

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO ORIUNDO DO
POLO OLEIRO DE IRANDUBA E MANACAPURU PARA
EMPREGO COMO ELEMENTO CONSTITUINTE DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTO**

DANIELLY KELLY DOS REIS DIAS

MANAUS
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIELLY KELLY DOS REIS DIAS

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO ORIUNDO DO
POLO OLEIRO DE IRANDUBA E MANACAPURU PARA
EMPREGO COMO ELEMENTO CONSTITUINTE DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração de Materiais e Componentes de Construção, na linha de pesquisa Materiais Regionais e Não Convencionais Aplicados a Pavimentos.

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS
2016

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

D541r Dias, Danielly Kelly dos Reis
Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do Polo Oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento / Danielly Kelly dos Reis Dias. 2016
166 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Estabilização de solos. 2. Resíduo cerâmico. 3. Dimensionamento de pavimento. 4. SisPav. I. Campelo, Nilton de Souza II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

DANIELLY KELLY DOS REIS DIAS

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO ORIUNDO DO
POLO OLEIRO DE IRANDUBA E MANACAPURU PARA
EMPREGO COMO ELEMENTO CONSTITUINTE DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração de Materiais e Componentes de Construção, na linha de pesquisa Materiais Regionais e Não Convencionais Aplicados a Pavimentos.

Aprovado em 25 de maio de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos
Universidade Federal do Amazonas

Prof.^a Dr.^a Liedi Legi Bariani Bernucci
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Cursar o Mestrado na área de Engenharia Civil sempre foi algo almejado por mim, mesmo ciente das dificuldades em conciliar trabalhos profissionais, pós-graduação, família, amigos e atividades voluntárias. Por todo esse contexto, tenho bastante a agradecer.

A Deus, pois nada acontece sem Sua vontade.

À minha família por todo o apoio e carinho, em especial ao meu esposo Allan, meu companheiro de infindáveis ensaios técnicos laboratoriais, à minha mãe Roseneide, que me ensinou o valor dos estudos na vida de uma pessoa de bem e por sua solicitude em todos meus momentos de necessidade, à minha tia Rose, por me auxiliar sempre que necessário e à minha filha Lindsen, por existir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, por sua disponibilidade em atender e elucidar questões, pela exigência que me incentivou e proporcionou oportunidades de crescimento e conhecimento, além dos conselhos e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas e aos professores do programa, pelos conhecimentos transmitidos, em especial à Prof.^a Dr.^a Adalena Kennedy e ao Prof. Dr. Raimundo Vasconcelos, com os quais sempre pude contar, na produção deste trabalho.

À Beatriz Mar, secretária do PPGEC, por ser tão competente e prestativa, além de quebrar várias "árvores" para mim. Deus te abençoe sempre, Bia!

Aos amigos discentes do PPGEC, pelas horas de estudo, convívio e amizade, em especial ao amigo Eduardo Souza, por auxiliar no manuseio do material enviado a COPPE/UFRJ, mesmo com seu tempo limitado.

Aos técnicos do Laboratório de Pavimentação e do Laboratório de Ensaio de Materiais da Faculdade de Tecnologia da UFAM, em especial ao Eng.^o Antônio Reinaldo, que mais do que um profissional, foi um grande amigo e à D. Rai, por cuidar de todos nós.

Ao Sr. Antônio Medeiros, Gerente da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, pelo acesso às dependências da Indústria, cessão do resíduo cerâmico utilizado nessa pesquisa e demais informações cedidas.

Ao Dr. Edson Moura e à Prof.^a Dr.^a Liedi Bernucci, além dos técnicos Erasmo e Vanderlei, por todo o auxílio durante os ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.

À Prof.^a Dr.^a Laura Maria Goretti da Motta e aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COOPE/UFRJ, em especial ao técnico e amigo Roberto Viana, por toda atenção durante os ensaios realizados na instituição.

Ao Instituto Federal do Amazonas - IFAM, por permitir a realização do Ensaio de Abrasão Los Angeles em seu Laboratório de Mecânica dos Solos.

À professora Adriana Maria Coimbra Horbe, por consentir e auxiliar na realização do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), no Laboratório de Química do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

Às Gestoras da SEMED, Joanita Aquino Afonso e Solo e Céu Lemos, pelo apoio, compressão e inúmeras negociações de carga horária de trabalho, que foram fundamentais para a conclusão desse trabalho.

Às Professoras MSc. Valdete Bitencourt e MSc. Maria Ivanilde Oliveira, por me inserirem no meio científico desde a graduação, acreditando e motivando-me com suas posturas exemplares e profissionalismo, além da amizade.

Ao professor Edilmar Passos por fazer nascer em mim o amor pelas Ciências Exatas, especificamente pela Física e Matemática, desde tenra idade. Muito obrigada professor, seu olhar diferenciado foi fundamental para minha formação.

A todos que de alguma maneira me ajudaram a vencer os desafios e conquistar esse sonho, mesmo com tantas dificuldades enfrentadas,

Minha eterna gratidão.

RESUMO

O polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru/AM agrega atualmente cerca de trinta indústrias cerâmicas instaladas com produção diária aproximada de 4,5 mil toneladas de tijolos, telhas e blocos cerâmicos, dos quais aproximadamente 95% atendem a demanda da cidade de Manaus, gerando renda, devido milhares de empregos diretos e indiretos. Este ramo industrial gera aproximadamente 135 toneladas de resíduo cerâmico (RC) no mesmo período, devido queima inadequada, falha no processo produtivo, má conformação das peças entre outros. O objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento mecânico do solo típico da cidade de Manaus, ao estabilizá-lo com este resíduo cerâmico, a fim de aplicá-lo em camadas de sub-base e base de pavimento, e consistiu na sua divisão em duas fases: na primeira fase foram analisados o solo natural (SN) coletado na obra de construção do Centro de Convivência da Faculdade de Tecnologia da UFAM e o resíduo cerâmico coletado na Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, localizada no município de Iranduba. Esses materiais compuseram as misturas solo-resíduo (MSR) com as seguintes proporções: 1) MSR1: 80% SN + 20%RC; 2) MSR2: 60%SN + 40%RC; 3) MSR3: 40%SN + 60%RC e 4) MSR4: 20%SN + 80%RC. Na segunda fase da pesquisa foram analisadas as misturas compostas pelo solo natural e resíduo cerâmico nas mesmas proporções das misturas anteriores com o acréscimo de 30% de areia na proporção de solo natural. Todas as amostras foram coletadas, armazenadas e preparadas conforme normas vigentes para realização dos seguintes ensaios técnicos: preliminarmente, as misturas se mostraram excessivamente plásticas e com baixo suporte para fins de aplicação; em seguida acrescentou-se a areia (MSAR) como desplastificante e corretor granulométrico, sendo posteriormente analisados seus Módulos de Resiliência em ensaios realizados no Laboratório do Grupo de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Os resultados obtidos indicaram a terceira composição com adição de areia (MSAR-3) como sendo a mistura com maior viabilidade de aplicação em pavimento em termos de proporção e suporte mecânico, onde se avaliou novamente o Módulo de Resiliência da melhor mistura no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, para confirmação dos dados e utilização dos mesmos em uma simulação de dimensionamento de pavimento, por meio do método mecanístico através do uso do programa computacional SisPav.

Palavras-chaves: Estabilização de solos, Resíduo Cerâmico, Dimensionamento de Pavimento, SisPav.

