



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA**  
**AMAZÔNIA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA AMAZÔNIA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO A UM SOLO ARGILOSO**  
**SUPERFICIAL DE MANAUS VISANDO SEU EMPREGO EM PAVIMENTOS**

**Helena Marinho Picanço**

**ORIENTADORA: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Consuelo Alves da Frota**

**Manaus**  
**2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA**  
**AMAZÔNIA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA AMAZÔNIA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO A UM SOLO ARGILOSO**  
**SUPERFICIAL DE MANAUS VISANDO SEU EMPREGO EM PAVIMENTOS**

**Helena Marinho Picanço**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos da Amazônia (M. Sc.).

**ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dra. Consuelo Alves da Frota**

**Manaus**  
**2012**

## AGRADECIMENTOS

À Deus,

À minha família que sempre me apoiou, incentivou e educou para a vida.

À minha orientadora, Consuelo Alves da Frota, pelos ensinamentos, estímulo, compreensão e amizade.

Aos professores do mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia, pelos ensinamentos.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

À todos, que direta ou indiretamente, me ajudaram na concretização deste sonho.

Resumo da Dissertação submetida ao PPGENGRAM/UFAM como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre (M.Sc.) em Engenharia de Recursos da Amazônia.

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO A UM SOLO ARGILOSO SUPERFICIAL  
DE MANAUS VISANDO SEU EMPREGO EM PAVIMENTOS

HELENA MARINHO PICANÇO

DEZEMBRO/2012

Orientadora: Consuelo Alves da Frota

**RESUMO**

O trabalho em pauta apresenta uma alternativa de melhoramento das características técnicas do solo argiloso representativo da cidade de Manaus, pela adição de resíduos da produção de tijolo cerâmico, oriundos das olarias de Iranduba-Amazonas. Para tanto foi realizada: a) caracterização do solo natural e do resíduo cerâmico moído, englobando análise granulométrica, limites de consistência, massa específica dos sólidos e ensaio de compactação; b) caracterização mineralógica do solo natural e do resíduo cerâmico mediante análise por difratometria de raios x e c) avaliação do comportamento mecânico da amostra de solo natural e da mistura solo-agregado, por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR). Os resultados referentes à mistura solo-resíduo mostraram que (a) quanto maior a granulometria do resíduo maior é Resistência à Compressão Simples da mistura; (b) o acréscimo do subproduto industrial ao solo tende, em geral, a reduzir o Módulo de Resiliência da mistura; (c) as misturas solo-resíduo cerâmico apresentaram resultado satisfatório quanto ao desempenho mecânico, alusivo ao solo natural; (d) considerando a grande quantidade de resíduos gerados atualmente na produção de tijolos cerâmicos, pode-se concluir que este resíduo apresenta potencial como agregado alternativo na melhoria de solos com baixa capacidade de suporte.

Palavras chave: módulo de resiliência, pavimento, resíduo cerâmico, ensaio de compressão simples.

*Abstract of the dissertation submitted to PPGENGRAM-UFAM as part of the requirements for obtaining the title of master (m.SC.) in Amazonian Resources Engineering.*

*INCORPORATION OF CERAMIC RESIDUE TO A SUPERFICIAL CLAY SOIL OF  
MANAUS AIMING TO EMPLOYMENT IN PAVEMENTS*

*HELENA MARINHO PICANÇO*

*DECEMBER/2012*

*Advisor: Consuelo Adams Fleet*

*ABSTRACT*

*The study in question presents an alternative to improve the technical characteristics of the clay soil representative of the city of Manaus, the addition of waste from the production of ceramic bricks, from the potteries of Iranduba - Amazonas. Therefore we performed: a) characterization of natural soil and crushed ceramic waste, encompassing particle size analysis, Atterberg limits, density of solids compaction test and b) soil mineralogical characterization of natural and ceramic waste through analysis by diffraction x-ray (XRD), and c) evaluate the mechanical behavior of natural soil sample and soil-aggregate mixture through the trials Simple compressive Strength (RCS) module and Resilience (MR). The results regarding the soil-residue mixture showed that (a) the larger the particle size the greater the residue compressive strength of the mixture, (b) the addition of industrial by-product tends to soil generally, to reduce the modulus of resilience of mixture, (c) the soil-ceramic waste showed satisfactory results regarding the mechanical performance, allusive to natural soil, (d) considering the large amount of waste generated currently in production of ceramic bricks, one can conclude that this residue has potential as aggregate alternative in improving soils with low bearing capacity.*

*Key words: resilience, pavement, Ceramic waste, simple compression test.*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.....	x
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVO.....	14
1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	14
<b>CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA REGIÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
3.1 Origem e Formação dos Solos.....	18
3.2 Solos Tropicais e Solos Lateríticos.....	18
3.3 Estabilização Granulométrica.....	19
3.4 Reciclagem de Resíduos.....	20
3.5 Pólo Oleiro da Cidade de Iranduba-AM.....	22
<b>CAPÍTULO 4 – MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
4.1 Seleção, Coleta e Preparação.....	23
4.2 Caracterização Física.....	27
4.3 Análise Mineralógica.....	31
4.4 Caracterização Mecânica.....	32
<b>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
5.1 Distribuição Granulométrica, Plasticidade e Classificação Geotécnica.....	37

5.2 Ensaio de compactação.....	42
5.3 Caracterização Mineralógica.....	44
5.4 Comportamento Mecânico.....	46
5.4.1 Resistência à Compressão Simples.....	46
5.4.2 Módulo de Resiliência.....	47
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>53</b>
6.1 Conclusões.....	51
6.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	54
<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da cidade de Manaus – AM. (Google Earth).....	16
Figura 2 – Granulometrias 01, 02 e 03 do resíduo cerâmico moído.....	27
Figura 3 – Granulometria 04 (pó de tijolo) .....	27
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.....	28
Figura 5 - Estados de consistência (CAPUTO, 1988).....	30
Figura 6 - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_s$ máx.) e umidade ótima ( $w_{ot.}$ ).....	32
Figura 7 – Esquema da deformação horizontal de um corpo de prova durante o ensaio de compressão simples. (CAVALCANTE, 2006).....	34
Figura 8 – Curva Tensão-Deformação. (CAVALCANTE, 2006).....	35
Figura 9 – Tensões atuantes numa amostra submetida ao ensaio triaxial dinâmico (CAVALCANTE, 2006).....	36
Figura 10 - Curvas Granulométricas do solo natural com defloculante e sem defloculante.....	40
Figura 11 – Ensaio de sedimentação do solo natural com e sem defloculante (esquerda para direita).....	40
Figura 12 - Curvas Granulométricas do resíduo cerâmico moído.....	41
Figura 13 - Curvas de Compactação do solo natural e mistura solo com resíduo cerâmico moído.....	45
Figura 14 – Difratoograma do solo natural.....	46
Figura 15 – Difratoograma do resíduo cerâmico moído.....	47
Figura 16 – Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão Simples do solo natural e misturas.....	48

Figura 17 – Módulos de Resiliência médios para cada amostra ensaiada.....	50
---	----

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1– Limites de Atterberg para argilo-minerais (Modificado -MITCHELL,1993).....	31
Tabela 2 – Massas Específicas dos Sólidos (Modificado - Nogueira, 2001).....	31
Tabela 3 – Combinação de tensões para materiais de base e sub-base de pavimentos (AASHTO T 307/1999).....	37
Tabela 4 – Limites de Atterberg para o solo natural e mistura com tijolo moído.....	42
Tabela 5 – Solo x Índice de plasticidade (BURMISTER, 1949).....	43
Tabela 6 – Identificação mineralógica do solo natural – Picos dos Minerais.....	44
Tabela 7 – Identificação mineralógica do tijolo em pó – Picos dos Minerais.....	46
Tabela 8 – Coeficientes de regressão ( $R^2$ ) para modelos aplicados aos resultados do Módulo de Resiliência.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A.T. – Agregação Total

DRX – Difractometria de Raios X

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ME – Método de Ensaio

E – Módulo de Elasticidade

$h_0$  – Altura inicial

kg – Kilograma

km – Quilômetro

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  – Constantes determinadas experimentalmente

LC – Limite de Contração

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

RCS – Resistência à Compressão Simples

rpm – Rotações Por Minuto

T.A. – Teor de Agregação

TRB – Transportation Research Board

w – Teor de Umidade

$w_{ot.}$  – Teor de Umidade ótima

$\gamma_s$  – Peso específico aparente seco

$\gamma_{s\ máx.}$  – Peso específico aparente seco máximo

$\rho_s$  – Massa específica dos sólidos

$\Delta h$  – Variação de altura

$\Delta R$  – Variação do raio

$^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_d$  – Tensão desvio

$\sigma_1$  – Tensão axial

$\sigma_3$  – Tensão confinante

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das civilizações ocorreu a partir do momento em que os seres humanos passaram a produzir e a armazenar seus alimentos e ferramentas. O passo seguinte foi a troca de produtos entre comunidades, o que deflagrou a demanda pela construção de caminhos e trilhas que facilitassem o transporte desses produtos.

Desde as construções das primeiras estradas até os dias atuais, é observado o emprego de solos e rochas como matéria prima primordial na composição das camadas dos mais diversos tipos de pavimentos. O uso exaustivo desses materiais naturais resultou no esgotamento das jazidas mais próximas aos sítios dos empreendimentos, prática que, nas últimas décadas, tem sido coibida pelos órgãos e entidades da administração pública voltados à proteção do meio ambiente levando a um controle mais rigoroso da exploração desses recursos.

De acordo com dados obtidos junto ao Ministério dos Transportes, o Estado do Amazonas possui 11.738 km de hidrovias navegáveis e 6.283,10 km de rodovias pavimentadas e não pavimentadas, em contraste com o contexto geral brasileiro, em que há 1.735.612 km de rodovias e pouco mais de 13.000 km de hidrovias navegáveis, de sorte que 58% da matriz de transporte de carga no Brasil pertencem ao modal rodoviário e somente 4% utilizam hidrovias, para fins de escoamento de mercadorias. Apesar desse quadro têm-se poucos investimentos na construção de estradas, particularmente na região amazônica, situação que se agrava pela escassez de material pétreo, em geral, nas proximidades dos grandes centros populacionais.

Em paralelo, motivada pela economia de custos do transporte, pelas restrições ambientais, ou, ainda, pela ausência de jazidas capazes de fornecer solos adequados ao uso rodoviário, nota-se o aumento do emprego de solos finos, material, contudo, tecnicamente desfavorável para as sub-camadas dos pavimentos.

Diante desse panorama, e com a finalidade de viabilizar a utilização de tais solos, concebeu-se, na Engenharia Civil, a denominada estabilização granulométrica, ou seja, a adição de um material com textura granular em um solo de textura fina, ao mesmo tempo em

que tais preocupações de caráter ambiental, tecnológico e econômico suscitaram pesquisas com os chamados materiais alternativos, direcionados à salvaguarda dos recursos naturais finitos. Mostra-se digna de nota, nesse aspecto, o caso da incorporação de resíduos industriais nas obras de pavimentação, a propiciar benefícios de cunho técnico, econômico e ambiental, bem como a redução dos custos da destinação final.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Na cidade de Manaus tem-se um alto custo da pedra britada, ocasionado pelas grandes distâncias de transportes dos afloramentos rochosos (matérias-primas) e, quando presentes próximos aos locais de construção, encontram-se cobertos por espessas camadas de solo — em geral de granulometria argilosa, inviabilizando sua obtenção. Visando utilizar tais materiais de abundante ocorrência nas obras de pavimentação, observa-se nas últimas décadas um crescente interesse do uso de diversos resíduos industriais e agroindustriais adicionado aos citados solos (JOHN, 1999).

Ressalta-se também que o crescimento industrial ocasionou o aumento da geração de resíduos, tornando-se cada vez mais difícil, oneroso e ambientalmente insustentável seu tratamento e disposição final. Portanto, a possibilidade do emprego total ou parcial desse material traria benefícios sociais, econômicos e ambientais para as comunidades.

Como exemplo, tem-se o rejeito da produção de tijolos nas olarias que, devidamente processado, resulta em um material granular com potencialidade a ser aplicado em correções granulométricas, verificando-se, por exemplo, quando adicionado aos solos argilosos o aumento, principalmente, do ângulo de atrito (BERNUCCI *et al*, 2008). Aliado a tal melhoria técnica dos solos finos ressalta-se o benefício que trará ao meio ambiente, proporcionado pela redução dos impactos ambientais gerados pela disposição inadequada desse material e, ao mesmo tempo, possibilitando, a utilização de um solo de menor resistência em obras de pavimentação.

Assim, o estudo em pauta visa a aplicação desses resíduos na estabilização de solos naturais argilosos, objetivando encontrar alternativas para o melhoramento das características técnicas destes e, ao mesmo tempo, a diminuição dos impactos ambientais gerados pelas indústrias oleiras da região.

## **1.2 OBJETIVOS**

- Objetivo geral

Avaliar o desempenho físico e mecânico de um solo predominantemente argiloso quando misturado, em várias porcentagens, ao resíduo cerâmico moído.

- Objetivos específicos

Realizar caracterização física e mineralógica dos materiais (cerâmico e solo) e contribuir para utilização de resíduos industriais adicionado aos solos finos característicos da região amazônica para fins de pavimentação.

## **1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho desenvolvido nessa dissertação encontra-se apresentado em seis capítulos, sendo que o Capítulo 1 refere-se a esta introdução.

A caracterização fisiográfica da região originária do solo analisado nesse estudo é descrita no Capítulo 2.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a origem e formação de solos, características dos solos tropicais e lateríticos, informações a respeito da estabilização granulométrica e a reciclagem de resíduos industriais, e um breve levantamento sobre a geração de resíduos proveniente da fabricação de tijolos nas olarias da cidade de Iranduba, Amazonas.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia empregada para atingir os objetivos propostos, bem como a descrição dos materiais utilizados.

