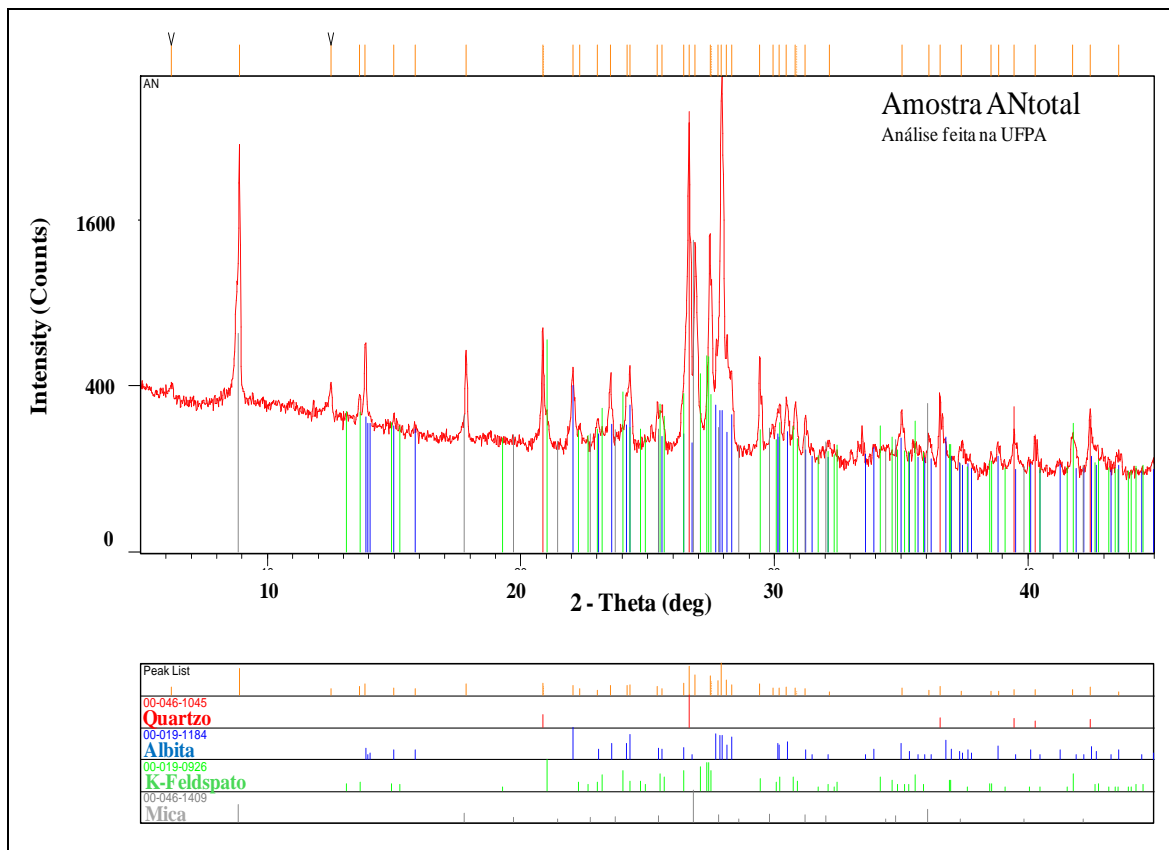


Figura 4.7 Difratoformas da amostra ANtotal.

De acordo com os difratogramas apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7, percebeu-se que a composição mineralógica da amostra ARtotal apresenta teores de micas maiores quando comparados ao resíduo da pedra Anhanguera, ocorrendo ainda a presença de uma muscovita.

O teor de clorita encontrado na amostra ARtotal também é maior, em comparação com a amostra ANtotal. O mineral clorita encontrado na amostra ARtotal é formado por camadas de micas e camadas de brucita. Segundo Costa (1991) há uma ligação eletrostática relativamente forte entre os respectivos minerais. Essas ligações tendem a conferir a estes materiais uma menor expansibilidade. Por isso, o mineral clorita possui característica similar ao argilo-mineral illita em relação a propriedades expansivas, ou seja, possui na sua maioria um reticulado não expansível.

A amostra ANtotal apresentou composição mineralógica formada por quartzo, feldspatos (albite + K-feldspato) e mica, e também a presença de muscovita. Confirmando assim, mineralogia típica de uma rocha granítica. Por meio da análise dos difratogramas

apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7 foi possível obter as informações sobre os resíduos finos analisados mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Minerais Identificados nos Difratomogramas.

Amostra	Composição Mineralógica Raios -X
ARtotal	Quartzo, Clorita, muscovita e albita
ANtotal	Quartzo, Albita, Feldspatos e mica.

4.2.2. Solo Natural de Goiânia

Para o solo natural de Goiânia foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios de difração de raios-X realizados por Jacintho (2008). Os procedimentos adotados por Jacintho (2008) seguiram as quatro análises: amostra integral, fração argila ao natural, fração argila glicolada e fração argila calcinada. Na Tabela 4.10 são evidenciados os principais minerais identificados nas análises realizadas com a amostra do solo natural.

Tabela 4.10. Minerais Identificados nos Difratomogramas (modificado Jacinto, 2008).

Descrição	Solo Goiânia
Minerais Principais	gibbsite
Minerais Subordinados	quartzo, caulinita e hematita
Minerais Traços	goethita

O solo de Goiânia apresenta predominância de hidróxidos de alumínio (gibbsite), possivelmente devido ao alto processo de intemperismo que este solo apresenta. A grande intemperização deste solo é reforçada pela presença de caulinita e óxidos de ferro (hematita) como minerais subordinados. A goethita aparece como minerais traços (Jacintho, 2008).

Com relação aos minerais presentes no solo de Goiânia, verificou-se que todos contribuem para a redução dos valores da capacidade de troca catiônica (CTC), ou seja, tanto os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (gibbsite, hematita e goethita) quanto o quartzo apresentam baixa CTC.

Jacintho (2005) em sua dissertação de mestrado destaca que solos com maior teor de alumínio livre tendem a ter maior floculação. No entanto, o solo de Goiânia, apesar de ter floculação

considerável não possui alumínio livre, fato que pode ocorrer em solos tropicais superficiais submetidos a intensos processos de intemperismo.

4.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

4.3.1. Resíduos Finos

Para avaliação da composição química dos resíduos das pedreiras Araguaia e Anhanguera foram realizados ensaios de análise química. Os resultados obtidos a partir dessas análises para as amostras ARtotal e ANtotal estão apresentados na Tabela 4.11. Cabe comentar que os ensaios químicos objetivaram conhecer quais compostos e a porcentagem desses compostos presentes nos dois resíduos de pedra, por isso optou-se em realizar a química do tipo total. Além de determinar os compostos constituintes dos resíduos, foram determinados perda ao fogo, a umidade 105°-110°, os pH em KCl e o pH em água de forma a evidenciar variação do pH (Δ pH).

Tabela 4.11. Resultados das análises químicas dos resíduos finos

	Elementos Químicos	ARtotal	ANtotal
	Resíduo Insolúvel- R.I.	87,5	95,5
Óxido de Silício	SiO ₂ (%)	60,0	88,0
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃ (%)	10,6	4,0
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃ (%)	2,05	0,8
Óxido de Potássio	K ₂ O (%)	17,2	3,2
Óxido de Sódio	Na ₂ O (%)	0,15	0,05
Enxofre	SO ₃ (%)	0,04	0,05
	Umidade à 105°- 110° (%)	0,1	0,1
	Perda ao Fogo (%)	2,8	0,7
	pH em água (sem unidade)	8,7	8,8
	pH em KCl (sem unidade)	8,2	8,3
	Δ pH	-0,5	-0,5

A Tabela 4.11 mostra que o elemento Si é considerado o constituinte básico dos dois resíduos, o que já era esperado uma vez que na análise de difração de raios-x houve a presença marcante apenas de minerais primários. Ainda a tabela evidencia que os outros elementos tais como K, Al, Fe, Na e S, representaram uma parcela menor na composição dos referidos resíduos finos.

A Tabela 4.11 destaca os resultados obtidos dos ensaios de pH realizados em água e em solução de cloreto de potássio (KCl) e verificou-se que para ambas as análises dos resíduos são considerados alcalinos. Os valores de pH encontrados nessa faixa alcalina indicam a não

influência das forças de atração entre as partículas de resíduos finos (agregação). Esse comportamento reproduz o que foi observado nos resultados de granulometrias para os resíduos (Figura 4.1 e 4.2), uma vez que com ou sem defloculante não houve diferença significativa devido a não agregação firme entre as partículas.

Ao avaliar a diferença entre o pH encontrado em solução de cloreto de potássio e o pH realizado em água, foram encontrados valores negativos e próximos de zero.

4.3.2. Solo Natural de Goiânia

Para análise química do solo natural de Goiânia foram utilizados os resultados obtidos por Jacintho (2008). Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados correspondentes as análises químicas realizadas no solo da região de Goiânia. Verifica-se que esse solo apresentou pH praticamente neutro em presença de água (6,9) indicando a ocorrência de solos salinos ou calcários, fato este confirmado pela maior presença de cálcio da amostra. Pode-se considerar ainda que o pH relativamente elevado do solo pode estar refletindo a rocha de origem ou o mesmo uma possível utilização de insumos agrícolas no solo. Em relação ao Δ pH percebe-se que apresentou valor negativo.

Tabela 4.12. Resultados das Análises Químicas (Jacintho, 2008).

Descrição	Solo Goiânia
pH em água	6,9
pH em KCl	6,1
Δ pH	-0,8
Ca + Mg ⁽¹⁾	2,7
Cálcio ⁽¹⁾	2,2
Magnésio ⁽¹⁾	0,5
Potássio ⁽¹⁾	0,08
Sódio ⁽¹⁾	0,03
Soma dos cátions trocáveis ⁽¹⁾	2,81
Alumínio ⁽¹⁾	0
Acidez total (H+Al) ⁽¹⁾	3
CTC ⁽¹⁾	5,81
Saturação de alumínio (%)	0
Saturação de bases (%)	48
Carbono orgânico (g/kg)	4,1
Matéria orgânica (g/kg)	7,1
Fósforo (mg/dm ³)	2

Obs.: (1) unidades em cmol_c/dm³ = mE/100ml.

De acordo com a Tabela 4.12 foi possível observar que o solo de Goiânia apresentou capacidade de troca catiônica (CTC) considerada, provavelmente devido ao elevado teor de matéria orgânica no solo. Em relação aos outros minerais presentes no solo de Goiânia, verificou-se que todos contribuem para a redução dos valores da CTC, ou seja, tanto os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (gibbsite, hematita e goethita) quanto o quartzo apresentam baixa CTC.

4.4. ENSAIOS ESPECÍFICOS PARA APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS FINOS EM PAVIMENTAÇÃO.

Após a caracterização física, estrutural, mineralógica e química, foram realizadas as análises do comportamento mecânico dos materiais, considerando principalmente, a proposta de avaliar os desempenhos das misturas para a confecção de camadas de pavimento. Nesse contexto, foram realizados os ensaios de Mini-compactação, Mini-MCV, perda por imersão, Mini-CBR, expansão, sucção, compressão simples e módulo de resiliência. Cabe ressaltar, que todas as amostras utilizadas nos ensaios de Mini-CBR, perda por imersão, expansão, sucção, compressão simples e módulo de resiliência foram compactadas na energia do Proctor intermediário e na faixa ótima de umidade. Os parâmetros de W_{ot} e γ_{dmax} foram determinados a partir da realização dos ensaios de compactação em miniatura nas amostras de resíduos puros, solo natural e nas seis misturas.

4.4.1. Ensaios de Compactação em Miniatura

O ensaio de compactação em miniatura teve como objetivo a determinação do peso específico seco máximo (γ_{dmax}) e umidade ótima (W_{ot}) para a energia do Proctor intermediário.

4.4.1.1. Resíduos Finos

Para avaliar a variação de γ_d ao aplicar a energia do Proctor intermediário e determinar a umidade ótima foram realizados ensaios de compactação miniatura nas amostras de resíduos. Os resultados desses ensaios são exibidos na Figura 4.8.

Baseados nos resultados mostrados na Figura 4.8 tem-se que a umidade ótima obtida para a ARtotal foi de 14,30% e para a amostra ANtotal foi 13,75% e os valores de γ_{dmax} foram, respectivamente, de 15,75 kN/m³ e de 15,36 kN/m³. Vale comentar que os resultados obtidos

de umidade ótima e γ_{dmax} para as amostras ARtotal e ANtotal foram muito próximos, uma vez que em termos de umidade ótima se distaram entorno de 0,65%, somado o fato da amostra ARtotal ter apresentado γ_{dmax} cerca de 2,5% a mais quando comparada a amostra ANtotal.

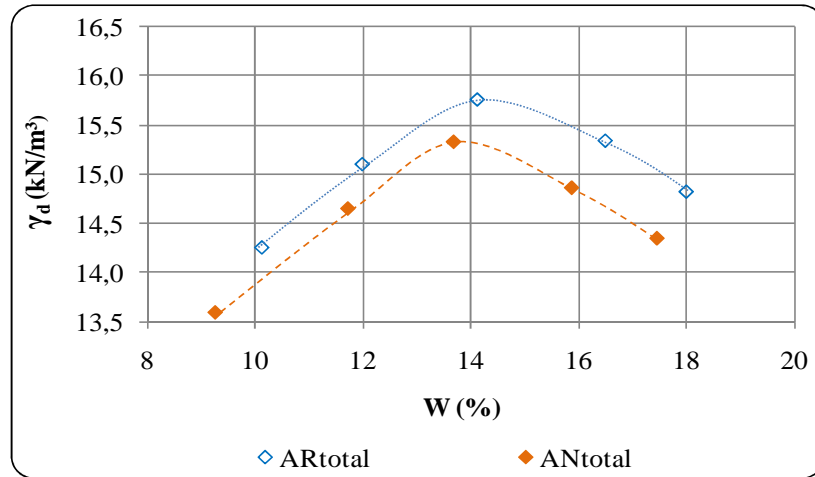


Figura 4.8. Curvas de Mini-Compactação na energia do Proctor intermediário das amostras compostas apenas por resíduos finos.

Para avaliar a variação do índice de vazios dos dois resíduos finos, na Figura 4.9 são apresentados os resultados obtidos do teor de umidade em relação ao índice de vazios. A pequena diferença da umidade ótima e do γ_{dmax} obtidos para as duas amostras de resíduos (Figura 4.8), corroboram com a diferença mínima encontrada em termos de índice de vazios das amostras ARtotal e ANtotal. A Figura 4.9 ainda evidencia que a compacidade das duas amostras é muito semelhante, uma vez que o índice de vazios mínimos encontrados apresentou diferença de 0,01.

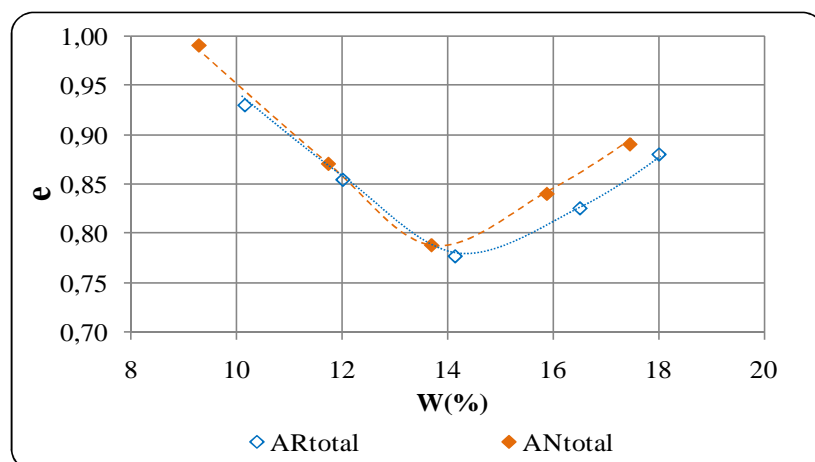


Figura 4.9. Relação de e x W (%) com resíduos da pedra Araguaia e Anhanguera.

4.4.1.2. Solo Natural de Goiânia

Para o solo natural de Goiânia também foi realizado o ensaio de Mini-Compactação, de forma a obter parâmetros de γ_{dmax} e umidade ótima na energia do Proctor intermediário. Na Figura 4.10 são apresentadas duas curvas de Mini-Compactação, sendo que a curva na cor rosa denominada de SN identifica os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados por esta pesquisa e a curva na cor vermelha chamada de solo Goiânia refere-se aos resultados obtidos na pesquisa desenvolvida por Guimarães & Jacintho (2008) para um solo similar ao utilizado nesta pesquisa.

De acordo com a Figura 4.10, percebeu-se que os resultados encontrados de γ_{dmax} e W_{ot} por Guimarães & Jacintho (2008) e os obtidos por esta pesquisa não tiveram diferenças significativas. Ou seja, os resultados mostraram que a amostra SN possuiu umidade ótima de 19,00% e peso específico seco máximo de 17,45 kN/m³, enquanto que os valores obtidos por Guimarães & Jacintho (2008) foram de W_{ot} igual a 18,90% e o γ_{dmax} igual a 17,50 kN/m³.

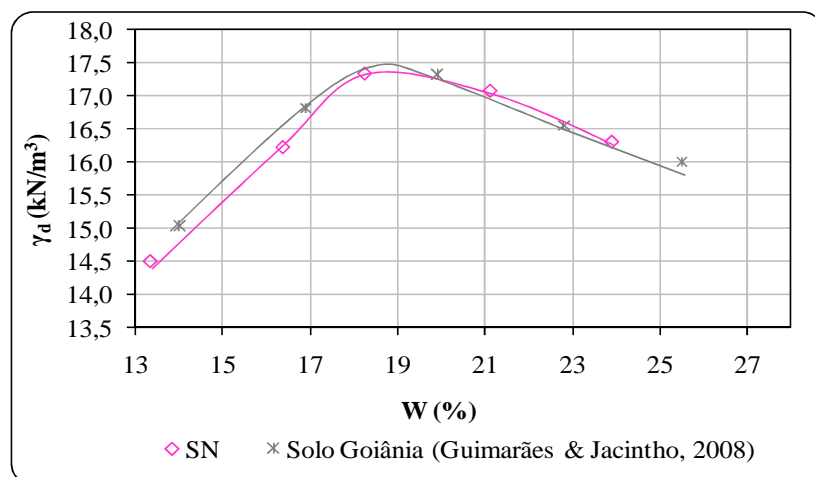


Figura 4.10. Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária para o solo de Goiânia.

Com o objetivo de avaliar a compacidade do solo natural de Goiânia, a Figura 4.11 apresenta a relação entre o índice de vazios versus as umidades de compactação.

Ao observar a Figura 4.11, percebe-se que os resultados de índice de vazios mínimos obtidos nesta investigação e encontrados por Guimarães & Jacintho (2008) são muito semelhantes, entorno de 0,59. Resultado esse muito menor quando comparado com os índices de vazios mínimos encontrados para os dois resíduos apresentados na Figura 4.9.

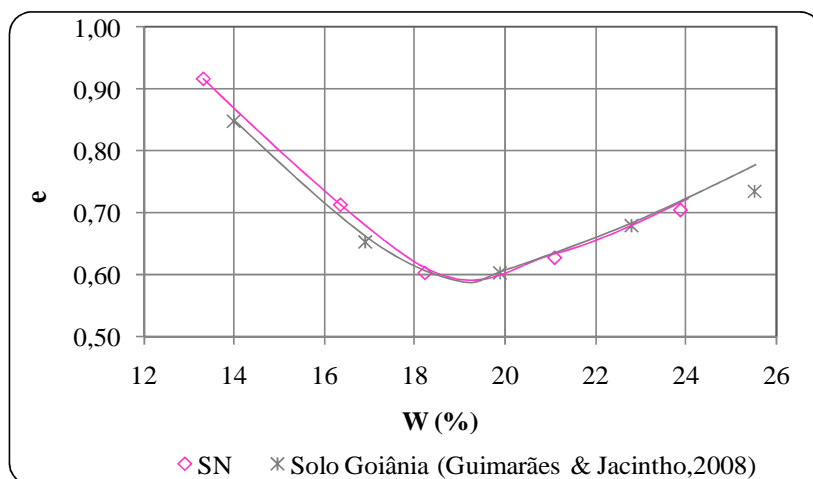


Figura 4.11. Relação de e x W (%) com resíduos da pedra Araguaia e Anhanguera.

4.4.1.3. Misturas de solo natural e resíduos finos

Adicionalmente a investigações realizadas com os materiais puros (ARtotal, ANtotal e SN), foram realizados os ensaios de Mini-Compactação para as seis misturas de solo natural e resíduos. Na Figura 4.12 (a) são apresentadas as curvas de Mini-Compactação utilizando a energia intermediária para as misturas com o resíduo de micaxisto (pedreira Araguaia) e na Figura 4.12 (b) são mostradas as curvas que relacionam índice de vazios versus teores de umidade para respectivas misturas.

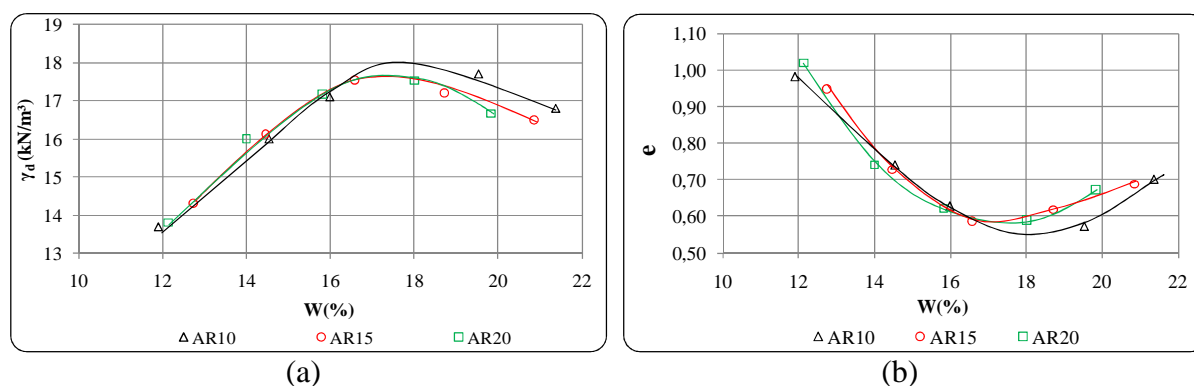


Figura 4.12. (a) Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária das misturas da pedra Araguaia; (b) Curvas de e x W (%) das misturas da pedra Araguaia.

A Tabela 4.13 evidencia os resultados da compactação em miniatura com base na Figura 4.12, além dos valores obtidos de grau de saturação para as misturas AR10, AR15 e AR20.

A Tabela 4.13 e a Figura 4.12 mostram que o valor de γ_{dmax} das misturas AR15 e AR20 apresentaram redução de $0,5 \text{ kN/m}^3$ quando comparada à mistura composta por somente 10% de resíduos finos da pedra Araguaia. Salienta-se ainda, que para distintos teores de

umidades e de porcentagens de resíduos finos em relação ao quantitativo de solo, as misturas AR15 e AR20 apresentaram o mesmo valor de peso específico seco máximo de 17,50 kN/m³. Entre as misturas da pedreira Araguaia a que apresentou melhor resultado considerando o peso específico seco máximo foi à amostra AR10, apresentando um γ_{dmax} igual a 18,00 kN/m³. Aliado ao fato da mistura AR10 ter apresentado melhor parâmetro de γ_{dmax} pode-se observar que ela também apresentou um grau de compactidade levemente superior aos das demais misturas com o resíduo da pedreira Araguaia, conforme pode ser observado na Figura 4.12 (b). Ainda na Figura 4.12 (b) e Tabela 4.13 foi possível observar que o índice de vazios encontrado para as misturas AR10, AR15 e AR20 indicaram valores muito próximos, entre 0,55 e 0,59.

Tabela 4.13. Resultados dos Ensaios de Mini-compactação na energia do Proctor intermediária- Metodologia MCT para amostras da pedreira Araguaia.

Amostra	γ_{dmax} (kN/m ³)	w _{ot} (%)	Sr (%)	e _{min}
AR10	18,00	17,75	92,27	0,55
AR15	17,50	16,88	81,08	0,59
AR20	17,50	17,88	85,78	0,59

Da mesma forma foram realizados os ensaios de compactação em miniatura para as três misturas de solo natural com o resíduo da rocha granítica, pedreira Anhanguera (Figura 4.13).

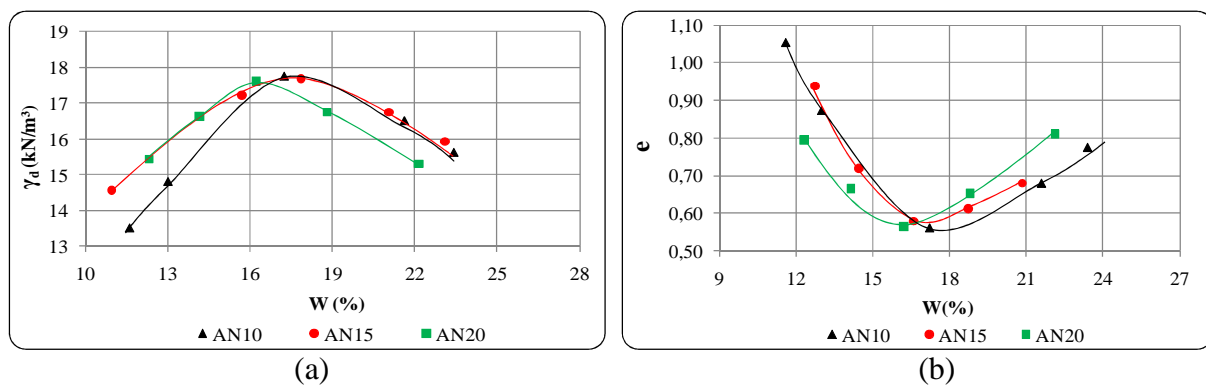


Figura 4.13. (a) Curvas de Mini-Compactação na energia intermediária das misturas da pedreira Anhanguera; (b) Curvas de e x W(%) das misturas da pedreira Anhanguera.