ABSTRACT

The complex of industrial manufacturing of bricks in the cities of Iranduba and Manacapuru in Amazonas state currently has about thirty ceramics industries operating with approximate daily production of 4500 tons of bricks, roof tiles and ceramic blocks, of which approximately 95% providing to Manaus demand, generating income, cause thousands of direct and indirect jobs according to the Associação dos Ceramistas do Amazonas - ACERAM. This industrial sector generates approximately 135 tons of ceramic waste (RC) at the same period due to incorrect burning, failure in the production process, poor conformation of parts among others. The purpose of this research is to evaluate the mechanical behavior of Manaus's typical soil to stabilize it with this ceramic waste in order to apply it in layers of sub-base and pavement base and consisted of a division into two phases: the first phase were analyzed natural soil (SN) collected in the building's construction of the Living Center at the Technology College - UFAM and the ceramic waste collected in the Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, located in the city of Iranduba. These materials composed the soil-residue mixing (MSR) with the following proportions: 1) MSR1: 80% SN + 20%RC; 2) MSR2: 60%SN + 40%RC; 3) MSR3: 40%SN + 60%RC e 4) MSR4: 20%SN + 80%RC. In the second phase of the research was analyzed the mixtures composed by natural soil and ceramic waste in the same proportions of the previous mixtures and increase 30% sand in the proportion of natural soil. All samples were collected, stored and prepared in accordance with the regulations to achieve the following technical tests: preliminarily, the mixtures demonstrated exceedingly plastics and with low support for enforcement purposes; then the sand (MSAR) was added as displasticizer and granulometric adjustment, subsequently analyzed its Resilience Modules by tests in the Geotechnical Laboratory of COPPE/UFRJ. The results indicated the third composition with the addition of sand (MSAR-3) as the mixture with greater application feasibility for sub-base and pavement bases in terms of proportion and mechanical support, which again was evaluated the Resilience Module in Pavement Technology Laboratory of the Department of Transportation at the University of Polytechnic School of São Paulo - USP to confirm the data and application in a simulation of pavement's dimensioning using the mechanistic method by computer program SisPav.

Keywords: soil stabilization, ceramic waste, pavement dimensioning, SisPav.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do Processo produtivo, entrada e saída de insumos da indústria de cerâmica vermelha, adaptado da Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM.	40
Figura 2. Localização do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru.....	42
Figura 3. Exposição da Formação Alter do Chão ao longo do Rio Amazonas.....	43
Figura 4. Delimitação da Bacia Amazônica e seus rios principais: (1) Rio Amazonas; (2) Rio Solimões; (3) Rio Negro; (4) Rio Xingu; (5) Rio Tapajós; (6) Rio Jurema; (7) Rio Madeira; (8) Rio Purus; (9) Rio Branco (10); Rio Juruá; (11) Rio Trombetas; (12) Rio Uatumã e (13) Rio Mamoré.	44
Figura 5. Afloramento de um perfil de latossolo sobre a Formação Alter do Chão, em falésia na margem direita do rio Negro. A) Topo do perfil, cobertura argilosa com crosta laterítica (baixa vulnerabilidade erosiva). B) Estratificação Alter do Chão (solo argilo-arenoso, média vulnerabilidade erosiva).	46
Figura 6. Heterogeneidade Paisagística de Iranduba. A) Planície de inundação. B) Depósitos arenosos.....	47
Figura 7. A) Granulação média do material laterítico. B) Afloramento de maciço latossólico..	47
Figura 8. Afloramento de maciço latossólico com concreções lateríticas em topo de platô. A) Topo do perfil, solo argiloso B) Na base, maciço laterítico. Ambos com baixa vulnerabilidade erosiva, com grande viabilidade de uso na construção civil.....	48
Figura 9. Mapa de lineamentos morfoestruturais da cidade de Manaus.....	50
Figura 10. Mapa do local da coleta do Solo Natural.....	53
Figura 11. Etapas do beneficiamento e preparação das amostras de Solo Natural: A) Armazenamento após coleta; B) Amostras identificadas; C) Destorroadora/extrusora; D) Solo natural em processo de destorroamento mecânico; E) Solo destorroadado e F) Quarteamento para separação das amostras parciais.....	54
Figura 12. Análise Granulométrica: A) Peneiramento grosso: Peneiras com abertura equivalente a 0,075mm a 1,19 mm ou peneiramento fino. B) Peneiramento grosso: Peneiras de Abertura equivalente a 2,00mm a 50,8 mm ou peneiramento grosso. C) Peneiramento Fino: Ensaio de Sedimentação na fração mais fina de solo, com granulometria inferior a 0,075 mm...	56
Figura 13. Determinação da umidade higroscópica: A) cápsulas com amostras de solo no fogareiro sob tela de amianto, a fim de retirar a umidade do solo e obter sua massa seca (ms). B) balança de precisão para pesagem das cápsulas e amostras de solo, antes e após o fogareiro.	56
Figura 14. Sequência dos ensaios de granulometria do solo Natural: A) Agitador de peneiras. B) Ensaio de sedimentação. C) Leitura com densímetro.....	56
Figura 15. Ensaio de determinação dos limites de consistência: A) Aparelho de Casagrande para determinação do Limite de Liquidez e (B) Moldagem do Cilindro de solo para determinação do Limite de Plasticidade.....	57
Figura 16. Sequência do ensaio de massa específica real do solo: A) Fervura dos picnômetros; B) Descanso em água em temperatura ambiente e medição de temperatura; e C) pesagem do picnômetro.	57
Figura 17. Ensaio de Compactação: A) amostras para determinação de pontos de compactação. B) homogeneização das amostras. C) compactação com soquete. D) cilindro de solo compactado; E) amostras de solo compactado para determinação de umidade e posteriormente peso específico e F) extração do cilindro de solo compactado.....	58
Figura 18. Etapas para determinação do Índice de Suporte Califórnia: A) Compactação da amostra de solo de acordo com umidade ótima e grau de compactação pré-determinados; (B) pesagem do conjunto amostra + cilindro; (C) Componentes utilizados para preparação do conjunto cilindro + amostra para imersão; (D) colocação das cargas para pressão durante a imersão; (E) imersão das amostras; (F) defletômetro indicando leitura da expansão; (G) prensa do ensaio de CBR e (H) extração da amostra.....	59

Figura 19. Método das pastilhas. A) Espatulação do solo por 8 minutos; B) Penetração do cone por 5 mm; C) Moldagem das pastilhas; D) Pastilhas retiradas da estufa, onde são colocadas em posição vertical. E) Pesagem das pastilhas após estufa. F) Medição da contração das pastilhas com o paquímetro.	61
Figura 20. Método das pastilhas. A) Preparação dos recipientes com água e papel filtro para absorção de água por capilaridade; B) Repouso das pastilhas na água por 3 horas; C) Esferas de solo moldadas na palma da mão; D) Observação do tempo de ascensão da água; E) Medição da absorção de água com o paquímetro; F) Trincas resultantes da absorção de água. G) penetração de cone; H) Imersão das esferas em água destilada e I) esmagamento das pastilhas entre os dedos e entre o polegar e uma superfície dura.....	62
Figura 21. Pontos de coleta do Resíduo Cerâmico.....	63
Figura 22. Resíduo Cerâmico. A) Pilha de resíduo cerâmico no pátio lateral esquerdo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA; B) Pilha de resíduo cerâmico no pátio lateral direito da indústria; C) Pilha maior de resíduo cerâmico depositado nos fundos da indústria; D) Coleta de tijolos descartados e E) Armazenamento para posterior utilização na pesquisa.....	64
Figura 23. Vista da entrada da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA e suas jazidas de argila....	65
Figura 24. Argila extraída depositada no pátio da olaria, em processo de sazonzamento.	66
Figura 25. Argilas extraídas com granulometrias diferentes: argila escura e argila de coloração mais clara.....	66
Figura 26. Processo Produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA: (a) Transporte da matéria-prima extraída das jazidas, em caminhão basculante (b) pilha de argila para sazonzamento; (c) destorroadora; (d) preparação da massa cerâmica; (e) extrusão e conformação das peças cerâmicas; (f) inspeção para verificação de peças resultante de falha no processo, após a etapa de laminação.....	68
Figura 27. Fornos da Indústria Cerâmica Rio negro: (a) forno tipo paulistinha do tipo reversível; (b) forno Hoffman semi-reversível; (c) forno tipo chama reversível; (d) sequência de portas laterais para carregamento e descarregamento de insumos energéticos ao forno.....	70
Figura 28. Processo Produtivo da Cerâmica Rio Negro LTDA: (a) Descarte de peças com ocorrência de má conformação; (b) Queima dos produtos em conformidade; (c) secagem natural das peças cerâmicas; (d) Chaminé oleira; (e) empacotamento das peças cerâmicas em pallets; (f) expedição dos tijolos cerâmicos para comercialização.....	71
Figura 29. Pilhas de Resíduo cerâmico resultante de falhas do processo produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA.....	72
Figura 30. Materiais utilizados para a queima de peças cerâmicas na Indústria cerâmica Rio Negro: (a) pilha de madeira reciclada e (b) pilha de serragem utilizada como matriz energética para os fornos.	73
Figura 31. Tratamento preliminar do resíduo cerâmico: A) secagem ao ar livre das peças coletadas; B) quebra das peças coletadas no cilindro de Proctor; C) peneiras utilizadas para colocar o resíduo na faixa granulométrica pré-determinada e D) Resíduo cerâmico na faixa granulométrica pré-determinada.	75
Figura 32. Faixa granulométrica do resíduo cerâmico; A) material retido na peneira #3/4” ou 19 mm; B) material retido na peneira #4 ou 4,8 mm; C) material retido na peneira #1/2” ou 12,5mm e D) material retido na peneira #3/8” ou 9,5 mm.....	75
Figura 33. Ensaio de determinação de absorção e massa específica do agregado graúdo: A) amostra de material seco; B) peso do agregado submerso em água e C) material seco em estufa.	77
Figura 34. Etapas do ensaio de desgaste após fervura: A) fervura e B) agitação.....	78
Figura 35. Ensaio de desgaste abrasão Los Angeles: A) Amostras enquadradas na faixa A; B) Máquina de Abrasão Los Angeles; C) número de ciclos para o ensaio; D) esferas metálicas utilizadas no ensaio; E) material inserido no tambor e F) material final na bandeja.....	81