A apresentação e análise dos resultados das caracterizações física e mineralógica e comportamento mecânico, as correlações das propriedades geotécnicas e análise dos resultados estão contidos no Capítulo 5.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros vinculados com a temática da pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### 2. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA REGIÃO

A cidade de Manaus, capital do estado do Amazonas, localiza-se na porção nordeste do estado do Amazonas e possui uma área de aproximadamente 11.458,50 km<sup>2</sup> (Figura 1). O citado município faz parte da bacia amazônica e está situado na margem esquerda da confluência dos rios Negro e Solimões, formadores do Rio Amazonas.

Possui aspectos climáticos característicos de regiões tropicais, podendo ser classificado como quente e úmido, possuindo duas estações que se assinalam pelo índice pluviométrico. A referida cidade possui uma precipitação anual média variando de 2100 a 2500 mm, e se distingue pelos seus rios e igarapés (LIMA, 1999). A temperatura média varia de 24 a 36 °C, podendo chegar a 40 °C. Em estudo de PIKANÇO *et al.* (2011) apontam-se que a temperatura superficial do revestimento asfáltico pode apresentar valores consideráveis nas épocas mais quentes do ano (junho a novembro), podendo alcançar até 59,7 °C no meio dia solar, influenciando a temperatura ambiente e gerando uma sensação térmica de grande desconforto. A umidade relativa do ar é bastante elevada, indicando nos meses mais chuvosos valores da ordem de 80 a 90 % e nas épocas de estiagem podendo chegar, no mínimo, a 75 %.

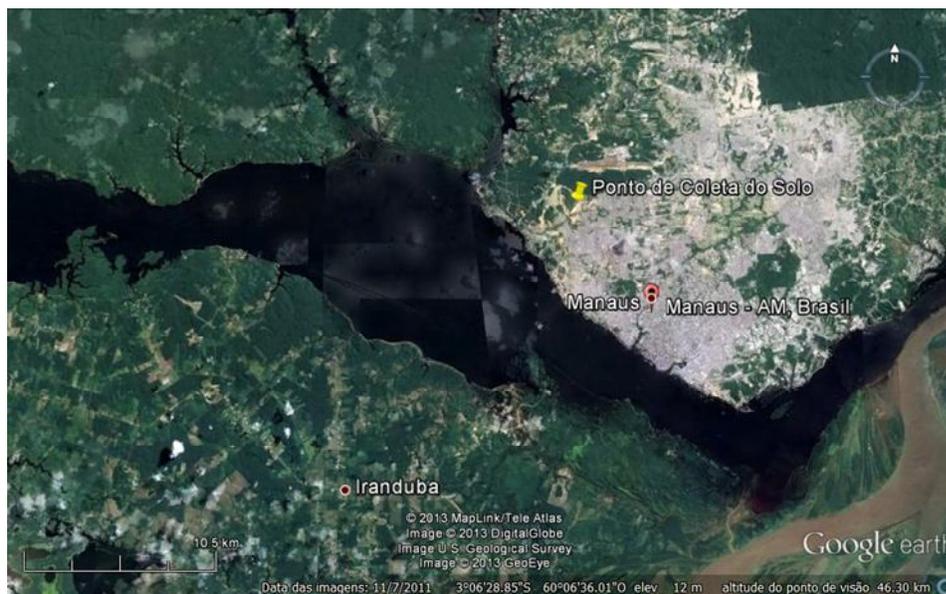


Figura 1 – Mapa de localização da cidade de Manaus – AM.

Fonte: Google Earth.

Segundo FERNANDES FILHO *et al.* (1997), o quadro geológico regional é composto por unidades litológicas do Cretáceo, Mioceno e Holoceno: a) A unidade do Cretáceo representada pela Formação Alter do Chão, que compreende sedimentos continentais vermelhos (arenitos argilosos, argilitos, quartzo grauvacas, quartzo arenitos e brechas intraformacionais), compõe o substrato rochoso da cidade de Manaus; b) A unidade do Mioceno (Formação Solimões), engloba argila, silte e areia fina a média com intercalações de linhito, camadas de gesso e nódulos de calcário lomonítico; ocorre na margem direita do Rio Negro, ao sul da cidade de Manaus, e nas ilhas ao longo do Rio Amazonas; e, c) O Holoceno representado por depósitos aluvionares expostos ao longo dos rios e igarapés da região.

A Formação Alter do Chão, particularmente, indica a presença de arenitos argilosos, argilitos arcósios, quartzo-arenitos e brechas intraformacionais, marcados por uma típica coloração avermelhada. AGUIAR *et al.* (2002) identificaram quatro fácies sedimentares argilosa — areno-argilosa, arenosa e o “Arenito Manaus”. Tais seções ocorrem em camadas sub-horizontais com disposição lenticular, deformadas por falhas lítricas pós-cretáceas. No caso do arenito Manaus, este apresenta diversas exposições na área urbana, sendo mais conspícuas nas proximidades da praia da Ponta Negra e Cachoeira do Tarumã. Mostra espessura que chegam até 10 metros e fácies locais de natureza silicosa ou argilosa, coloração vermelha ou roxa que se torna branca quando submetido à ação das águas ácidas, perdendo, assim, sua coerência (SILVA, 2010).

Sobreposto a esse pacote do “Arenito Manaus” são encontradas camadas estratificadas caulínicas e ferruginosas da porção incoesa da unidade Alter do Chão. Estas são as camadas esbranquiçadas e avermelhadas muito comuns nos barrancos observados em toda a cidade de Manaus. Tais materiais são camadas alteradas pelo intemperismo tropical úmido e que compreendem a parte superior da própria Formação Alter do Chão. Acima da linha de pedra o material argilo-arenoso amarelado homogêneo e sem estruturação compreende um pacote espesso com cerca de 8 a 10 metros, sendo designado como latossolo amarelo (SILVA, 2010). O mencionado material caracteriza-se por constituir camada bastante profunda, variando de “bem” a “fortemente” drenada, de coloração amarelada, encontrando-se, geomorfologicamente, no Planalto Dissecado Rio Trombetas – Rio Negro (LIMA *et al.*, 1999).

BENTO & FROTA (1998) realizaram mapeamento geotécnico da cidade de Manaus, entre 1977 e 1998, a partir de relatórios de sondagens e perfis de poços tubulares profundos, além de 25 pontos de observação em campo. Deste trabalho foram obtidas cartas temáticas, particularmente a relativa à textura, onde foi observado que, em profundidades de 2m, 5m e 10m, tem-se a presença de 62%, 55% e 30% da fração argilosa, respectivamente.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O solo constitui-se no recurso natural mais abundante da crosta terrestre, sendo empregado na Engenharia Civil seja como material de construção ou como fundação. Notadamente nas rodovias compõem as camadas estruturais do pavimento. Sua utilização está condicionada a especificações técnicas, que normalmente permitem apenas o uso de jazidas de empréstimo de qualidade tecnológica superior, no que diz respeito à resistência, a deformabilidade e a impermeabilidade.

As propriedades e comportamento dos solos dependem da sua textura, estrutura, composição química e mineralógica, fatores esses que estão intimamente ligados aos processos pedogenéticos/intempéricos que os originou. Relativo aos solos tropicais apresenta propriedades e comportamento diferenciados, devido à influência direta que o clima da região provoca no seu processo de formação, tornando as especificações e normatizações de outras regiões (clima temperado), em geral, inadequadas para o uso no solo em questão (PESSOA, 2004).

Outro aspecto importante a ser lembrado diz respeito à necessidade da utilização de materiais granulares nas camadas de base e sub-base rodoviária, visto que tecnicamente respondem pela excelência no desempenho mecânico. Entretanto, na região Amazônica, particularmente na cidade de Manaus, como visto anteriormente constitui-se, em regra, material restritivo.

Em virtude disso, observa-se a necessidade de estudos de viabilidade de uso dos solos finos regionais e abundantes na superfície do subsolo regional, visando estudar o efeito da

incorporação dos resíduos cerâmicos moídos nesse material argiloso para uso em base ou sub-base de rodovias de baixo volume de tráfego.

### **3.1 Origem e Formação dos Solos**

O termo "solo" vem do latim "solum", e é a porção da superfície terrestre onde se anda e se constrói, etc. Material da crosta terrestre, não consolidado, que ordinariamente se distingue das rochas, de cuja decomposição em geral provém, por serem suas partículas desagregáveis pela simples agitação dentro da água (definição do dicionário Aurélio).

Geologicamente, define-se solo como o material resultante da decomposição das rochas pela ação de agentes de intemperismo. No âmbito da engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra. Em outras palavras, considera-se como solo qualquer material que possa ser escavado com pá, picareta, escavadeiras, em necessidade de explosivos. (DNIT, 2006).

Os solos apresentam propriedades e características que os diferenciam, esse fato decorre da ação dos processos de intemperismo a que são submetidos as formações rochosas. São influenciados diretamente pelo clima, relevo e vegetação regionais, ou seja, fenômenos físicos, químicos e biológicos que agem sobre a rocha matriz formando um aglomerado de partículas não consolidadas.

### **3.2 Solos Tropicais e Solos Lateríticos**

O solo tropical é o produto da decomposição da rocha matriz devido à ação de processos de alteração pedogenéticos característicos de regiões tropicais úmidas, tais como o intemperismo químico e físico. Dentre tais materiais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

Os solos saprolíticos são resultantes da decomposição e/ou desagregação da rocha matriz, e cuja principal propriedade é apresentar resquícios da estrutura da rocha que lhe deu origem. São encontrados, em geral, logo abaixo da camada de solo superficial laterítico. Diferentemente deste, o citado solo apresenta uma mineralogia muito variada, dependendo do seu grau de intemperização e do tipo de rocha matriz (VILLIBOR, 2009).

No caso dos solos lateríticos, estes se encontram na superfície, em partes mais bem drenadas das regiões tropicais úmidas e caracterizam-se pela presença da caulinita como argilomineral predominante e quase sempre exclusivo, além da coloração típica (vermelho, amarelo, marrom e alaranjado) proporcionada pelos óxidos hidratados de ferros e/ou alumínio devido ao processo de laterização (PESSOA, 2004).

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1971) define solo laterítico como material natural cuja fração coloidal tem uma relação molecular sílica/sesquióxidos menor que dois, mostra a presença em quantidade apreciável de sesquióxido de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica.

No Brasil, os solos lateríticos estão presentes em quase a totalidade do seu território, por meio de camadas superficiais, com espessuras de ocorrência que variam desde a ordem de dezenas de centímetros até cerca de dez metros (COUTO, 2009).

Uma das grandes motivações da utilização dos solos lateríticos de granulação fina como material para bases *in natura*, ou misturadas a agregados, tem como fator condicionante a sua ocorrência em abundância, em regra, nas proximidades das obras.

### **3.3 Estabilização Granulométrica**

A alteração das propriedades do solo para possibilitar a sua utilização como material de Engenharia, é normalmente designada por estabilização de solos, modificações essas que podem ser resultantes de métodos mecânicos, físicos e/ou químicos. Visto que as características de um solo natural se alteram em intervalos de alguns metros em um subsolo, a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo tipo de solo sobre o qual este provou ter uma ação efetiva (CRISTELO, 2001).

Particularmente os solos argilosos são considerados na Engenharia Rodoviária como materiais problemáticos, tanto no que concerne a trabalhabilidade quanto ao comportamento. Isto ocorre devido as suas características de expansão, contração e plasticidade, que se apresentam frequentemente elevadas, além de sua grande sensibilidade às variações de umidade, aliado ao seu baixo desempenho mecânico. A estabilização destes materiais possibilita utilizar solos locais, dispensando assim, os custos provenientes de elevadas distâncias de transporte (PESSOA, 2004).

Segundo SERRA (1987) a coesão característica de solos finos argilosos contribui consideravelmente para o desenvolvimento da resistência das misturas solo-agregado quando compactadas e, ainda, atua na permanência desta, mesmo com a variação do teor de umidade nas camadas de base.

FROTA *et al.* (2003) analisaram o comportamento mecânico de um solo fino misturado com agregado granular e aditivos químicos (cal e cimento). Os resultados mostram que, para as misturas solo-aditivo, a Resistência à Compressão Simples (RCS) e o Índice de Suporte Califórnia (ISC) aumentam com o tempo de cura e teor de aditivo. Particularmente, a mistura solo-cimento apresentou melhores resultados quanto à resistência mecânica para todas as porcentagens e tempos de cura propostos. Relativo a mistura solo-agregado os valores de resistência (RCS e ISC) mostraram-se inferiores àqueles obtidos com a mistura solo-cimento, ocasionando uma ruptura mais rápida.

### **3.4 Reciclagem de Resíduos**

A reciclagem é a maneira mais econômica de tornar a construção civil sustentável e ambientalmente correta, pois transforma resíduos em material aproveitável. Na maioria das vezes, reduzindo o custo da obtenção de matéria-prima e o consumo energético necessário à produção, bem como, preservando as áreas que seriam utilizadas na destinação final desses resíduos e, sobretudo minimiza a extração de recursos naturais.

De acordo com DIAS (2004), para a seleção de possíveis aplicações dos resíduos, tendo em conta os aspectos tecnológicos, o conhecimento de sua composição e a sua caracterização, se faz necessária, envolvendo aspectos químicos, físicos e mecânicos que irão interagir na qualidade e durabilidade das aplicações.

A pesquisa por tecnologias visando à reciclagem de resíduos industriais como material de construção encontra-se bem desenvolvida, no entanto tem se concentrado principalmente na utilização do cimento *portland*, esquecendo-se de outras aplicações talvez mais adequadas para muitos resíduos (JOHN, 1999).

A indústria da cerâmica vermelha é responsável pela produção de insumos, constituindo grande consumidora de matérias-primas naturais, e gerando resíduos isentos de qualquer mistura, como por exemplo, de materiais cimentícios. Do ponto de vista tecnológico, os resíduos cerâmicos apresentam potencialidade de uso como agregado para concreto,

argamassa ou artefatos de cimento, onde participam como filler inerte — possivelmente com alguma atividade pozolânica, material para sub-base ou base de pavimentação, e, ainda, poderiam ser reaproveitados no próprio processo de produção da indústria cerâmica (DIAS, 2004).