Analisando a Figura 4.13 são ilustradas as curvas de compactação utilizando a energia intermediária e as curvas que relacionam índice de vazios versus teores de umidade para respectivas misturas contendo o resíduo da pedreira Anhanguera. Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados desses ensaios considerando a energia do Proctor intermediária. Verifica-se na Tabela 4.14 que a partir da adição de 15% de resíduos finos de pedreira

Anhanguera na mistura houve uma leve redução do valor de γ_{dmax} . Ainda assim, ao incorporar até 20% de resíduos finos o peso específico seco máximo encontrado foi superior ao obtido para amostra composta apenas pelo solo natural de Goiânia (Figura 4.10). Por exemplo, o menor valor encontrado dentre as misturas da pedra Anhanguera foi a mistura AN20, essa apresentou γ_{dmax} igual a 17,63 kN/m³, enquanto o γ_{dmax} do solo natural foi de 17,50 kN/m³.

Tabela 4.14. Resultados dos Ensaios de Mini-compactação na energia do Proctor intermediária - Metodologia MCT para amostras da pedra Anhanguera.

Amostra	γ_{dmax} (kN/m ³)	w _{ot} (%)	Sr (%)	e
AN10	17,75	18,16	91,24	0,56
AN15	17,73	18,07	90,62	0,56
AN20	17,63	16,38	80,97	0,57

Ainda analisando a Figura 4.13 e a Tabela 4.14 percebeu-se que com o aumento da porcentagem de resíduos da pedra Anhanguera nas associações com o solo natural houve uma redução do γ_{dmax} e da W_{ot}. Essa redução da W_{ot} pode ser explicada uma vez que com aumento do resíduo da pedra Anhanguera ao solo natural, ocorreu um aumento de percentual de frações grossas nas respectivas misturas, e conseqüentemente, a quantidade de água para se atingir a umidade ótima diminuiu. Esse aumento da porcentagem das frações grossas poderia estar associado à granulometria arenosa da amostra ANtotal (Figura 4.2) ou mesmo com a natureza química e mineralógica dos resíduos. Merecendo assim estudos mais aprofundados sobre esse tema, além de uma possível avaliação de compatibilidade entre os compostos químicos dos resíduos puros com os do solo. O comportamento de redução da umidade ótima com o acréscimo do resíduo fino da pedra Anhanguera foi similar ao encontrado no trabalho de Batalione (2007). Cabe observar que esse autor utilizou o mesmo resíduo fino utilizado nesta pesquisa, porém utilizando solo de outra localidade.

Os índices de vazios encontrados das misturas AN10, AN15 e AN20 indicaram valores muito próximos, da ordem de entre 0,56 e 0,57, e próximos aos obtidos para as misturas contendo o resíduo da pedra Araguaia.

Ao se comparar os resultados dos ensaios de Mini-Compactação obtidos para as seis misturas, observou-se que com o aumento das porcentagens de resíduos finos nas associações com o solo, houve uma leve diminuição da densidade aparente seca máxima. Ou seja, as misturas que possuíam menores teores de finos, AR10 e AN10, foram às misturas que apresentaram

densidades aparentes secas máximas maiores ao serem compactadas na energia do Proctor intermediário, conforme pode ser observada na Figura 4.14.

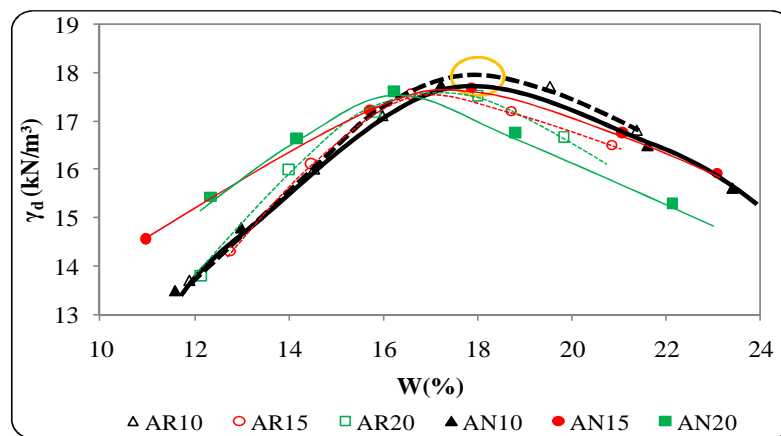


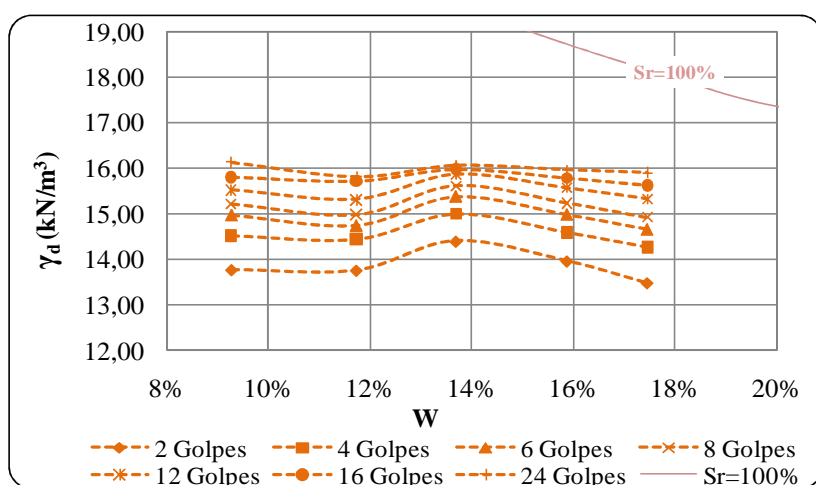
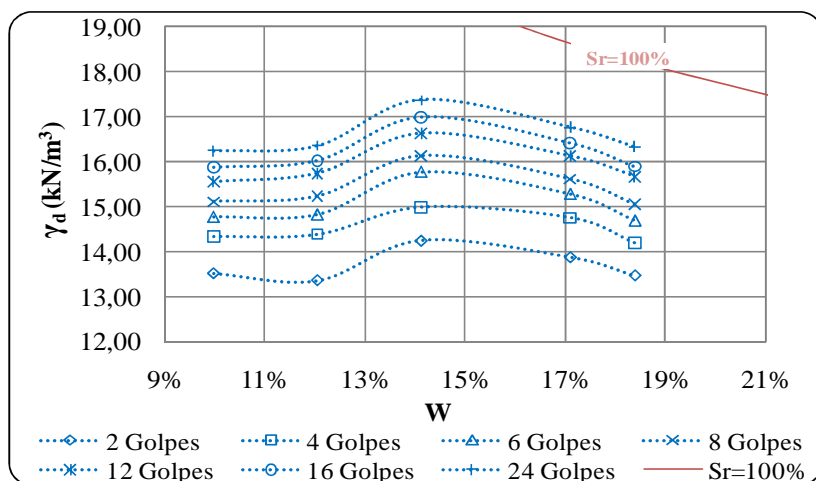
Figura 4.14. Curvas de Mini- compactação na energia do Proctor intermediária das seis misturas.

4.4.2. Ensaio de Mini-MCV

Utilizando corpos de provas de dimensões reduzidas para todas as amostras, foram realizados os ensaios de Mini-MCV que forneceram entre outros dados, a variação do γ_d das amostras compactadas em função dos teores de umidades. Além disso, com os resultados gerados por meio do ensaio de Mini-MCV, foi possível efetuar a caracterização das amostras de comportamento laterítico, uma vez que esse ensaio engloba o comportamento dos corpos de provas quando imersos em água, o chamado ensaio de perda por imersão. O ensaio de Mini-MCV permitiu gerar famílias de curvas de compactação, obtidas com energia variável. Adicionalmente, foi possível avaliar as inclinações de cada curva de compactação de cada amostra. Nesta pesquisa os ensaios de Mini-MCV foram executados com as amostras de acordo com o preconizado pela norma ME 228 (DNER, 1994).

4.4.2.1. Resíduos Finos

Para avaliar a família de curvas de compactação para energias variáveis e classificar as duas amostra de resíduos finos foram realizados os ensaios de Mini-MCV (Figuras 4.15 e 4.16). Por meio das figuras foi possível observar certo paralelismo das curvas de compactação no ramo úmido, tanto para a amostra ARtotal quanto para amostra ANtotal. Podendo assim constatar que no momento da compactação houve pouca geração de poro-pressão no ramo úmido.



Baseado nos dados evidenciados nas Figuras 4.15 e 4.16, na Tabela 4.15 são revelados as inclinações médias do ramo seco das amostras ARtotal e ANtotal. De acordo com a tabela, nota-se que embora com valores distintos de γ_{dmax} médio para os dois resíduos obteve-se semelhantes inclinações média relativas ao ramo seco das curvas Mini-MCV. Observou-se também que o valor de γ_{dmax} para a amostra ANtotal tendeu a sofrer menos variações para valores de energias altos, tendendo a estabilizar em 16,00 kN/m³. Ao contrário da amostra ARtotal em que o valor de γ_{dmax} apresentou um aumento considerável em função da energia de compactação.

Tabela 4.15. Resultados da inclinação média do ramo seco para a amostra ARtotal e ANtotal.

Amostra	Coefficiente Angular Médio (kN/m ³ /%)	Inclinação média do ramo seco (em graus)	γ_{dmax} médio (kN/m ³)
ARtotal	0,24	14,33°	16,01
ANtotal	0,26	14,39°	15,46

4.4.2.2. Solo Natural de Goiânia

Assim como para os resíduos finos, a amostra do solo Goiânia também foi submetida ao ensaio de Mini-MCV (Figura 4.17). Baseado na Figura 4.17, pode-se verificar que o γ_{dmax} do solo natural não apresentou variação elevada a partir da aplicação de 12 golpes, ou seja, os valores encontrados de γ_{dmax} para as curvas referentes a 16 e 24 golpes foram muito próximos aos obtidos pela curva de 12 golpes.

Ainda por meio da análise da Figura 4.17, foi possível calcular a inclinação do ramo seco das curvas compactadas, resultando numa inclinação média de 0,29 kN/m³%. Ao comparar a inclinação média obtida para o solo natural com os dois resíduos, foi observado que o valor da inclinação encontrada para o solo foi levemente superior à encontrada para os dois resíduos. Em relação aos ensaios de perda por imersão o solo natural apresentou um Pi igual a 45%.

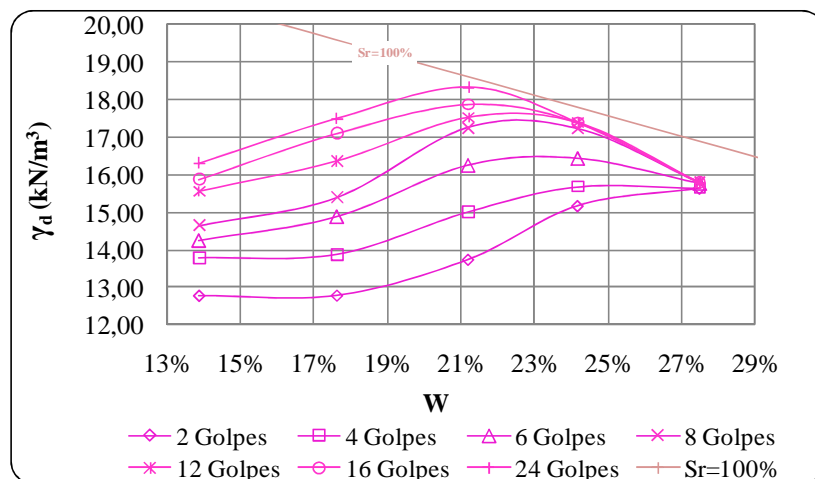
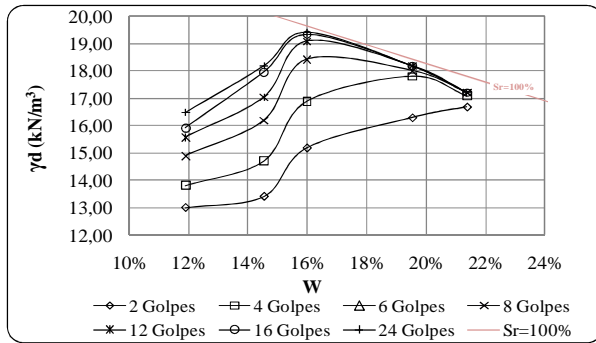


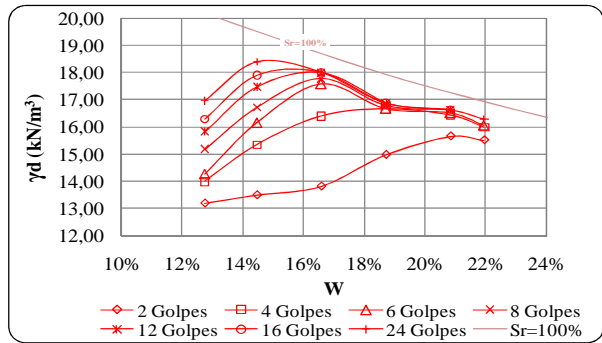
Figura 4.17. Ensaio de Mini-MCV do solo natural de Goiânia.

4.4.2.3. Misturas de solo natural e resíduos finos

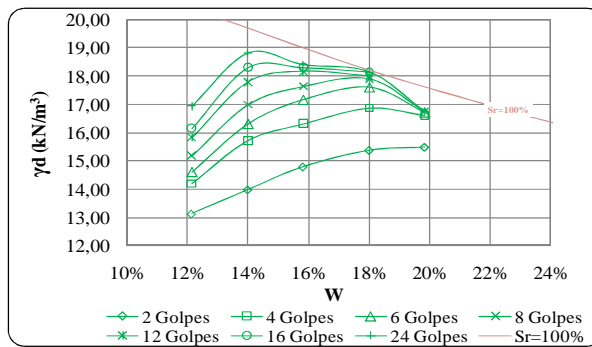
Igualmente aos resíduos e solo natural foram realizados os ensaios de Mini-MCV para as seis misturas, possibilitando avaliar a variação do γ_d para diversas energias de compactação. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados dos ensaios de Mini-MCV realizados nestas amostras. Nessas figuras, foi possível observar o comportamento dos diferentes teores de resíduos associados ao solo natural. Ou seja, para todas as misturas foi possível avaliar a influência da adição de resíduo ao solo. Este comportamento pode ser verificado por meio das alterações ocorridas principalmente nas inclinações das curvas obtidas para diferentes energias de compactação.



(a)

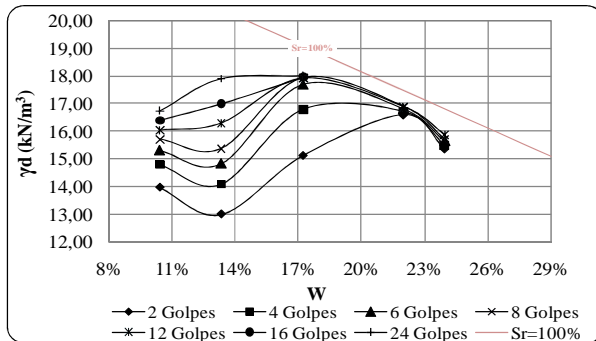


(b)

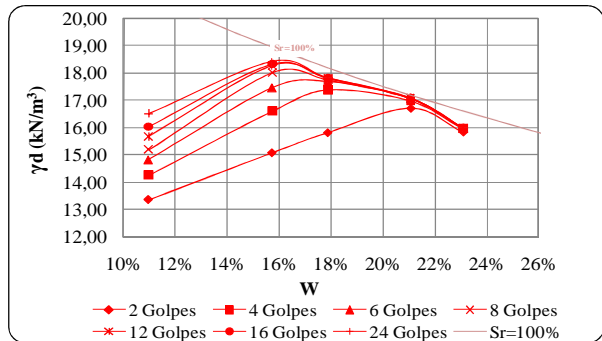


(c)

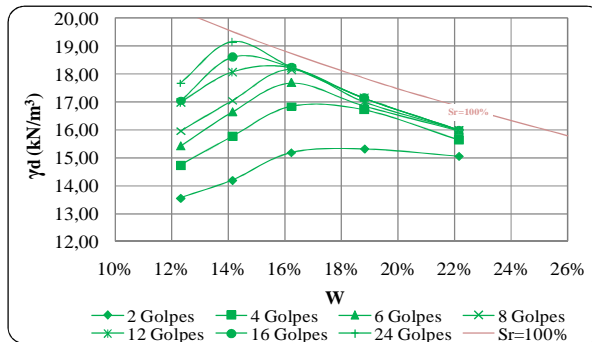
Figura 4.18. Ensaio de Mini-MCV da amostra AR10; (b) Ensaio de Mini-MCV da amostra AR15 e (c) Ensaio de Mini-MCV da amostra AR20.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.19. (a) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN10; (b) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN15; (c) Ensaio de Mini-MCV da amostra AN20.

Nota-se nas Figuras 4.18 e 4.19 que quanto maior porcentagem do resíduo nas misturas houve uma perda de eficiência da compactação no ramo úmido, porém o fato de perder a eficiência não está ligado à deficiência de compactação. Sendo assim, recomenda-se nesses casos que para eficiência completa para todas as misturas é importante que a umidade de compactação esteja entre o ramo seco e a umidade ótima de cada amostra. Este mesmo fenômeno de perda de eficiência no ramo úmido não ocorre tão bruscamente ao se trabalhar somente com os resíduos de pedreiras, isto pode ser justificado principalmente devido a afinidade que o resíduo teve com a água ao serem compactados.

Ainda na Figura 4.18 foi observado que com o aumento da porcentagem do resíduo da pedreira Araguaia nas misturas houve aumento de umidade ótima. Em contrapartida, para a família de curvas de compactação para as misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera (Figura 4.19), ocorreu diminuição da umidade ótima. Esta variação de comportamento entre as misturas pode ser justificada pelas diferenças granulométricas entre os dois resíduos. Uma vez que o resíduo oriundo da pedreira Anhanguera ser mais arenoso quando comparado com o resíduo da pedreira Araguaia, implicando em uma redução da umidade ótima.

Além dos parâmetros extraídos das Figuras 4.18 e 4.19, foram calculadas as inclinações médias da parte retilínea do ramo seco de cada curva das seis misturas. Essas inclinações foram definidas como a relação entre a variação do peso específico aparente seco em kN/m^3 e a variação do teor de umidade em porcentagem (Figura 4.20).

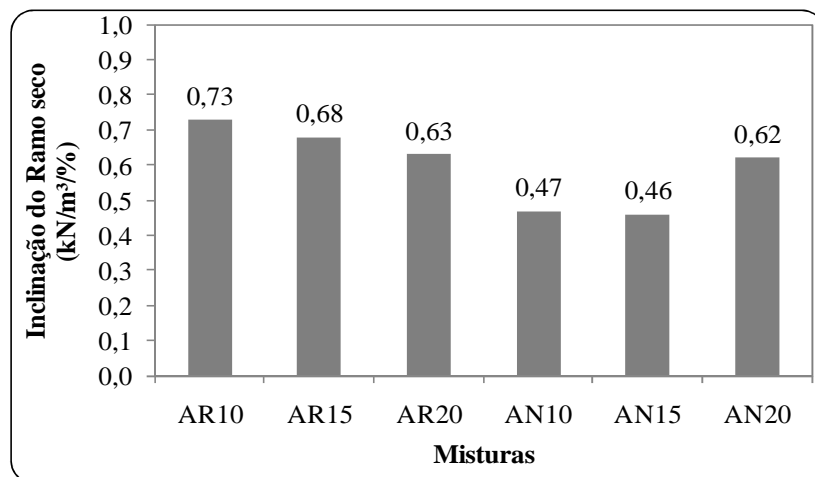


Figura 4.20. Variação da inclinação do ramo seco para as seis misturas.

De acordo com a Figura 4.20, observa-se que as misturas com o resíduo da pedreira Araguaia as inclinações médias sofreram pouca variação, mostrando um leve decréscimo com o

aumento do teor de resíduos. Para as misturas com o resíduo da pedra Anhanguera as variações foram mais significativas, revelando um relativo aumento para o teor de resíduo de 20%.

Para as seis misturas foram realizados os ensaios de perda por imersão e assim foi possível avaliar a erodibilidade, isto é, a agregação das partículas em presença de água. Na Figura 4.21 é apresentada a variação do coeficiente Pi em função do teor de resíduos adicionados ao solo natural.

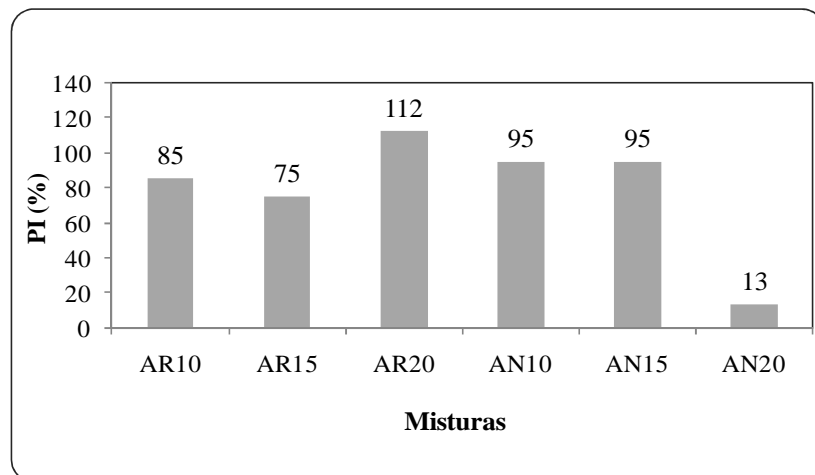


Figura 4.21. Variação do coeficiente Pi com a adição de resíduos finos de pedra para as seis misturas.

Pela Figura 4.21 verifica-se que não houve uma tendência da variação do Pi com o teor de resíduos. O único resultado que chama atenção é a perda de material com a imersão para a amostra com 20% do resíduo da pedra Anhanguera. Este comportamento pode estar associado à melhor interação entre as partículas do resíduo e a do solo natural.

4.4.3. Ensaio de Mini-CBR e Expansão

Por meio da realização dos ensaios de Mini-CBR foi possível determinar a expansão e o índice de Suporte Califórnia (ISC ou Mini-CBR) das amostras desta pesquisa. A expansão foi determinada pela imersão dos CPs em águas durante vinte e quatro horas. O Mini-CBR com imersão foi determinado pela a resistência à penetração do corpo de prova compactado, ou seja, foi feita a medida da penetração de um pistão padrão no CP após o período de imersão.

O Mini-CBR sem imersão, como o próprio nome revela, foi determinado com corpos de provas sem a imersão em água. Esses Parâmetros auxiliam na definição dos materiais usados em cada camada da estrutura do pavimento, uma vez que existem normas regulamentadoras

que definem a especificação mínima para cada camada de pavimento, sendo a mais conhecida e empregada no Brasil o manual de pavimentação do DNIT (2006).

Nesta investigação para facilitar o entendimento dos resultados de Mini-CBR e expansão realizados com as amostras de resíduos finos das duas pedreiras em estudo, solo natural de Goiânia e as seis misturas (solo+resíduo fino) foi elaborado um grupo de figuras e tabelas que expressam os principais resultados obtidos.

Primeiramente, serão apresentados os resultados de Mini-CBR para as amostras compostas apenas por resíduos (ARtotal e ANtotal). Logo após, serão mostrados resultados para o solo de Goiânia em relação ao ensaio de Mini-CBR, seguidos dos resultados de Mini-CBR para as seis associações de solo natural de Goiânia + resíduos. Para todas as amostras, os ensaios de Mini-CBR e expansão foram realizados de acordo com os procedimentos e equipamentos descritos ME 254 (DNER, 1997).

4.4.3.1. Resíduos Finos

Para as amostras ARtotal e ANtotal foram obtidos resultados somente para condição sem imersão, uma vez que ao tentar imergir os corpos de provas o material desprende do molde, não sendo possível executar as fases de expansão e penetração. A fim obter valores representativos de Mini-CBR as amostras ARtotal e ANtotal, foram moldados e compactados três CPs para cada amostra na condição de umidade ótima e na energia intermediária. Os dados de moldagem dos CPs submetidos ao ensaio de Mini-CBR estão apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Características de moldagem dos CPs das amostras ARtotal e ANtotal submetidos ao ensaio de Mini-CBR

Amostras	CPs	$\gamma_{d\text{ mold}}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\text{ max}}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	$W_{\text{ mold}}$ (%)	$W_{\text{ ot}}$ (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios	Mini-CBR (%)
ARtotal	CP1	15,68	15,75	0,07	13,13	14,3	1,17	0,75	9,39
	CP2	15,71	15,75	0,04	13,47	14,3	0,83	0,74	11,32
	CP3	15,71	15,75	0,04	14,50	14,3	-0,20	0,74	11,66
ANtotal	CP1	15,28	15,36	0,08	14,21	13,75	-0,46	0,79	8,75
	CP2	15,30	15,36	0,06	13,96	13,75	-0,21	0,79	9,33
	CP3	15,22	15,36	0,14	14,58	13,75	-0,83	0,80	7,07

Na Figura 4.22 e na Tabela 4.17 são ilustrados os resultados de Mini-CBR das amostras ARtotal e ANtotal.