Figura 36. Medição do Resíduo cerâmico utilizado como agregados utilizando o paquímetro...	83
Figura 37. Método do frasco de areia (Chapman).....	86
Figura 38. Etapas da dosagem das Misturas Solo Arenoso - Resíduo: A) Pesagem do agregado miúdo (areia); B) Frações pesadas de solo natural, areia e resíduo; C) mistura dos materiais e D) mistura finalizada na faixa pré-determinada.....	89
Figura 39. Granulometria das Misturas Solo Resíduo: A) peneiras utilizadas para o ensaio de análise granulométrica e B) agitador mecânico de peneiras.....	90
Figura 40. Etapas da Confecção dos corpos de prova da Mistura Solo Arenoso-Resíduo para envio a COPPE/UFRJ: A) Confecção das misturas; B) corpo de prova moldado; C) corpos de prova embalados com filme plástico e acondicionados em isopor para conservação da umidade ótima e D) corpos de prova embalados com filme plástico e com proteção ao deslocamento, acondicionados na caixa de madeira.	93
Figura 41. Sequência dos procedimentos de preparação do corpo de prova para o ensaio de Módulo de Resiliência: A) Retirada do filme plástico para colocação da membrana de látex; B) posicionamento em base porosa e C) colocação da membrana no cabeçote e base do aparelho...	94
Figura 42. Montagem do corpo de prova para realização do ensaio: A) Fixação dos transdutores mecânicos-eletromagnéticos do tipo LVDT no corpo de prova; B) Ajuste do invólucro cilíndrico da câmara na placa superior de vedação e C) Equipamento montado para realização do ensaio.	94
Figura 43. Finalização do Ensaio de MR: A) pesagem do corpo de prova e B) secagem em estufa até constância de massa.	96
Figura 44. Dosagem dos materiais para preparação dos corpos de prova: A) pesagem do RC; B) Absorção de água acrescentada ao RC antes da moldagem; C) Pesagem do SN e D) Pesagem da areia.	97
Figura 45. Confecção dos corpos de prova: A) Compactação e moldagem do CP ; B) Extração do CP; C) Pesagem do CP e D) Colocação do molde de PVC para colocação na câmara úmida.	97
Figura 46. Preparação dos corpos de prova para o ensaio de MR: A) capeamento do CP com gesso; B) retirada do excesso do gesso no CP; C) colocação dos transdutores LVDT e D) Colocação da membrana de borracha para colocação do CP na câmara triaxial.....	98
Figura 47. Ensaio para determinação do Módulo de Resiliência: A) monitor para acompanhamento do ensaio; B) CP durante o ensaio triaxial dinâmico; C) ranhuras observadas na membrana de borracha durante o ensaio e D) Finalização do ensaio triaxial dinâmico.....	100
Figura 48. Equipamento da USP montado para realização do ensaio para determinação do Módulo de Resiliência e conectado ao microcomputador.....	101
Figura 49. Curva granulométrica do Solo Natural.....	105
Figura 50. Curvas de compactação do Solo Natural na Energia Modificada e Intermediária.....	107
Figura 51. Curva de penetração do Solo Natural na Energia Intermediária.....	109
Figura 52. Curva de penetração do Solo Natural na Energia Modificada.....	109
Figura 53. Difrátograma da amostra de Resíduo Cerâmico.....	114
Figura 54. Curva granulométrica da areia.	116
Figura 55. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 1 (MSR-1).....	117
Figura 56. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 2 (MSR-2).....	118
Figura 57. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 3 (MSR-3).....	118
Figura 58. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 4 (MSR-4).....	119
Figura 59. Curvas de compactação da MSR-1 na Energia Modificada e Intermediária.....	122
Figura 60. Curvas de compactação da MSR-2 na Energia Modificada e Intermediária.....	122
Figura 61. Curvas de compactação da MSR-3 na Energia Modificada e Intermediária.....	123
Figura 62. Curvas de compactação da MSR-4 na Energia Modificada e Intermediária.....	123
Figura 63. Curvas de penetração das Mistura Solo-Resíduo compactadas com energia intermediária.....	125