O resíduo cerâmico moído, também conhecido como chamote ou cascalho, é o subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico após a queima. Ao final do processo de produção os materiais cerâmicos que apresentarem trincas ou imperfeições são descartados e, na maioria das vezes, destinados a depósitos de resíduos sólidos.

DALLACORT *et al.* (2002) em seu trabalho afirma que os resíduos de material cerâmico moído apresentaram ação pozolânica e efeito filler (efeito de preenchimento de vazios entre os agregados de uma mistura). Segundo o mesmo autor, na confecção de corpos de prova de solo-cimento, onde 57% do cimento foi substituído por chamote, foram alcançadas resistências superiores a 2 MPa, para um teor de material ligante igual a 8%.

Segundo RIPOLI (1997) a adição de chamote na fabricação de elementos cerâmicos proporcionou algumas melhorias no processo produtivo, como por exemplo, diminuição do tempo de queima; redução de possíveis defeitos (trincas, fissuras, empenamentos, deformações, etc.) na etapa de secagem e de queima; maior trabalhabilidade e, além disso, a possibilidade de reduzir a quantidade de ciclos de queima, onde a temperatura destes proporciona considerável economia de energia.

A utilização de resíduos exclusivamente cerâmicos em pavimentos é recente e, na literatura, foi localizado somente um estudo nessa temática, em que DIAS (2004) analisa a viabilidade da aplicação do resíduo cerâmico proveniente da fabricação de telhas em camadas de pavimento de baixo volume de tráfego. Diagnosticou a geração deste resíduo nas cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba, em Minas Gerais, e os dados quantitativos alcançados indicaram que é justificável e necessária a sua reciclagem. Somente na cidade de Monte Carmelo, as quantidades geradas atingiram 1,9 kg/ hab.dia e permitiriam executar 32 km de camada de base de pavimento ao se misturar 40% de solo.

### **3.5 Pólo Oleiro do Município de Iranduba-AM**

Iranduba, cidade pertencente ao estado do Amazonas, está situada a 22 km da capital e integra a região Metropolitana de Manaus. Possui o maior pólo produtor de materiais cerâmicos da região, sendo responsável por 75% de toda a produção cerâmica vermelha do estado do Amazonas, em termos quantitativos produz em média 35.000 toneladas de tijolo por mês. De acordo com dados obtidos junto a ACERAM (Associação dos Ceramistas do Amazonas), existem 32 olarias cadastradas para a produção do tijolo furado, produto mais consumido na indústria da construção civil na região.

Com base em dados coletados nas olarias, em visita técnica, a primeira olaria situada na cidade de Iranduba foi inaugurada há 106 anos. A produção de tijolos cerâmicos de oito furos em uma das olarias pesquisadas chega a 620 milheiros por mês, segundo o proprietário. Em relação à geração de resíduos nas olarias, obteve-se uma média de 10% de perda de material, portanto a geração de resíduos somente na produção de tijolo chega próximo de 1 milhão de unidades por mês, considerando a estimativa de produção de 10 milhões de tijolos por mês (ACERAM, 2012). Cada tijolo pesa 3,0 kg, assim 3.000 toneladas deste resíduo cerâmico são gerados, por mês, somente na produção de tijolos do município de Iranduba.

Quanto à reutilização dos resíduos, nos foi informado que algumas olarias trituram e reutilizam o material no próprio processo produtivo, enquanto que outras doam o material para ser utilizado na manutenção das estradas rurais e, finalmente, algumas empresas vendem ainda no pátio da fábrica o resíduo gerado a partir da produção de tijolo por R\$10,00 um metro cúbico ou R\$ 5,00, caso seja resíduo da produção de telhas cerâmicas.

## CAPÍTULO 4

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as características dos materiais empregados nesta pesquisa, os critérios adotados para a escolha desses materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais.

#### 4.1 Seleção, Coleta e Preparação

Levando em consideração a predominância de solos argilosos compondo a camada superficial do subsolo da cidade de Manaus, optou-se por selecionar, inicialmente por meio de análise visual e tátil, um material que apresentasse características físicas próprias dessa fração granulométrica — índices de plasticidade elevados e baixas capacidades de suporte. Tais propriedades inviabilizam o emprego desses materiais *in natura* nas camadas de um pavimento.

O local de coleta das amostras situa-se nas proximidades do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, zona norte da cidade de Manaus, nas coordenadas geográficas 3°03'28" Sul e 60°04'18" Oeste. Procurou-se efetuar a retirada do material na profundidade de 4 a 5m, aproveitando um corte de talude decorrente de intensa escavação na área, local onde é obtido material utilizado em obras de pavimentação do Município de Manaus. Após a coleta, armazenaram-se as amostras em sacos plásticos, com capacidade de 50 kg, e, em seguida, foram transportadas até o Laboratório de Solos do Grupo de Geotecnia (GEOTEC) da UFAM, onde se realizaram os experimentos. Na sequência efetuou-se a preparação das amostras de acordo com os procedimentos indicados na norma ABNT NBR 6457/1986, intitulada "Amostras de solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização". Das etapas iniciais tem-se a secagem ao ar e o quarteamento do material e, em seguida, a separação granulométrica necessária para cada ensaio de caracterização física.

No caso do material cerâmico, conforme mencionado, foram oriundos de Olarias situadas nas proximidades do Município de Iranduba, a uma distância de aproximadamente 22 km da capital do Estado do Amazonas. As amostras constituem um resíduo da produção de tijolos descartados pela presença de trincas e defeitos de queima. Realizou-se a coleta nos

pátios das olarias onde são armazenados, em pilhas, os resíduos de descarte. O referido material foi armazenado em sacos com capacidade de 50 kg e, em seguida, transportado até o Laboratório de Solos do GEOTEC. Segundo dados obtidos junto às citadas olarias, durante a fabricação os tijolos são submetidos a uma temperatura que varia de 800 a 900°C, por um período de aproximadamente 24h, em geral, utilizadas em processos de calcinação. Visando o enquadramento desse material em determinadas granulometrias realizou-se a sua trituração em moinho de bolas — tambor metálico no qual são inseridas 12 esferas de aço com aproximadamente 47,6 mm de diâmetro, cada uma pesando entre 390 e 445 g, onde foram submetidos a 500 revoluções e a uma velocidade de 30 a 33 rpm. Este equipamento também é utilizado no Ensaio de Abrasão *Los Angeles* (ABNT NBR 6465/ 1984). Após a moagem, selecionou-se o resíduo por meio de peneiras, de maneira que se obtiveram 3 (três) granulometrias correspondentes aos tamanhos de agregados graúdos segundo a ANBT NBR 7225 (Figura 2), são elas:

- Granulometria 01, com dimensão máxima inferior a 2,0 mm e dimensão mínima igual ou superior a 1,2 mm, correspondendo ao diâmetro de uma areia média;
- Granulometria 02, com dimensões máxima e mínima iguais a 4,8 mm e 2,0 mm, respectivamente, representando a faixa granulométrica de um areia grossa; e,
- Granulometria 03, dimensão compreendida entre 4,8 mm e 12,5 mm, satisfazendo o diâmetro correspondente a pedregulho.

Além dessas, escolheu-se uma quarta granulometria (Figura 3) com diâmetro máximo de 1,2mm, ou seja, empregou-se todo material remanescente do processo de triagem por peneiramento. Optou-se por utilizar este último material devido à facilidade de obtenção em grande quantidade após cada moagem.

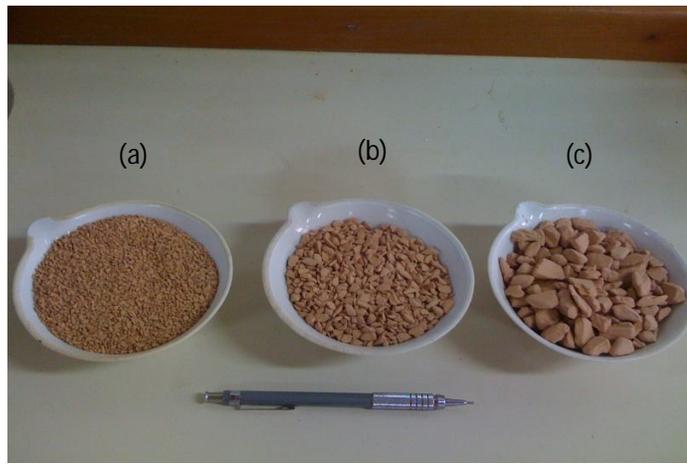


Figura 2 – Granulometrias 01 (a), 02 (b) e 03(c) do resíduo cerâmico moído.



Figura 3 – Granulometria 04 (pó de tijolo).

No presente estudo analisaram-se os solos naturais e misturas com 10% e 50% de resíduo cerâmico, relativos ao peso seco destes. Definiram-se tais porcentagens buscando observar o comportamento físico e mecânico do solo natural misturado a uma pequena quantidade de agregado graúdo e compará-lo com uma mistura com maiores proporções do mencionado material alternativo, ou seja, avaliar qual a porcentagem de material granular que poderia causar maiores alterações (físicas e mecânicas). Na Figura 4 indica-se um esquema simplificado das etapas realizadas durante a presente pesquisa.

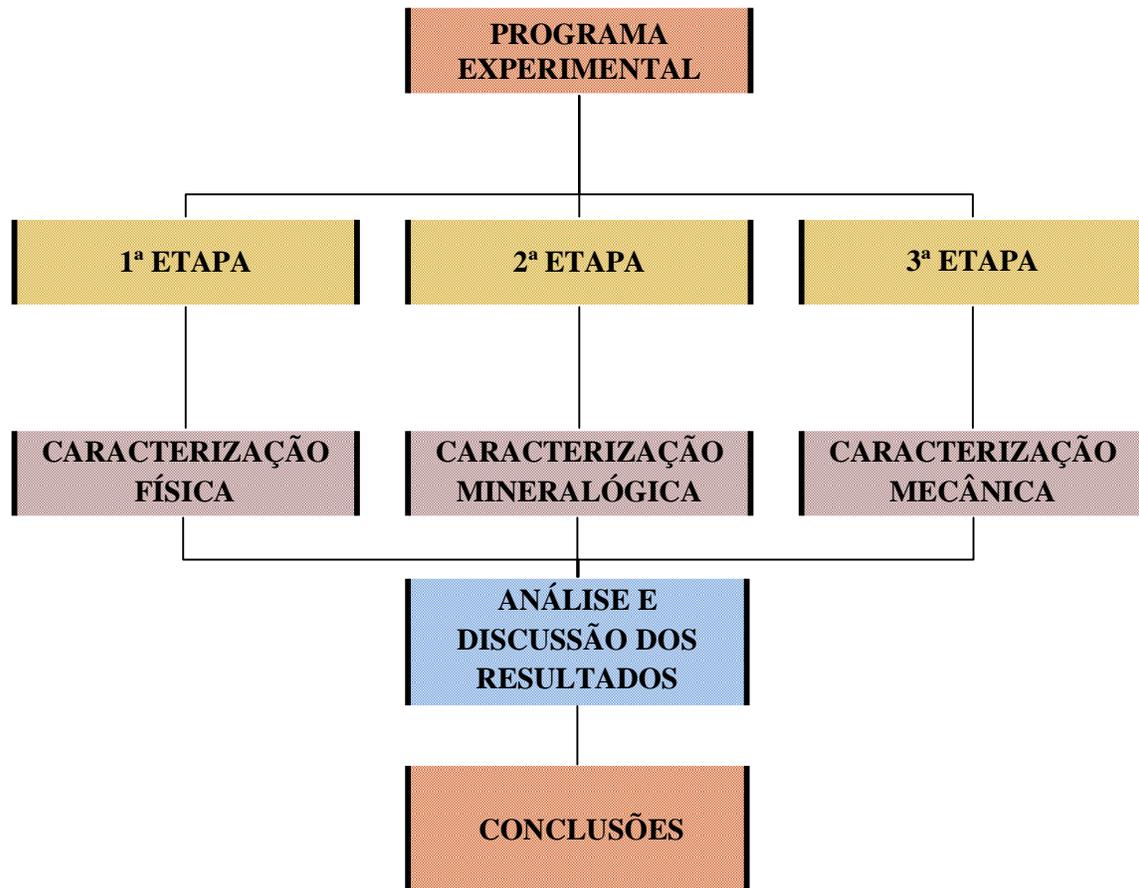


Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.

O citado programa experimental, como pode ser observado na Figura 6.1, foi dividido em três etapas:

1ª Etapa – caracterização do solo natural e do resíduo cerâmico moído, englobando análise granulométrica, limites de consistência, massa específica dos sólidos e ensaio de compactação;

2ª Etapa – caracterização mineralógica do solo natural e do resíduo cerâmico mediante análise por difratometria de raios X (DRX)

3ª Etapa – avaliação do comportamento mecânico da amostra de solo natural e da mistura solo-agregado, por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR).

## 4.2 Caracterização física

Com a finalidade de caracterizar fisicamente o solo e o resíduo cerâmico, realizaram-se os ensaios geotécnicos de limites de consistência, massa específica dos sólidos, análise granulométrica com e sem defloculante, e compactação. Os procedimentos alusivos aos citados ensaios seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de acordo com as seguintes normas:

- NBR 6457/1986 Amostras de solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.
- NBR 7181/1984 Solo – Análise Granulométrica.
- NBR 6459/1984 Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
- NBR 7180/1984 Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
- NBR 6508/1984 Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica dos Sólidos.
- NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de Compactação

Os resultados desses ensaios permitiram a classificação do solo e das misturas segundo os Sistemas Unificado de Classificação de Solos (Unified Soil Classification System) e Transportation Research Board (TRB).

Na Geotecnia a análise da textura visa determinar a relação entre as dimensões das partículas (faixas granulométricas) e os seus percentuais, bem como a graduação destas no solo. Nos ensaios convencionais ela consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação. A análise por peneiramento permite diferenciar as frações granulométricas presentes em solos com partículas maiores que 0,075 mm, sendo as demais frações analisadas recorrendo-se ao método da sedimentação.