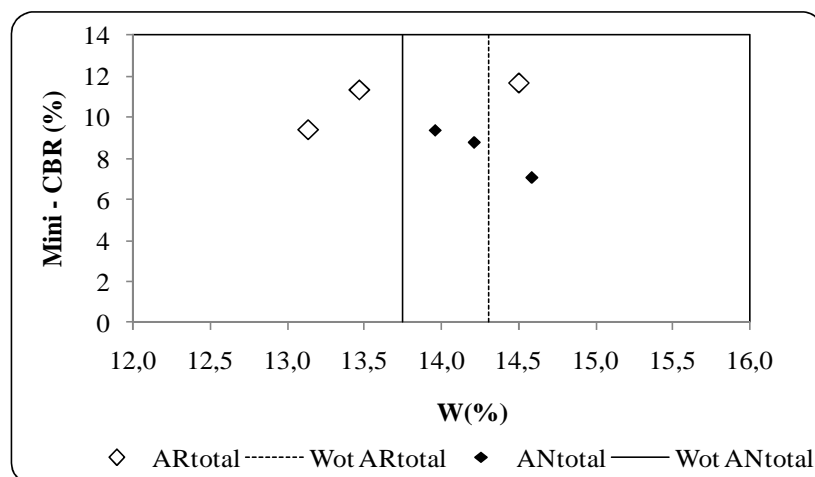


Figura 4.22. Resultados dos ensaios de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária dos resíduos finos ARtotal e ANtotal.

Tabela 4.17. Resultados de Mini-CBR sem imersão- Energia intermediária com amostra compostas apenas por resíduos finos de pedreira.

Amostra	ARtotal	ANtotal
Tipo do Ensaio	Sem Imersão	Sem Imersão
Energia Aplicada	E.I	E.I
W_{otmold} Média (%)	13,70	14,25
γ_{dmold} Médio (kN/m ³)	15,70	15,27
CBR Médio (%)	10,79	8,38
Índice de Vazios Médio	0,80	0,79
Porosidade Média	0,443	0,443
Grau de Saturação Médio (%)	49,46	50,08

De acordo com a Tabela 4.17 foi possível verificar que a amostra ARtotal apresentou um valor de Mini-CBR médio igual a 10,79, sendo este valor cerca de 2,41% maior quando comparado com a amostra ANtotal. Este comportamento poderia ser atribuído a uma maior interação/agregados entre as partículas, pois era de se esperar que pela característica arenosa da ANtotal que o valor de CBR fosse mais alto.

4.4.3.2. Solo Natural de Goiânia

Para o solo natural foram realizados os ensaios de Mini-CBR, com e sem imersão. Nesta investigação foram moldados quatro corpos de provas na energia intermediária e nas condições ótimas de umidades, conforme pode ser observado na Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Características de moldagem dos CPs do solo natural que foram submetidos ao ensaio de Mini-CBR

Amostras	CPs	Mini-CBR (%)	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
SN	CP1	30,00	17,43	17,45	0,02	18,62	19,00	0,38	0,59
	CP2	30,12	17,43	17,45	0,02	18,86	19,00	0,14	0,59
	CP3	30,25	17,43	17,45	0,02	18,88	19,00	0,12	0,59
	CP4	30,63	17,43	17,45	0,02	19,01	19,00	-0,01	0,59

A curva cinza plotada na Figura 4.23 apresenta os resultados obtidos por Guimarães & Jacintho (2008) dos ensaios de Mini-CBR para o solo de Goiânia na energia intermediária, para diferentes condições de umidades. Guimarães & Jacintho (2008) verificaram que para umidade ótima ($W_{ot}=18,90\%$) foi obtido um Mini-CBR de 35%. Os pontos destacados na cor rosa na mesma figura evidenciam os resultados encontrados por esta pesquisa, sendo que para umidade ótima de 19,00% o Mini-CBR apresentou um valor de 30,63%.

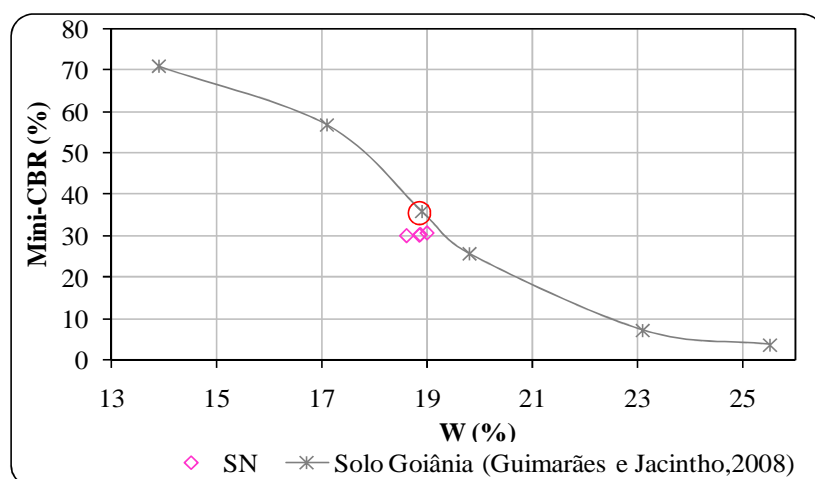


Figura 4.23. Resultados dos ensaios de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária do solo de Goiânia.

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados médios obtidos nos ensaios de Mini-CBR, com e sem imersão para o solo natural.

Ao comparar os resultados de Mini-CBR dos resíduos finos (Tabela 4.17) com aos resultados obtidos para o solo Goiânia (Tabela 4.19), é notório que o Mini-CBR obtido para o solo natural foi superior aos Mini-CBR encontrados para as amostras ARtotal e ANtotal. Isto pode ser explicado, principalmente, devido a densidade aparente seca máxima do solo natural ser mais elevada que os $\gamma_{d\ max}$ obtidos para os resíduos finos. Além disso, nas análises táctil-visuais a coesão apresentada pelo solo natural é mais evidente do que a coesão apresentada para os resíduos finos.

Tabela 4.19. Resultados dos ensaios de Mini-CBR e expansão do solo natural de Goiânia.

Amostra	Solo Goiânia (desta Pesquisa)	Solo Goiânia (desta Pesquisa)
Tipo do Ensaio	Com Imersão	Sem Imersão
Energia Aplicada	E.I	E.I
$\gamma_{dmax\ mold}$ Médio (kN/m ³)	17,43	17,43
γ_{dmax} (kN/m ³)	17,45	17,45
$\Delta\gamma_{dmax}$	0,02	0,02
$W_{ot\ mold}$ Média (%)	18,84	18,84
W_{ot} (%)	19,00	19,00
ΔW_{ot}	0,16	0,16
Umidade Média após a imersão (%)	19,11	-
CBR Médio (%)	15,90	30,25
Expansão Média (%)	0,37	-
Índice de Vazios Médio	0,59	0,59
Porosidade Média	0,37	0,37
Grau de Saturação Médio (%)	91,12	89,86

4.4.3.3. Misturas de solo natural e resíduos finos

Os ensaios de Mini-CBR para as seis misturas foram realizados sobre os corpos de prova sem imersão e com imersão. Durante a execução dos ensaios de Mini-CBR com imersão também foi medida a expansão dos corpos de prova. Na Tabela 4.20 são evidenciadas as características de moldagem dos CPs das misturas AR10, AR15 e AR20, sendo que esses CPs que foram submetidos aos ensaios de Mini-CBR.

Tabela 4.20. Características de moldagem dos CPs das misturas AR10, AR15 e AR20 submetidos aos ensaios de Mini-CBR.

Misturas	CPs	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios	Mini-CBR (%)
AR10	CP1-AR10	17,95	18,00	0,05	18,00	17,75	-0,25	0,55	24,4
	CP2-AR10	17,87	18,00	0,13	18,32	17,75	-0,57	0,56	22,6
	CP3-AR10	18,00	18,00	0,00	17,75	17,75	0,00	0,55	26,2
	CP4-AR10	17,92	18,00	0,08	18,25	17,75	-0,50	0,55	22,6
AR15	CP1-AR15	17,50	17,50	0,00	16,88	16,88	0,00	0,59	26,1
	CP2-AR15	17,45	17,50	0,05	17,20	16,88	-0,32	0,60	20,8
	CP3-AR15	17,43	17,50	0,07	17,48	16,88	-0,60	0,60	18,0
	CP4-AR15	17,50	17,50	0,00	17,00	16,88	-0,12	0,59	25,0
AR20	CP1-AR20	17,45	17,50	0,05	18,15	17,88	-0,27	0,60	17,3
	CP2-AR20	17,45	17,50	0,05	18,26	17,88	-0,38	0,60	16,8
	CP3-AR20	17,50	17,50	0,00	17,90	17,88	-0,02	0,59	19,3
	CP4-AR20	17,40	17,50	0,10	18,48	17,88	-0,60	0,60	15,4

A Figura 4.24 relaciona os resultados obtidos nos de Mini-CBR sem imersão em relação à umidade de moldagem para as três misturas com o resíduo da pedreira Araguaia. É importante ressaltar que os pontos destacados na Figura 4.24 (círculo vermelhos) indicam os corpos de prova correspondentes aos moldados na umidade ótima.

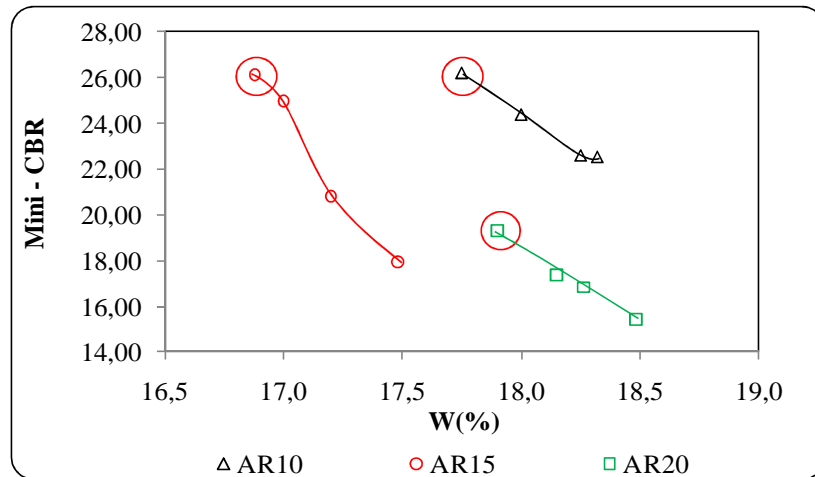


Figura 4.24. Resultados dos Ensaios de Mini-CBR das misturas da pedreira Araguaia – Sem Imersão – Energia Intermediária.

A Figura 4.25 correlaciona os valores obtidos de Mini-CBR com índices de vazios das três misturas contendo o resíduo da pedreira Araguaia.

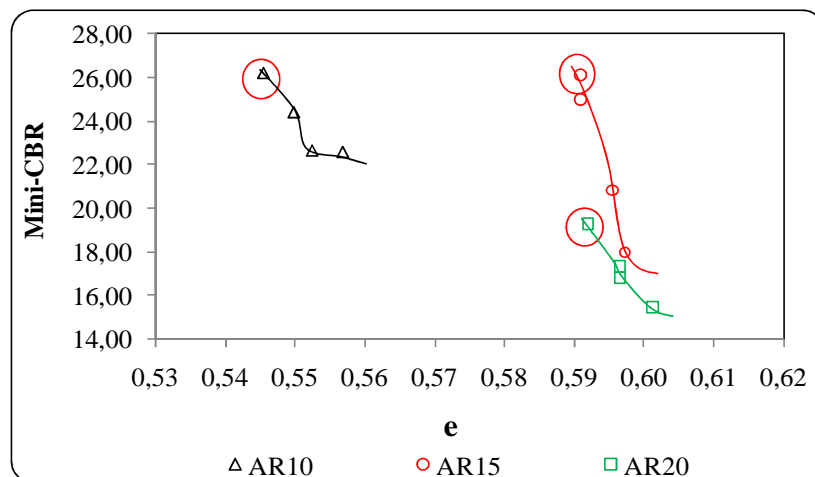


Figura 4.25. Mini-CBR x e - misturas com resíduos finos da pedreira Araguaia.

De acordo com a Figura 4.25, percebe-se que a mistura AR10 foi a que apresentou o menor valor de índice de vazios que foi de 0,545 e ao mesmo tempo apresentou melhor índice de Mini-CBR quando comparado a demais misturas. Ainda pela Figura 4.25, pode ser observado que para valores próximos de Mini-CBR, das amostras AR10 e AR15, encontrou-se índices de vazios bem distintos.

Na Tabela 4.21 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Mini-CBR, salienta-se que os valores encontrados para o ensaio de Mini-CBR com imersão foram inferiores aos ensaios sem imersão.

Tabela 4.21. Resumo dos resultados, Mini-CBR e expansão para as misturas com resíduo fino da pedraira Araguaia.

Misturas	AR10		AR15		AR20	
Tipo do ensaio	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão
Energia Aplicada	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I
$\gamma_{dmax\ mold}$ Médio (kN/m ³)	17,94	17,94	17,47	17,47	17,45	17,45
γ_{dmax} (kN/m ³)	18,00	18,00	17,50	17,50	17,50	17,50
$\Delta\gamma_{dmax}$	0,06	0,06	0,03	0,03	0,05	0,05
$W_{ot\ mold}$ Média (%)	18,08	18,08	17,14	17,14	18,20	18,20
W_{ot} (%)	17,75	17,75	16,88	16,88	17,88	17,88
ΔW_{ot}	-0,33	-0,33	-0,26	-0,26	-0,32	-0,32
Umidade Média após imersão (%)	19,10	-	19,43	-	20,50	-
Mini- CBR Médio (%)	11	24	10	23	12	17
Expansão Média (%)	0,24	-	0,29	-	0,25	-
Índice de Vazios Médio	0,55	0,55	0,59	0,59	0,60	0,60
Porosidade Média	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37
Grau de Saturação Médio (%)	98,4	93,1	92,9	82,0	97,6	86,6

De acordo com a Tabela 4.21, destaca-se que os valores de expansão encontrados para as três misturas com o resíduo da pedraira Araguaia não comprometem a utilização das três misturas em camadas de pavimentos. Ou seja, a expansão média encontrada para as três mistura com o resíduo da pedraira Araguaia foram inferiores aos limites propostos pelo o manual de pavimentação do DNIT (2006).

Esse manual indica como valor máximo 1% de expansão para camadas de reforços de subleito. Os valores de expansão obtidos para as três misturas com o resíduo da pedraira Araguaia além de baixos foram inferiores ao valor de expansão encontrado para o solo natural.

As características de moldagens dos CPs das três misturas com resíduo da pedraira Anhanguera estão destacadas na Tabela 4.22. De forma análoga, para as composições utilizando os resíduos finos da pedraira Anhanguera também foram realizados os ensaios de Mini-CBR, com e sem imersão (Figura 4.26).

Tabela 4.22. Características de moldagem dos CPs das misturas AN10, AN15 e AN20 submetidos aos ensaios de Mini-CBR.

Misturas	CPs	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios	Mini-CBR (%)
AN10	CP1-AN10	17,67	17,75	0,08	18,25	18,16	-0,09	0,57	10,9
	CP2-AN10	17,58	17,75	0,17	18,85	18,16	-0,69	0,58	9,7
	CP3-AN10	17,67	17,75	0,08	18,40	18,16	-0,24	0,57	10,2
	CP4-AN10	17,75	17,75	0,00	18,16	18,16	0,00	0,56	14,4
AN15	CP1-AN15	17,66	17,73	0,07	18,60	18,07	-0,53	0,57	16,6
	CP2-AN15	17,72	17,73	0,01	18,08	18,07	-0,01	0,56	21,4
	CP3-AN15	17,57	17,73	0,16	18,95	18,07	-0,88	0,58	15,2
	CP4-AN15	17,70	17,73	0,03	18,23	18,07	-0,16	0,57	20,5
AN20	CP1-AN20	17,63	17,63	0,00	16,40	16,38	-0,02	0,57	13,1
	CP2-AN20	17,57	17,63	0,06	17,05	16,38	-0,67	0,58	11,7
	CP3-AN20	17,48	17,63	0,15	17,31	16,38	-0,93	0,58	10,0
	CP4-AN20	17,60	17,63	0,03	16,85	16,38	-0,47	0,57	13,1

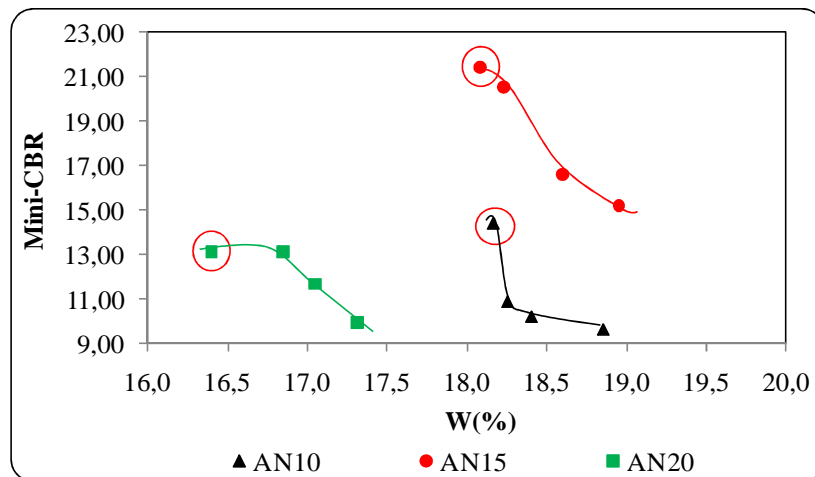


Figura 4.26. Resultados dos Ensaio de Mini-CBR – Sem Imersão – Energia Intermediária.

Baseado na Figura 4.26 e na Tabela 4.22, percebeu-se que a mistura AN15 foi a que apresentou o melhor valor de Mini-CBR que foi de 21,4 %, esse corresponde ao corpo de prova compactado na umidade ótima da referida mistura.

Na Figura 4.27 são mostradas as relações do Mini-CBR com o índice de vazios de cada mistura.

Ao correlacionar os valores de Mini-CBR com índices de vazios para as misturas da pedra Anhanguera observou-se que as misturas AN10 e AN15 apresentaram índice de vazios médio iguais, entorno de 0,57, porém a amostra AN15 foi que apresentou maior valor de Mini-CBR, conforme pode ser visto a Figura 4.25. Isso pode ter acontecido devido à má compactação dos CPs da mistura AN10 ou ainda a não agregação satisfatória no interior do cilindro de compactação.

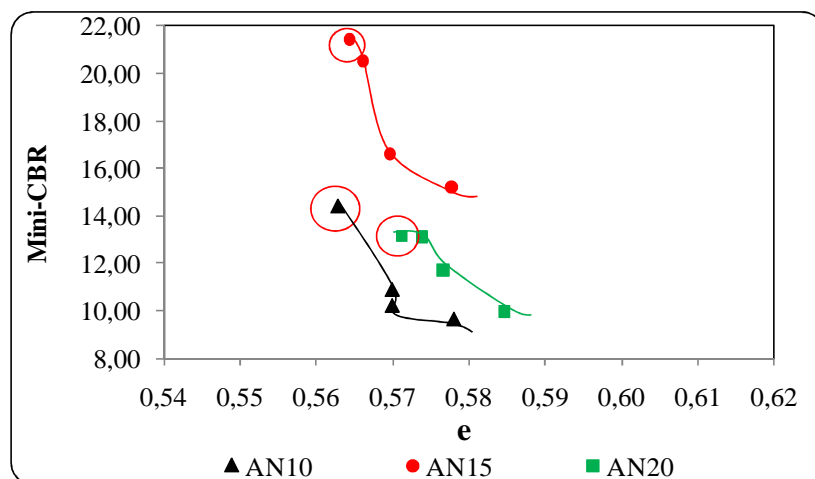


Figura 4.27. Mini-CBR X e - misturas com resíduos finos da pedra Anhanguera.

Na Tabela 4.23 são destacados os resultados obtidos no ensaio de Mini-CBR e expansão para as misturas AN10, AN15 e AN20.

Tabela 4.23. Resumo dos resultados, Mini-CBR e expansão para as misturas com resíduos finos da pedra Anhanguera.

Misturas	AN10		AN15		AN20	
	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão
Tipo do ensaio	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I
Energia Aplicada	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I	E.I
$\gamma_{dmax\ mold}$ Médio (kN/m ³)	17,67	17,67	17,70	17,70	17,57	17,57
γ_{dmax} (kN/m ³)	17,75	17,75	17,73	17,73	17,63	17,63
$\Delta\gamma_{dmax}$	0,08	0,08	0,03	0,03	0,06	0,06
$W_{ot\ mold}$ Média (%)	18,42	18,42	18,47	18,47	16,98	16,98
W_{ot} (%)	18,16	18,16	18,07	18,07	16,38	16,38
ΔW_{ot}	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,6	-0,6
Umidade média após imersão (%)	19,3	-	19,4	-	18,8	-
CBR Médio (%)	10	11	10	18	10	12
Expansão média	0,33	-	0,18	-	0,12	-
Índices de vazios médios	0,57	0,57	0,57	0,57	0,58	0,58
Porosidade	0,36	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37
Grau de Saturação Médio (%)	95,7	91,6	96,8	92,1	92,1	83,2

De acordo com a Tabela 4.23, os valores encontrados de expansão para as três misturas com resíduos da pedra Anhanguera não comprometem a utilização das três misturas em camadas de pavimentos, conforme os limites propostos pelo o manual de pavimentação do DNIT (2006). Esse manual indica como valor máximo de 1% de expansão para camadas de reforços de subleito.

Na Figura 4.28 são reunidos os resultados obtidos dos ensaios de Mini-CBR para as seis misturas em estudo. E ao comparar às seis misturas, a mistura AR10 foi a que apresentou o maior valor de Mini-CBR entorno de 26,2 % quando comparada com as misturas AR15 e AR20, enquanto ao compara as três misturas com resíduos da pedra Anhanguera a que apresentou o maior Mini-CBR foi à mistura AN15 que foi de 21,42%.

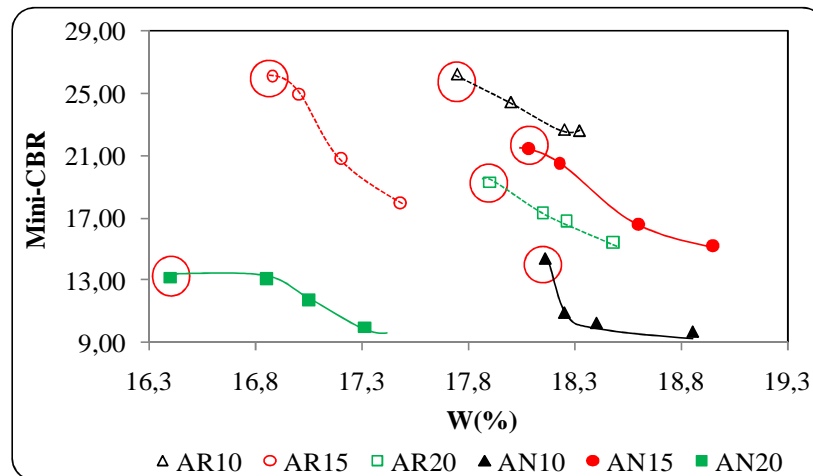


Figura 4.28. Curvas de Mini- CBR versus teor de umidade das seis misturas.

É importante ressaltar que somente as duas misturas que apresentaram maiores Mini-CBR (AR10 e AN15) foram submetidas ao ensaio de módulo de resiliência, ou seja, o resultado encontrado de Mini-CBR foi o critério para as escolha dessas duas misturas. O resultado obtido do ensaio de módulo de resiliência será apresentado posteriormente.

4.4.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Foram determinadas as resistências à compressão simples conforme NBR 12770 (ABNT, 1992) das amostras compostas por resíduos finos, solo natural de Goiânia e também para as seis misturas. Para cada amostra foram moldados quatro corpos de provas nas mesmas condições de umidade ótima e utilizando a energia do Proctor intermediária.

4.4.4.1. Resíduos Finos

Para os corpos de prova compostos apenas por resíduos finos foram utilizados dois corpos de prova com cura de 15 dias e os outros dois CPs foram ensaiados sem cura. A Tabela 4.24 evidencia dados de moldagem de cada corpo de prova submetidos ao ensaio de compressão simples. Os CPs sem cura foram submetidos imediatamente ao ensaio de compressão simples. Já os CPs sujeitos ao processo de cura foram submetidos aos ensaios de compressão simples

após 15 dias, conforme descrito no Capítulo 3. Ressalta-se que este artifício de executar o ensaio de compressão com CPs com cura e sem cura teve a intenção de compará-los e verificar se há interferência significativa nos resultados de resistência a compressão entre os referidos CPs.

Tabela 4.24. Características de moldagem dos CPs das amostras ARtotal e ANtotal submetidos aos ensaios de compressão simples.