Figura 64. Curvas de penetração das Mistura Solo-Resíduo compactadas com energia modificada.....	125
Figura 65. Curvas de compactação da MSAR-1 na Energia Modificada e Intermediária.....	128
Figura 66. Curvas de compactação da MSAR-2 na Energia Modificada e Intermediária.....	128
Figura 67. Curvas de compactação da MSAR-3 na Energia Modificada e Intermediária.....	129
Figura 68. Curvas de compactação da MSAR-4 na Energia Modificada e Intermediária.....	129
Figura 69. Curvas de penetração das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia intermediária.....	130
Figura 70. Curvas de penetração das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia modificada.....	131
Figura 71. Módulos de Resiliência das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia modificada e energia intermediária.....	133
Figura 72. Configuração de eixos utilizada pelo programa computacional SisPav.....	136
Figura 73. Mapa de Localização da Avenida Cravina dos Poetas.....	137
Figura 74. Tela do Programa SisPav após inserção dos dados coletados referentes ao tráfego da via.....	138
Figura 75. Tela do Programa SisPav após inserção dos dados referentes ao clima de Manaus/AM.....	139
Figura 76. Modelos de comportamento resiliente de materiais de pavimentação utilizado pelo SisPav.....	141
Figura 77. Parâmetros da Mistura reciclada com RFA inseridos no SisPav.....	142
Figura 78. Tela do Programa SisPav: Modelo de comportamento de Fadiga de Misturas Asfálticas.....	142
Figura 79. Parâmetros da mistura MSAR-3 compactada com energia intermediária, inseridos para o dimensionamento da base do pavimento proposto.....	143
Figura 80. Propriedades da camada de sub-base utilizando os parâmetros de um solo laterítico, sugeridos pelo banco de dados do programa SisPav.....	144
Figura 81. Inserção dos parâmetros referentes ao subleito tipo II.....	144
Figura 82. Tela do programa SisPav: Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento com camada de base constituída por MSAR-3 compactada com energia intermediária, para um volume de tráfego meio pesado.....	145
Figura 83. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo x) %.....	146
Figura 84. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo y) %.....	146
Figura 85. Parâmetros da mistura MSAR-3 compactada com energia modificada, inseridos para o dimensionamento da sub-base do pavimento proposto.....	147
Figura 86. Tela do programa SisPav: Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento com camada de sub-base constituída por MSAR-3 compactada com energia modificada, para um volume de tráfego meio pesado.....	148
Figura 87. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo x) %.....	149
Figura 88. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo y) %.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição Granulométrica do material constituinte da camada de base.....	34
Tabela 2. Ensaio realizado no solo natural e suas respectivas normas.....	55
Tabela 3. Guia de identificação de solos tropicais proposto.....	60
Tabela 4. Vantagens e desvantagens dos processos de secagem manual e artificial.....	67
Tabela 5. Ensaio de caracterização do Resíduo Cerâmico.....	73
Tabela 6. Massa mínima para amostra de ensaio.....	76
Tabela 7. Graduação do material para ensaio de Abrasão Los Angeles.....	80
Tabela 8. Carga abrasiva para o ensaio de abrasão Los Angeles.....	81
Tabela 9. Quantidade mínima de material para ensaio de determinação do Índice de forma.....	83
Tabela 10. Malha das peneiras do ensaio de granulometria.....	85
Tabela 11. Ensaio realizado nas Misturas solo-resíduo e suas respectivas normas.....	87
Tabela 12. Percentual de materiais utilizados nas misturas solo-resíduo das duas fases da pesquisa.....	88
Tabela 13. Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento.....	95
Tabela 14. Níveis de tensões utilizados durante o ensaio triaxial dinâmico especificado pela COPPE/UFRJ.....	95
Tabela 15. Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento utilizados pela USP.....	99
Tabela 16. Níveis de tensões adotados pela USP, durante o ensaio triaxial dinâmico	99
Tabela 17. Faixa Granulométrica do Solo Natural	105
Tabela 18. Resultados da caracterização do Solo Natural.....	106
Tabela 19. Dados referentes à compactação do Solo Natural.....	107
Tabela 20. Resultados referentes ao Suporte e Expansão do Solo Natural.....	108
Tabela 21. Faixa Granulométrica do Resíduo cerâmico.....	112
Tabela 22. Absorção e Massa Específica do Resíduo Cerâmico.....	113
Tabela 23. Resultados da caracterização da areia.....	116
Tabela 24. Limites de Atterberg das Misturas Solo-Resíduo.....	120
Tabela 25. Massa específica das Misturas Solo-Resíduo.....	120
Tabela 26. Dados referentes à compactação das misturas Solo-Resíduo: Teor ótimo de umidade (W_{ot}) e Massa específica seco máximo (γ_{dmax}).....	121
Tabela 27. Resultados de CBR das Misturas Solo-Resíduo: ISC e Expansão.....	125
Tabela 28. Limites de Atterberg das Misturas Solo Arenoso – Resíduo.....	126
Tabela 29. Massa específica das Misturas Solo Arenoso-Resíduo.....	127
Tabela 30. Dados referentes à compactação das misturas Solo Arenoso-Resíduo: Teor ótimo de umidade (W_{ot}) e Peso específico seco máximo (γ_{dmax}).....	127
Tabela 31. Resultados de CBR das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR) : ISC e Expansão	131
Tabela 32. Módulo de Resiliência das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR).....	132
Tabela 33. Módulo de Resiliência MSAR 3 ensaiados na Politécnica da USP.....	134
Tabela 34. Dados do Tráfego.....	137
Tabela 35. Tráfego previsto.....	138
Tabela 36. Dados referentes ao clima regional.....	139
Tabela 37. Resultados da análise do dimensionamento de pavimento utilizando a MSAR-3 como base de pavimento.....	145
Tabela 38. Resultados da análise do dimensionamento de pavimento utilizando a MSAR-3 como sub-base de pavimento.....	148

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACERAM	Associação dos Ceramistas do Estado do Amazonas
ALT-MAT	Alternative Materials in Road Construction
ANICER	Associação Nacional das Indústrias Cerâmicas
ANTAQ	Associação Nacional de Transportes Aquaviários
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBD	Programa que envolveu empréstimos entre o BNDES, BIRD e DNER para financiamento de construção de rodovias vicinais
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	California Bearing Ratio
CEAG-AM	Centro de Apoio à Pequena e Média Empresa do Amazonas
CH	Grupo de argila inorgânica com alto limite de liquidez
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DER-SP	Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
ES	Especificações de normas do DNIT
EUA	Estados Unidos da América
FAPEAM	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FT	Faculdade de Tecnologia
HRB	Highway Research Board
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFAM	Instituto Federal do Amazonas
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
IPAAM	Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
kpa	Kilopascal
LA	Areia laterítica quartzosa
LA'	Solo arenoso laterítico
LABPAV	Laboratório de Pavimentação
LEM	Laboratório de Materiais
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LTDA	Sociedade Empresarial Limitada

LVDT	Linear Variable Differential Transduce
MCT	Sistema de classificação de Miniatura, Compactado e Tropical
ME	Método de Ensaio do DNIT
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
MSAR	Mistura Solo Arenoso-Resíduo
MSR	Mistura Solo-Resíduo
NA	Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico
NA'	Misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico
NBR	Norma Técnica Brasileira
NG'	Solo argiloso não laterítico
NS'	Solo siltoso não laterítico
PIB	Produto Interno Bruto
PVC	Policloreto de vinila
RC	Resíduo Cerâmico
RCD	Resíduo Sólido de Construção Civil
RFA	Resíduo fresado do pavimento asfáltico
RIMA	Relatório de Impacto do Meio Ambiente
SA	Solo estabilizado com Areia
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SisPav	Programa Computacional que realiza simulações para dimensionamento de pavimentos
SN	Solo Natural
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US\$	Dólar americano (moeda)
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. JUSTIFICATIVA.....	21
1.2.OBJETIVOS.....	23
1.2.1. Objetivo Geral.....	23
1.2.2. Objetivos Específicos.....	23
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	24

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1. SOLO: CONCEITOS, CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	25
2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	28
2.2.1. Estabilização Mecânica.....	29
2.2.2. Estabilização Química.....	29
2.2.3. Estabilização de solos com resíduos e aplicações em camadas de pavimentos.....	30
2.3. BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE..	32
2.3.1. Requisitos para o emprego dos materiais constituintes de sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente.....	33
2.3.2. Execução das camadas de base e sub-base estabilizada granulometricamente.....	35
2.4. RESÍDUO CERÂMICO: CONTEXTO HISTÓRICO E PROCESSO PRODUTIVO DO POLO OLEIRO.....	36
2.4.1. O polo oleiro ceramista dos Municípios de Iranduba e Manacapuru.....	36
2.4.2. Matéria-prima para produção de tijolos.....	38
2.4.3. Processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha	40
2.5. ASPECTOS GEOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DOS MUNICÍPIOS CONSTITUITES DO POLO OLEIRO DE IRANDUBA E MANACAPURU.....	41
2.5.1. Características geológicas - geotécnicas do município de Iranduba e Manacapuru.....	42

2.6.ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS DOS SOLOS DA CIDADE DE MANAUS.....	49
---	----

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....;	52
3.2.1. SOLO NATURAL.....	53
3.2.1.1. Análise Granulométrica.....	55
3.2.1.2. Limites de consistência.....	57
3.2.1.3. Massa específica real.....	57
3.2.1.4. Ensaio de compactação.....	58
3.2.1.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	59
3.2.1.6. Método das Pastilhas – MCT.....	60
3.2.2. RESÍDUO CERÂMICO.....	63
3.2.2.1. Processo Produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA.....	64
3.2.2.2. Granulometria.....	74
3.2.2.3. Absorção e massa específica do resíduo cerâmico usado como agregado.....	76
3.2.2.4. Perda de massa do agregado após fervura.....	78
3.2.2.5. Desgaste do resíduo cerâmico utilizado como agregado graúdo por Abrasão Los Angeles.....	79
3.2.2.6. Índice de Forma.....	82
3.2.2.7. Ensaio de Difração de Raios-X (DRX).....	84
3.2.3. AGREGADO MIÚDO (AREIA).....	85
3.2.3.1. Análise granulométrica.....	85
3.2.3.2. Massa específica real (Chapman).....	86
3.2.4. MISTURAS SOLO-RESÍDUO (MSR).....	87
3.2.4.1. Dosagem das Misturas.....	87
3.2.4.2. Análise granulométrica das Misturas Solo-Resíduo.....	89
3.2.4.3. Limites de Atterberg das Misturas Solo-Resíduo.....	90
3.2.4.4. Massa Específica Real das Misturas Solo-Resíduo.....	90
3.2.4.5. Ensaio de Compactação das Misturas solo resíduo.....	91
3.2.4.6. Índice de Suporte Califórnia das Misturas Solo-Resíduo.....	91