Como os solos tropicais possuem frequentemente concreções e/ou micro-concreções lateríticas, originadas em sua própria formação e cuja estabilidade em presença de água varia de solos para solo, interferindo em suas propriedades e comportamento, torna-se necessário realizar ensaios de sedimentação com e sem defloculante (LIMA, 1999). Sendo assim, efetuaram-se tais experimentos nas amostras de solo e nas misturas, com e sem a utilização do hexametáfosfato de sódio como agente defloculante. Com auxílio das Equações (1) e (2), obtém-se a agregação total (A.T.) e o teor de agregação (T.A.) ou grau de floculação.

$$\text{Agregados Totais (A. T.)} = \% \text{ Argila com de loculante} - \% \text{ Argila sem de loculante} \quad (1)$$

$$\text{Teor de Agregação (T.A.)} = \frac{\text{Agregados Totais (A.T.)}}{\% \text{ Argila sem defloculante}} \quad (2)$$

Por outro lado, somente a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos — notadamente os argilosos, sob o ponto de vista da Engenharia, porquanto as propriedades físicas das frações mais finas dependem de fatores como: forma e tamanho das partículas, estrutura mineralógica, grupo de argilominerais, e principalmente a reação de suas partículas perante a água (PINTO, 2002).

O teor de umidade ( $w$ ) dos solos argilosos constitui-se em um dos parâmetros índice de maior relevância, sendo usual definir o estado de umidade do solo natural em relação ao limite de liquidez (LL) e ao limite de plasticidade (LP) — teores de umidade fronteiras relativos aos diferentes estados de consistência que um solo pode adquirir quando sua umidade varia. Assim, o limite de liquidez (LL) é o teor de umidade limite (fronteira) entre o estado de consistência líquido e o plástico, o limite de plasticidade (LP) separa o estado plástico do semi-sólido, e finalmente, o limite de contração (LC) demarca o estado semi-sólido do sólido (Figura 5).

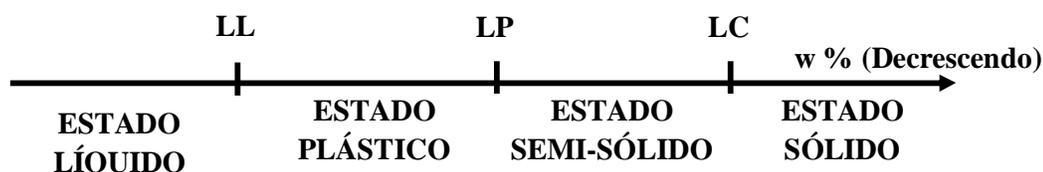


Figura 5 - Estados de Consistência (CAPUTO, 1988).

Conhecido tais limites determina-se a plasticidade de um solo (LL-LP), que está diretamente relacionada ao grupo do argilomineral. Diversos autores vêm procurando correlacionar os limites de consistência com os grupos dos argilominerais. A Tabela 1, modificada de MITCHELL (1993) e citada por SANTOS (1997), exemplifica valores desses parâmetros relativos a diferentes argilominerais.

Tabela 1- Limites de Atterberg para argilominerais (Modificado, MITCHELL,1993).

<b>Grupo de Argilomineral</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>
Montmorillonita	100 – 900	50 – 100
Illita	60 – 120	35 – 60
Caulinita	30 – 110	25 – 40

O emprego desses índices e os ensaios para determiná-los foram propostos pelo engenheiro químico Atterberg, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônomo, sendo adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos Arthur Casagrande (PINTO, 2002). Na Geotecnia obtém-se o Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade de acordo com ensaios padronizados no Brasil pela ABNT, por meio das seguintes normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente.

Também na caracterização física dos solos determina-se a massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), relação entre a massa das partículas sólidas e o seu volume, que varia em função dos minerais constituintes. Na Tabela 2 constam os valores desse parâmetro atinentes aos minerais de maior ocorrência nos solos.

Tabela 2 - Massas Específicas dos Sólidos (Modificado, NOGUEIRA, 2001).

<b>MINERAL</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Caulinita	2600 – 2650
Feldspato	2590 – 2900
Goetita	4400
Ilmenita	4500 – 5000
Magnetita	5200
Mica	2700 – 3200
Montmorilonita	2500 – 2800
Quartzo	2650

Finalmente a compactação constitui-se em um processo físico que visa melhorar as propriedades do solo, por meio de compressão quando submetido a uma determinada energia mecânica. Dentre os principais benefícios, em termos de propriedades geotécnicas, podem ser citados: o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte.

A indução dessa densificação, igualmente, reduz o índice de vazios, a permeabilidade, a contração e a compressibilidade (SOUZA JUNIOR, 2005).

Atribui-se ao Engenheiro da Califórnia R.R. PROCTOR (1933) o início da técnica da compactação, com os primeiros trabalhos sobre a compactação de aterros. O mencionado técnico desenvolveu um ensaio dinâmico para determinação experimental da curva de compactação, ou seja, a variação do peso específico aparente seco relativo ao teor de umidade do solo. A Figura 6 mostra uma típica curva de compactação.

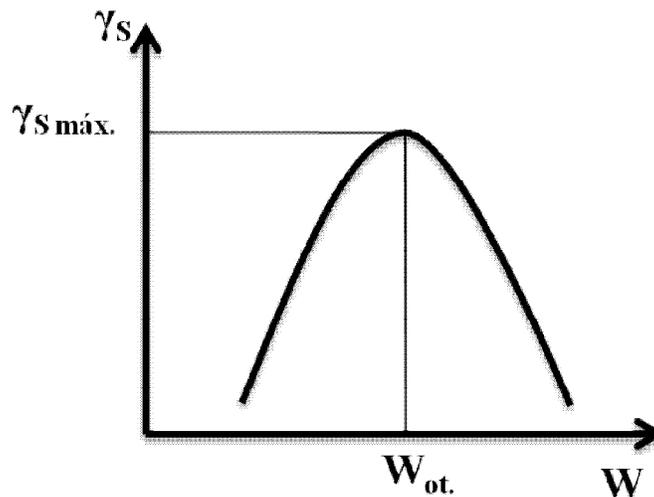


Figura 6 - Peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) x umidade ( $w$ ).

O denominado ensaio de Proctor é normalizado pela ABNT (NBR 7182), podendo ser especificado em três energias Normal, Intermediária e Modificada. As principais técnicas de compactação são a dinâmico, a estática ou semi-estática e a por vibração. Nesta pesquisa será realizada a compactação dinâmico na energia Intermediária, uma das quais melhor representa os equipamentos de compactação hoje empregados em campo. O método de compactação dinâmico consiste basicamente em deixar cair sobre uma camada de solo um peso (soquete) de uma altura, segundo um número determinado de vezes. Todas estas variáveis dependem do tipo de energia de compactação que se deseja aplicar.

O procedimento relativo a esse ensaio em laboratório consistiu: a) destorroamento e passagem do solo na peneira de diâmetro 4,8 mm; b) homogeneização da mistura a seco; c)

adição de água até atingir a umidade desejada; d) homogeneização da mistura úmida e passagem na peneira de 4,8 mm; e) compactação dos corpos de prova por processo dinâmico.

### 4.3 Análise mineralógica

Os minerais argilosos, devido à pequena dimensão dos seus cristais, associada à variabilidade das suas respectivas formas e arranjos estruturais, necessitam do emprego de várias técnicas e métodos analíticos para a respectiva identificação, caracterização e quantificação (SILVA, 2010). A difração de raios X (DRX) consiste em uma técnica que fornece informações amplas, precisas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes em uma argila (GOMES, 1988).

A mencionada técnica consiste da interação entre a radiação eletromagnética (raios X) e a matéria ordenada. Para a ocorrência da difração é necessário que o comprimento de onda da radiação incidente, seja da mesma ordem de grandeza do espaçamento interatômico do material analisado, ou seja, da ordem de angstrom. A incidência de raios X sobre um átomo provoca o espalhamento da radiação em todas as direções. A interferência construtiva dos raios X espalhados, provenientes de vários átomos, caracteriza a difração. No caso de um cristal, a sequência ordenada e periódica de átomos, pode ser visualizada como um conjunto de planos, os quais são denominados planos cristalográficos e indexados por meio dos índices de Miller (hkl). O espalhamento coerente dos raios X (mesma energia da radiação incidente) por um conjunto de planos cristalinos (hkl) ocorre em um ângulo bem definido, denominado ângulo de Bragg. A condição é estabelecida pela Lei de Bragg (Eq. 3). (KLUG & ALEXANDER, 1974).

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \text{ sen } \theta_{hkl} \quad (3)$$

Onde,  $n$  é a ordem de difração (normalmente considera-se  $n=1$ );  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente;  $d_{hkl}$  é a distância interplanar e  $\theta_{hkl}$  é o semi-ângulo de difração medido em relação aos raios incidentes. Os valores de  $d_{hkl}$  para compostos padrões estão tabelados, disponíveis em microfichas ou CD-ROM no sistema ICDD (JCPDS) da International Union of Crystallography (SCAPIN, 2003).

Neste trabalho utilizou-se difratômetro Shimadzu, modelo XRD-6000, equipado com ânodo de cobre ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ) pertencente ao Laboratório de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas. As análises foram realizadas na fração fina (tamanho de grão  $< 0,074 \text{ mm}$ ) do solo natural e resíduo cerâmico moído, a qual foi separada da fração grossa por peneiramento, sendo selecionado somente o material passante na peneira n° 200 (abertura  $0,074 \text{ mm}$ ). Empregou-se o método do pó, procurando-se preservar a desorientação das partículas, para que todos os minerais ou estruturas cristalinas fossem identificados.

#### 4.4 Caracterização mecânica

Para verificação o comportamento mecânico realizaram-se ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR), tanto para o solo natural quanto para as misturas de solo com resíduo cerâmico. Deve ser ressaltado que no estudo em pauta tais ensaios mecânicos foram executados a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , com o objetivo de simular condições regionais de compactação em campo.

A determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS), também chamada de compressão não confinada ou compressão uniaxial, consiste em submeter um corpo-de-prova cilíndrico a uma carga axial, objetivando-se avaliar sua deformação longitudinal e horizontal, o ensaio segue o método preconizado na norma ABNT NBR 12.770/1992. O carregamento é aplicado segundo uma velocidade constante, prosseguindo até que os valores de carga aplicada diminuam com a evolução dos deslocamentos, ou então, até que se obtenha 15% de deformação axial específica. Os valores de carga, deslocamento e tempo são registrados, com intervalos adequados definindo a forma da curva tensão-deformação.

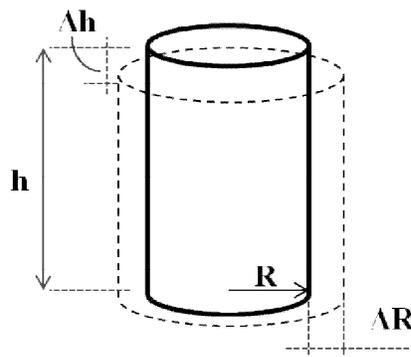


Figura 7 – Esquema da deformação horizontal de um corpo de prova durante o ensaio de compressão simples (CAVALCANTE, 2006).

Quando o corpo de prova é submetido à carga de compressão, o encurtamento axial é acompanhado por uma expansão lateral, isto é, a largura do cilindro torna-se maior e seu comprimento diminui. A variação da dimensão dividida pelo valor do tamanho inicial do corpo de prova é denominada deformação, a qual pode ser longitudinal, quando relacionada à altura do corpo de prova, e transversal, quando se refere à largura deste. Registrando-se as tensões no plano horizontal (carga dividida pela área da seção transversal) pela deformação longitudinal obtém-se a seguinte curva:

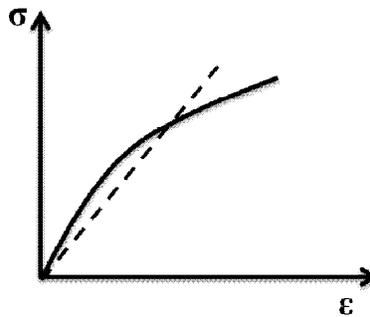


Figura 8 – Curva Tensão-Deformação (CAVALCANTE, 2006).

Embora o solo não seja um material verdadeiramente elástico e o gráfico “tensão x deformação”, em geral, assume a forma de uma linha com suave curvatura, para fins práticos, admite-se um comportamento elástico-linear para o solo quando da realização do ensaio, buscando facilitar a análise dos resultados por meio de uma aproximação de seu comportamento com o desempenho dos metais. Obtém-se o valor da Resistência à Compressão Simples no ponto máximo da curva “tensão x deformação”.

Por outro lado, o solo quando submetido às ações de cargas cíclicas apresenta uma parcela de deslocamento permanente (não-recuperável), e outra resiliente (recuperável) após cessar a ação da sollicitação. Determinou-se o comportamento resiliente das amostras analisadas neste trabalho por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, de acordo com o método preconizado na norma AASHTO T 307/1999. O referido ensaio dinâmico consiste em aplicar tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ) e pulsos de tensões axiais ( $\sigma_d$ ) em uma amostra cilíndrica posicionada numa câmara triaxial (SOUZA JUNIOR, 2005). Particularmente o

Módulo Resiliente dos solos define-se como a relação entre a tensão-desvio aplicada axialmente e ciclicamente, e a correspondente deformação específica vertical recuperável, conforme indica a Equação (7):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (8)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, geralmente expresso em MPa ou kgf/cm<sup>2</sup>;

$\sigma_d$  = tensão desvio, em MPa ou kgf/cm<sup>2</sup>;

$\varepsilon_r$  = deformação específica resiliente, que é definida como a deformação resiliente ( $\Delta h$ ) registrada pelo equipamento (deslocamentos recuperáveis) dividida pela altura inicial do corpo de prova ( $h_0$ ), demonstrado na Equação (8).