Amostras	CPs	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
ARtotal	CP1 (com cura)	15,53	15,75	0,22	13,96	14,3	0,34	0,82
	CP2 (com cura)	15,57	15,75	0,18	14,13	14,3	0,17	0,81
	CP3 (sem cura)	15,67	15,75	0,08	14,23	14,3	0,07	0,80
	CP4 (sem cura)	15,67	15,75	0,08	14,21	14,3	0,09	0,80
ANtotal	CP1 (com cura)	15,33	15,36	0,03	13,62	13,75	0,13	0,79
	CP2 (com cura)	15,28	15,36	0,08	13,47	13,75	0,28	0,79
	CP3 (sem cura)	15,34	15,36	0,02	13,66	13,75	0,09	0,79
	CP4 (sem cura)	15,27	15,36	0,09	13,47	13,75	0,28	0,79

A Figura 4.29 e 4.30 apresentam as curvas tensão deformação obtidas nos ensaios de compressão simples para as amostras ARtotal e ANtotal, respectivamente.

Através da Figura 4.29 observa-se que o CP-1 e CP-2 (amostras ARtotal) apresentaram tensões de ruptura inferiores quando comparado aos CPs sem cura, mas destaca-se que a deformação específica média encontrada para os quatro CPs da pedreira Araguaia apresenta-se igual a 4%. Por meio da análise da Figura 4.30, observou-se que os quatro CPs da amostra ANtotal apresentaram ruptura com esforços muito similares e deformações próximas.

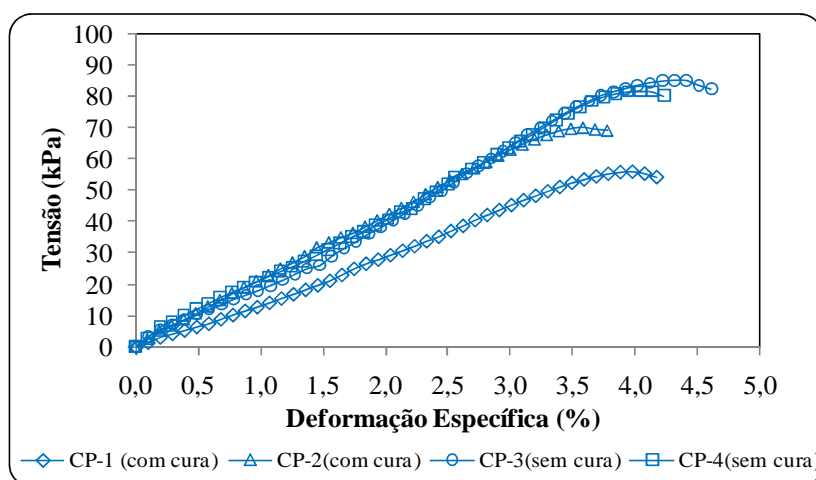


Figura 4.29. Ensaio de compressão simples com a amostra ARtotal.

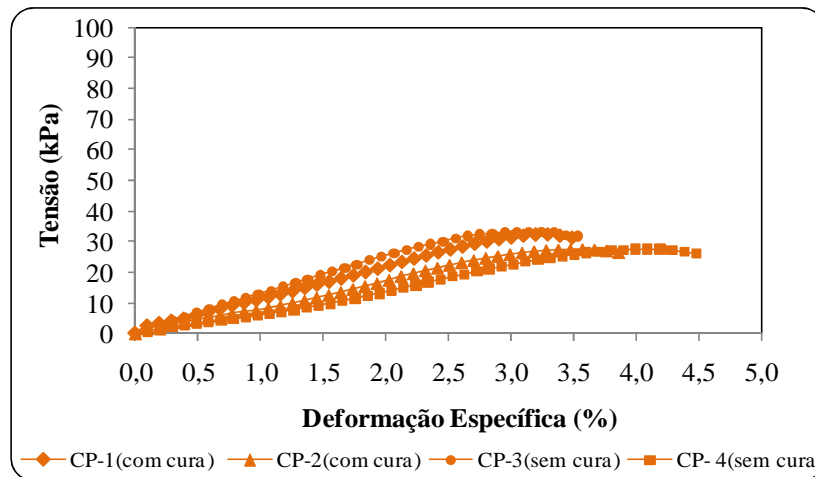


Figura 4.30. Ensaio de compressão simples com a amostra ANtotal.

Para complementar as análises referentes à resistência a compressão simples das amostras ARtotal e ANtotal, também foi realizada a análise desta propriedade em relação a umidade e índice de vazios inicial. Portanto, a Figura 4.31 (a) apresenta a resistência à compressão simples na ruptura (RCS) em função das umidades dos corpos de prova. E a Figura 4.31 (b) apresenta a resistência à compressão simples na ruptura em função do índice vazios inicial dos corpos de prova das amostras ARtotal e ANtotal. A Figura 4.31 (a) mostra que amostra ANtotal apresentou valores inferiores, de resistência à compressão simples, cerca 45%, ao ser comparado com a amostra ARtotal.

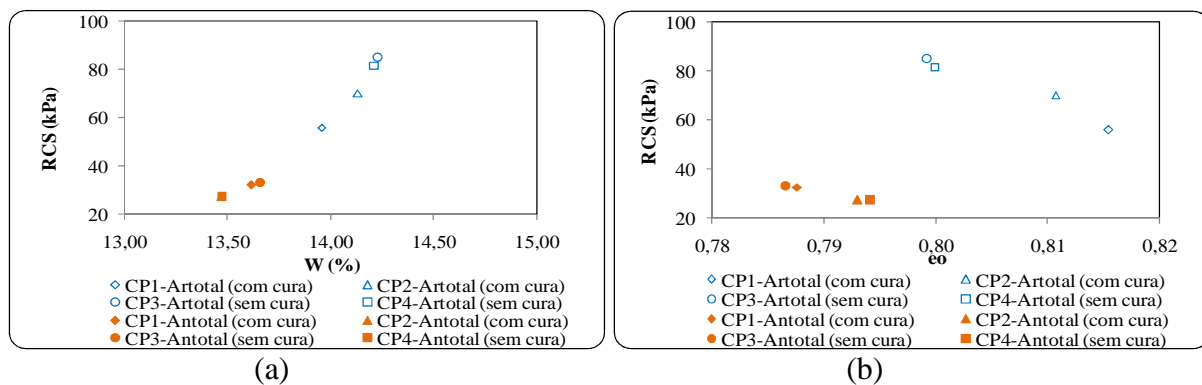


Figura 4.31. Correlações com o ensaio de compressão simples para as amostras ARtotal e ANtotal.(a) RCS x W (%); (b) RCS x e_0 .

A Figura 4.32 exibe a relação entre o módulo de elasticidade em função da umidade de cada corpo de prova para as amostras ARtotal e ANtotal, ressalta-se que o valor do módulo foi calculado pelo módulo secante a 50% (E_{50}).

Baseado na Figura 4.32, pode-se observar que o módulo de elasticidade encontrado para a amostra ARtotal foi superior ao encontrado para ANtotal. O CP2-ARtotal foi o que

apresentou o maior módulo de elasticidade, entorno de 2121,8 kPa e já para amostras da pedreira Anhanguera o maior valor atingido foi de 1294,9 kPa, esse relativo ao CP3-ANtotal.

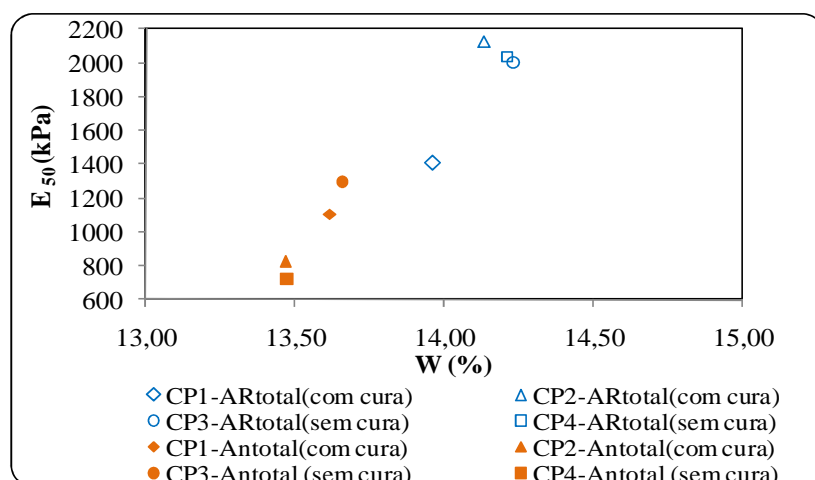


Figura 4.32. Resultados do módulo de elasticidade em função da umidade de compactação das amostras ARtotal e ANtotal.

Diante dos resultados da relação E_{50} em função do teor de umidade, pode-se observar que para a amostra ARtotal o melhor resultado de E_{50} foi para um CP com cura e para a amostra ANtotal o maior E_{50} foi obtido para um corpo de prova sem cura. Cabe ressaltar, que no caso da amostra ARtotal a diferença é muito pequena entre os resultados obtidos de E_{50} para os CP2, CP3 e CP4, levando a incerteza que o artifício da cura seja benéfico ao aumento do E_{50} . Na Tabela 4.25 são exibidos os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão simples para as amostras ARtotal e ANtotal.

Tabela 4.25. Resultados dos ensaios de RCS para as amostras ARtotal e ANtotal.

Amostra	CPs	γ_s (kN/m ³)	W_{mold} (%)	γ_{dmold} (kN/m ³)	Índice de Vazios	Tensão de Ruptura (kPa)	Tensão a 50% (kPa)	Deformação Específica (ϵ -%)	E_{50} -Módulo de Elasticidade (E- kPa)
ARtotal	CP1-ARtotal	28,20	13,96	15,53	0,82	55,85	27,93	1,98	1410,4
	CP2-ARtotal	28,20	14,13	15,57	0,81	70,02	35,01	1,65	2121,8
	CP3-ARtotal	28,20	14,23	15,67	0,80	84,91	42,46	2,12	2002,6
	CP4-ARtotal	28,20	14,21	15,67	0,80	81,43	40,72	2,00	2035,8
ANtotal	CP1-ANtotal	27,40	13,62	15,33	0,79	32,42	16,21	1,47	1102,7
	CP2-ANtotal	27,40	13,47	15,27	0,79	27,30	13,65	1,65	827,3
	CP3-ANtotal	27,40	13,66	15,34	0,79	33,15	16,58	1,28	1294,9
	CP4-ANtotal	27,40	13,47	15,27	0,79	27,55	13,78	1,90	725,0

4.4.4.2. Solo Natural de Goiânia

Como feito para os resíduos, também foi realizado o ensaio de resistência a compressão simples para o solo natural de Goiânia. As características do processo de moldagem dos

quatro corpos de provas relativos à amostra de solo natural estão evidenciadas na Tabela 4.26. A Figura 4.33 apresenta os resultados de resistência à compressão simples para o solo natural.

Tabela 4.26. Características dos CPs do solo natural de Goiânia baseados no ensaio de compressão simples.

Amostra	CPs	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
SN	CP1-SN	17,42	17,45	0,03	19,21	19,00	-0,21	0,59
	CP2-SN	17,44	17,45	0,01	18,92	19,00	0,08	0,59
	CP3-SN	17,42	17,45	0,03	19,22	19,00	-0,22	0,59
	CP4-SN	17,40	17,45	0,05	19,32	19,00	-0,32	0,60

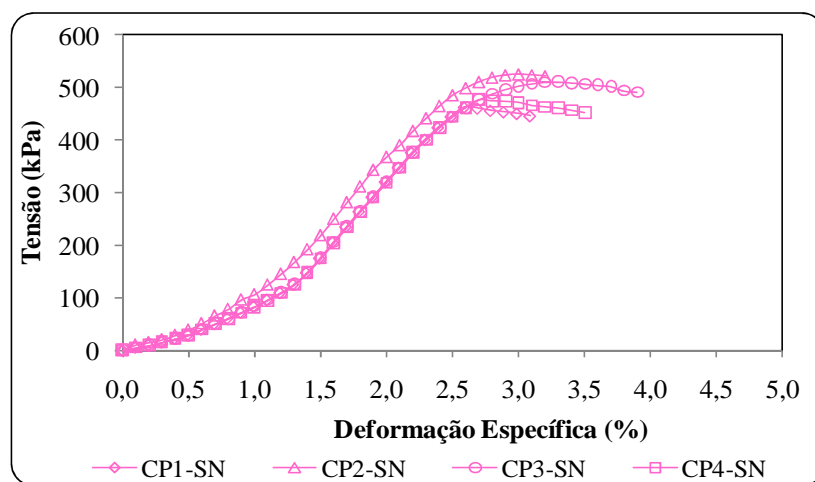


Figura 4.33. Curvas tensão-deformação para o solo Goiânia.

Com os dados obtidos de teor de umidade de moldagem e a resistência a compressão na ruptura foi possível estabelecer uma correlação entre estes dois parâmetros (Figura 4.34a). Adicionalmente, a Figura 4.34 (b) apresenta os dados relacionados à resistência a compressão simples e ao índice de vazios para cada CP.

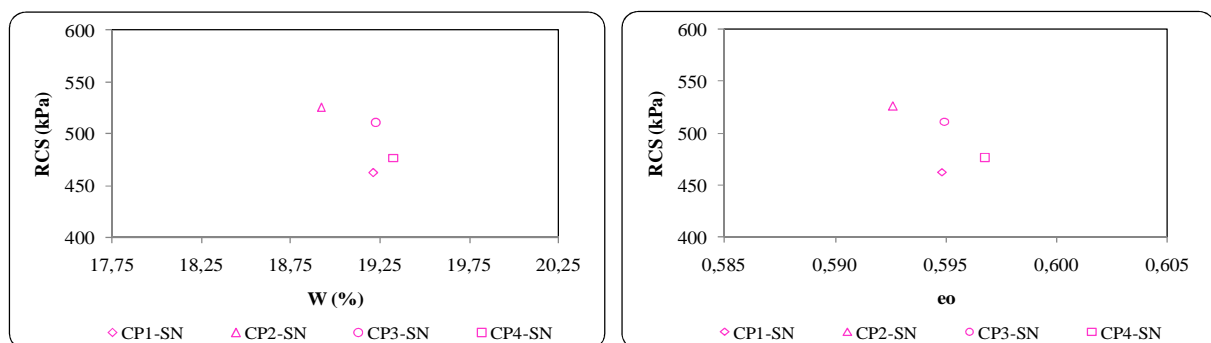


Figura 4.34. Correlações com o ensaio de compressão simples solo natural de Goiânia. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0 .

Observando a Figura 4.34 (a) foi possível perceber que quando houve um aumento da umidade, ou seja, os CPs que estavam acima da W_{ot} ($W_{ot}=19\%$) ocorreu uma leve diminuição da resistência a compressão simples dos mesmos. De acordo com o a Figura 4.34 (b) percebeu-se que o CP1-SN apresentou menor índice de vazios, salienta-se que esse mesmo corpo foi o que evidenciou a maior resistência a compressão simples.

Como feito para as amostra de resíduos finos, na Figura 4.35 são apresentados os valores de módulo secante a 50% em função do teor de umidade de cada corpo de prova do solo natural. Na Tabela 4.27 são destacados os resultados obtidos diretamente do ensaio de compressão simples.

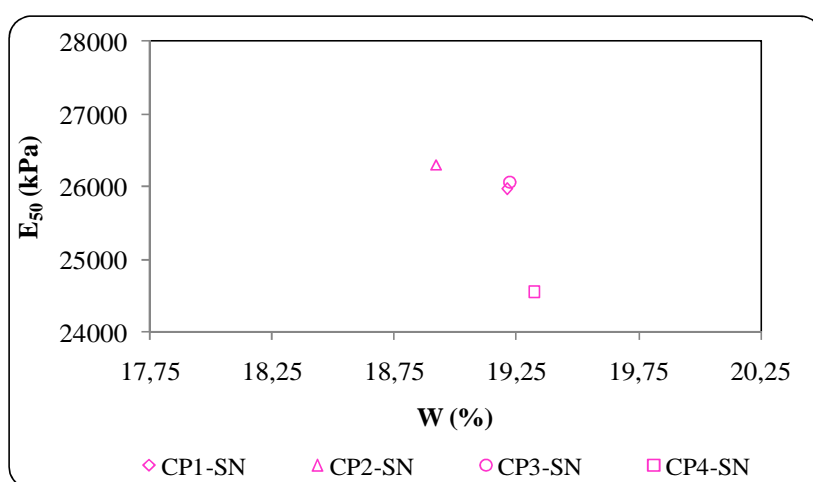


Figura 4.35. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação do solo natural.

Tabela 4.27. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para o solo natural.

Amostra	CPs	γ_s (kN/m ³)	W_{mold} (%)	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	Índice de vazios	Tensão de Ruptura (kPa)	Tensão a 50% (kPa)	Deformação Específica (ϵ -%)	E ₅₀ -Módulo de Elasticidade (E- kPa)
SN	CP1-SN	27,78	19,21	17,42	0,59	462,27	231,14	0,89	25970,22
	CP2-SN	27,78	18,92	17,44	0,59	525,88	262,94	1,00	26294,00
	CP3-SN	27,78	19,22	17,42	0,59	510,75	255,38	0,98	26058,67
	CP4-SN	27,78	19,32	17,40	0,60	476,50	238,25	0,97	24561,86

4.4.4.3. Misturas de solo natural e resíduos finos

Foram realizados também ensaios de compressão simples para as misturas de solo natural com os resíduos da pedreira Araguaia e Anhanguera. Cabe ressaltar, que optou-se por questão de tempo que os ensaios fossem executados com as seis misturas sem cura dos corpos de prova. A Tabela 4.28 evidencia as características iniciais de cada corpo de prova moldado para o ensaio de compressão simples.

Tabela 4.28. Características dos CPs relativos às misturas com resíduos finos da pedraira Araguaia utilizados no ensaio de compressão simples.

Misturas	CPs	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
AR10	CP2-AR10	17,88	18,00	0,12	17,95	17,75	-0,20	0,56
	CP3-AR10	17,74	18,00	0,26	18,09	17,75	-0,34	0,57
	CP4-AR10	17,89	18,00	0,11	17,85	17,75	-0,10	0,56
AR15	CP1-AR15	17,50	17,50	0,00	16,84	16,88	0,04	0,59
	CP2-AR15	17,46	17,50	0,04	16,90	16,88	-0,02	0,59
	CP3-AR15	17,44	17,50	0,06	16,96	16,88	-0,08	0,60
	CP4-AR15	17,50	17,50	0,00	16,81	16,88	0,07	0,59
AR20	CP1-AR20	17,36	17,50	0,14	18,02	17,88	-0,14	0,60
	CP2-AR20	17,49	17,50	0,01	17,89	17,88	-0,01	0,59
	CP3-AR20	17,44	17,50	0,06	17,96	17,88	-0,08	0,60
	CP4-AR20	17,43	17,50	0,07	17,97	17,88	-0,09	0,60

Os resultados de resistência a compressão simples para as três misturas compostas com finos da pedraira Araguaia estão apresentados na Figura 4.36.

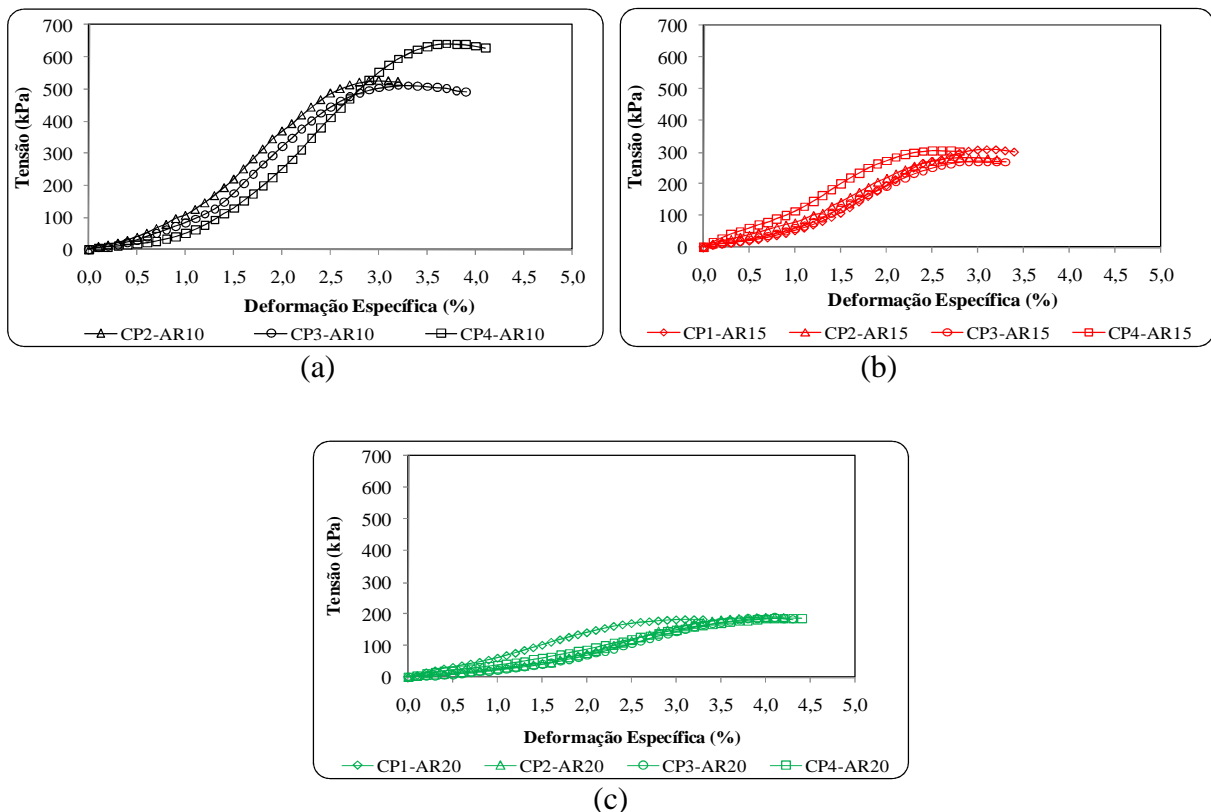


Figura 4.36. (a) Ensaio de compressão simples com a amostra AR10; (b) Ensaio de compressão simples com a amostra AR15; (c) Ensaio de compressão simples com a amostra AR20.

Ressalta-se que com o objetivo de aferir os resultados obtidos foram confeccionados quatro CPs por misturas na energia do Proctor intermediária. É importante justificar que no caso da mistura AR10 foi retirado o resultado relativo ao CP1-AR10, uma vez que ocorreu um erro técnico na execução do ensaio, e conseqüentemente, houve uma incompatibilidade de resultados com os demais CPs.

Fundamentado pelos resultados mostrados na Figura 4.36, percebe-se que com o aumento do percentual de resíduos finos da pedreira Araguaia ao solo natural houve uma diminuição da tensão de ruptura. Porém, as curvas tensão versus deformações das misturas AR15 e AR20 ilustradas na Figura 4.36, demonstram boa convergência de resultados entre elas.

A Figura 4.37(a) apresenta a relação entre a umidade e a resistência a compressão na ruptura e já a Figura 4.37 (b) mostra a variação do índice de vazios com a resistência a compressão simples. Pela Figura 4.37 (b) pode-se observar que a variação do índice de vazios está diretamente relacionada à porcentagem de resíduos incorporado ao solo natural.

Mesmo considerando as pequenas variações de umidades na preparação dos CPs pode-se observar que o aumento no teor de umidade acarretou uma redução na redução de resistência à compressão simples. Esta tendência foi mais evidente para a mistura AR10, sendo que para as outras misturas este comportamento foi menos significativo.

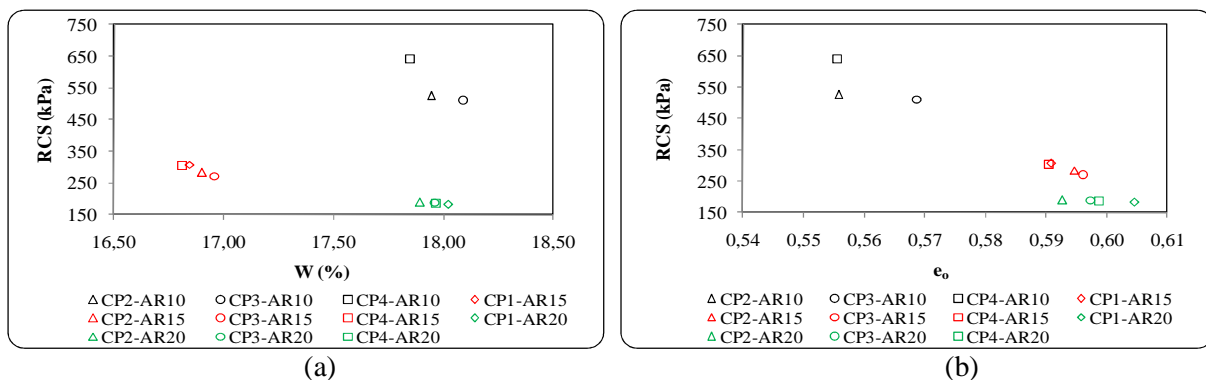


Figura 4.37. Correlações com o ensaio de compressão simples para as três misturas composta pelo resíduo fino da pedreira Araguaia. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0 .