3.2.4.7. Ensaio de Determinação do Módulo de Resiliência (MR).....	91
3.3.MÉTODO MECANÍSTICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	101
3.3.1. Sistema computacional SisPav.....	102

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	104
4.1. RESULTADOS REFERENTES AO SOLO NATURAL.....	104
4.1.1. Análise granulométrica do Solo Natural.....	104
4.1.2. Limites de Atterberg e Densidade Real.....	106
4.1.3. Compactação do Solo Natural.....	107
4.1.4. Índice Suporte Califórnia – ISC.....	108
4.1.5. Método das Pastilhas.....	110
4.2. RESULTADOS REFERENTES AO RESÍDUO CERÂMICO.....	111
4.2.1. Análise granulométrica do Resíduo Cerâmico.....	112
4.2.2. Determinação da Absorção e Densidade real de agregado graúdo.....	112
4.2.3. Determinação da perda de massa após fervura.....	113
4.2.4. Desgaste por Abrasão Los Angeles.....	113
4.2.5. Composição mineralógica	114
4.2.6. Índice de Forma	115
4.3. RESULTADOS REFERENTES AO AGREGADO MIÚDO (AREIA).....	116
4.4. MISTURAS SOLO-RESÍDUO (MSR).....	117
4.4.1. Granulometria das MSRs.....	117
4.4.2. Limites de Atterberg das MSRs.....	119
4.4.3. Massa específica das MSRs.....	120
4.4.4. Compactação das MSRs.....	121
4.4.5. Índice Suporte Califórnia das MSRs.....	124
4.5. MISTURAS SOLO ARENOSO - RESÍDUO (MSAR).....	126
4.5.1. Limites de Atterberg das Misturas Solo Arenoso - Resíduo (MSAR).....	126
4.5.2. Massa Específica das MSARs.....	127
4.5.3. Compactação das MSARs.....	127
4.5.4. ISC das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR).....	130
4.5.5. Módulo de Resiliência das Misturas Solo-Arenoso Resíduo (MSAR)....	132

4.6.DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PELO MÉTODO MECANISTICO UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL SISPAV.	135
4.6.1. Estudo de Tráfego	136
4.6.2. Dados referentes ao ambiente e fatores climáticos da região.....	139
4.6.3. Materiais utilizados na simulação de dimensionamento do pavimento.....	140
CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	151
5.1 CONCLUSÕES.....,	151
5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	153
REFERÊNCIAS.....	155

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

O polo oleiro-ceramista dos municípios de Iranduba e Manacapuru têm aproximadamente trinta indústrias cerâmicas instaladas nos dois municípios do estado do Amazonas, que, de acordo com os dados levantados pelo Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM (2008) produzem mensalmente, cerca de dez milhões de peças de tijolos cerâmicos (tipo oito furos), sendo o parque oleiro de Iranduba, o maior polo, com produção em torno de oito milhões de tijolos, enquanto o de Manacapuru tem produção de cerca de dois milhões, no mesmo período. Ambos geram aproximadamente 16 mil empregos diretos e indiretos, conforme números da Associação dos Ceramistas do Amazonas – ACERAM (2012).

Após levantamento sócio-econômico-patrimonial em oito olarias dos dois municípios, Seye et al (2003) apontava uma perda de produtos queimados, de 5% a 7%, cuja causa se dá por motivos variados: quebra das peças cerâmicas devidas às falhas no processo produtivo e conformação das mesmas, quebras durante manuseio, empacotamento e transporte, ou ainda, proveniente de defeitos decorrentes de queima inadequada. Esse percentual equivale a aproximadamente 18.000 ton/ano de produtos desperdiçados que, de acordo com Campelo et. al. (2006), além de resultar em um custo maior e interferir na qualidade do produto final, esses resíduos não têm destinação adequada, sendo frequentemente depositados a céu aberto, nos pátios das olarias, espalhados em ramais nas proximidades ou indevidamente em leitos de rios, gerando problemas ambientais.

Diante dessa constatação, a reciclagem do Resíduo Cerâmico (RC), também chamado pelo termo “Chamote”, gerados nas indústrias cerâmicas, como material reciclado em camadas de pavimentos, é uma alternativa de utilização para esse excedente, podendo apresentar vantagens técnicas com adequação desse material, conforme os critérios estabelecidos na prática corrente, além de vantagens econômicas e ambientais, na medida em que essa atividade de reciclagem tende a diminuir o impacto ambiental causado além da redução dos custos com a deposição final dos resíduos.

A dissertação em questão apresenta o desenvolvimento de estudos visando coletar resíduos provenientes da indústria de cerâmica vermelha oriundos do polo ceramista dos municípios de Iranduba e Manacapuru, decorrentes de falhas de produção ocorridas após a queima, analisando a possibilidade de aplicação desse material como elemento constituinte em camadas de sub-base e base de pavimento.

Para tal intento, foi necessário o planejamento prévio e posteriormente execução das seguintes etapas: 1) Escolha e coleta dos materiais, 2) tratamento preliminar das amostras, 3) caracterização dos solos natural e com percentual de areia, 4) caracterização do Resíduo Cerâmico (RC), 5) dosagem e caracterização das misturas da primeira e segunda fase da pesquisa, 6) ensaios mecânicos das misturas da segunda fase da pesquisa, 7) simulação de dimensionamento do pavimento proposto com a inserção dos resultados referentes à sub-base e base, confeccionadas com a mistura solo-resíduo cerâmico selecionada, 8) análise e discussão dos resultados obtidos e 9) conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2.4. JUSTIFICATIVA

A quantidade de resíduos gerados pelas atividades humanas é uma preocupação crescente em tempos atuais. O uso desordenado propicia o esgotamento das reservas naturais, impactando o meio ambiente e aumentando, assim, a necessidade de grandes recursos financeiros para a gestão dos resíduos, fatos esses que por si justificam ações latentes em busca de soluções sustentáveis.

A produção de cerâmica vermelha consome recursos naturais renováveis e não renováveis em abundância, impactando o meio ambiente nas áreas de extração e gerando uma quantidade expressiva de resíduos após a queima, os quais não tem destinação definida. Esta atividade também utiliza intensivamente o transporte de matérias primas, energéticos, resíduos gerados e de produtos acabados, consumindo energia e lançando poluentes, gases e particulados para a atmosfera. Segundo o SEBRAE (2012), em âmbito nacional, o setor de cerâmica vermelha conta com cerca de 11.000 indústrias, com produção anual de 60 milhões de toneladas, geração de 300.000 empregos, e um faturamento de aproximadamente US\$ 3 bilhões. De acordo com a ABC (2004) a produção mensal brasileira alcança a marca de dois bilhões de peças.

Dias (2004) afirmou que do ponto de vista tecnológico, os resíduos cerâmicos apresentam potencialidade de uso variado, desde como agregado para concreto, argamassa ou artefatos de cimento, filler com atividade pozolânica, material de sub-base ou base de pavimentação e, ainda, poderiam ser reaproveitados no próprio processo de produção da indústria cerâmica.

Em relação à reutilização de resíduos na pavimentação viária, que é o objeto de estudo dessa dissertação, Carneiro et al. (2001) afirmaram que o uso de agregado reciclado em camadas de pavimentos urbanos tem sido uma das maneiras mais difundidas para o seu fim. O aproveitamento deste material em pavimentação apresenta muitas vantagens como utilização de quantidade significativa de material reciclado, tanto na fração miúda quanto na graúda, simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado (separação e britagem primária).