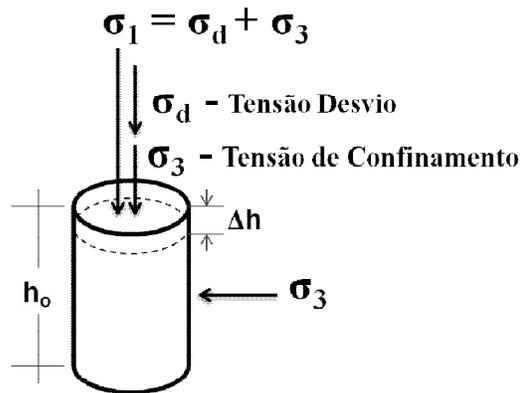


Figura 9 – Tensões atuantes numa amostra submetida ao ensaio triaxial dinâmico. (CAVALCANTE, 2006).

O material a ser ensaiado é compactado nas condições de estado representativas do projeto e obra, com altura de pelo menos duas vezes o diâmetro. Tem-se empregado normalmente corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para solo natural, solo-cimento, misturas solo-agregado, etc. A aplicação de carga é semi-senoidal por se

aproximar da forma de carregamento correspondente à passagem de roda dos veículos. O tempo de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundo. (BERNUCCI et al, 2008). São utilizadas diferentes tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ), dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões solicitantes ( $\sigma_1$ ), aplicadas por célula de carga. No repouso, restam apenas as tensões de confinamento, sendo retirada a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), que é a diferença entre as tensões maior e menor, respectivamente representadas por  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . Na Tabela 3 é indicada a combinação de tensões aplicadas ao corpo-de-prova durante a realização do ensaio em conformidade com a norma AASHTO T 307/1999.

Tabela 3 – Combinação de tensões para materiais de base e sub-base de pavimentos (AASHTO T 307/1999).

<b>Combinação de Tensões</b>		
<b>Condicionamento do Corpo de Prova (1000 ciclos)</b>	<b>Registro das Deformações (100 ciclos)</b>	
<b><math>\sigma_3 = 103 \text{ kPa} - \sigma_d = 103 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_3 = 21 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_d = 21 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 41 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 62 \text{ kPa}</math></b>
	<b><math>\sigma_3 = 34 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_d = 34 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 69 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 103 \text{ kPa}</math></b>
	<b><math>\sigma_3 = 69 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_d = 69 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 138 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 207 \text{ kPa}</math></b>
	<b><math>\sigma_3 = 103 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_d = 69 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 103 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 207 \text{ kPa}</math></b>
	<b><math>\sigma_3 = 138 \text{ kPa}</math></b>	<b><math>\sigma_d = 103 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 138 \text{ kPa}</math></b>
		<b><math>\sigma_d = 276 \text{ kPa}</math></b>

Para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso, como uma função do estado de tensão aplicado durante o ensaio, segundo modelos matemáticos. Dois dos principais modelos constantes na literatura, alusivos aos solos granulares e areno-argiloso, são apresentados nas equações (9) e (10), respectivamente (MICELI JUNIOR, 2006).

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (9)$$

$$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_3} \quad (10)$$

Onde: MR = Módulo de Resiliência [MPa];  
 $\sigma_3$  = Tensão confinante [MPa];  
 $\sigma_d$  = Tensão desvio [MPa];  
 $k_1, k_2, k_3$  = Coeficientes obtidos por regressão.

Sem relacionar à textura, MACÊDO (1996) utilizando o modelo definido por Pezo em 1991, obteve o denominado modelo composto, função da tensão confinante e da tensão desvio, como indicado na equação (11):

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (11)$$

Onde: MR = Módulo de Resiliência [MPa];  
 $\sigma_3$  = Tensão confinante [MPa];  
 $\sigma_d$  = Tensão desvio [MPa];  
 $k_1, k_2, k_3$  = Coeficientes obtidos por regressão.

## CAPÍTULO 5

### 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O solo natural e o tijolo moído foram submetidos aos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos, granulometria por peneiramento, granulometria por sedimentação com e sem defloculante, compactação, Resistência à Compressão Simples e Módulo de Resiliência. Dos experimentos realizados, aqueles referentes aos limites de consistência e granulometria tiveram por finalidade a classificação do solo segundo a textura, plasticidade e pelos sistemas tradicionais *Transportation Research Board* e *Unified Soil Classification System*. Por meio da execução dos ensaios de compactação foram determinados parâmetros necessários à confecção dos corpos de prova, obtendo-se, então, as propriedades mecânicas quanto à Resistência à Compressão Simples (RCS) e ao Módulo Resiliência (MR).

#### 5.1 Distribuição Granulométrica, Plasticidade e Classificação Geotécnica

São apresentadas na Figura 10 as curvas granulométricas do solo natural, obtidas por peneiramento e sedimentação com e sem a utilização de defloculante. Observa-se a partir da análise da curva com defloculante que há uma predominância da fração argila (56,47%), seguido da areia (23,86%) e do silte (21,92%). Por outro lado, quando o ensaio efetua-se sem a presença de defloculante nota-se uma considerável mudança nas porcentagens granulométricas, tendo-se 56,55% de areia, 39,50% de silte e 2,00% de argila. Estes resultados refletem o estado de agregação do solo, onde os valores da agregação total e do teor de agregação encontrados foram 54,47% e 27,23%, respectivamente. Destarte, observa-se que uma boa parte da argila presente no solo natural encontra-se floculada/agregada.

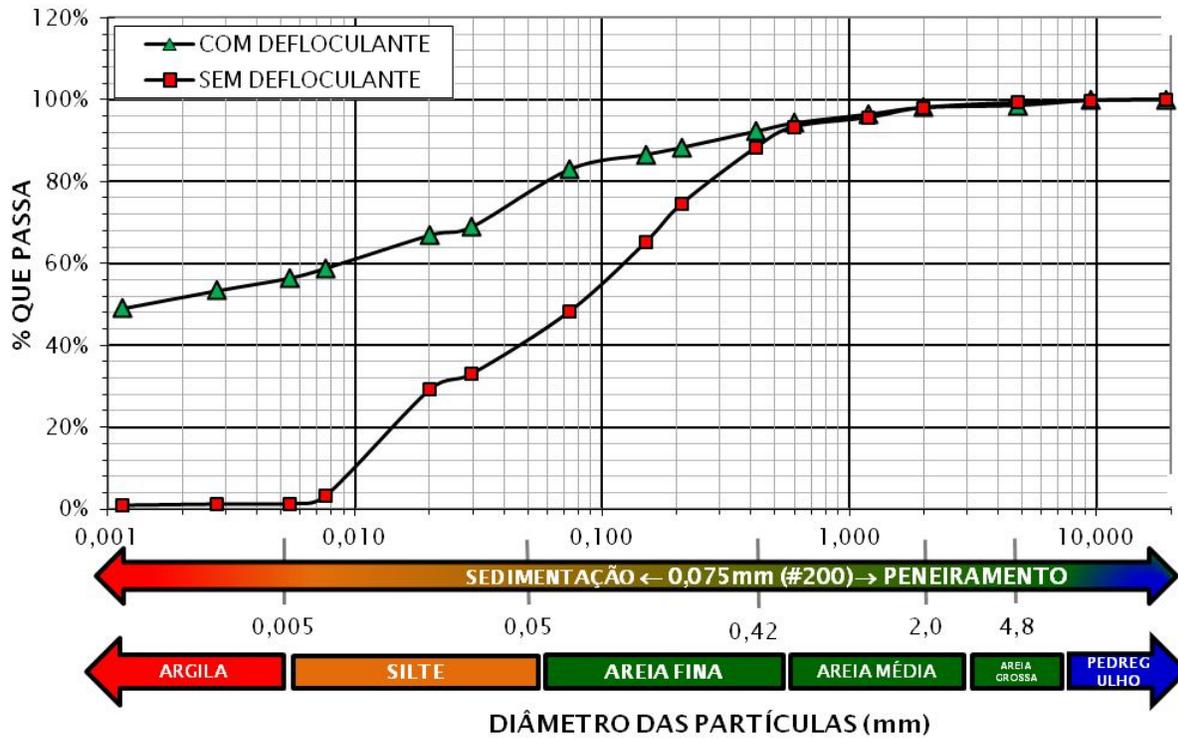


Figura 10 - Curvas Granulométricas do solo natural com defloculante e sem defloculante.

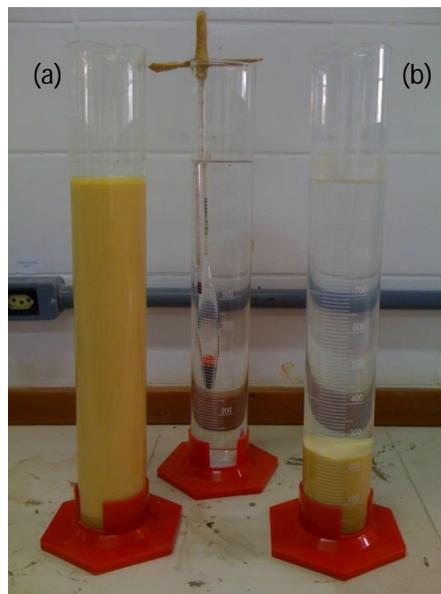


Figura 11 – Ensaio de sedimentação do solo natural com (a) e sem defloculante (b).

A Figura 12 apresenta as curvas granulométricas do resíduo cerâmico oriundo da trituração de tijolos cerâmicos e dividido, por meio de peneiras, em quatro faixas granulométricas distintas. As granulometrias 01, 02 e 03 apresentaram graduação muito

uniforme de acordo com CAPUTO (1988), obtendo valores de coeficiente de uniformidade iguais a 1,23, 1,45 e 1,07, respectivamente.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{ef}} \quad (12)$$

Onde:

$C_u$  = Coeficiente de Uniformidade;

$d_{60}$  = Diâmetro correspondente a 60% passando;

$d_{ef}$  = Diâmetro correspondente a 10% passando.

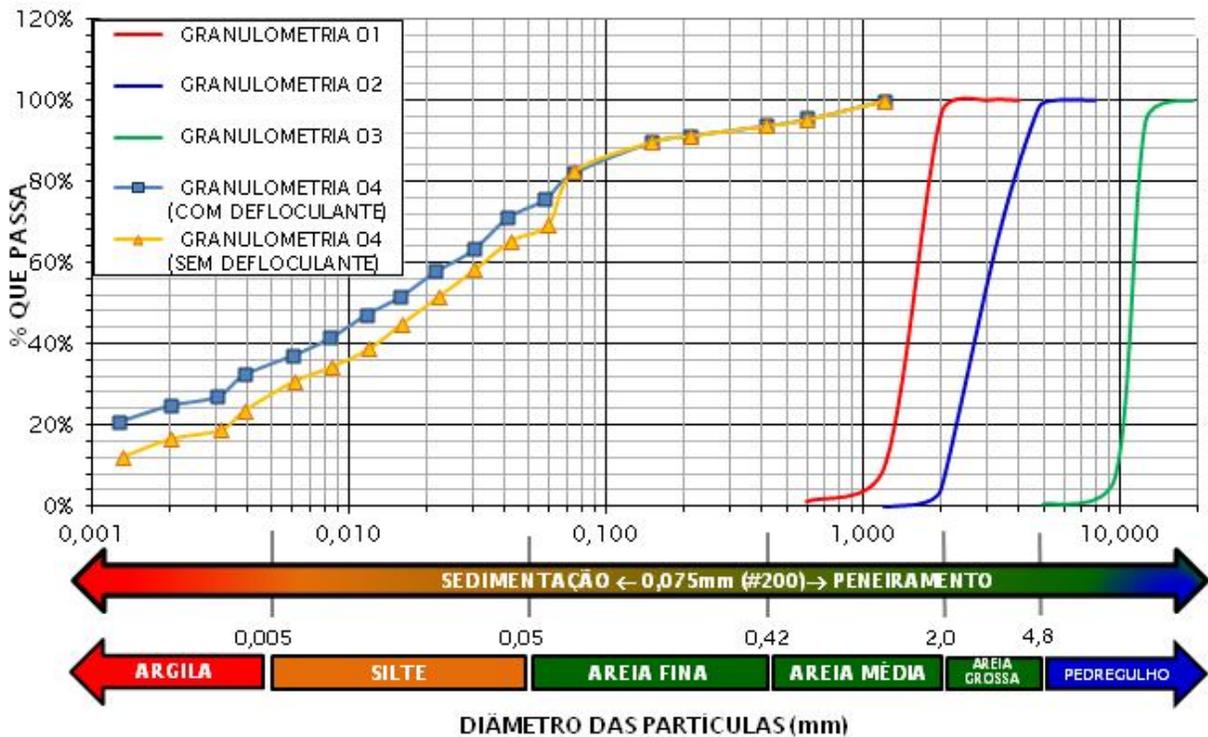


Figura 12 - Curvas Granulométricas do resíduo cerâmico moído.

Realizaram-se com o material 04 ensaios de sedimentação, com e sem o uso de defloculante, complementando o ensaio de peneiramento, a fim de caracterizar granulometricamente o material fino resultante da trituração total do resíduo cerâmico. Como resultado do experimento com defloculante e sem defloculante, obteve-se como fração predominante o silte, representando 41,86% e 43,20% do total da amostra, respectivamente.

Ainda relativo a esse material o uso de defloculante mostrou alterações nas porcentagens de argila (34,53%) e areia (23,60%), respeitantes ao experimento sem defloculante (24,3% de argila e 32,51% de areia). As granulometrias 01, 02 e 03 foram enquadradas como materiais granulares, ou seja, areia média, areia grossa e pedregulho, respectivamente.

Além da caracterização granulométrica determinaram-se os Limites de Atterberg, tendo em vista que a classificação da plasticidade é de grande importância em materiais utilizados na pavimentação. No caso do resíduo cerâmico este não apresentou limite de liquidez não sendo possível, então, determinar o índice de plasticidade, sendo classificado como não plástico (NP), segundo a NBR 7180 (ABNT, 1984).