Conforme a Figura 4.37 (a) percebeu-se que a amostra AR10 foi à associação solo mais resíduo que apresentou melhores resultados em relação à resistência à compressão simples e indicou o menor índice de vazios quando comparadas as duas outras misturas da pedreira Araguaia.

Além da determinação da tensão de ruptura avaliou-se também o efeito da adição de resíduo no comportamento do módulo secante a 50%. A Figura 4.38 ilustra a correlação entre o módulo secante a 50% (E_{50}) com os dados de umidade de moldagem de cada mistura de solo com o resíduo da pedraira Araguaia.

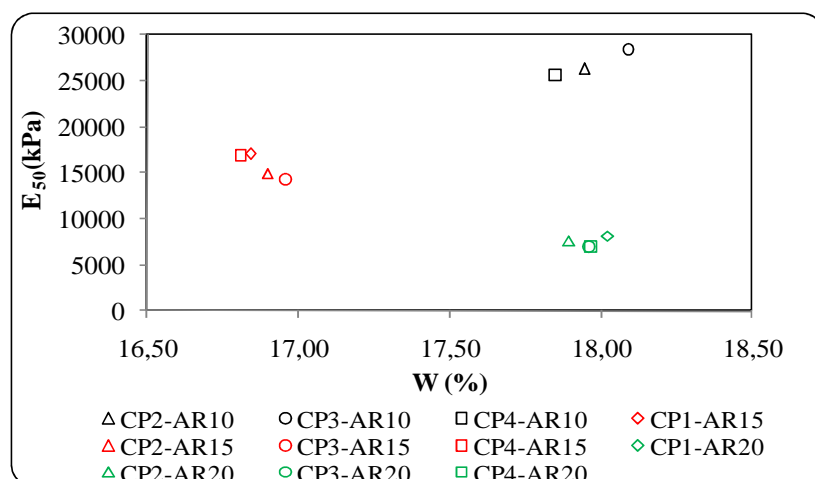


Figura 4.38. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação das amostras AR10, AR15 e AR20.

A Tabela 4.29 evidencia os dados relativos a cada corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples, além de apresentar resultados de deformação e tensão a 50%, módulo elasticidade secante a 50%.

Tabela 4.29. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para as misturas com resíduos finos da pedraira Araguaia.

Misturas	CPs	γ_s (kN/m ³)	W_{mold} (%)	$\gamma_{d\ mold}$ (kN/m ³)	Índice de Vazios	Tensão de Ruptura (kPa)	Tensão a 50% (kPa)	Deformação Específica (ϵ -%)	E_{50} -Módulo de Elasticidade (E- kPa)
AR10	CP2-AR10	27,82	17,95	17,88	0,56	525,88	262,94	1,00	26294,0
	CP3-AR10	27,82	18,09	17,74	0,57	510,75	255,38	0,90	28375,0
	CP4-AR10	27,82	17,85	17,89	0,56	640,50	320,25	1,25	25620,0
AR15	CP1-AR15	27,84	16,84	17,50	0,59	307,41	153,71	0,90	17078,3
	CP2-AR15	27,84	16,90	17,46	0,59	283,25	141,63	0,95	14907,9
	CP3-AR15	27,84	16,96	17,44	0,60	271,45	135,73	0,95	14286,8
	CP4-AR15	27,84	16,81	17,50	0,59	304,36	152,18	0,90	16908,9
AR20	CP1-AR20	27,86	18,02	17,36	0,60	183,64	91,82	1,13	8125,7
	CP2-AR20	27,86	17,89	17,49	0,59	189,45	94,73	1,25	7578,0
	CP3-AR20	27,86	17,96	17,44	0,60	187,81	93,91	1,35	6955,9
	CP4-AR20	27,86	17,97	17,43	0,60	185,61	92,81	1,32	7030,7

Os ensaios de compressão simples também foram realizados para as três misturas da pedraira Anhanguera. Na Tabela 4.30 são apresentadas as características de cada corpo de prova

moldado para o ensaio de compressão simples e a variação entre a W_{ot} e W_{mold} (ΔW), variação entre a γ_{dmax} e γ_{dmold} ($\Delta\gamma_d$).

Tabela 4.30. Características dos CPs relativos às misturas com resíduos finos da pedraira Anhanguera utilizados no ensaio de compressão simples.

Misturas	CPs	$\gamma_{d mold}$ (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
AN10	CP1-AN10	17,73	17,75	0,02	18,23	18,16	-0,07	0,56
	CP2-AN10	17,73	17,75	0,02	18,21	18,16	-0,05	0,56
	CP3-AN10	17,73	17,75	0,02	18,26	18,16	-0,10	0,56
	CP4-AN10	17,74	17,75	0,01	18,18	18,16	-0,02	0,56
AN15	CP1-AN15	17,71	17,73	0,02	18,05	18,07	0,02	0,56
	CP2-AN15	17,71	17,73	0,02	18,04	18,07	0,03	0,56
	CP3-AN15	17,70	17,73	0,03	18,13	18,07	-0,06	0,56
	CP4-AN15	17,71	17,73	0,02	18,06	18,07	0,01	0,56
AN20	CP1-AN20	17,62	17,63	0,01	16,29	16,38	0,09	0,57
	CP2-AN20	17,56	17,63	0,07	16,41	16,38	-0,03	0,58
	CP3-AN20	17,62	17,63	0,01	16,30	16,38	0,08	0,57
	CP4-AN20	17,62	17,63	0,01	16,31	16,38	0,07	0,57

Na Figura 4.39 são evidenciados os resultados obtidos para as três misturas utilizando o resíduo da pedraira Anhanguera no ensaio de resistência a compressão simples.

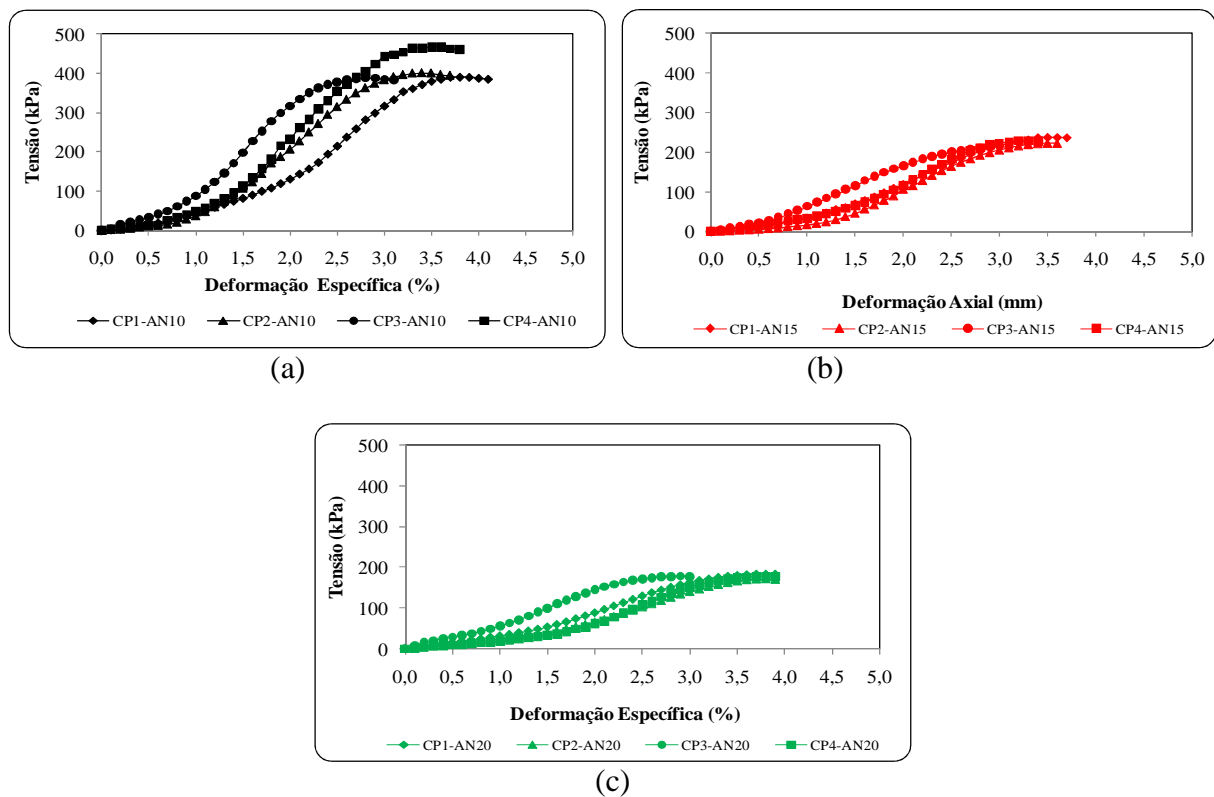


Figura 4.39. (a) Ensaio de compressão simples com a amostra AN10; (b) Ensaio de compressão simples com a amostra AN15; (c) Ensaio de compressão simples com a amostra AN20.

Ao observar a Figura 4.39, percebe-se que mistura AN10 foi a que apresentou melhor resultado quando comparados as misturas AN15 e AN20, com valores de resistência a compressão simples da ordem de 468 kPa. Observa-se uma tendência de diminuição da resistência à compressão simples com o aumento do teor de resíduos da pedra Anhanguera associado ao solo.

A Figura 4.40 (a) apresenta a relação entre a umidade e a resistência a compressão na ruptura e a Figura 4.40 (b) apresenta a variação de índice de vazios com a resistência a compressão simples. Analisando a Figura 4.40 (b) pode-se verificar que a mistura AN10 foi a que apresentou menor índice de vazios e maior tensão de ruptura, quando comparada as mistura AN20 e AN15. No caso a mistura AN20 apresentou o menor valor de resistência a compressão simples, este fato pode estar associado à baixa coesão. Embora o arranjo seja compacto, as partículas estariam menos ligadas entre si, quando comparadas as misturas AN10 e AN15.

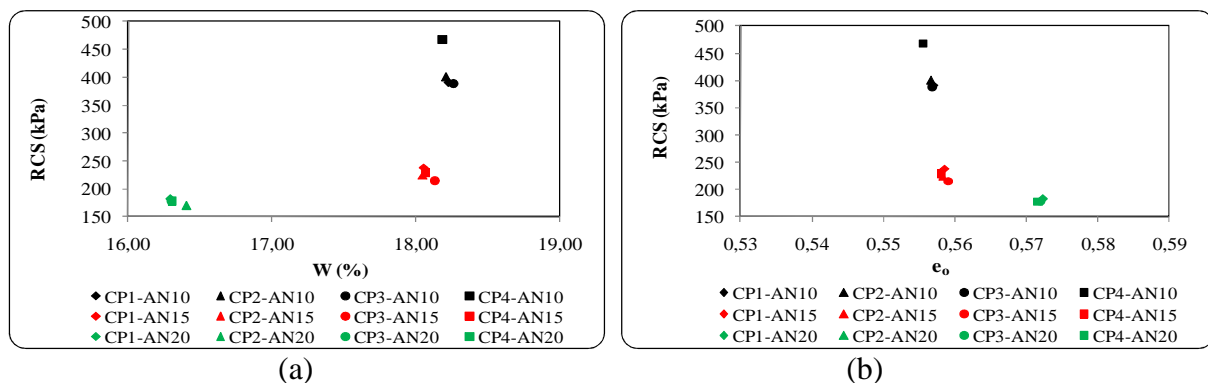


Figura 4.40. Correlações com o ensaio de compressão simples para as três misturas composta pelo resíduo fino da pedra Anhanguera. (a) RCS x W (%) e (b) RCS x e_0 .

Conforme ilustrado na Figura 4.40, foi possível notar que com aumento da porcentagem de resíduos finos houve uma diminuição da resistência a compressão simples. Ou seja, a mistura AN10 foi a que apresentou o maior valor de resistência a compressão simples, corroborando com a afirmação que quanto maior porcentagem de finos menor a resistência a compressão simples.

Considerando a análise do módulo de elasticidade secante a 50% a Figura 4.41 apresenta a correlação entre o módulo de elasticidade a 50% e o teor de umidade para as três misturas da pedra Anhanguera.

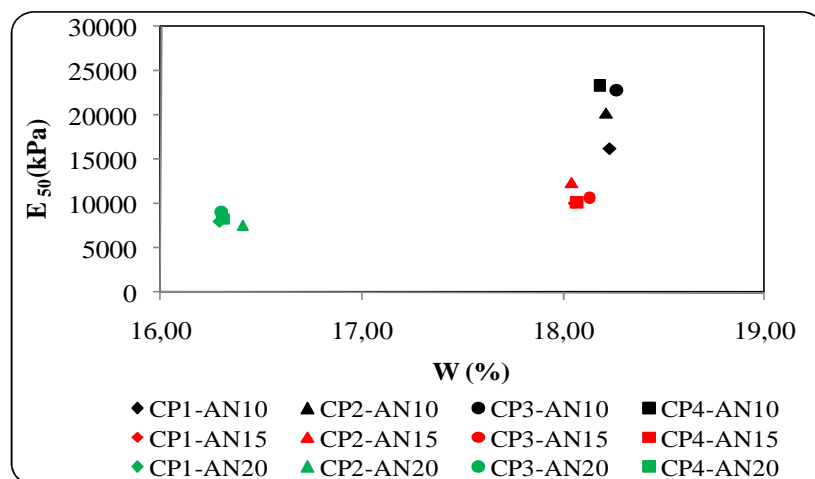


Figura 4.41. Analogia do módulo de elasticidade em relação à umidade de compactação das amostras AN10, AN15 e AN20.

Baseada na Figura 4.41, foi possível destacar que a mistura AN10 foi a que apresentou o maior módulo de elasticidade, quando comparada as misturas AN15 e AN20. Na Tabela 4.31 são apresentados os dados iniciais de cada corpo de prova das misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera.

Tabela 4.31. Resultados obtidos do ensaio de compressão simples para as misturas com resíduos finos da pedreira Anhanguera.

Misturas	CPs	γ_s (kN/m ³)	W_{mold} (%)	γ_{dmold} (kN/m ³)	Índice de Vazios	Tensão de Ruptura (kPa)	Tensão a 50% (kPa)	Deformação Específica (ε-%)	E ₅₀ -Módulo de Elasticidade (E- kPa)
AN10	CP1-AN10	27,74	18,23	17,73	0,56	391,20	195,60	1,20	16300,0
	CP2-AN10	27,74	18,21	17,73	0,56	401,25	200,63	0,99	20265,2
	CP3-AN10	27,74	18,26	17,73	0,56	388,66	194,33	0,85	22862,4
	CP4-AN10	27,74	18,18	17,74	0,56	467,56	233,78	1,00	23378,0
AN15	CP1-AN15	27,72	18,05	17,71	0,56	238,07	119,04	1,18	10087,7
	CP2-AN15	27,72	18,04	17,71	0,56	223,65	111,83	0,90	12425,0
	CP3-AN15	27,72	18,13	17,70	0,56	214,92	107,46	1,00	10746,0
	CP4-AN15	27,72	18,06	17,71	0,56	228,72	114,36	1,13	10120,4
AN20	CP1-AN20	27,70	16,29	17,62	0,57	182,93	91,47	1,13	8094,2
	CP2-AN20	27,70	16,41	17,56	0,58	170,25	85,13	1,12	7600,4
	CP3-AN20	27,70	16,30	17,62	0,57	177,86	88,93	0,98	9074,5
	CP4-AN20	27,70	16,31	17,62	0,57	177,76	88,88	1,07	8306,5

4.4.5. Ensaio de Sucção

Para verificar a influência da porcentagem de resíduos finos de pedreira associado ao solo natural, foi determinada a sucção matricial para todas as misturas e para os dois resíduos finos puros. Ressalta-se que todos os corpos de provas foram moldados semelhantes aos CPs submetidos aos ensaios de Mini-CBR e compressão simples, sendo assim foram compactados

quatro CPs para cada amostra na umidade ótima e com a energia do Proctor intermediária. A metodologia de ensaio para a determinação da sucção foi apresentada no capítulo 3.

Para obtenção dos valores de sucção foram feitas as determinações após um período de cura, ou seja, até atingir o almejado equilíbrio da sucção. O método utilizado para determinação da sucção matricial foi o ensaio com papel filtro, preconizado pela norma técnica D 5298 (ASTM, 1992) e já descrito no capítulo anterior.

As determinações foram feitas após um período de 15 dias de cura, ou seja, até atingir o almejado equilíbrio da sucção.

4.4.5.1. Resíduos Finos

Com o objetivo de conhecer o comportamento da sucção dos resíduos das pedreiras Araguaia e Anhanguera e proceder à comparação com as respectivas misturas e a relação com o Mini-CBR, RCS e E_{50} foi realizado o ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

Embora a adição de resíduo ao solo natural acarrete a formação de um novo material com características diferentes, a proposta desta investigação é avaliar quais as alterações ocorridas no valor da sucção quando se varia o teor de resíduos. Baseado nesta proposta na Tabela 4.32 são apresentados os valores de densidade seca (γ_d), umidade de moldagem (W_{mold}) e índices de vazios dos corpos de prova das amostras ARtotal e ANtotal submetidas aos ensaios de sucção com papel filtro.

Tabela 4.32. Resultados da moldagem das amostra ARtotal e ANtotal utilizados para o ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

Amostras	CPs	γ_{dmold} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{ot} (%)	W_{mold} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
ARtotal	CP1-ARtotal	15,51	15,75	0,24	14,30	14,12	0,18	0,82
	CP2-ARtotal	15,51	15,75	0,24	14,30	14,12	0,18	0,82
	CP3-ARtotal	15,44	15,75	0,31	14,30	14,06	0,24	0,83
	CP4-ARtotal	15,44	15,75	0,31	14,30	14,06	0,24	0,83
ANtotal	CP1-ANtotal	14,99	15,36	0,37	13,75	13,60	0,15	0,83
	CP2-ANtotal	14,99	15,36	0,37	13,75	13,60	0,15	0,83
	CP3-ANtotal	15,06	15,36	0,30	13,75	13,64	0,11	0,82
	CP4-ANtotal	15,06	15,36	0,30	13,75	13,64	0,11	0,82

A Figura 4.42 apresenta a relação de sucção matricial versus teor de umidade para as amostras ARtotal e ANtotal.

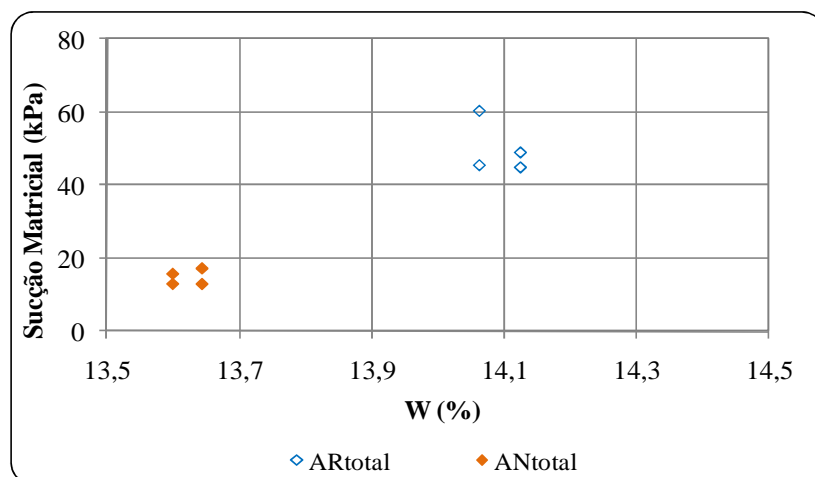


Figura 4.42. Variação da Sucção em relação à umidade para as amostra ARtotal e ANtotal.

Por meio da análise da Figura 4.42 foi possível observar que os valores encontrados de sucção matricial da amostra ARtotal foram superiores ao da ANtotal. Percebe-se ainda que no caso da amostra ANtotal não houve variação relevante no valor da sucção matricial entre os CPs.

4.4.5.2. Misturas de solo natural e resíduos finos

A Tabela 4.33 indica os valores de densidade seca de moldagem, umidade de moldagem e condições de índice de vazios dos corpos de prova das três misturas com resíduos da pedraira Araguaia. A Figura 4.43 apresenta os dados obtidos para as misturas com resíduos da pedraira Araguaia no ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

Tabela 4.33. Características dos CPs das misturas com resíduos finos da pedraira Araguaia no ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

Misturas	CPs	γ_{dmold} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
AR10	CP1-AR10	17,64	18,00	0,36	18,12	17,75	-0,37	0,58
	CP2-AR10	17,64	18,00	0,36	18,12	17,75	-0,37	0,58
	CP3-AR10	17,70	18,00	0,30	18,03	17,75	-0,28	0,57
	CP4-AR10	17,70	18,00	0,30	18,03	17,75	-0,28	0,57
AR15	CP1-AR15	17,41	17,50	0,09	17,72	16,88	-0,84	0,60
	CP2-AR15	17,41	17,50	0,09	17,72	16,88	-0,84	0,60
	CP3-AR15	17,42	17,50	0,08	17,83	16,88	-0,95	0,60
	CP4-AR15	17,42	17,50	0,08	17,83	16,88	-0,95	0,60
AR20	CP1-AR20	17,42	17,50	0,08	18,63	17,88	-0,75	0,60
	CP2-AR20	17,42	17,50	0,08	18,63	17,88	-0,75	0,60
	CP3-AR20	17,42	17,50	0,08	18,49	17,88	-0,61	0,60
	CP4-AR20	17,42	17,50	0,08	18,49	17,88	-0,61	0,60

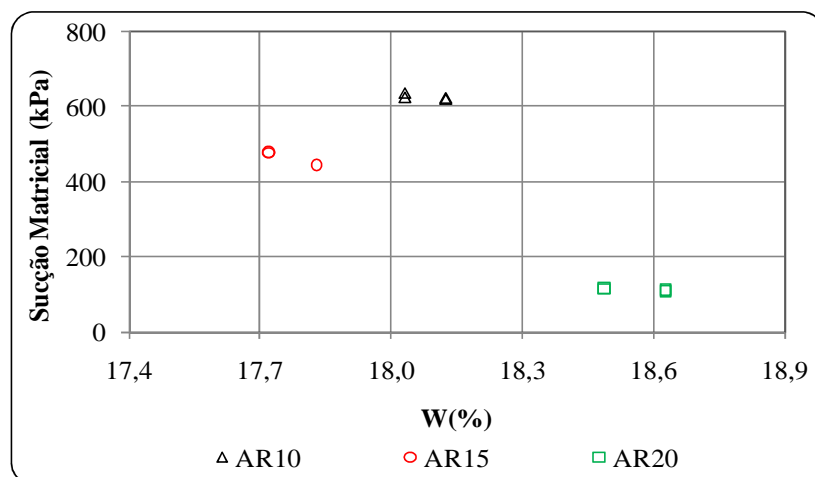


Figura 4.43. Relação entre Sucção Matricial (kPa) e W (%) das misturas AR10, AR15 e AR20.

De acordo com a Tabela 4.33 e a Figura 4.43, pode-se notar que a sucção variou em função da quantidade de resíduo associado ao solo natural. A mistura AR10 que possui menor percentual de resíduo incorporado ao solo natural apresentou maior valor de sucção matricial. Em contrapartida, a mistura AR20 que possui maior quantidade de resíduo foi a que apresentou menor valor de sucção.

Considerando o resíduo da pedra Anhanguera, também foram realizados os ensaios de sucção com as três misturas com 10, 15 e 20% de resíduos da pedra Anhanguera. Os dados de moldagem dos CPs submetidos ao referido ensaio encontram-se na Tabela 4.34.

Tabela 4.34. Características dos CPs das misturas com resíduos finos da pedra Anhanguera utilizados no ensaio de sucção.

Misturas	CPs	γ_{dmold} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)	Índice de Vazios
AN10	CP1-AN10	17,64	17,75	0,11	18,60	18,16	-0,44	0,58
	CP2-AN10	17,64	17,75	0,11	18,60	18,16	-0,44	0,58
	CP3-AN10	17,68	17,75	0,07	18,30	18,16	-0,14	0,57
	CP4-AN10	17,68	17,75	0,07	18,30	18,16	-0,14	0,57
AN15	CP1-AN15	17,62	17,73	0,11	18,09	18,07	-0,02	0,58
	CP2-AN15	17,62	17,73	0,11	18,09	18,07	-0,02	0,58
	CP3-AN15	17,58	17,73	0,15	18,11	18,07	-0,04	0,58
	CP4-AN15	17,58	17,73	0,15	18,11	18,07	-0,04	0,58
AN20	CP1-AN20	17,58	17,63	0,05	17,86	16,38	-1,48	0,58
	CP2-AN20	17,58	17,63	0,05	17,86	16,38	-1,48	0,58
	CP3-AN20	17,58	17,63	0,05	17,85	16,38	-1,47	0,58
	CP4-AN20	17,58	17,63	0,05	17,85	16,38	-1,47	0,58

Na Figura 4.44 é evidenciado a relação entre a sucção e o teor de umidade para as misturas AN10, AN15 e AN20.