De acordo com Hortegal et al. (2009), o uso de agregados reciclados na pavimentação tem se mostrado viável diante da disponibilidade de resíduos a serem destinados para esse fim. Assim, várias cidades do Brasil e exterior, têm utilizado agregados reciclados em pavimentos, visto que seus resultados são satisfatórios, por serem alternativas interessantes na substituição de materiais naturais não renováveis, principalmente em locais onde esses materiais são escassos, que é o caso da região amazônica.

Motta (2005) complementou que a utilização desses materiais ocorre em todo o mundo há bastante tempo. Na Europa, alguns países formaram um grupo de pesquisa e análise de materiais alternativos destinados aos pavimentos, denominado ALT-MAT (Alternative Materials in Road Construction), que teve duração de dois anos, com excelentes resultados. Leite (2001) relatou que, no Brasil, a primeira via pavimentada utilizando material reciclado foi uma via de baixo volume de tráfego na zona oeste da cidade de São Paulo, em 1984, recebendo Resíduo de Construção e Demolição (RCD) em uma camada de reforço de subleito, que na época apresentou bom desempenho. Fernandes (2004) citou a execução de pavimentos com agregados reciclados em suas camadas de base e sub-base, produzidos pela prefeitura municipal de Belo Horizonte, em 1996, enquanto Carneiro et al. (2001) citaram ainda, as primeiras experiências realizadas com uso de agregado reciclado em camadas de sub-base e base estabilizadas granulometricamente, na Região Metropolitana de Salvador e a pavimentação do sistema viário do novo campus da USP-Leste, com o Pavimento Ecológico, que emprega materiais reciclados em toda sua estrutura.

O uso desses materiais, com custos baixos de britagem e disponibilidade em considerável quantidade, contribui para a redução dos custos de execução desses pavimentos e, de acordo com Silva (2013), diante da escassez de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores e da necessidade da proteção ambiental, torna-se imprescindível o uso de técnicas e materiais alternativos para pavimentação que consumam volumes consideráveis desse material.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico do solo estabilizado com resíduo cerâmico, como elemento constituinte de camadas de base e sub-base de pavimento, considerando os parâmetros físicos e mecânicos das misturas solo-resíduo.

2.5.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o solo natural, resíduo cerâmico, agregado miúdo (areia) e as misturas solo-resíduo confeccionadas durante as duas fases da pesquisa, conforme os ensaios técnicos descritos na metodologia deste trabalho;
- Analisar os resultados obtidos, atentando para a viabilidade técnica da base e sub-base confeccionadas com as misturas solo-resíduo.
- Verificar a adequação ao tráfego, das bases e sub-bases confeccionadas com a melhor mistura de solo-resíduo, a partir de simulações para o dimensionamento de pavimentos em uma via de Manaus, utilizando o programa computacional SisPav.

2.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação é o resultado da pesquisa a ser apresentada nos tópicos seguintes e está estruturada em cinco capítulos:

No primeiro capítulo são apresentadas a Introdução, Justificativa, Objetivo Geral e Objetivos Específicos e a estrutura da dissertação.

O capítulo dois estabelece a Fundamentação Teórica, na qual são abordados conceitos relacionados à estabilização de solos, utilização de agregados não convencionais na confecção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, especificações e parâmetros técnicos para viabilidade de sua aplicação, aspectos geológicos, pedológicos e geomorfológicos do solo de várzea de ambos os municípios, nos quais se localizam as jazidas da argila, que compõe a massa cerâmica utilizada nesse processo

O terceiro capítulo relata a procedência e coleta dos materiais empregados nesta pesquisa, breve histórico do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, o processo industrial para fabricação das peças cerâmicas e eventuais falhas de produção que resultam no resíduo cerâmico utilizado nessa pesquisa, metodologias utilizadas durante os procedimentos para realização dos ensaios físicos, químicos e mecânicos, visando a caracterização dos mesmos, além de citar e explicar brevemente os métodos mecanísticos para dimensionamento de pavimento, citando o programa computacional SisPav, desenvolvido por Franco (2007).

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados referentes a materiais e misturas, obtidos por meio dos procedimentos aplicados e relatados no capítulo anterior, além do procedimento e resultados da análise do dimensionamento de pavimentos utilizando a melhor mistura solo-resíduo, a partir de simulações com inserção dos parâmetros da mistura, no programa SisPav.

No quinto capítulo expõem-se as conclusões da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras. A dissertação é concluída com as referências bibliográficas consultadas para produção da mesma.

CAPITULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, objetiva-se reunir conceitos fundamentais acerca da estabilização de solos, que constrói o referencial teórico dessa pesquisa através dos seguintes tópicos:

- Estabilização de Solos: conceitos referentes à estabilização de solos, técnicas de estabilização, especificações e parâmetros para o uso de agregados não convencionais, para confecção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, além de alguns exemplos referentes à viabilidade técnica acerca da aplicação de materiais reciclados em camadas de pavimento;
- Resíduo cerâmico: breve histórico do polo oleiro ceramista amazonense, o processo industrial para fabricação das peças cerâmicas e eventuais falhas no processo produtivo, manipulação e transporte, que resultam no resíduo cerâmico (RC) utilizado nessa pesquisa.
- Aspectos geológicos, pedológicos e geomorfológicos do solo dos municípios de Iranduba e Manacapuru, cidades que compõem o polo oleiro ceramista e nas quais se localizam as jazidas, de onde é extraída a argila que compõe a massa para a produção das peças cerâmicas desse polo.

2.1. SOLO: CONCEITOS, CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Neves et al. (2009), o solo é definido como material da crosta terrestre proveniente da decomposição de rochas, constituído por elementos minerais e/ou orgânicos, que dependem da composição química e mineralógica da rocha de origem, das características do relevo, dos diferentes climas e do tempo de exposição às intempéries. Salgado (2010) explicou que, para a utilização do solo na construção civil, é necessário que o mesmo disponha de algumas propriedades técnicas, conhecidas por meio de procedimentos simples de laboratório, para então aferir sua aplicação.

De acordo com Das (2007), solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos, de acordo com seu comportamento do ponto de vista da engenharia, que são organizados em sistemas de classificação, que fornecem uma linguagem comum, a fim de expressar as características gerais dos solos. Atualmente, são utilizados dois sistemas que visam classificar todos os tipos de solos, levando em consideração a distribuição granulométrica e os limites de Atterberg: o Highway Research Board (HRB), da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation), atualmente chamado de TRB (Transportation Research Board) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). O sistema da AASHTO é utilizado na maioria dos departamentos rodoviários nacionais, enquanto os engenheiros geotécnicos preferem a classificação unificada.

Recentemente, alguns órgãos rodoviários brasileiros passaram a adotar, para os solos finos, o Sistema de classificação MCT (de Miniatura, Compactado e Tropical) elaborado por Villibor e Nogami (1981), que tem como finalidade a caracterização, identificação e classificação de solos tropicais. O método MCT expedito já sofreu algumas adaptações e modificações, entre as quais se destacam as de Fortes e Nogami (1991), Villibor e Nogami (1994), Godoy (1997) e Godoy e Bernucci (2002). Conforme Godoy e Bernucci (2002), o Método das Pastilhas (MP), além de classificar os tipos de solos tropicais, lança um olhar acerca da compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos mesmos, avaliando, principalmente, as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade, através de observações e medidas de características em pastilhas de solos moldadas, como: contração por perda de umidade, expansão por contato com a água, resistência à penetração de cone, quantidade de água reabsorvida após secagem, entre outros aspectos, utilizando procedimentos e equipamentos simples. Em suma, seja qual for o sistema ou método utilizado, a partir desta classificação é possível se fazer uma previsão da aplicação para cada tipo de solo.

Aplicar o solo como material de construção não é uma prática atual para a humanidade, Barbosa e Ghavami (2007) afirmam que, há aproximadamente 10 mil anos, o homem passou a utilizá-lo, para construir suas moradias. De acordo com Pinto (2008), na Europa, o solo foi utilizado, inclusive, em locais cujos índices de pluviosidade eram altos como Alemanha, França, Suécia, Noruega e Dinamarca.