Visando avaliar a influência da adição do resíduo cerâmico no solo, quanto ao seu índice de plasticidade, realizaram-se ensaios de limite de liquidez e plasticidade com o solo natural e as misturas com 10% e 50% de pó de tijolo, cujos resultados encontram-se expostos na Tabela 4. Os dados apontam uma diminuição dos limites conforme aumenta o teor de resíduo na mistura. O índice de plasticidade do solo natural e da mistura com 10% de resíduo cerâmico indicaram valor superior a 20%, classificando como plasticidade alta, de acordo com BURMISTER (1949) (Tabela 5). No caso da mistura com 50% de material cerâmico o valor reduziu e enquadrou a mistura como plasticidade média.

Tabela 4 – Limites de Atterberg para o solo natural e mistura com tijolo moído.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores Médios</b>		
	<b>Solo Natural</b>	<b>Solo com resíduo cerâmico (10%)</b>	<b>Solo com resíduo cerâmico (50%)</b>
Limite de Liquidez (LL)	85%	75%	59%
Limite de Plasticidade (LP)	56%	50%	46%
Índice de Plasticidade (IP)	29%	25%	13%

Tabela 5 – Solo x Índice de plasticidade (BURMISTER, 1949).

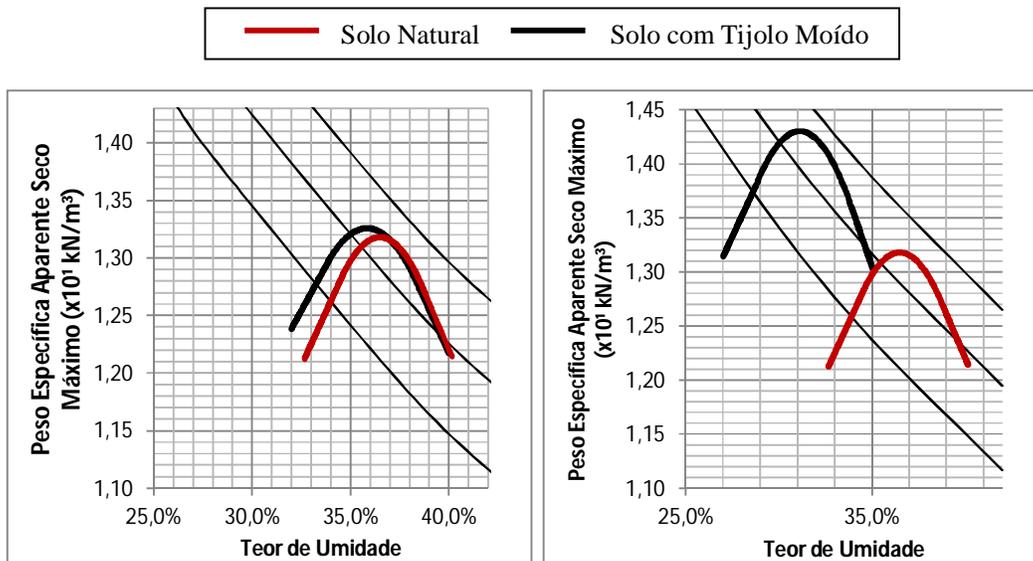
<b>Descrição</b>	<b>Índice de Plasticidade (%)</b>
Não-plástico	0
Ligeiramente plástico	1 - 5
Plasticidade baixa	5 - 10
Plasticidade média	10 - 20
Plasticidade alta	20 - 40
Plasticidade muito alta	> 40

Os resultados do ensaio de massa específica dos sólidos mostraram os valores de 2,711 g/cm<sup>3</sup> para o solo natural e 2,784 g/cm<sup>3</sup> referentes ao material alternativo. O resultado encontrado para o resíduo apresentou valor análogo ao disposto na literatura, ou seja, igual a 2,742 g/cm<sup>3</sup> para resíduos de telhas cerâmicas empregados em camadas de pavimento (DIAS, 2004). Embora a massa específica dos sólidos seja de grande importância por refletir possíveis variações mineralógicas e servir como base para obtenção de outros índices de caracterização, o seu resultado por si só não permite avaliar com precisão a presença ou ausência de um mineral.

Partindo do conjunto dos resultados (granulometria e limites), foi possível classificar segundo: a) Unified Soil Classification System o solo natural e as misturas com 10% e 50% de material cerâmico como silte ou argila orgânica arenosa de alta compressibilidade (OH/CH). Portanto, apesar do acréscimo do resíduo cerâmico na mistura, este não foi suficiente para causar alterações quanto a presente classificação; e b) Transportation Research Board o solo natural e as misturas com o material alternativo na classe A-7-5, definidos como solos argilosos altamente plásticos e suscetível a sofrer grandes variações volumétricas devido a sua sensibilidade as mudanças de umidade, sendo enquadrados como subleito de regular a mau (CAPUTO, 1988).

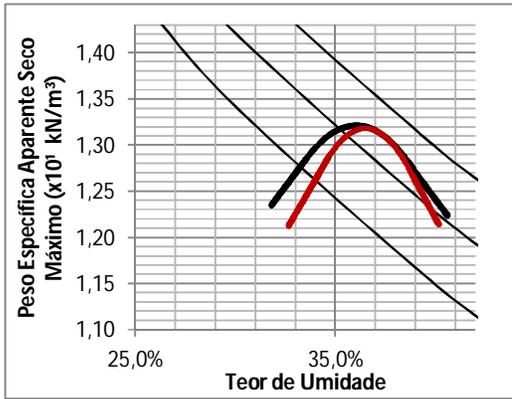
## 5.2 Ensaio de Compactação

Na Figura 13 são apresentadas as curvas de compactação do solo natural e das misturas com resíduo cerâmico, onde se observaram: a) expressivas alterações na mistura com 50% de tijolo moído em todas as granulometrias; b) que o solo natural apresentou um peso específico aparente seco máximo de  $13,2 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima de 37%; c) que as misturas com 10% de resíduo obtiveram como resultado curvas de compactação bem próximas ao solo natural, com exceção da granulometria 03 que mostrou um aumento do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima; d) que a granulometria 03 apresentou uma faixa granulométrica semelhante ao pedregulho, por isso indicando alterações significativas na curva de compactação com a adição de apenas 10% na mistura com o solo natural; e) quando adicionado 50% do resíduo ao solo natural teve-se um aumento mais acentuado do peso específico aparente seco máximo e diminuição da umidade ótima nas granulometrias 01, 02 e 03, alcançando valores em torno de  $14,0 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico e 30% relativo à umidade ótima; f) que as alterações foram menos expressivas na mistura com resíduo cerâmico pertencente à granulometria 04, pois o diâmetro dos seus grãos é o que mais se assemelha a um material fino em comparação às outras texturas do resíduo. Assim, suas características físicas estão mais próximas do solo natural, causando menores alterações na curva de compactação do solo natural.

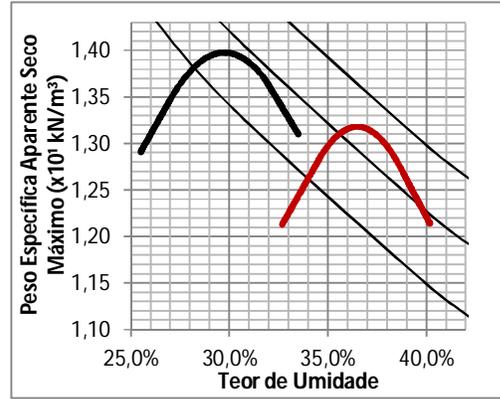


(a) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 01 – Areia Média - 10%

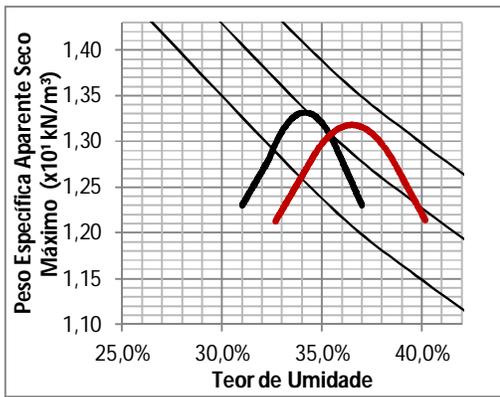
(b) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 01- Areia Média - 50%



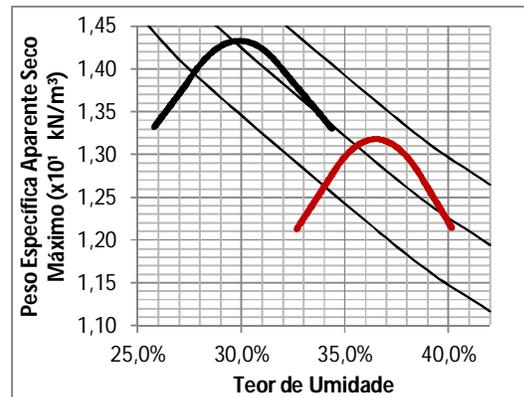
(c) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 02- Areia Grossa - 10%



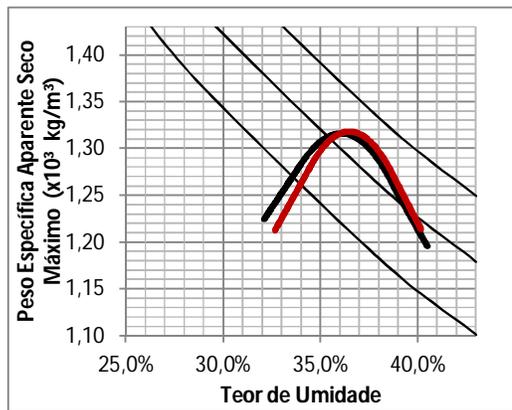
(d) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 02- Areia Grossa - 50%



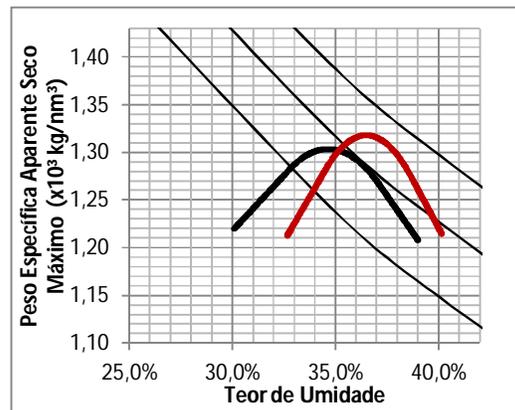
(e) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 03- Pedregulho - 10%



(f) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 03- Pedregulho - 50%



(g) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 04 - Pó de tijolo - 10%



(h) Solo com Tijolo Moído -  
Granulometria 04- Pó de tijolo - 10%

Figura 13 - Curvas de Compactação do solo natural e mistura solo com resíduo cerâmico moído.

### 5.3 Caracterização Mineralógica

Quanto à caracterização mineralógica, o solo argiloso apresentou composição característica dos latossolos da região amazônica, com presença majoritária do argilomineral caulinita, seguida de quartzo. Igualmente tem-se a presença de minerais de ferro (hematita e goetita) que dão a cor alaranjada para o solo e traços de gibsita e anatásio. A Figura 14 apresenta o difratograma para o solo argiloso natural.

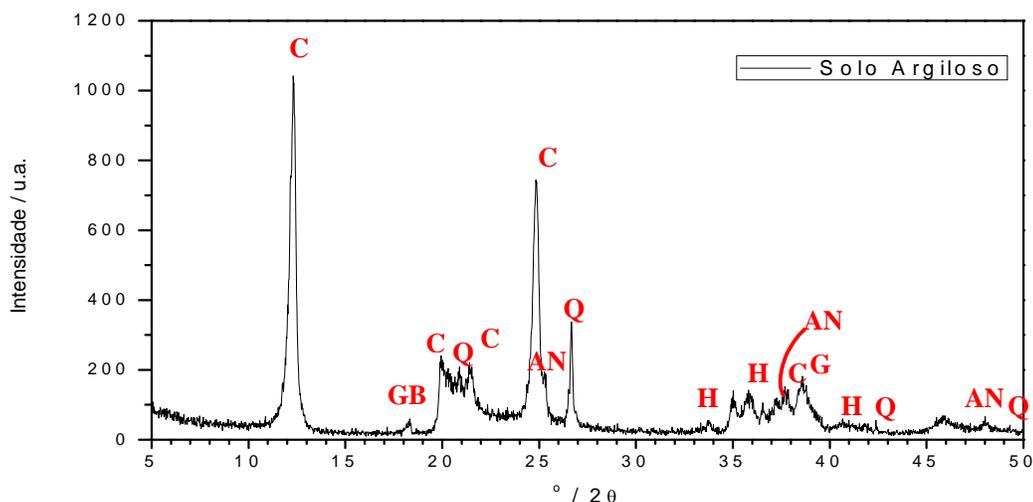


Figura 14 – Difratograma do solo natural.

Tabela 6 – Identificação mineralógica do solo natural – Picos dos Minerais

Mineral	Presença	Fórmula Química	Picos ( $^{\circ} / 2\theta$ )
Caulinita (C)	+++	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	12,34; 20,34; 21,24; 24,86; 38,36
Quartzo (Q)	++	$SiO_2$	20,87; 26,65; 42,43; 50,15
Hematita (H)	+	$Fe_2O_3$	24,20; 33,69; 35,62; 40,91;
Goethita (G)	+ (traço)	$FeOOH$	24,84; 38,98;
Gibsita (GB)	+ (traço)	$Al(OH)_3$	18,27
Anatásio (AN)	+ (traço)	$TiO_2$	25,30; 37,80; 48,06;

O difratograma da amostra de tijolo moído (Figura 15) mostrou padrões de quartzo (mineral majoritário), dos minerais de ferro (hematita e goetita) e dos argilominerais caulinita e illita. Em estudos semelhantes realizados com resíduos cerâmicos de telhas e/ou tijolos (DIAS, 2004 e GOUVEIA, 2008), observou-se a ausência ou abatimento dos picos do argilomineral caulinita, o qual se faz presente na matéria-prima utilizada na fabricação do tijolo. Evidenciando uma possível amorfização da caulinita devido às temperaturas elevadas em que o material foi submetido na fase de queima. Em D'ANTONA et al (2007) tem-se o estudo de amostras de argila, utilizadas na produção de cerâmica, oriundas de Iranduba, Manaus, Careiro e Manacapuru, onde constataram a predominância de argilominerais do grupo da caulinita com traços gibsita, rara illita e ainda feldspato e quartzo. Portanto, concordantes com os resultados encontrados nesse trabalho.