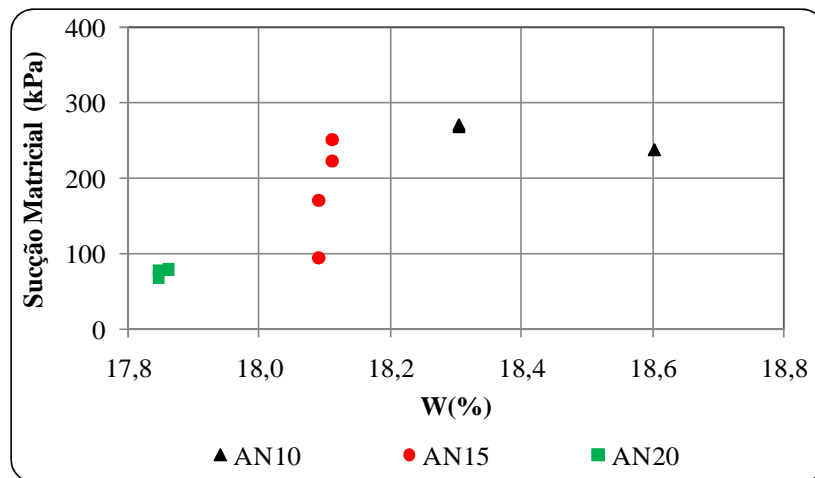


Figura 4.44. Relação entre a Sucção Matricial (kPa) e W (%) das misturas AN10, AN15 e AN20.

Igualmente ao resíduo da pedra Araguaia associado ao solo natural, a Figura 4.44 evidenciou que quanto menor a porcentagem de resíduos nas misturas ocorreu um aumento no valor da sucção. Ao realizar a comparação dos resultados dos ensaios de sucção para as seis misturas (Figuras 4.45), notou-se que embora o solo natural utilizado seja o mesmo para todas as misturas, as diferenças nos dois resíduos causaram um efeito diferenciado sobre os valores de sucção. Por exemplo, a mistura AR10 apresentou sucção média de 626 kPa e para a mesma proporção a mistura AN10 apresentou sucção média de 253 kPa. Constatando que a mistura AR10 possuiu valor de sucção cerca de 60% superior ao valor de sucção matricial obtido para mistura AN10.

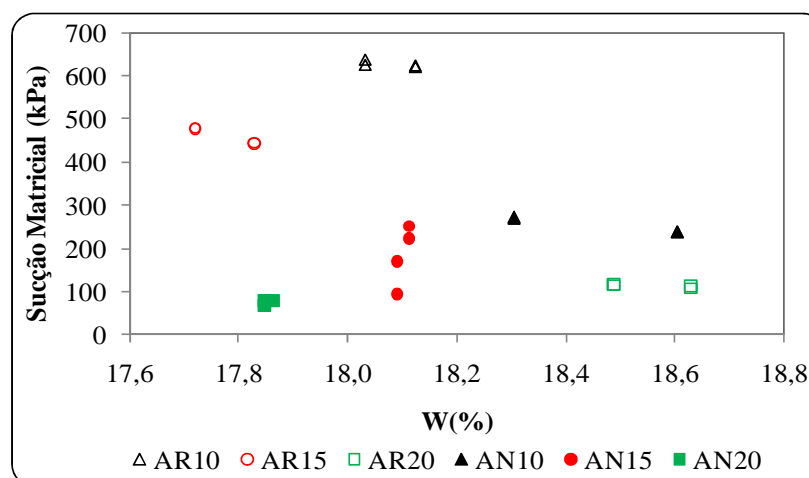


Figura 4.45. Resultados de sucção matricial para as seis misturas compactadas na faixa ótima de umidade.

4.4.6. Correlações de propriedades geotécnicas com o ensaio de sucção

Para o melhor entendimento entre as propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas, foi feito um conjunto de gráficos que correlacionam às referidas propriedades de cada mistura.

Cabe esclarecer que os ensaios de sucção matricial realizados com as seis misturas tiveram objetivo inicial de avaliar a influência da sucção nos valores obtidos nos ensaios de Mini-CBR, RCS e E_{50} . Além disso, foi feita a relação dos respectivos ensaios versus pF/e proposto por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004).

Na Figura 4.46 são apresentadas as correlações entre os resultados de Mini-CBR com os resultados de sucção matricial (kPa).

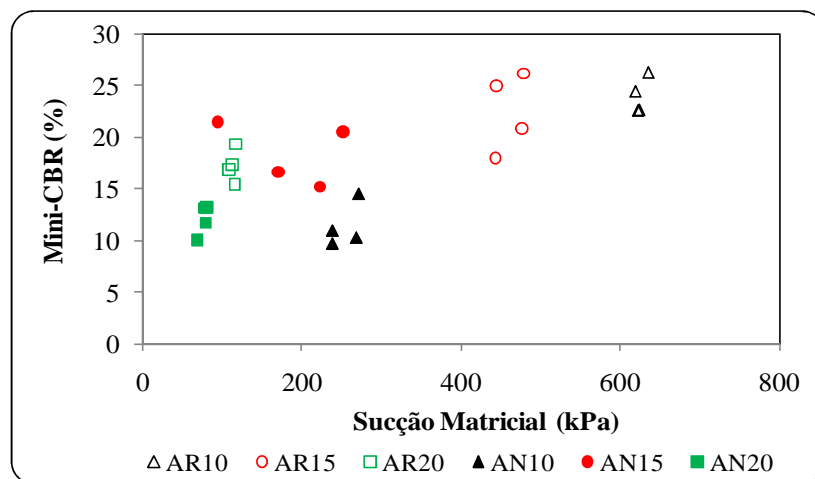


Figura 4.46. Relação de Mini-CBR x Sucção (kPa) para as seis misturas.

De acordo com a Figura 4.46 foi possível observar para as três misturas com resíduo fino da pedreira Araguaia que quanto menor a proporção de resíduos finos em relação ao solo, maior a sucção matricial e, conseqüentemente, houve um leve aumento no valor de Mini-CBR. Este cenário apresenta-se diferente para as três misturas com resíduos da pedreira Anhanguera, uma vez a mistura AN15 foi à amostra que apresentou o maior valor de Mini-CBR, mas não possui a maior sucção.

A Figura 4.47 ilustra a relação de Mini-CBR x pF/e das seis misturas. E percebe-se que pelo fato do índice de vazios variarem muito pouco (Figura 4.25 e Figura 4.27) não houve diferença significativa do comportamento de cada mistura.

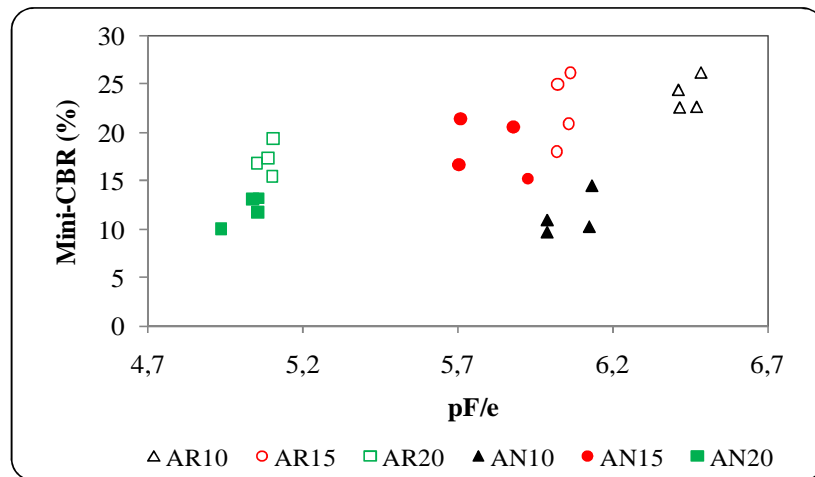


Figura 4.47. Relação de Mini-CBR x pF/e para as seis misturas.

Na Figura 4.48 são evidenciadas as correlações entre a resistência a compressão simples e a sucção matricial. Percebe-se que com o aumento da proporção de resíduos finos ao solo houve um decréscimo de RCS; isto pode ser explicado, pois para teores mais baixos de resíduos em relação ao solo natural têm-se sucções maiores o que leva a RCS maiores. Cabe ressaltar que este comportamento é comum tanto para as misturas com o resíduo da pedra de Araguaia, quanto para as misturas com resíduos da pedra Anhanguera.

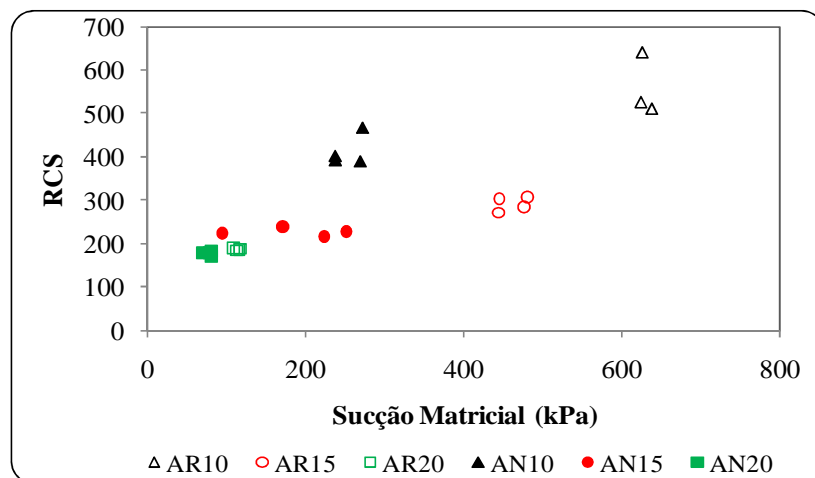


Figura 4.48. Relação de RCS x Sucção (kPa) para as seis misturas.

Com o objetivo de eliminar a influência do índice de vazios no comportamento analisado em função da sucção matricial, na Figura 4.49 são ilustrados os resultados de resistência a compressão simples em função da sucção em pF (pF equivale ao logaritmo da sucção em centímetro de coluna de água), conforme proposta apresentada por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004).

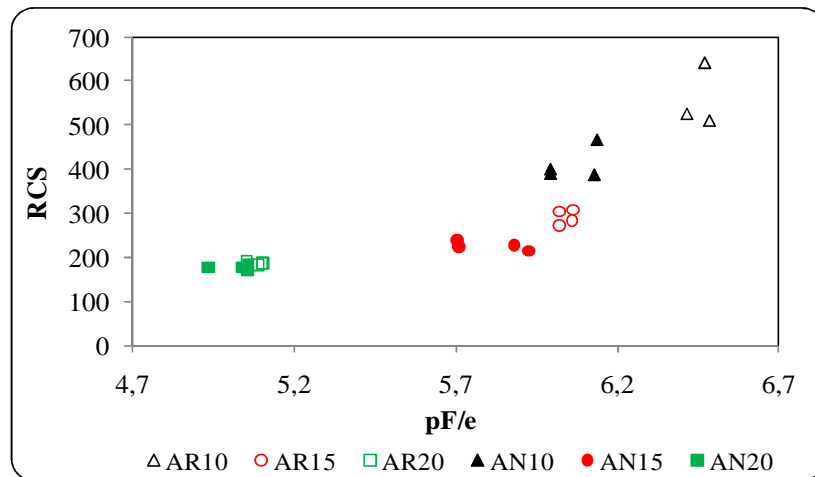


Figura 4.49. Relação de RCS x pF/e para as seis misturas.

Baseado nos resultados ilustrados nas Figuras 4.48 e 4.49, nota-se que tanto o aumento de porcentagem de resíduos quanto os valores de sucção obtidos se mostraram relevantes na variação de resistência a compressão simples. Além disso, percebeu-se que para as três misturas com resíduos da pedra Araguaia que a porcentagem de resíduo em relação ao solo prevalece sobre a variação de sucção matricial. Em contrapartida, os resultados de RCS obtidos para as misturas AN10, AN15 e AN20 mostram que os dois fatores (teor de resíduos e sucção) influenciam de maneira mais equilibrada.

Com o objetivo de explicar a variação do E_{50} em função da sucção para cada mistura, se apresenta a Figura 4.50

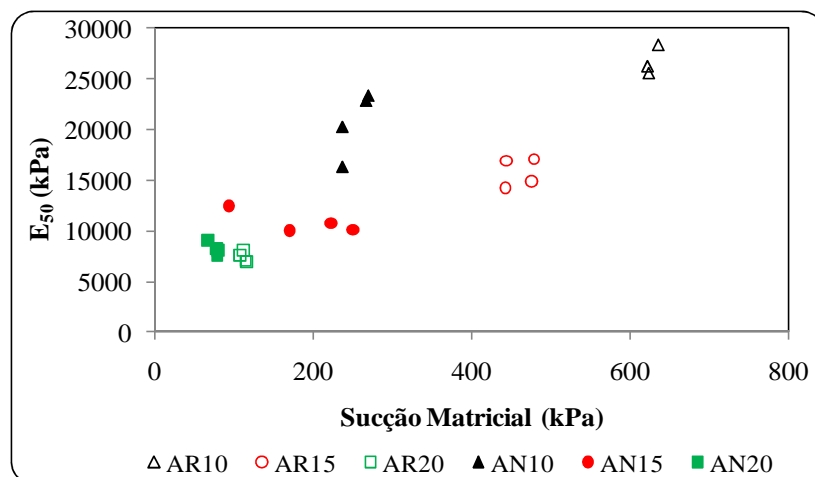


Figura 4.50. Relação de E_{50} x Sucção Matricial (kPa) para as seis misturas.

Por meio da Figura 4.50 foi possível observar que o módulo de elasticidade (E_{50}) apresenta uma relação direta com a sucção. Ou seja, para valores de sucção matricial maiores houve o aumento do módulo de elasticidade secante a 50% para todas as misturas. Além da influência

direta entre a sucção matricial e E_{50} , não se pode esquecer o fato da porcentagem de resíduos em relação ao solo natural também ser um fator relevante nos resultados obtidos de sucção e E_{50} . Mas, nesta correlação foi enfatizada apenas a relação do aumento ou diminuição do E_{50} com a sucção matricial.

Na Figura 4.51 são destacados os módulos de elasticidade secante a 50% em relação ao parâmetro pF/e para as seis misturas. Na Tabela 4.35 é apresentado um resumo dos principais resultados ilustrados da Figura 4.46 até a Figura 4.51.

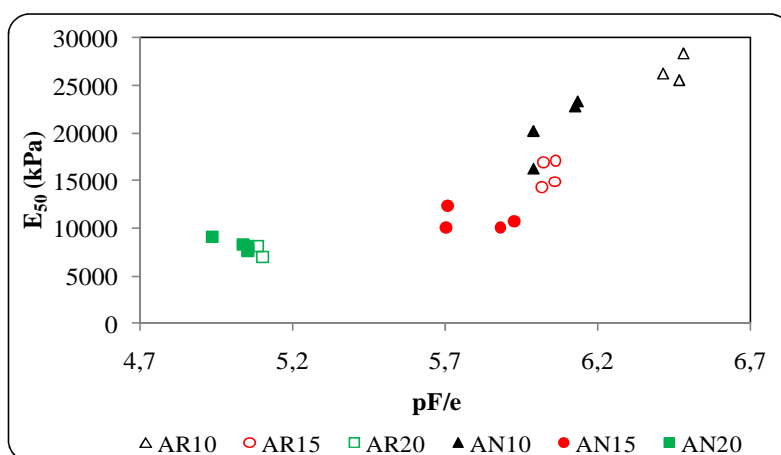


Figura 4.51. Relação de E_{50} x pF/e para as seis misturas.

Tabela 4.35. Correlações da sucção com as propriedades mecânicas das seis misturas.

Misturas	$W_{mold\ sucção}$ (%)	Sucção Matricial (kPa)	RCS	E_{50} (kPa)	Mini-CBR (%)	pF/e
AR10	18,1	622,58	525,9	26294,0	22,6	6,41
	18,0	636,34	510,8	28375,0	26,2	6,48
	18,0	624,22	640,5	25620,0	22,6	6,47
AR15	17,7	479,13	307,4	17078,3	26,1	6,06
	17,7	476,05	283,3	14907,9	20,8	6,06
	17,8	443,20	271,5	14286,8	18,0	6,02
	17,8	444,59	304,4	16908,9	25,0	6,02
AR20	18,6	112,70	183,6	8125,7	17,3	5,09
	18,6	107,49	189,5	7578,0	16,8	5,05
	18,5	115,97	187,8	6955,9	19,3	5,10
	18,5	115,45	185,6	7030,7	15,4	5,10
AN10	18,6	237,53	391,2	16300,0	10,9	5,99
	18,6	237,46	401,3	20265,2	9,7	5,99
	18,3	268,02	388,7	22862,4	10,2	6,13
	18,3	270,94	467,6	23378,0	14,4	6,14
AN15	18,1	170,70	238,1	10087,7	16,61	5,70
	18,1	94,03	223,7	12425,0	21,42	5,71
	18,1	222,91	214,9	10746,0	15,20	5,93
	18,1	251,19	228,7	10120,4	20,52	5,88
AN20	17,9	79,82	182,9	8094,2	13,15	5,06
	17,9	79,42	170,3	7600,4	11,69	5,06
	17,8	68,10	177,9	9074,5	9,97	4,94
	17,8	77,85	177,8	8306,5	13,11	5,04

4.4.7. Ensaio de Módulo de Resiliência

Para segurança do emprego de materiais de construção como camada de um pavimento é de suma importância avaliar o comportamento mecânico desses materiais quanto às solicitações de cargas repetidas.

Diferentemente dos ensaios de Mini-CBR, CBR e compressão diametral, o ensaio de módulo de resiliência propõem avaliar o comportamento dos corpos de provas compactados submetidos a cargas repetidas (carregamento cíclico), reproduzindo mais realisticamente as solicitações que ocorrem em um pavimento.

Para Medina & Motta (1997) o ensaio de módulo de resiliência é vantajoso, por avaliar as propriedades mecânicas dos materiais com a simulação das condições reais de solicitação de campo. Ou seja, o ensaio com cargas repetidas traduz com mais veracidade o que realmente ocorre nos pavimentos rodoviários.

Assim, visando completar as análises realizadas, os ensaios de módulo de resiliência foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico das duas misturas que apresentaram o melhor desempenho no ensaio de Mini-CBR. Neste sentido, as misturas que foram submetidas aos ensaios de módulo de resiliência foram às amostras AR10 e AN15. Os corpos de prova correspondentes às misturas AR10 e AN15 foram compactados na energia intermediária, em cinco camadas visando obter um corpo de prova cilíndrico com dimensões 10 x 20 cm. Cabe ressaltar que os ensaios de módulo de resiliência foram realizados acordo com a norma T 307 (AASHTO, 1999). Na Tabela 4.36 são evidenciadas as características iniciais dos referidos corpos de prova referentes às amostras AR10 e AN15.

Tabela 4.36. Características dos corpos de provas submetidos ao ensaio de módulo de resiliência.

Amostra	γ_{dmold} (kN/m ³)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\Delta\gamma_d$ (kN/m ³)	W_{mold} (%)	W_{ot} (%)	ΔW (%)
AR10	17,75	18,00	0,25	17,10	17,75	0,65
AN15	17,65	17,73	0,08	17,41	18,07	0,66

É importante ressaltar que o cálculo do módulo de resiliência para as duas misturas foi baseado no modelo proposto por Uzan & Witczak (1998), já mencionado no Capítulo 2 sendo denominado por Modelo Universal.

A equação 4.1 evidencia o cálculo do módulo de resiliência por meio do Modelo Universal, sendo que essa equação já foi mencionada no Capítulo 2.

$$M_R = k_1.P_a.\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2}.\left(\frac{\sigma_{oct} + 1}{P_a}\right)^{k_3} \quad 4.1.$$

Onde: M_R é o módulo resiliente; θ é a soma das tensões principais, σ_{oct} é a tensão octaédrica, P_a é a pressão atmosférica e k_1 , k_2 e k_3 são coeficientes determinados experimentalmente

Quanto à modelagem M_R , foram obtidos neste trabalho os parâmetros de resiliência (k_1 , k_2 e k_3) para o modelo universal proposto por Uzan & Witzack (1998). Para a transformação dos parâmetros fornecidos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados (σ_3 , σ_d , σ_1 e σ_{oct}), foram utilizados os dados de ensaios adquiridos nos arquivos de saída e uma planilha de regressão. Nas Figuras 4.52 e 4.53 são ilustradas as planilhas de regressão utilizadas para determinar o módulo de resiliência das amostras AR10 e AN15, respectivamente.

Modelo Universal - Uzan & Witzack (1998)								
$M_R = k_1.P_a.\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2}.\left(\frac{\sigma_{oct} + 1}{P_a}\right)^{k_3}$								
Ensaio :	Módulo de resiliência	Solver			k_1	75,44891858		
Amostra:	AR10				k_2	0,00846657		
					k_3	4,091711839		
					R^2	0,8972		
M_R (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1 (MPa)	θ	σ_{oct} (MPa)	P_a	M_R Calculado (MPa)	Erro (MPa)
125,850	0,410	0,275	0,685	1,505	0,130	1	124,671	1,2
59,720	0,412	0,133	0,545	1,369	0,063	1	97,021	-37,3
137,020	0,408	0,272	0,680	1,496	0,128	1	124,027	13,0
160,740	0,411	0,412	0,823	1,645	0,194	1	156,635	4,1
272,150	0,413	0,684	1,097	1,923	0,322	1	238,064	34,1
84,480	0,274	0,136	0,410	0,958	0,064	1	97,256	-12,8
140,830	0,273	0,272	0,545	1,091	0,128	1	123,696	17,1
158,080	0,277	0,409	0,686	1,240	0,193	1	155,505	2,6
179,500	0,273	0,548	0,821	1,367	0,258	1	193,701	-14,2
266,050	0,273	0,684	0,957	1,503	0,322	1	237,568	28,5
151,220	0,138	0,272	0,410	0,686	0,128	1	123,211	28,0
156,900	0,137	0,410	0,547	0,821	0,193	1	155,213	1,7
218,280	0,137	0,683	0,820	1,094	0,322	1	236,584	-18,3

Figura 4.52. Exemplo de planilha de regressão para a transformação dos parâmetros σ_3 , σ_d , σ_1 e σ_{oct} para o modelo universal proposto Uzan & Witzack (1998), aplicada à amostra AR10.

Modelo Universal - Uzan & Witzak (1998)								
$M_R = k_1.P_a.\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2}.\left(\frac{\sigma_{oct} + 1}{P_a}\right)^{k_3}$								
						k ₁	125,6277673	
						k ₂	-0,571936753	
						k ₃	2,501395846	
						R ²	0,7739	
Ensaio :	Módulo de resiliência	Solver				P _a	M _R Calculado (MPa)	Erro (MPa)
Amostra:	AN15							
M _R (MPa)	σ ₃ (MPa)	σ _d (MPa)	σ ₁ (MPa)	θ	σ _{oct} (MPa)	P _a	M _R Calculado (MPa)	Erro (MPa)
90,710	0,408	0,272	0,680	1,496	0,128	1	134,926	-44,2
64,230	0,410	0,134	0,544	1,364	0,063	1	122,609	-58,4
97,080	0,411	0,273	0,684	1,506	0,129	1	134,553	-37,5
194,740	0,408	0,548	0,956	1,772	0,258	1	160,918	33,8
191,870	0,410	0,687	1,097	1,917	0,324	1	174,669	17,2
115,450	0,274	0,133	0,407	0,955	0,063	1	150,170	-34,7
209,970	0,274	0,411	0,685	1,233	0,194	1	173,560	36,4
197,870	0,277	0,548	0,825	1,379	0,258	1	185,733	12,1
192,320	0,275	0,686	0,961	1,511	0,323	1	199,959	-7,6
184,250	0,136	0,133	0,269	0,541	0,063	1	207,845	-23,6
278,180	0,136	0,272	0,408	0,680	0,128	1	211,807	66,4
221,100	0,136	0,409	0,545	0,817	0,193	1	219,189	1,9

Figura 4.53. Exemplo de planilha de regressão para a transformação dos parâmetros σ_3 , σ_d , σ_1 e σ_{oct} para o modelo universal proposto Uzan & Witzack (1998), aplicada à amostra AN15.

Nas Figuras 4.54 e 4.55 são apresentadas as relações obtidas entre os módulos de resiliência obtidos pelo software de cálculo do equipamento triaxial cíclico e os módulos de resiliência calculados pelo Modelo Universal proposto por Uzan-Witzack (1998) para as misturas AR10 e AN15, respectivamente.

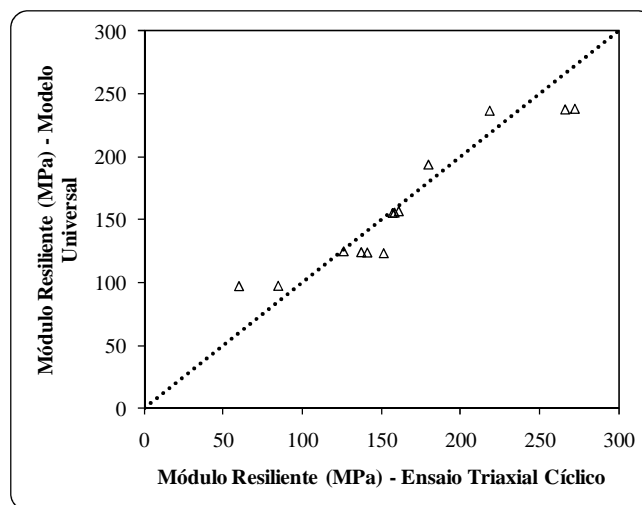


Figura 4.54. Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a composição AR10.