No Brasil, essa tecnologia de construção foi trazida por colonizadores portugueses e muitas dessas construções permanecem erguidas até os dias de hoje, o que confirma a qualidade e a durabilidade do solo em edificações, quando bem empregado. Barbosa (2002) apontou diversas vantagens em relação ao uso do solo em construções, devido ao seu histórico de bom desempenho ao longo dos vários séculos de uso, como: grande disponibilidade na natureza, propriedades de isolamento térmico, manutenção da umidade do ambiente, baixo consumo energético, rápida aprendizagem das técnicas por mão-de-obra não qualificada, além da fácil reincorporação na natureza, em caso de descarte. Porém, apesar de inúmeras vantagens acerca de sua utilização, sua utilização foi significadamente reduzida devida à intensificação do uso de materiais industrializados.

Em relação à utilização do solo na pavimentação viária, que é o objeto de estudo desse trabalho, sabe-se que empregar adequadamente o solo compactado, sem adição de estabilizantes e de acordo com as especificações recomendadas, em camadas de pavimentos, é a ambição de muitos técnicos da área de pavimentação interessados em pavimentos de baixo custo. Isso se dá, devido à abundância desse material em áreas de concentração urbana em desenvolvimento, em especial em áreas de periferia, na qual há uma escassez de serviços públicos relacionados à pavimentação viária, estimulando várias tentativas de utilização do solo em camadas de pavimentos, a custos inferiores aos métodos convencionais. No Brasil, várias tentativas têm sido feitas com esse objetivo, Villibor e Nogami (1990) citaram que, no Plano de Pavimentação de 1958, do Departamento de Estradas e Rodagem do estado de São Paulo - DER-SP, a construção de sub-bases e reforços do subleito foi executada em grande escala, com uso de argilas lateríticas, sendo retomada na década de 1980, segundo Aranovich e Ogurstsova, (1987), a construção de trechos experimentais no estado de São Paulo e no estado do Paraná, sendo alguns desses trechos monitorados por longos períodos.

Outra pesquisa relevante e mais recente refere-se ao pavimento alternativo desenvolvido a partir da experiência de Villibor e Nogami (1995), também no estado de São Paulo, utilizando solos lateríticos finos na construção de camadas de pavimento de baixo volume de tráfego ou de baixo custo. Convém mencionar que, antes de ser utilizado para esta finalidade, o solo precisa ser estabilizado, processo este, que melhora suas propriedades físicas e mecânicas.

2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Rebelo (2009) afirmou que estabilizar um solo significa melhorar sua resistência mecânica, visando suportar cargas e esforços induzidos pelo tráfego, normalmente aplicados sobre um pavimento, bem como, garantir a constância destas melhorias no tempo de vida útil da obra, mediante as ações erosivas de agentes naturais e, sob as condições mais adversas de solicitação. Além disso, segundo Pinto (1985), promover o beneficiamento do material com o intuito de adquirir propriedades necessárias ao fim a que se destina, havendo maiores vantagens em seu aproveitamento.

Medina e Motta (2004) afirmavam que o solo, ao passar pelo processo de estabilização, tem as seguintes propriedades modificadas: resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade, enquanto Soliz (2007) complementou que devem ser consideradas as propriedades do solo na condição natural e também as propriedades esperadas do solo estabilizado para, então, escolher o método utilizado, além dos efeitos no material, após a estabilização. Ingles e Metcalf (2002) alegavam que não há método de estabilização que se aplique a todos os solos, pois é grande a variabilidade dos mesmos, não obstante, a estabilização não deveria ser pensada apenas como tratamento corretivo, mas também, como uma medida preventiva ou de segurança, contra condições adversas que se desenvolvem no decorrer da construção ou ao longo da vida da estrutura.

Em relação às técnicas de estabilização de solos, Vargas (1977) explanou que o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência às cargas ou à erosão, pode ser dar por meio de compactação, correção granulométrica ou adição de substância, que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de suas partículas. Outra característica importante em relação à resistência do solo compactado é a umidade ótima, pois é neste estado de lubrificação, que as partículas de solo melhor se acomodam, resultando em um arranjo mais compacto enquanto que, compactar um solo com umidade baixa, eleva o atrito entre as partículas, dificultando a redução dos vazios.

De acordo com Rebelo (2009), os principais métodos empregados na estabilização de solos são: a estabilização mecânica, granulométrica e a química, cada um desses métodos, com seus respectivos mecanismos e peculiaridades, os quais serão descritos brevemente nos subitens seguintes.

2.2.1. Estabilização Mecânica

Para Medina e Motta (2004) a estabilização mecânica pode ser dividida de duas formas: estabilização mecânica por compactação e estabilização granulométrica. A estabilização mecânica por compactação consiste, basicamente, no melhoramento de um solo, ou mistura de solos, dando uma condição de densidade máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. Santos et al. (1995) complementavam que, a estabilização mecânica por compactação condiz ao processo de beneficiamento cujo solo minimiza sua porosidade, pela aplicação de sucessivas cargas, isto é, associa o ganho de resistência mecânica com a redução de volume de vazios.

A estabilização granulométrica é definida por Senço (2002), como sendo a distribuição de grãos com diferentes tamanhos, com intuito de fazer com que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelas partículas médias, e os vazios destas, pelos grãos menores, buscando desenvolver um material densamente graduado e uma fração fina plástica limitada, com uma mistura de dois ou mais solos. Pinto (2008) complementa que, neste tipo de estabilização, é possível empregar materiais granulares diversos ou ainda, adicionar fibras, cujo teor de cada fração, que, conforme Barbosa et al. (2002), é relevante e deve ser estimada de acordo com sua aplicação.

2.2.2. Estabilização Química

De acordo com Santos et al.(1995), a estabilização química consiste na adição de um determinado produto químico ao solo, de modo a provocar alterações que venham a influenciar as suas propriedades quanto à resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade, a fim de estabilizá-lo. A adição de um ou mais produtos químicos, quando solidificam ou reagem com o solo, preenchem os vazios, imergindo as partículas de solo, como se fossem um material inerte de enchimento, tendo assim, um solo repelente à água.

Segundo Jacintho (2005), neste tipo de estabilização, os aditivos interagem com as partículas dos solos, promovendo, nas palavras de Medina (1987), uma reação química do aditivo com os minerais do solo, ou a constituição de recheio dos poros, pelo produto da reação química do aditivo com a água.

O produto químico altera as relações solo-água, sobretudo nos solos argilosos, pois as partículas de argila de dimensões coloidais apresentam carga elétrica superficial de predominância negativa, que atrai os cátions adsorvidos hidratados, de maneira que ocorre uma variação na concentração de eletrólito na água, estabelecendo uma melhoria em suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Dentre os vários produtos químicos utilizados na estabilização química, de acordo com Medina e Motta (2004), os mais comumente utilizados são a cal, o cimento e a emulsão asfáltica.

Por fim, sejam quais forem os métodos de estabilização utilizados, o objetivo principal de estabilizar um solo é obter uma massa que apresente uma resistência mecânica satisfatória, definida pela resistência ao esforço de cisalhamento, porém, para que sejam concebidos e aplicados novos materiais para pavimentação, se faz necessário que se conheçam suas propriedades mecânicas e físicas, assim como suas combinações possíveis. O conhecimento da técnica de estabilização, aliada ao conhecimento das características e propriedades dos materiais componentes das misturas é de grande importância no entendimento da resposta da mistura como um todo, no que se refere ao seu comportamento mecânico.

2.2.3 Estabilização de solos com resíduos e aplicações em camadas de pavimentos

Vizcarra (2010) conceituou resíduo como sendo materiais provenientes de origens diversas, tais como: indústrias, agricultura, residências, mineração, etc., e complementa que, diante do grande volume gerado e contínuo crescimento da geração do mesmo, seu uso tem sido bastante difundido, a fim de incentivar a reutilização de alguns resíduos em forma de filler, material granular, argamassas etc., atentando para a viabilidade de seu uso.