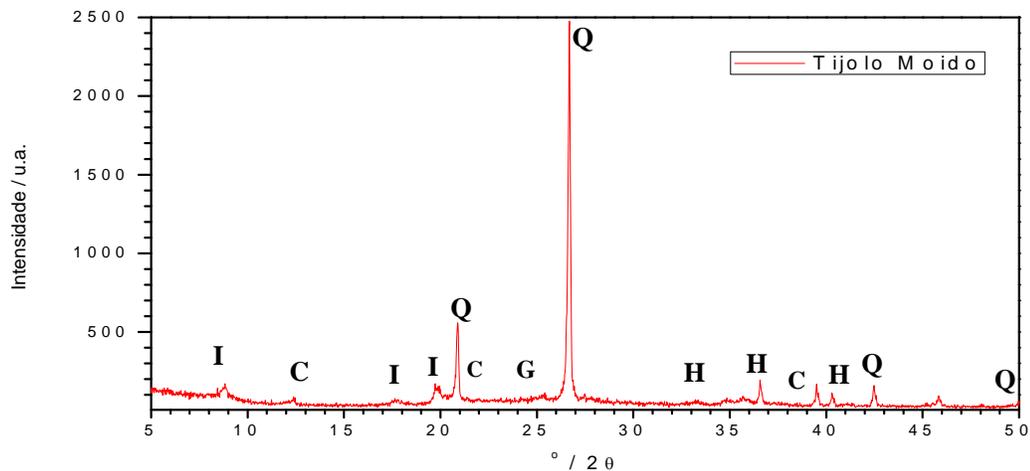


Figura 15 – Difratograma do resíduo cerâmico moído.

Tabela 7 – Identificação mineralógica do tijolo em pó – Picos dos Minerais

Mineral	Presença	Fórmula Química	Picos ( $^{\circ} / 2\Theta$ )
Caulinita (C)	++	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12,34; 20,34; 21,24; 24,86; 38,36
Quartzo (Q)	+++	$\text{SiO}_2$	20,87; 26,65; 42,43; 50,15
Hematita (H)	+ (traço)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	24,20; 33,69; 35,62; 40,91;
Goethita (G)	+ (traço)	$\text{FeOOH}$	24,84; 38,98;
Illita (I)	++	$\text{K}_{0,88}\text{Al}_2[\text{Al}_{0,88}\text{Si}_{3,12}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	8,82; 17,66; 19,82; 25,42; 26,66;

#### 5.4 Comportamento Mecânico

O solo natural e os solos com adição de tijolo moído foram submetidos aos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR), ambos a uma temperatura de 40°C, no equipamento UTM 14 (*Universal Testing Machine*) auxiliado pelo software UTS009 1.28 *Unbound Material Resilient Modulus and Shear Test*. A mencionada temperatura de ensaio visou simular as condições reais de compactação em campo presentes região amazônica.

##### 5.4.1 Resistência à Compressão Simples

Relativo aos resultados da Resistência à Compressão Simples, constantes na Tabela 4, observou-se: a) maiores valores da RCS para as misturas solo granular (01, 02 e 03) com 10% de resíduo cerâmico moído, confrontados à condição natural. Apresentando também uma crescente sequência de valores respeitante ao tamanho dos grãos (Granulometria 03 > 02 > 01

> 04); b) maiores valores da RCS para as misturas com 50% de tijolo relativos ao solo natural, porém na sequência inversa a adição de 10% do material alternativo; c) o melhor desempenho da RCS para as misturas com 10% de acréscimo do resíduo alusivo às misturas com a participação de 50%, exceto para a granulometria 01 que indicou um aumento de 11% para a mistura com maior quantidade de adição do material cerâmico; e d) obteve-se o maior valor da RCD para a mistura com 10% de resíduo na granulometria 03, resultando em um valor 154% maior em comparação ao solo natural.

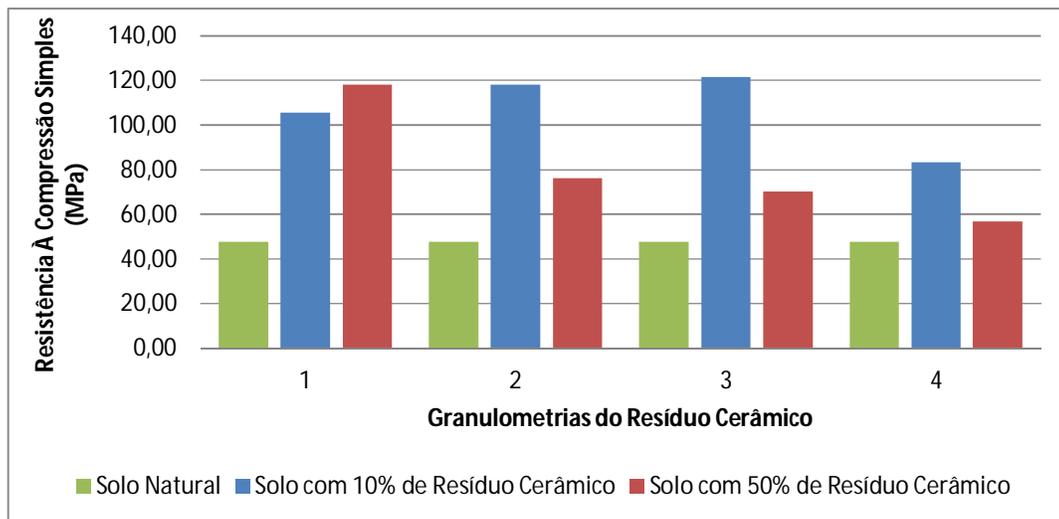


Figura 16 – Resultados da Resistência à Compressão Simples do solo natural e misturas.

#### 5.4.2 Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados para cada mistura, nas duas porcentagens consideradas nesse trabalho (10% e 50%), além do solo natural, e ensaiados na temperatura de 40°C.

A escolha do modelo de comportamento “tensão x deformação” é de grande importância para a avaliação dos módulos de resiliência associados a cada tipo de material. Para melhor ilustrar a grande variação de resultados que se pode obter ao aplicar os diferentes modelos, elaborou-se a Tabela 6 que apresenta os valores de  $R^2$  para cada amostra.

Tabela 8 – Coeficientes de regressão ( $R^2$ ) para modelos aplicados aos resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.

Amostra	MODELOS	
	Composto	Areno-argiloso
Solo Natural	0,84	0,56
Solo com Granulometria 01 – 10%	0,83	0,82
Solo com Granulometria 01 – 50%	0,98	0,96
Solo com Granulometria 02 – 10%	0,97	0,95
Solo com Granulometria 02 – 50%	0,97	0,53
Solo com Granulometria 03 – 10%	0,91	0,87
Solo com Granulometria 03 – 50%	0,84	0,82
Solo com Granulometria 04 – 10%	0,75	0,64
Solo com Granulometria 04 – 50%	0,83	0,35

Dentre os modelos matemáticos utilizados na análise dos dados, o que melhor representou o comportamento resiliente dos solos estudados foi o Modelo Composto (Eq. 11) e o maior valor do coeficiente de correlação  $R^2$  se referiu à mistura de solo com 50% de resíduo cerâmico na granulometria 01 ( $R^2 = 0,98$ ). Para o tratamento dos dados e posterior compilação dos gráficos, fez-se necessário a utilização dos programas LabFit – Ajuste de curvas e o Programa OriginPro 8.

Os dados obtidos foram representados graficamente por meio de superfícies, tornando possível observar as variações impostas pelos diversos fatores sobre o parâmetro resiliente do solo natural e misturas.

A primeira superfície obtida a partir dos resultados, para a amostra de solo natural, é apresentada na figura 17. Segundo SANTOS (2003), solos argilosos e arenosos sofrem a influência, quase que exclusiva, das tensões desvio e confinante, respectivamente. Nos

resultados abaixo apresentados para o solo natural e suas misturas observa-se que a tensão desvio concorreu decisivamente para a variação do Módulo Resiliente enquanto que a tensão confinante ( $\sigma_d$ ) somente causou maiores alterações nas misturas com maiores teores e diâmetros de resíduo.

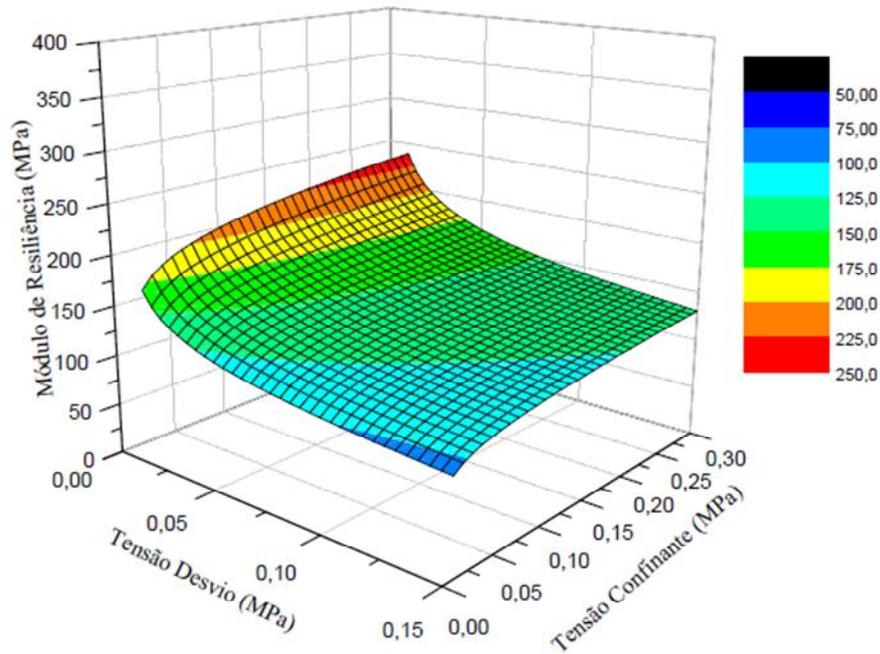


Figura 17 – Módulo de resiliência para o solo natural.

Tendo em vista a análise dos parâmetros  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  no solo misturado ao resíduo cerâmico, as superfícies referentes a cada granulometria de resíduo foram agrupadas com suas respectivas porcentagens e estão apresentadas nas figuras 18 a 21.

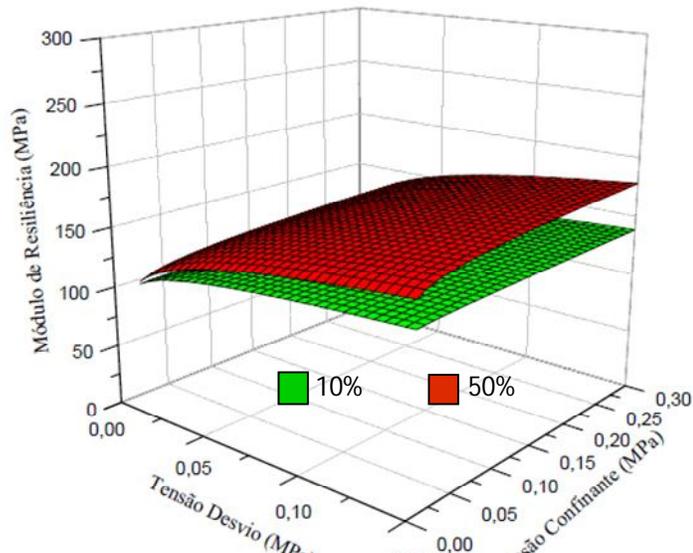


Figura 18 – Módulo de resiliência para o solo misturado ao resíduo na granulometria 1 (areia média).

O comportamento resiliente do solo misturado ao resíduo cerâmico na granulometria 3 (areia média) mostrou semelhante dependência da tensão desvio como observado no solo natural e o aumento de quantidade na mistura apenas acresceu os valores do MR mantendo semelhante a forma da superfície (figura 18). As superfícies (figura 19) encontradas para o solo misturado a tijolo moído na granulometria 2 (areia grossa) mostraram-se semelhantes e o acréscimo de resíduos na mistura gerou uma leve redução nos valores do módulo resiliente.

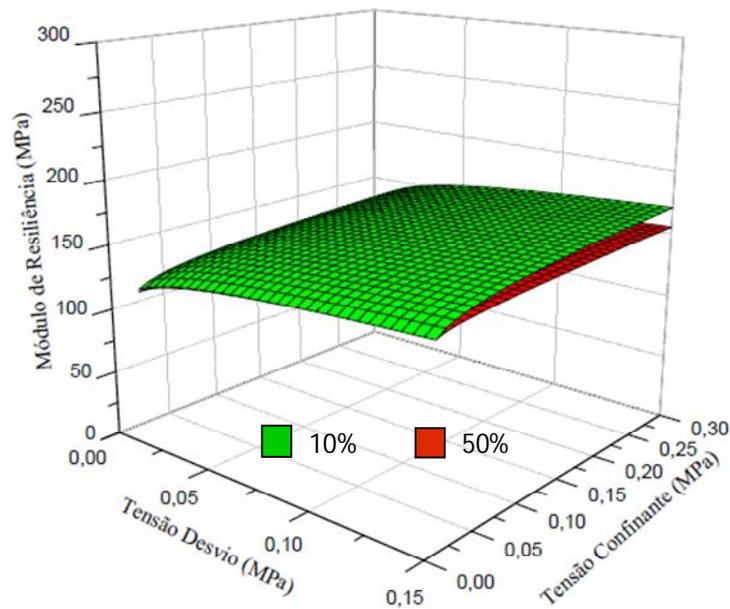


Figura 19 – Módulo de resiliência para o solo misturado ao resíduo na granulometria 2 (areia grossa).