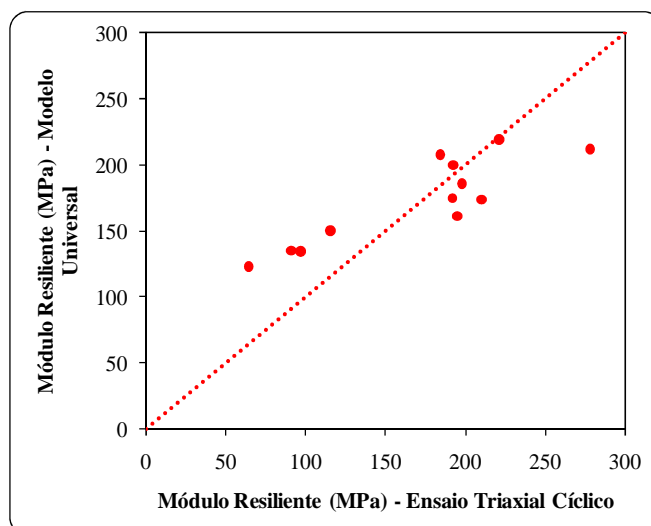


Figura 4.55. Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para a composição AN15.

Analisando os gráficos de igualdade plotados e ilustrados nas Figuras 4.54 e 4.55, pode-se observar menor dispersão para valores de módulos de resiliência para a amostra AR10 quando comparada com a mistura AN15. Contudo percebe-se uma boa correspondência entre os dois métodos de cálculo do Modelo Universal e os valores obtidos pelo programa interno do equipamento. Em relação aos valores máximos de módulo de resiliência determinados de acordo com modelo Universal para as duas amostras investigadas percebeu-se que foram próximos. Por exemplo, o maior valor de módulo de resiliência encontrado para a amostra AR10 foi igual a 238 MPa e o módulo de resiliência encontrado para a amostra AN15 foi de 219 MPa.

Em relação aos efeitos da tensão de desvio e a tensão confinante, inicialmente serão analisados os resultados dos ensaios realizados com as amostras AR10 e AN15, enfatizando a relação dos valores encontrados de módulo de resiliência (modelo universal) em função da tensão confinante. A Figura 4.56 apresenta os resultados obtidos para as duas amostras investigadas.

Por meio da Figura 4.56 foi possível verificar que a amostra AN15, as maiores tensões confinantes conduziram a uma leve redução nos valores de módulo de resiliência. Contudo para a amostra AR10 a influência da tensão confinante não foi muito significativas. Adicionalmente, na Figura 4.56, observa-se que a amostra AR10 apresentou para tensões confinantes similares, diferentes valores de módulo de resiliência, esse mesmo fenômeno ocorreu com a amostra AN15, porém os valores encontrados do módulo de resiliência foram muito mais próximos quando comparado com os obtidos para a amostra AR10.

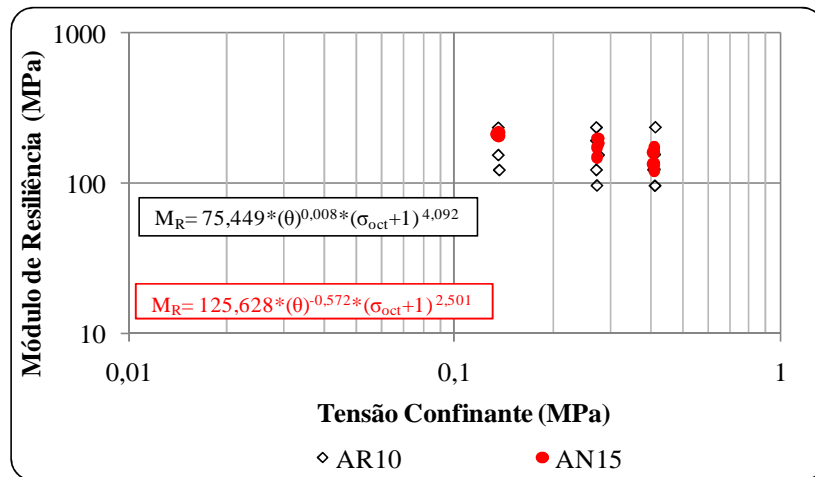


Figura 4.56. Ensaio de módulo de resiliência em função da tensão confinante para as amostras AR10 e AN15.

Na Figura 4.57 são apresentados os resultados obtidos do módulo de resiliência em função da tensão desvio para as amostra AR10 e AN15. Ao observar a Figura 4.57 percebeu-se que com o aumento da tensão desvio ocorreu um pequeno aumento no valor de módulo de resiliência.

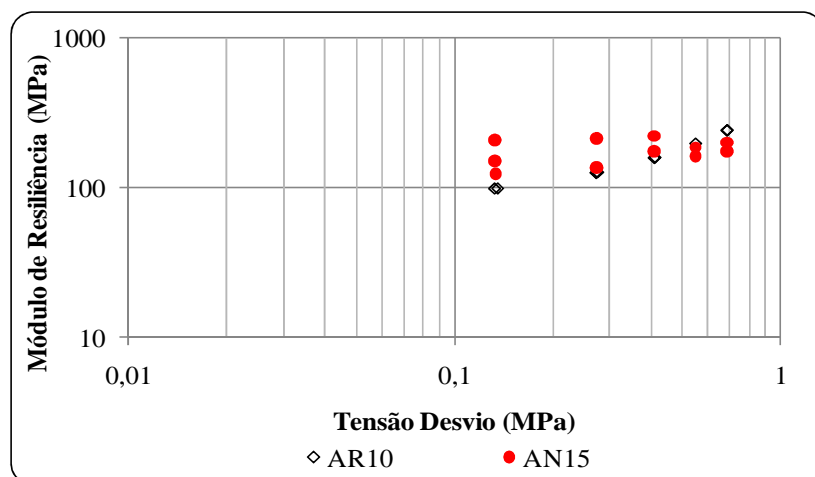


Figura 4.57. Ensaio de módulo de resiliência em função da tensão confinante para as amostras AR10 e AN15.

Em resumo pode-se observar que a mistura AN15 foi sutilmente mais suscetível aos efeitos da tensão de confinante e a amostra AR10 foi mais influenciável pela tensão desvio. Os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos, em geral, indicam que o módulo de resiliência dos solos arenosos depende principalmente da tensão de confinamento (σ_3) e no caso do solo argiloso depende da tensão desvio (σ_d). Observa-se, portanto, que o comportamento das amostras ensaiadas corrobora com o que se costuma observar em estudos que empregam o ensaio de módulo de resiliência.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa objetivou estudar as propriedades de dois resíduos finos de pedreiras do entorno de Goiânia e também de associações destes resíduos a um solo natural típico da cidade de Goiânia/GO como material alternativo em aplicações geotécnicas.

Esta investigação motivou-se pela elevada geração de resíduos oriundos da produção de agregados artificiais. Esses resíduos não possuem valor econômico e ficam depositados nos pátios das pedreiras por tempo indeterminado, podendo causar inúmeros problemas de cunho ambiental.

Neste termos a pesquisa procurou realizar investigações de laboratório com os dois resíduos puros, o solo de Goiânia e as seis misturas (solo+resíduos) com o objetivo de avaliar o comportamento geotécnico destas associações visando seu emprego em obras de pavimentação. A análise de resultados conduziu a constatação de que os materiais utilizados apresentaram comportamento diferenciado em função da porcentagem de resíduos em relação ao quantitativo de solo natural. Para os diversos ensaios realizados, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e observações verificadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

5.2. CONCLUSÕES RELATIVAS À INVESTIGAÇÃO TÉCNICA

- Com base nas análises realizadas a respeito da caracterização física dos resíduos puros, percebeu-se que o resíduo da pedreira Araguaia em termos de granulometria apresentou-se composto por mais frações finas do que os resíduos da pedreira Anhanguera. Ainda, relacionada granulometria dos resíduos puros, as curvas granulométricas não apresentaram diferenças significativas com ou sem o uso de defloculante, possibilitando assim verificar que os resíduos estudados possuem pouca agregação entre as partículas. Portanto, segundo a escala da ABNT, verificou-se que o resíduo da pedreira Araguaia possui granulometria típica de um silte arenoso, enquanto o resíduo da pedreira Anhanguera por apresentar maior porcentagem na fração areia foi considerado como uma amostra arenosa-siltosa.

- O peso específico dos grãos encontrado para a amostra AR_{total} foi levemente superior ao obtido para a amostra AN_{total}. Em relação à plasticidade, os dois resíduos foram classificados como não-plásticos, apesar de apresentarem porcentagem consideráveis de partículas finas, mas que não refletem as características destes tamanhos.
- O solo natural de Goiânia utilizado nesta pesquisa foi classificado pelas metodologias SUCS, TRB e MCT, respectivamente, como uma argila de baixa plasticidade (CL), solo argiloso (A-7-6) e solo argiloso laterítico (LG').
- Com o incremento tanto do resíduo da pedreira Araguaia quanto do resíduo da pedreira Anhanguera ao solo natural de Goiânia, as seis misturas foram classificadas de acordo com a metodologia MCT, como materiais com comportamento de arenoso laterítico (LA'). Esse muito utilizado em pavimentações viárias. Podendo concluir que a associação com resíduo melhorou o comportamento do solo;
- Em relação ao peso específico dos grãos das misturas, percebeu-se que ao incluir porcentagens do resíduo da pedreira Araguaia houve um aumento do γ_s ao comparar com o valor do γ_s obtido para amostra dotada apenas de solo natural. Em contrapartida, para as três misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera houve um decréscimo no valor do γ_s com o incremento do respectivo resíduo ao solo natural.
- Nas análises mineralógicas dos resíduos finos investigados, verificou-se a presença de minerais primários muito comuns para as rochas que dão origem aos resíduos, ou seja, presença marcante do quartzo, esse mineral foi confirmado nos ensaios químicos uma vez que ambos os resíduos apresentaram percentuais acentuados de sílica.
- Com o auxílio da caracterização mineralógica, do valor do pH, e dos percentuais químicos do solo natural de Goiânia foi possível verificar a presença de argilos minerais típicos como a gibsita, caulinita, hematita e goethita, além da presença do mineral primário quartzo confirmando a característica típica do ambiente de formação deste solo.
- Em relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de compactação em miniatura na energia intermediária para os resíduos puros, as duas amostras apresentaram resultados semelhantes de γ_{dmax} e W_{ot} . Além de evidenciarem resultados de índice de vazios mínimos e compacidade muito próxima, sendo que o e_{min} encontrado para as amostras foi muito elevado e a compacidade muito baixa, evidenciando a baixa agregação também revelada nos ensaios de granulometria com e sem defloculante.
- O solo natural apresentou resultados de γ_{dmax} muito superior quando comparado com as amostras de resíduos puros. Entretanto, as seis misturas apresentaram valores de γ_{dmax}

superiores aos encontrados para a amostra de solo natural. A mistura com resíduos da pedraira Araguaia que apresentou maior valor de γ_{dmax} foi à mistura AR10, com cerca de 0,5 kN/m³ a mais que a amostra de solo natural. Para as misturas com resíduo da pedraira Anhanguera a que evidenciou melhor desempenho em termos de γ_{dmax} foi à mistura AN10, apresentando uma valor de γ_{dmax} igual a 17,75 kN/m³, com isso evidenciou cerca de 0,25 kN/m³ superior ao γ_{dmax} do solo natural. Cabe ressaltar que a mistura AN15 apresentou γ_{dmax} (17,73kN/m³) muito próximo ao obtido para a mistura AN10, além de ter evidenciado o mesmo valor de índice de vazios entorno de 0,56. Esses resultados de γ_{dmax} demonstram que com a adição de resíduos no solo natural houve um acréscimo no valor desse parâmetro, resultando no melhor desempenho da amostra para fins de compactação.

- Em termos de umidade ótima, com o aumento da porcentagem de resíduos da pedraira Anhanguera associada ao solo natural, conduziu a redução do teor de umidade ótima. Em relação à umidade ótima para as três misturas com o resíduo da pedraira Araguaia, percebeu-se que com a inclusão desse resíduo ocorreu à redução de W_{ot} até o limite de adição de 15%. A amostra ensaiada na energia intermediária, que recebeu a inclusão de 20% do resíduo da pedraira Araguaia evidenciou um aumento do teor de umidade ótimo em relação às misturas que receberam 10 e 15% de adição de resíduo. Concluindo assim, que a partir da adição 20% de resíduos da pedraira Araguaia ao solo natural, a porcentagem de partículas finas aumenta, necessitando conseqüentemente, de maior quantidade de água para atingir o ponto de umidade ótima de compactação.
- Ao comparar os resultados dos ensaios de Mini-MCV realizados com os dois resíduos puros, observou-se por meio das famílias de curvas de compactação que o valor de γ_{dmax} encontrado para o resíduo da pedraira Anhanguera tendeu a sofrer menos variações para elevadas energias em relação aos resultados obtidos para o resíduo da pedraira Araguaia. As amostras apresentaram valores de γ_{dmax} médios distintos, todavia a inclinação média do ramo seco foram semelhantes.
- No ensaio de Mini-MCV, para as três misturas do solo natural com o resíduo da pedraira Araguaia, percebeu-se que o acréscimo de porcentagem do resíduo gerou uma leve diminuição da inclinação média do ramo seco. Em contrapartida, para as três misturas com o resíduo da pedraira Anhanguera, as variações das inclinações médias foram mais significativas e ainda mais relevantes para a amostra com adição de 20% do resíduo. A inclinação média do ramo seco para o solo natural foi muito inferior quando comparado as

seis misturas investigadas. Essa diferença se justifica pelas diferenças granulométricas de cada amostra.

- Para avaliação da erodibilidade foram executados os ensaios de perda de massa por imersão para as seis misturas. Os resultados encontrados de perda de massa por imersão são condizentes aos elucidados por Nogami & Villibor (1995) para os solos arenosos lateríticos, excetuando o resultado obtido para a amostra AN20 que apresentou P_i igual a 13%. Este resultado pode ser justificado pela maior interação entre as partículas do resíduo com o solo natural. Ressalta-se ainda que o valor de P_i encontrado para a amostra de solo natural foi bem inferior as misturas AR10, AR15, AR20, AN10 e AN15.
- Ao realizar os ensaios de Mini-CBR e compressão simples foi verificado a incapacidade de agregação com amostras de resíduos puros de cada pedreira, ou seja, coesão baixa. Porém, ao associar os resíduos com o solo natural houve uma mudança em relação à estabilidade das misturas.
- Em termos dos resultados do Mini-CBR, para as misturas com o resíduo da pedreira Araguaia, o melhor desempenho foi da mistura com a adição de 10% de resíduos. Já ao analisar os resultados de Mini-CBR para as misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera o melhor desempenho foi obtido pela amostra contendo 15% de resíduo. A amostra dotada apenas solo natural apresentou valores superiores de Mini-CBR ao compararmos com os resultados obtidos das seis misturas investigadas. Para as amostras AR10 e AN15, a quantidade de resíduos para cada uma das amostras adicionada ao solo produziu um CBR superior a 20%, credenciando estas duas misturas como material de sub-base, de acordo com a norma ES 301 (DNER, 1997).
- Os resultados de Mini-CBR versus teores de umidades, mostraram que pequenas variações da umidade representaram grandes variações nos valores de Mini-CBR no caso das seis misturas pesquisadas;
- Apesar de perceber a incapacidade de agregação das amostras compostas por resíduos puros, no ensaio de resistência a compressão simples verificou-se que o resíduo de pedreira Araguaia apresentou maior valor de tensão de ruptura quando comparada com o resultado obtido para o resíduo da pedreira Anhanguera.
- Ao comparar os resultados de RCS, E_{50} e índice de vazios para as três misturas com resíduo da pedreira Araguaia, verificou-se que a amostra AR10 foi a que apresentou melhores resultados. Além disso, o aumento da porcentagem do referido resíduo repercutiu numa relevante diminuição da tensão de ruptura e no módulo de elasticidade. Esse mesmo

comportamento foi verificado para as três misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera, diferindo apenas em relação ao índice de vazios, uma vez que a variação do índice de vazios encontrada foi mínima, mantendo-se o valor médio de 0,57. Ao comparar os resultados de RCS e E_{50} das seis misturas com a amostra do solo natural, verificou-se que a amostra AR10 apresentou o melhor desempenho.

- A sucção matricial encontrada para os dois resíduos puros apresentou valores baixos quando comparada aos resultados obtidos para as seis misturas. É importante ressaltar que a sucção encontrada para o resíduo da pedreira Araguaia foi cerca de 50% maior que o valor da sucção encontrada para o resíduo da pedreira Anhanguera.
- Para as misturas utilizando os resíduos percebeu-se que com o aumento da porcentagem do resíduo associado ao solo natural ocorreu uma diminuição gradativa no valor da sucção. Todavia, destaca-se que os valores de sucção para as misturas com resíduos da pedreira Araguaia sempre foram superiores aos valores de sucção das respectivas misturas com resíduos da pedreira Anhanguera.
- Observou-se que para misturas com o resíduo da pedreira Araguaia, que maiores valores de sucção acarretaram maiores valores de Mini-CBR. Em contrapartida, para as misturas com o resíduo da pedreira Anhanguera, com exceção da amostra com adição de 20% do resíduo, as demais amostras apresentaram comportamento inverso aos das amostras da pedreira Araguaia. Isto é, para a pedreira Anhanguera, quanto menor a sucção maiores os valores de Mini-CBR. Isto revela que aparentemente no caso das misturas com resíduo da pedreira Araguaia a sucção poderia ter condicionado o aumento no valor de Mini-CBR. Entretanto, tal afirmação pode não ser uma única explicação em vista do comportamento apresentado para as misturas com resíduo da pedreira Anhanguera. Nesse sentido sugere-se uma avaliação mais criteriosa desse comportamento.
- A análise conjunta da sucção com as duas propriedades RCS e E_{50} mostrou que os maiores valores de sucção implicaram em maiores valores de RCS e E_{50} para todas as seis misturas. Esse fato evidencia o efeito da sucção neste tipo de ensaio.
- O valor máximo de módulo de resiliência encontrado para a amostra AR10 (238 Mpa) foi superior aos resultados obtidos para a amostra AN15 (219 MPa). Corroborando com os resultados encontrados nos ensaios de Mini-CBR, uma vez que a amostra AR10 apresentou índice de suporte superior (24%) ao comparar com os resultados obtidos de Mini-CBR para a amostra AN15 que foi de 18%.

- Ao relacionar os resultados do módulo de resiliência com a tensão confinante, percebeu-se que a amostra AR10 foi mais influenciada por essa tensão em comparação com a amostra AN15. Contudo, ao relacionar os resultados de módulo de resiliência com a tensão desvio observou-se que a amostra AN15 foi mais suscetível a tensão desviadora, apresentando comportamento coerente com os materiais utilizados na área de pavimentação.
- Nos resultados obtidos com objetivo de avaliar o desempenho mecânico dos materiais investigados, foi observado que as amostras com o resíduo de micaxisto (pedreira Araguaia) apresentaram resultados levemente melhores quando comparados com as amostras com o resíduo de rocha granítica (pedreira Anhanguera). Normalmente, para agregados graúdos, as rochas com minerais lamelares não apresentam bom comportamento mecânico para fins de pavimentação. Logo, deve-se considerar que para o caso estudado, todos os ensaios mecânicos foram realizados com corpos de prova compactados com material de fração granulométrica fina (resíduos). Portanto, infere-se que a semelhança de comportamento do resíduo de micaxisto com o resíduo de rocha granítica ocorreu pelo fato da granulometria ter se sobressaído a forma das partículas, pode-se, deste modo, admitir que o material composto por mica não apresentou comportamento lamelar.
- Por fim, é importante comentar que este trabalho propiciou uma alternativa ambientalmente relevante para transformar um subproduto sem valor econômico (resíduos de pedreira) quando associado a um solo natural, em um novo material artificial com potencialidade de utilização em pavimentação rodoviária. Sendo assim, conclui-se que este trabalho tende a contribuir para um aproveitamento sustentável dos resíduos oriundos do beneficiamento de agregados.

5.3. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.

No decorrer da realização desta dissertação muitas dúvidas puderam ser dirimidas, contudo ainda existem investigações e estudos poderão ser ainda realizados. Com auxílio dessas futuras investigações seria possível obter um maior volume de informações técnicas dos materiais alternativos utilizados e aumentar a contribuição das análises realizadas. Neste sentido são evidenciados a seguir estudos adicionais e pesquisas futuras que possam esclarecer melhor alguns pontos ou mesmo complementar estas investigações.

- Realizar ensaios de granulometria e limites de consistências para as seis misturas investigadas nesta pesquisa, proporcionado assim maior conhecimento em relação à interferência do acréscimo do teor de resíduos no solo natural;

- Realizar ensaios complementares para caracterização química e mineralógica, os quais não foram possíveis de serem realizados nesta pesquisa, tais como: capacidade de troca catiônica (CTC) para todas as amostras, microscopia eletrônica de varredura para todas as amostras, módulo de resiliência para as demais amostras.
- Determinar as curvas características das seis misturas;
- Realizar o ensaio de módulo de resiliência para o solo natural e demais misturas, a fim de comparar todos os resultados;
- Realização de uma pista experimental com as misturas que apresentaram melhores desempenhos e nessa pista executar o monitoramento periódico por meio de ensaios de campo;
- Proceder um estudo sobre a viabilidade econômica do emprego dos dois resíduos em associações com solo natural, em relação aos materiais tradicionais utilizados;
- Caracterização geotécnica dos agregados associados aos finos produzidos nas duas pedreiras para utilização em base de pavimento rodoviário.
- Verificar a compatibilidade e aplicabilidade destes resíduos de pedreira associados aos ligantes betuminosos para serem utilizados em camadas de revestimento.
- Ainda é possível avaliar com pesquisas futuras, a associação dos agregados aos finos resíduos das respectivas pedreiras e solos naturais para utilização em base de um pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1982). Terminologia e classificação de pavimentos, NBR 7207. Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1983). Agregados para concreto – Especificação. NBR 7211. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1984). Agregados – Agregados - Determinação do diâmetro máximo dos agregados - Método de ensaio. NBR 6465. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1984). Limite de plasticidade - NBR – 7180. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1984). Solo - Determinação do limite de liquidez - NBR – 6459. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1984). NBR 7181: Solo Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1984). Solo – Determinação da massa específica dos grãos, NBR 6508. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1986). Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, NBR 6457. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1987). Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos – Método de ensaio. NBR 7219. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1987). Agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis- Método de ensaio. NBR 7218. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1987). Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. NBR 9776. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1987). Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. NBR 7217. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1992). Solo Coesivo - Determinação à resistência à compressão simples não confinada, NBR 12.770. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1993). Agregados – Terminologia. NBR 7225. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1996). Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS. NBR 13602. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2001). Agregados – Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. NBR NM 248. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2003). Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

- ABNT (2004). NBR 10004: Resíduos Sólidos- Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2004). Resíduos Sólidos: Classificação. NBR 10.004. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2005). Agregados – Terminologia. NBR 9935. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ASTM (1992). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) using filter paper, D5298, Philadelphia, E.U.A, 6p.
- AASHTO (1999). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, T 307.
- AGUIAR, L. A. (2008). Estudo da Curva Característica de Solos Compactados. Monografia de Graduação, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás. Anápolis, GO, 93p.
- ALMEIDA, S. L. M. & Sampaio, J. A. (2002). Obtenção de Areia Artificial com Base em Finos de Pedreiras. CETEM- Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: 2002.
- ANGELIM, R. R (2005). Influência do Procedimento de Mistura da Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária.
- AQUINO, F. R. (2008). Determinação dos Parâmetros de Resistência em Solos Compactados. Monografia de Graduação, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás. Anápolis, GO 99p.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D. & PASSOS, E. (1996). Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis, Editora da UFSC. 448 p. Vol. 2. 1ª ed.
- ARAÚJO, W. E. L. (2008). Aproveitamento de resíduos de extração de micaxisto em pavimentos flexíveis. Escola de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Universidade Federal do Goiás, Goiânia, GO 135p.
- BATALIONE, G. (2007). Estabilização de solos tropicais com utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 172p.
- BATISTA, L.C.M. (2009). O Estudo da Influência da Umidade de Compactação na Determinação de Parâmetros de Deformabilidade do Subleito de um Pavimento. Exame de Qualificação. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 72p.
- BISPO, L. H. O.; ALMEIDA, S. L. M. (2005) Obtenção de areia artificial a partir de finos de pedra: In: SEMINÁRIO SOBRE FINOS DE BRITAGEM, 2, 2005, São Paulo. Anais em CD... São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2005.
- CALAES, G. D.(2007). Gestão de negócio. Agregados Para a Construção Civil No Brasil. Contribuições para formulação de Políticas Públicas. CETEC, Minas Gerais, Brasil, pp. 167-232.
- CAMPOS, E.E. (2007). Controle Ambiental. Agregados Para a Construção Civil No Brasil. Contribuições para formulação de Políticas Públicas. CETEC, Minas Gerais, Brasil, pp. 125-166.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J., LEROUEIL, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. Revista Solos e Rochas, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.(2004). Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. In: 5o. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2004, São Carlos. Solos Não Saturados. São Carlos : Vilar, O.M., EESC-USP, 2004. v. 2. p. 1-22
- CAMACHO , J. & BERNUCCI, L.B. (2000), Sucções Matriciais e Índices de Suporte Mini-CBR de um solo arenoso fino laterítico, In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, pp.116-123, Brasília, 2000.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL “Resíduos Sólidos Industriais”, 2ed. rev. ampl., São Paulo, 1993.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA 307, de 5 de julho de 2002.
- COSTA, C. M. C. (2007). Utilização de Rejeitos de Pedreiras para Confeção de Concreto Auto-Adensável Aplicado a Estacas Escavadas. Seminário de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 20 p.
- COSTA, O.P.(2005). Avaliação de Expansão, Contração e Resistência à Compressão Simples de Barreira Selantes Produzidas com Solo Laterítico Estabilizado Quimicamente. Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (Unesp). Área de concentração: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais. Ilha Solteira, São Paulo. 104p.
- COSTA, J. B. (1991) Caracterização e Constituição do Solo. Editora Fundação Calouste Gulbenkian de Lisboa. 4ª Edição. 527p.
- CUTI, C. A. C (2008). Metodologia para cadastro georreferenciado de pedreiras – estudo de caso de duas pedreiras no entorno de Goiânia/GO. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 127p.
- DANA, J. D. (1969). Manual de Mineralogia. Ao Livro Técnico S. A. Editora da Universidade de São Paulo. Volume I.354p
- DELGADO, A.K,C. (2002). Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. Dissertação de Mestrado, G. DM. 93A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 181p.
- DIAS, C.R.C.; DIAS, C.R.R.; CERATTI, J.A (2004). Soluções para pavimentos urbanos utilizando resíduos industriais e solos locais. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36. 2005, Curitiba. Anais eletrônicos do 36.a Reunião Anual de Pavimentação [CD-ROM]. Curitiba, 2000. n.p.
- D’AGOSTINHO, L. Z. (2004) Uso de Finos de Pedreira no preparo e argamassas de assentamento. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica , Universidade de São Paulo, São Paulo 119p.
- DNER (1994). ME 086 – Agregados: determinação do índice de forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNER (1994). ME 228 – Solos - compactados em equipamento miniatura. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 14p.

- DNER (1994). ME 258 – Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNER (1994d). ME 256 – Perda de massa por imersão em água. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- DNER (1997 c). ME – 254. Solos compactados em equipamento miniatura, MINI – CBR e expansão. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNER (1998b). Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”. ME 035. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNIT (2006). Publicação IPR – 719, Manual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, 294p.
- DNPM (2005). Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2005. Brasília, DF.
- EMBRAPA (1997). Manual de Métodos de Análise de Solos; Editora EMBRAPA, 2ª edição, Rio de Janeiro, RJ, 212p.
- EMBRAPA (1999). Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 412 pp.
- FERREIRA, J. C. (2009). Estudo Sobre Drenagem e Redução de Umidade do Minério de Ferro de Carajás com Utilização de Geossintéticos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 98p.
- FRANZOI, S. (1990). Algumas Peculiaridades Resilientes de Solos Lateríticos e Saprolíticos. Dissertação apresentada à EPUSP para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. São Paulo.
- FRAZÃO, E. B. (1991). Caracterização tecnológica de rochas de revestimento. Revista Rochas de Qualidade, nº 110, p. 110-113.
- FOOKES, G. P. (2004). *Suelos Residuales Tropicales*. Medellín. Hombre Nuevo Editores. 235p.
- FORTES, R. M. (1999). Estudo da Aderência entre Placas de Concreto de Cimento Portland e Concretos Asfálticos para Fins de Reforços Ultras delgados de Pavimentos, Tese de Doutorado, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 335p.
- FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. (1998). Geologia do Brasil. In: Oliveira, A. M.S; Brito, S. N. A. (Eds). Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE. Cap.20, p.331-360. 1998.
- FRAZÃO, E. B., 2002, Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 132 p.
- FRAZÃO, E. B. (2007). Tecnologia para a produção e utilização de agregados. Agregados Para a Construção Civil No Brasil. Contribuições para formulação de Políticas Públicas. CETEC, Minas Gerais, Brasil, pp. 25-73.

- FREDLUND D.G., RAHARDJO (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, INC, New York, USA, 517p.
- FREDLUND, D.G. & XING, A (1994), “Equations for the soil-water characteristic curve” *Can. Geotech. J* 31 pp 521-532
- GONÇALVES, R. F., PARREIRA, A. B. (1999). Influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso de subleito rodoviário, In: XIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, pp. 395-405, São Carlos, SP.
- GRIM, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. New York, McGraw Hill, 422p.
- GUIMARÃES, E. M. (1999). Apostila do Mini- curso de Difractometria de Raios-X. In: XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. Brasília, DF.
- GUIMARÃES, R. C. & Jacintho, E. C. (2008). Relatório de Compactação. Programas 234 e 270. FURNAS, Goiânia, GO. 43p.
- JACINTHO, E. C. (2008) Estudo do Comportamento Hidráulico de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens. Exame de Qualificação. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 50p.
- JUNQUEIRA, F. F.(1994). Caracterização do Calcário do Distrito Federal e Avaliação do seu Potencial para Uso na Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 95p.
- LAMBE, W.T. (1967). *Soil Testing for engineers*. 12. ed. New York. John Wiley & Sons. 165p.
- LUZ, M. P., CASTRO, S.S., REZENDE, L. R., ARAÚJO, A. L. S. (2006). Análise da viabilidade técnica da utilização de rejeito de pedra dosado ao solo com material pavimentação. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. ABMS. Curitiba, PR,
- MARANGON, M. (2004). Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, RJ, 331p.
- MARINHO, F. A. M. (1997). Medição de Sucção em Solos. In: Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 3, Rio de Janeiro, RJ, Anais.Vol 2, PP 373-397.
- MENDES, K. S., (1999). Viabilidade de Emprego de Finos de Basalto em Concreto Compactado a Rolo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 109p.
- MEDINA, J. & PREUSSLER, E. S. (1980). Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, COPPE-UFRJ, vol.3, no 1, 3-26.
- MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 380p.
- MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G. (1997). Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos de baixo volume de tráfego. I SINBATRA – I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Rio de Janeiro, I: 190-199.
- MEDINA J., MOTTA, L. M. G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*, editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 574p.

- MELLO, L. G. R. (2008). A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, G.TD- 055/08. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 247p.
- MOURA E. , BERNUCCI L. B., CANALES W. S., (2006). M-MCV Simplificado – Cálculo do coeficiente c' uma abordagem didática. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPV, Goiânia. GO, Artigo 34, 11p.
- MUÑETÓN, C. M. G.(2009), Uso da Biotecnologia na Melhoria de Solos para Fins de Pavimentação Rodoviária. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 101p.
- MUNIZ, M. F. & Palmeira, E. M. (2007), Livro Materiais de Construção Civil. Ibracon. Capítulo 16.
- NEVILLE, A. M. 1997. Propriedades do Concreto. Ed. Pini, 2ª ed., São Paulo, SP.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 1: 30-41.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo, editora Villibor. 213p.
- OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. (1998). Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, SP 586p.
- PARREIRA, A. B. et al. (1998). O módulo resiliente de alguns materiais de pavimentação e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, Brasília. Anais... Brasília: 1998. p. 149-155.
- PARSONS, A.W(1976). The rapid measurement of the moisture condition of earthwork material. Transportation and Road Research Laboratory, Report, n.750.
- PARSONS, A.W. & BODEN, J.B. (1979). The moisture condition test and its potential applications in Earthworks, Supplementary Report 522. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, U.K.
- PINTO, C. S. (2002). Curso básico de Mecânica dos solos em 16 aulas. Ed. Oficina de Textos. p.105.
- PINTO, S. & PREUSSLER, E. (2002). Pavimentação Rodoviária. Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos flexíveis. Copiadora e Artes Gráficas Ltda. Rio de Janeiro, RJ 255p.
- PREUSSLER, L. A. (2007), Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimentos. Dissertação de Mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- QUEIROZ, F. C. & FRASCÁ, M. H. B. O. (2008). Estudo para aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento portland. Revista Exacta, São Paulo, v.6, n.1, p.83-92, jan./jun..
- RAMIRO, R. F.; PAMPLONA, D. R. P.; IVAN, F. J. ; COLLARES, E.G. (2008). Estudo Comparativo de Rejeitos de Quartzito com Outros Agregados Comercialmente Utilizados como Materiais de Construção no Sudoeste de Minas Gerais. Revista Ciência ET PRAXIS, v1, n1.

- REGADA, I. C. M. C. (2007). Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 125p.
- REZENDE, L. R. (1999). Técnicas alternativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado, G.DM-055A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.
- REZENDE, L. R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 358p.
- SANTOS, P. S. (1975). Tecnologia de Argilas. Editora Universidade de São Paulo. Vol I . São Paulo, SP.340p.
- SANTOS, J. (2004). Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 109p.
- SANTANA, H. & GONTIJO, P. R. A. (1987). Os materiais lateríticos na pavimentação de baixo custo no Brasil. 22a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Maceió, AL, 805- 899.
- SANTANA, H. (1993). Mecânica dos pavimentos de baixo custo. 27a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Teresina, PI, 1:489-521.
- SILVA, P. A.(2000). “Estudos geotécnicos na recuperação ambiental da pedreira municipal de Pirenópolis”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF 142p.
- SENÇO, W. (1997). Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo: Pini.
- SILVEIRA, L. L. L. (2007). Polimento de Rochas Ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, Campus São Carlos. São Carlos, São Paulo, SP 227p. .
- SINDIBRITA (2006). Panorama do Mercado de Agregados para Construção Civil no Estado de Goiás. Arquivo digital consultado no endereço: http://www.dnpm.gov.br/go/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=1534
- TAVEIRA, A. L. S. (1997). Análise Qualitativa da Distribuição de Custos Ambientais. Estudo de Caso da Samarco Mineração. Dissertação de Mestrado em Administração e Política de Recursos Minerais, Universidade Estadual de Campinas; Campinas, SP, 187p
- TEIXEIRA, W. ; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2000). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.
- THULER, R. B. (2005). Estudo de Solos do estado do Rio de Janeiro para aplicação em rodovias de baixo volume de tráfego. Tese de Doutorado, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 174p.
- TONSO, S.(1994). As Pedreiras no espaço urbano: perspectivas construtivas, Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, 1994, p. 131.
- VARGAS, M. (1978). Introdução à mecânica dos solos. McGraw Hill, São Paulo, 1978, 509p.
- UZAN, J. & WITCZAK, M. W. (1998). The Universal Airport Pavement Design System, Report I of IV: Granular Material Characterization. University of Maryland, College Engineering, College Park, MD, EUA.

APÊNDICES

ENSAIOS REALIZADOS COM OS AGREGADOS DAS PEDREIRAS ARAGUAIA E ANHANGUERA.

Complementando estes estudos foram realizados ensaios com os produtos obtidos nas duas pedreiras, estes ensaios tiveram como objetivo principal a elaboração de um banco de dados contendo as características básicas e desses agregados avaliar possivelmente alguma associação que possa viabilizar ainda mais a aplicabilidade dos resíduos em obras viárias.

As características básicas analisadas foram: análise granulométrica, teor de material pulverulento, módulo de finura, diâmetro máximo característico, massa específica real, massa específica aparente, absorção de água, teores de argilas em torrões e materiais friáveis, índice de forma e abrasão los angeles.

A. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO

Foram realizados os ensaios de granulometria e teor de material pulverulento com todas as frações de agregados produzidos pelas duas pedreiras dentro do circuito de britagem. Esses ensaios foram realizados em conformidade com as normas NBR NM 248 (ABNT, 2001) e a NBR 7219 (ABNT, 1987), respectivamente.

Na Figura A.1 são ilustradas as curvas granulométricas relativas às amostras de areias artificiais coletadas nas pedreiras Araguaia e Anhanguera.

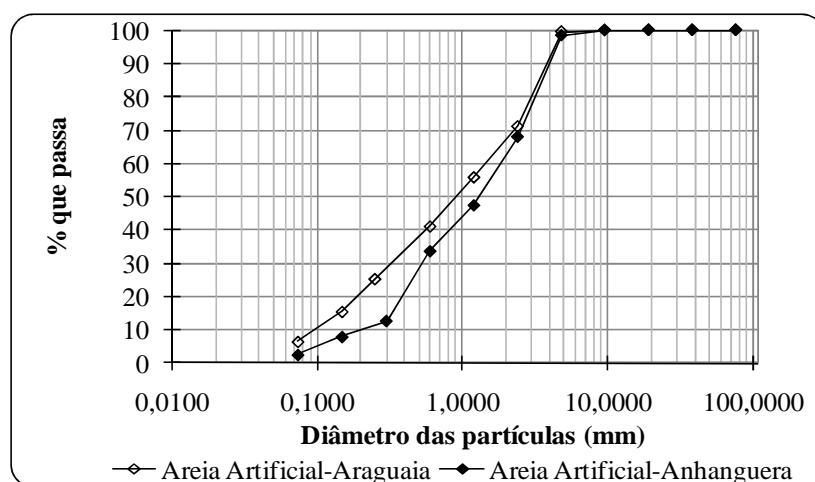


Figura A.1. Análise granulométrica da areia artificial da pedreira Araguaia e Anhanguera.

Com base nas curvas granulométricas apresentadas na Figura A.1, a Tabela A.1 pode-se obter as porcentagens retidas acumuladas em cada uma das peneiras de série normal. Ressalta-se que a série de peneiras utilizadas nos ensaios de granulometria dos agregados graúdos e miúdos foi baseada nos procedimentos prescritos na NBR 7217 (1987). Juntamente com dados de porcentagens retidas em cada peneira, na Tabela A.1 são apresentadas as principais

características dos agregados miúdos como o Diâmetro Máximo Característico (DMC), Módulo de Finura (MF) e Teor de Materiais de Pulverulentos (TMP).

Tabela A.1. Porcentagens das frações granulométricas e características básicas das areias artificiais produzidas nas pedreiras Araguaia e Anhanguera.

	Amostras	Areia Artificial Araguaia	Areia Artificial Anhanguera	
Peneiras (mm)	9,5	-	0,17	Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm.
	4,8	0,54	1,64	
	2,4	28,92	32,05	
	1,20	44,20	52,58	
	0,60	58,90	66,36	
	0,30	74,66	87,19	
	0,15	85,46	92,00	
Características	DMC (mm)	Ø4,8	Ø4,8	
	MF	2,92	3,32	
	TMP (%)	6,65	2,60	

Baseados nos resultados obtidos, verifica-se que a areia artificial produzida na pedreira Araguaia é classificada como areia média (zona 3) e a areia artificial da pedreira Anhanguera é classificada como areia grossa (zona 4), essa classificação foi estabelecida de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 1983). Ao comparar os resultados encontrados do teor de materiais pulverulentos para areia artificial da pedreira Araguaia com os da pedreira Anhanguera, percebe-se que a areia da pedreira Araguaia apresenta percentual superior de material pulverulento ao encontrado para a areia da pedreira Anhanguera. Na NBR 7211(ABNT, 1983) são apresentados limites de teores de materiais pulverulentos para o emprego de agregados miúdos em concreto, essa norma estabelece limite máximo de 7% de teores de materiais pulverulentos (TMP), quando o agregado miúdo analisado for oriundo de britamento de rochas, portanto as duas amostras de areia artificial ensaiadas ficaram dentro dos limites percentuais em relação ao TMP.

Assim como para o agregado miúdo, foram realizados os ensaios de granulometria dos agregados graúdos (brita 0, brita 1 e brita 2). As curvas granulométricas das britas das duas pedreiras estão ilustradas nas Figuras A2, A3 e A4.

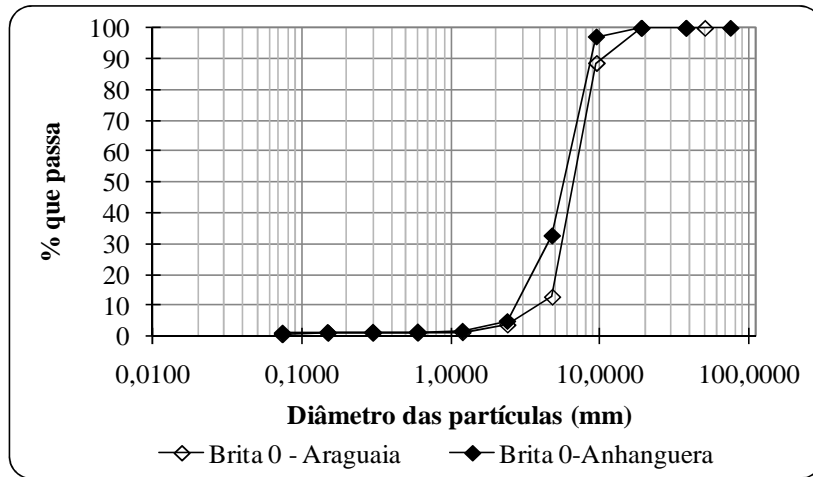


Figura A.2. Análise granulométrica da brita 0 da pedreira Araguaia e Anhanguera.

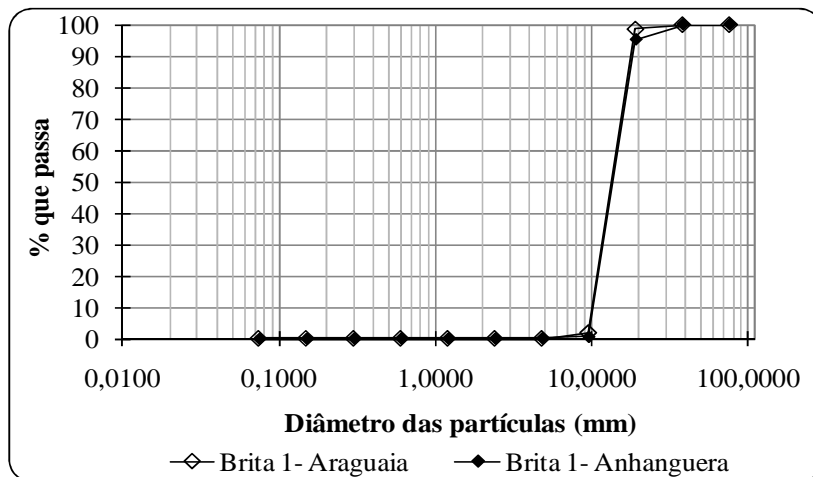


Figura A.3. Análise granulométrica da brita 1 da pedreira Araguaia e Anhanguera.

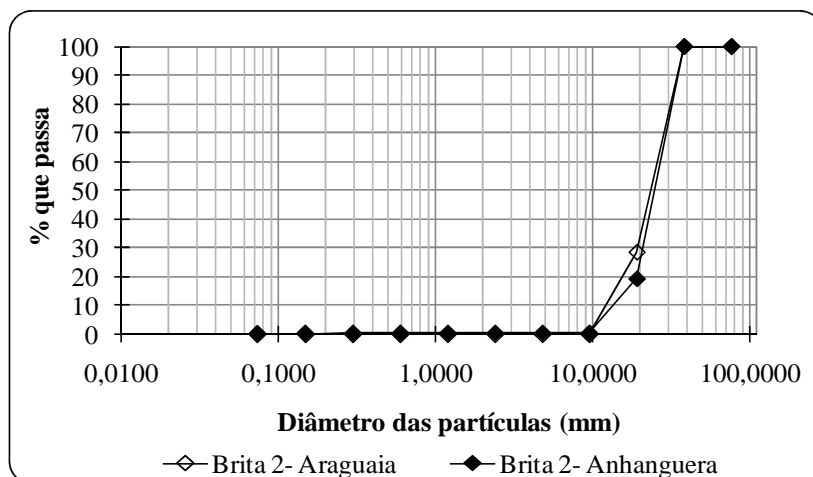


Figura A.4. Análise granulométrica da brita 2 da pedreira Araguaia e Anhanguera.

Baseado nos resultados apresentados nas figuras A2, A3 e A4 gerou-se a Tabela A.2, onde são evidenciadas as porcentagens retidas acumuladas de cada peneira e características básicas para cada amostra de brita.

Tabela A.2. Porcentagens das frações granulométricas para as amostras britas produzidas nas pedreiras Araguaia e Anhanguera.

	Amostras	Brita 0 Araguaia	Brita 0 Anhanguera	Brita 1 Araguaia	Brita 1 Anhanguera	Brita 2 Araguaia	Brita 2 Anhanguera	
Peneiras (mm)	38,1	-	-	-	-	-	-	Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras d abertura nominal, em mm.
	19,1	-	-	1,43	4,82	71,35	80,95	
	9,5	10,05	2,80	98,19	99,12	99,96	99,77	
	4,8	85,84	67,50	100,00	99,58	100,00	99,77	
	2,4	96,22	95,33	100,00	99,64	100,00	99,77	
	1,2	98,71	98,49	100,00	99,65	100,00	99,78	
	0,6	98,84	98,72	100,00	99,66	100,00	99,78	
	0,3	98,87	98,83	100,00	99,68	100,00	99,79	
	0,2	98,87	98,93	100,00	99,72	100,00	99,81	
Características	DMC (mm)	Ø9,5	Ø9,5	Ø19,0	Ø19,0	Ø38,1	Ø38,1	
	MF	5,87	5,61	7,00	7,02	7,71	7,79	
	TMP (%)	0,65	0,87	0,10	0,22	0,10	0,22	

Por meio da observação das curvas granulométricas apresentadas nas Figuras A.2 a A.4, percebe-se que para todas as frações de agregados não há diferenças significativas entre os materiais produzidos nas duas pedreiras. A fração que visualmente apresenta alguma diferença é a brita 0.

Como pode ser observado tanto à brita 1 da pedreira Araguaia e da pedreira Anhanguera, estão correspondendo ao mesmo diâmetro máximo característico (DMC) de 19 mm. Por apresentarem DMC igual a 19 mm, a fração de brita 1 produzidas pelas duas pedreiras enquadram-se no intervalo das graduações limites para a comercialização como agregado graúdo. Com isso, mostra que o processo de britagem das duas pedreiras é eficiente e os agregados estão dentro das especificações prescritas na NBR 7211 (ABNT, 1983).

B. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL E APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na Tabela B.1 são apresentados os valores da massa específicas reais (D_r), massas específicas aparentes (D_a) e absorção de água da massa de material seco (A) das amostras das duas pedreiras em estudo.

Tabela B.1. Ensaios realizados com a Brita 1 das duas pedreiras.

Ensaios/Amostras	Brita 1 (Pedreira Araguaia)	Brita 1 (Pedreira Anhanguera)
Massa Específica Real (D_r) g/cm ³	2,87	2,75
Massa Específica Aparente (D_a)	2,72	2,61
Absorção de Água (A) (%)	1,93	1,93

Segundo Moizinho (2007) a absorção do agregado está diretamente relacionada com a quantidade os vazios comunicantes ou porosidade aparente dos grãos sólidos. Ainda define que os valores da absorção das rochas ígneas e metamórficas, geralmente são inferiores a 0,5% e raramente excedem 1,0%. As rochas sedimentares têm maior capacidade de absorção, uma exceção que consta na natureza é que alguns tipos de basalto podem ter alta absorção. Agregados lateríticos ou lateritas são altamente porosos e a absorção de água chega facilmente aos 10%.

Diferentemente do que constatou Moizinho (2007), ambas as frações de brita 1 das duas pedreiras apresentaram 1,93% de absorção de água. Ressalta-se que a pedreira Araguaia explorar os bens minerais do micaxisto e a pedreira Anhanguera de uma rocha granítica.

C. TEORES DE ARGILAS EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS

O ensaio que determinou os teores de argilas em torrões e materiais friáveis foi realizado apenas com a fração de brita 1 de cada pedreira, o ensaio foi baseado na norma NBR 7218 (ABNT, 1987).

A norma 7211 (ABNT, 1983) estabelece limites máximos do teor de argilas em torrões para o emprego de agregados em concreto. Nessa norma são apresentados diferentes teores de argilas em relação ao tipo de concreto, isto é, para agregados graúdos não deve ser maior que: 1% para o emprego de agregados em concretos aparentes; 2% em concreto submetido ao desgaste superficial e 3 % nos demais concretos.

Ambas as amostras de brita 1 apresentaram 0% de teor de teor de argila em torrões e materiais friáveis estando dentro do limite máximo que prescreve a norma vigente para aplicação desses agregados em concreto.

D. ÍNDICE DE FORMA

Assim como para os demais ensaios de caracterização mecânica, o ensaio de índice de forma foi realizado apenas com a amostra de brita 1. Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma ME 086 (DNER, 1994). Os resultados obtidos de índice de forma dos agregados foram de 0,70 para a brita 1 produzida na pedreira Araguaia e 0,72 para a brita 1 produzida pela pedreira Anhanguera.

Sabe-se que a forma ideal dos agregados é a cúbica, que conduz a um melhor entrosamento entre partículas, produzindo maior travamento, ou seja, maior resistência ao cisalhamento. Define-se agregado de forma cúbica como sendo aquele que possui o índice de forma $\geq 0,6$. Com base nesta consideração, pode-se constatar que os resultados obtidos para as amostras de brita 1 de ambas as pedreiras conduzem a consideração de agregados apresentando forma cúbica.

E. ABRASÃO LOS ANGELES

O material utilizado no ensaio de abrasão Los Angeles foi também correspondente a fração de brita 1 de cada pedreira, o ensaio foi baseado na norma ME 035 (DNER, 1994).

No ensaio de Abrasão Los Angeles, observou-se que 25,97% do agregado proveniente da pedreira Araguaia foi perdido, enquanto que para o agregado da pedreira Anhanguera a perda por abrasão foi de 23,84%.

Os resultados obtidos para ambas as amostras de brita 1 se mantiveram dentro dos limites máximos que prescreve a norma ME 037 (DNER, 1997). Cabe ressaltar que as diferenças encontradas neste parâmetro estão associadas à natureza da rocha explorada em cada pedreira.