Nos ensaios realizados com a mistura de solo com o resíduo de tamanho semelhante ao pedregulho (figura 20) observou-se que a superfície com 50% de mistura se mostra mais dependente da tensão confinante, o que representa um comportamento característico de solos granulares. Esta alteração pode ser explicada pelo acréscimo de tijolo moído com tamanho semelhante o pedregulho, visto que a mistura com 10% de resíduo apresentou comportamento semelhante ao solo natural.

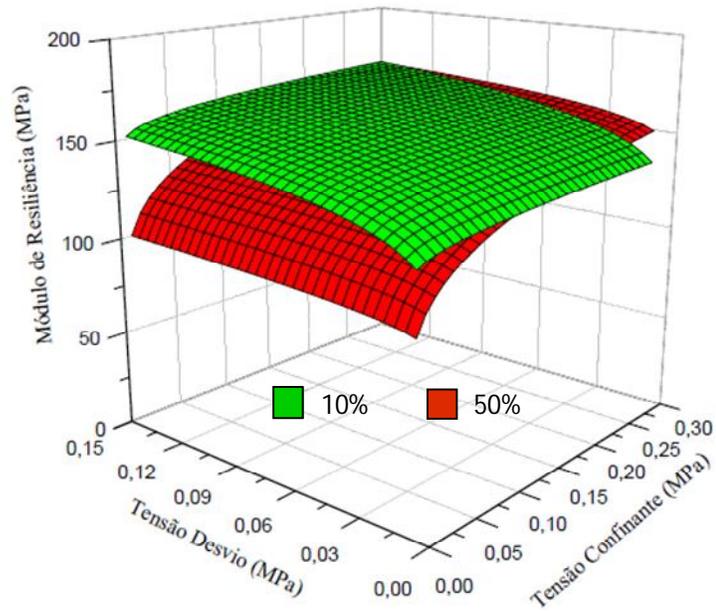


Figura 20 – Módulo de resiliência para o solo misturado ao resíduo na granulometria 3 (pedregulho).

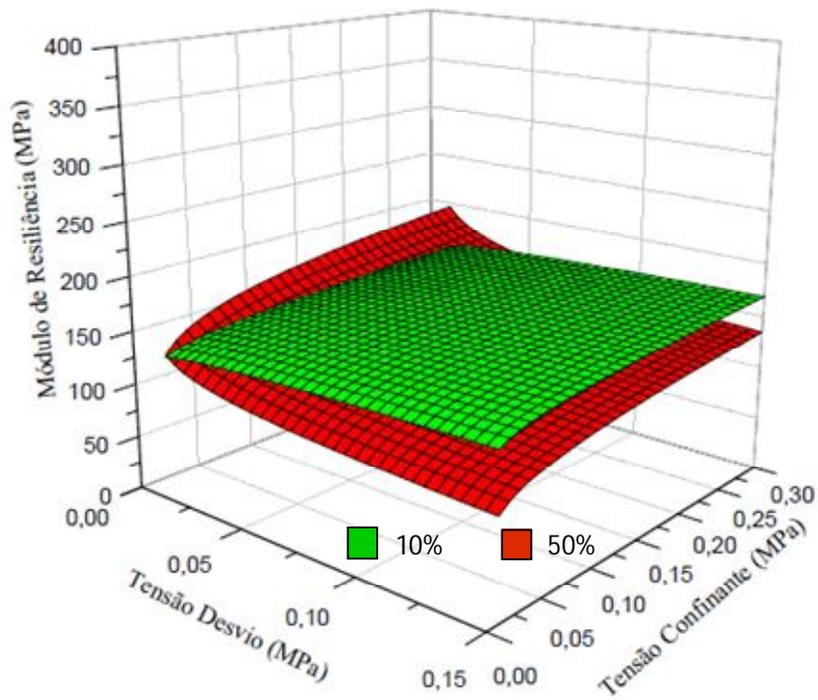


Figura 21 – Módulo de resiliência para o solo misturado ao resíduo na granulometria 4 (pó de tijolo).

A partir das superfícies apresentadas na figura 21, verificou-se que a adição do pó de tijolo ao solo alterou o seu comportamento resiliente somente para a mistura com 10%. E dentre todas as amostras de solo ensaiadas, a mistura de solo com 50% de pó de tijolo foi a que apresentou os menores valores de Módulo de Resiliência.

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES

A caracterização física do solo natural mostrou resultados que confirmaram as características descritas na literatura em relação aos latossolos da região amazônica. Dentre estas podemos citar a coloração amarelada, a predominância da fração argilosa e o elevado teor de agregação.

O acréscimo do resíduo cerâmico em pó ao solo não alterou sua classificação quanto à textura. No entanto, levou a uma redução do Índice de Plasticidade, ou seja, o material natural e com a mistura com acréscimo de 10% de resíduo moído foi classificado com alta plasticidade, porém com 50% de tijolo passou a apresentar média plasticidade. Essa redução do IP melhora a trabalhabilidade do solo, uma vez que diminui a suscetibilidade do solo em presença de água. Atinente ao tijolo moído: não apresentou limite de liquidez, portanto foi classificado como não plástico (NP); e o valor da massa específica dos sólidos mostrou-se semelhante ao valor disposto na literatura para resíduos de telhas cerâmicas.

Em relação às curvas ensaios de compactação as misturas com 10% de resíduo mostraram-se bem próximas ao solo natural. Exceção a granulometria 03, que mostrou um aumento do peso específico aparente seco máximo e redução da umidade ótima. Quando adicionado 50% do resíduo ao solo natural, notou-se um aumento mais acentuado do peso específico aparente seco máximo e diminuição da umidade ótima para as granulometrias 01, 02 e 03. Por outro lado, a mistura com o resíduo cerâmico em pó (granulometria 04) apresentou as menores alterações.

O difratograma do tijolo moído indicou a presença do quartzo (mineral predominante) e de outros minerais constituintes (ilita, hematita, entre outros). Destaca-se a ausência ou abatimento dos picos do argilomineral caulinita, evidenciando uma possível amorfização da caulinita devido às elevadas temperaturas de queima. Em relação ao solo natural, observou-se a presença majoritária do argilomineral caulinita, bem como a presença de minerais de ferro (hematita e goetita) que dão a cor avermelhada ao solo.

Pelos resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples, concluiu-se que: a) quanto maior a granulometria do resíduo maior foi a sua contribuição na resistência do solo; e b) dentre as misturas, o menor valor de RCS foi mostrado para a mistura com 50% do material com granulometria 04 (pó de tijolo).

Referente aos resultados do Módulo de Resiliência: a) o modelo composto indicou melhor adequação dentre os modelos de representação do comportamento resiliente do solo, mostrando igualmente os maiores valores de coeficiente de regressão ( $R^2$ ); e b) o comportamento resiliente das misturas foi tanto melhor quanto menor a porcentagem de resíduo cerâmico adicionado. Porém, no caso da granulometria 01, ocasionou o maior valor do MR dentre todas as misturas.

Por fim, considerando a grande quantidade de resíduos gerados na produção de tijolos cerâmicos e, levando em consideração o desempenho mecânico satisfatório da mistura solo-resíduo na maioria das amostras, pode-se concluir que este resíduo apresenta grande potencial como agregado alternativo na melhoria de solos com baixa capacidade de suporte. Dentre as amostras analisadas, a mistura de solo com 10% de resíduo cerâmico na granulometria 03 (pedregulho) apresentou os melhores resultados quanto ao comportamento mecânico, elevando consideravelmente os valores de resistência à compressão simples.

## **6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Visando dar continuidade a este estudo e contribuir para o conhecimento das aplicabilidades dos resíduos cerâmicos, sugere-se:

- a) Estudar o efeito da temperatura de queima no resíduo cerâmico por meio da análise química e mineralógica do material;
- b) Realizar caracterização física do tijolo moído quanto à absorção e resistência ao desgaste;
- c) Investigar o potencial pozolânico e o efeito filer do resíduo por meio de análises físicas e químicas, bem como sua aplicação em misturas asfálticas substituindo o cimento *portland*;
- d) Realizar estudos que contemplem a viabilidade econômica da reutilização deste material cerâmico em camadas de pavimentos.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- AASHTO - American Association of State And Highway Transportation Officials (2003), Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Material, T 307-99. p. 43.
- ABNT (1984). Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles" - 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). Solo - Análise Granulométrica - NBR 7181- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (1986). Solo – Ensaio de Compactação - NBR 7182 - 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 (1992). Solo Coesivo - Determinação da resistência à compressão simples não confinada, NBR 12.770. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1993). Materiais de pedra e agregados naturais, NBR 7225. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ACERAM (Associação dos Ceramistas do Estado do Amazonas) (2012). Relatório da APL de Base Mineral: “Central de Resíduos”.
- AGUIAR, C.J.B., HORBE, M.A., R. FILHO, S.F., LOPES, E.S.,MOURA, U.F., ANDRADE, N.M. & DIÓGENES, H.S., (2002) ,Carta hidrogeológica da cidade de Manaus. CPRM-AM Manaus, Relatório Interno, 1-4.
- BENTO, A. H.; FROTA, C. A. (1998). Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Manaus - AM.. In: III Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, 1998. III Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica. Florianópolis, SC.

- BERNUCCI, L. B.; MOTA, L. M. G.; CERATI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2008). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Abeda
- BURMISTER, D. M.; (1949). Principles and techniques of soil identification. Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council, Washington, D.C., 29, 402-433.
- CAPUTO, H.P. (1988). Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234p.
- CAVALCANTE, E.H. (2006) Mecânica dos solos II. Aracaju-SP: Universidade Federal de Sergipe, Centro de ciências exatas e tecnologia, Departamento de engenharia civil. 75p. (Notas de aula).
- COUTO, J. B. (2009). Estudo de misturas de solo-agregado em bases e sub-bases rodoviárias do Rio Grande do Sul: caracterização de laboratório e execução de trecho experimental. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre
- CRISTELO, N. M. C., (2001). Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Portugal. <http://hdl.handle.net/1822/150> [online]. Acessado 23/11/2011.
- DALLACORT, R.; LIMA JUNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. (2002). Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, vol.6, n.3, pp. 511-518. ISSN 1807-1929.
- D'ANTONA, R. J. G.; CRUZ, N. M. C.;BRITO, I. A.; REIS, N. J.; FERREIRA. A. L.; DIAS, M. T. C. (2007). Projeto materiais de construção na área Manacapuru –Iranduba – Manaus – Careiro: domínio Baixo Solimões /– Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER (1971). Especificações gerais para obras viárias. São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. (2006). Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 274p.

- DIAS, J. F. (2004) Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FERNANDES FILHO, L.A., COSTA, M.L., and COSTA J.B.S., (1997). Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus - Amazonas: Geociências, v. 16, no. 1, pp. 9-33.
- FROTA, C. A. ; SANTOS, M. G. R. ; NUNES, F. R. G. ; CANTANHEDE, B. P. (2003). Estudo de Alternativas para a Estabilização do Solo Argiloso Superficial de Manaus.. In: V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre - RS. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.
- GOMES, C.F. (1988). Argilas – O que são e para que servem. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- GOUVEIA, F. P.; (2008). Efeito da incorporação de chamote (resíduo cerâmico queimado) em massa cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação para o Distrito Federal: um estudo experimental. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. UNB. Faculdade de Tecnologia. Distrito Federal.
- JOHN, V. M. (1999). Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: II Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo. IBRACON. v. 1 p. 44-55
- KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. (1974). X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials: Wiley-Interscience, New York, 2nd ed.
- LIMA, M.C. (1999). Contribuição ao Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 057A/99, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.
- LIMA, M. C. ; CARVALHO, J. C. ; FROTA, C. A. ; BENTO, A. H. (1999) . Relação entre a Geologia Estrutural e a Formação de Boçorocas na Área urbana de Manaus.. In: 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1999, São Pedro - São Paulo. 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. São Paulo, SP : ABGE,. v. CD-ROM.
- MACÊDO, J. A. G (1996) Interpretação de ensaios defletométricos para a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

- MICELI JR, G. (2006) Comportamento Resiliente de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- MITCHELL, J. K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, Inc., New York
- MORAES, E.L., COSTA, M.L. (1997). O caulim de Manaus-Itacoatiara: aspectos mineralógicos e geoquímicos. Geociências, v.16, p.35-53.
- NOGUEIRA, J.B. (2001). Ensaio de Laboratório. EESC-USP, São Carlos,SP, 248 p.
- PESSOA, F. H. C. (2004). Análise de solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília.
- PICANÇO, H. M. ; CARTAXO, E. F. ; FROTA, C. A. ; PEREIRA, P. H. S. (2011) . Refletividade, Radiação Solar e Temperatura em Diferentes Tipos de Revestimentos das Vias Urbanas no Município de Manaus (Am). In: 5º CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, São Paulo.
- PINTO, C.S. (2002) Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. São Paulo, Oficina de Textos, 2ª Edição. 247p.(Se não fez referência, por favor retirar. Livro de graduação!)
- RIPOLI FILHO, F. (1997). A Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico. Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental, Revista CERÂMICA 43 (281-282)
- SANTOS, A.G. (2003). Estudo do comportamento resiliente de três solos da região de Campo Grande-MS e de relações entre o módulo de resiliência e resultados de ensaios de compressão simples. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. USP. São Paulo. SP. 140p
- SANTOS, R. M. M. (1997). Caracterização Geotécnica e Análise do Processo das Erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 120 p.
- SCAPIN, M. A. (2003) Aplicação da Difração e Fluorescência de Raios X: Ensaio em Argilominerais. Dissertação Mestrado) - Instituto Pesquisas Energéticas Nucleares, São Paulo.

- SERRA, P. R. M. (1987) Considerações sobre misturas de solo-agregado com solos finos lateríticos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Vias de Transporte e Topografia. Universidade de São Paulo. São Paulo. 106 p.
- SILVA, M. B. (2010). Análise gravimétrica de uma anomalia morfoestrutural na cidade Manaus-AM. Dissertação de Mestrado em Geociências da Universidade Federal do Amazonas. 102 p.
- SOUZA JUNIOR, J. D. (2005) Efeito da energia de compactação em algumas propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. 211p.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R.M.; ZUPPOLINI NETO, A. (2009) - Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas - 2ª edição , São Paulo: Arte & Ciência, 196 p.