A absorção de parte dessa demanda, na construção de pavimentos, pode ser interessante, visto que, obras de pavimentação viária consomem grandes quantidades de materiais, porém, na perspectiva da engenharia de pavimentos, o reaproveitamento desses materiais não deve comprometer o desempenho esperado do pavimento. Algumas aplicações utilizando resíduos obtiveram bons resultados, dentre os quais, pode-se mencionar Santana (1971), que utilizou misturas de solo-asfalto, para construção de segmentos no nordeste na década de 1960, cuja técnica proposta preliminarmente por ele, foi reformulada, para uma melhor aplicação do resíduo (Santana, 1978).

Chaves (2007) relatou que, no estado do Ceará, no período de 1981 a 1984, foi implantado o Projeto Jaguaribe, através do programa III BBD (BIRD-BNDES-DNER), que beneficiava vários municípios do vale do rio Jaguaribe, com a construção de pavimentos de baixo volume de tráfego, revestidos com solo-betume, numa extensão aproximada de 200 km. Abdou e Bernucci (2006) citaram a pavimentação do sistema viário do novo Campus da USP na Zona Leste (USP-Leste), em 2004, seguindo um projeto inovador de Pavimento Ecológico, que emprega materiais reciclados em toda sua estrutura, sendo as camadas de base e a sub-base confeccionadas com agregado reciclado de RCD (resíduo de construção e demolição). Por fim, podem ser citados diversos estudos acerca da aplicação de resíduos em camadas de pavimentos, tais como: escória de aciaria por Rohde (2002), Freitas (2007) e Resende (2010); Solo-emulsão por Jacintho et al. (2005) e Rebelo (2009); Solo-cal por Azevêdo (2010) e Oliveira (2010), entre tantos outros materiais utilizados para esse fim.

Para adequar esses materiais a um determinado uso potencial, engenheiros, pesquisadores e os órgãos reguladores ambientais ou de pavimentação devem ter conhecimento de suas propriedades e limitações que podem ser associados à sua utilização. Com base em diversos estudos e experiências no âmbito nacional e internacional, Carneiro (2008) afirmou que a utilização de material granular proveniente de resíduos, na forma de agregados reciclados, tem-se mostrado uma alternativa viável na execução de camadas do pavimento, com resultados satisfatórios de suas aplicações e boa adequação dos materiais para esse fim.

De acordo com a NBR 9935 (2011), que determinou a terminologia dos agregados, o termo “agregado” é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto.

Quanto à classificação dos agregados segundo sua natureza, os mesmos podem ser naturais, que são aqueles agregados que são utilizados como se encontram na natureza, ou artificiais, que são os agregados resultantes de uma alteração física ou química de outros materiais.

De acordo com Roberts et al. (1996), os agregados convencionais, utilizados em construção rodoviária, são amplamente obtidos de depósitos de rochas naturais que ocorrem próximo à superfície.

Grande parte das rochas exploradas para esse fim encontra-se em áreas de alto valor paisagístico ou em áreas de preservação ambiental, sendo necessário um planejamento prévio para minimizar impactos ambientais e danos à paisagem. Em regiões que apresentam escassez de material para produção de britas, como a região norte do Brasil, por exemplo, o uso de argila calcinada na forma de agregado, para utilização em serviços de pavimentação apontam boa viabilidade técnica, conforme estudos realizados por Campelo et al. (2005), Nascimento (2005) e Cabral (2008) .

De acordo com Carneiro (2005), o uso de materiais reciclados como agregado em base e sub-base de pavimentação apresentam muitas vantagens, tais como a utilização de grande quantidade de material reciclado, tanto na fração miúda, quanto na graúda e simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado, fator que contribui para a redução dos custos com separação e britagem e possibilidade de utilizar vários tipos de materiais componentes do RCD. Porém, segundo Ângulo et al. (2002), a desvantagem da utilização de resíduos reciclados está no fato do setor de pavimentação não ser capaz de consumir integralmente esses materiais, além de que, o mercado de pavimentação é controlado quase que exclusivamente pelo setor público, o que limita o uso dos agregados reciclados nessas atividades, sendo portanto, necessário buscar outros mercados.

2.3. BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE

De acordo com as normas DNIT 139/2010- ES e DNIT 141/2010- ES, sub-base é a camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito devidamente compactado e regularizado, enquanto base é a camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado.

Após a estabilização granulométrica, as camadas de sub-base e base passam a ser denominadas de sub-base estabilizada granulometricamente e base estabilizada granulometricamente, respectivamente.

2.3.1 Requisitos para o emprego dos materiais constituintes de sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente

De acordo com a norma DNIT 139/2010-ES, os materiais constituintes da camada de sub-base devem ser solos, mistura de solos ou mistura de solos e materiais britados. Ao serem submetidos aos ensaios de caracterização normalizados pelas normas DNER-ME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94, os mesmos devem apresentar as seguintes características: 1) Índice de Grupo (IG) igual à zero; 2) A fração retida na peneira n° 10 no ensaio de granulometria deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais; 3) Índice de Suporte Califórnia (ISC) superiores a 20% e; Expansão inferior a 1%, nos ensaios de compactação normatizado pela Norma DNER-ME 129/94, na energia do Método B ou maior que esta e, Índice de Suporte Califórnia, normalizado pela norma DNER-ME 049/94, com a energia do ensaio de compactação. Em caso de solos lateríticos o IG pode ser diferente de zero e a expansão superior a 1%, desde que no ensaio de expansibilidade normatizado pela norma DNER-ME 029/94, a mesma seja inferior a 10%.

Em relação aos materiais constituintes da camada de base, a norma DNIT 141/2010- ES estabelece que os materiais devam ser solos, mistura de solos ou mistura de solos e materiais britados que, ao serem submetidos aos mesmos ensaios, aos quais é submetida a camada de sub-base, devem apresentar:

1) Composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas de granulometria do material, de acordo com o Número N de tráfego, mostrado na Tabela 1. Segundo Marangon (2004), o Número N expressa solicitação de tráfego sobre uma rodovia, definindo o tipo de via em função de duas variáveis principais: o volume total de veículos em todo período de projeto e o fator de veículos, além da influência do Fator climático regional;

2) A fração que passa na peneira n° 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25%, e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%, quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%;

3) A porcentagem do material que passa na peneira n° 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n° 40;

4) Índice Suporte Califórnia deve ser superior a 60% para Número $N \leq 5 \times 10^6$ e superior a 80% para Número $N > 5 \times 10^6$;

Tabela 1: Composição Granulométrica do material constituinte da camada de base

Faixas de Projeto	Para $N \leq 5 \times 10^6$						Tolerância da Faixa de Projeto
	Para $N > 5 \times 10^6$						
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	-	-	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	100	100	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT 141/2010- ES

5) Expansão inferior a 0,5%, determinados através dos ensaios de Ensaio de Compactação normalizado pela norma DNER-ME 129/94, na energia do Proctor modificado e Ensaio de Índice de Suporte Califórnia, normatizado pela norma DNER-ME 049/94, com a energia do ensaio de compactação;

6) o agregado retido na peneira nº 10 deve ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial e

7) quando submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles, normalizados pela norma DNER-ME 035/98, não devem apresentar desgaste superior a 55%, admitindo-se valores maiores, no caso de, em utilização anterior, terem apresentado desempenho satisfatório.

2.3.2 EXECUÇÃO DAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

Para a execução da sub-base e base, estabilizadas granulometricamente, são indicados alguns equipamentos, como: 1) Motoniveladora pesada, com escarificador; 2) carro tanque distribuidor de água; 3) rolos compactadores tipo pé-de-carneiro, liso-vibratório e pneumático; 4) grade de discos e/ou pulvimisturador; 5) pá-carregadeira; 6) arado de disco (em caso de base estabilizada granulometricamente); 7) central de mistura e 8) rolo vibratório portátil ou sapo mecânico (em caso de base estabilizada granulometricamente).

De acordo com as normas DNIT que normatizam a execução das camadas de base e sub-base, essa compreende as operações de mistura, em central de mistura ou na pista, e pulverização, umedecimento em caso do teor de umidade abaixo do limite especificado em norma, cuja camada deve ser umedecida através de caminhão tanque-irrigador. E finalizando, secagem dos materiais. Essas ações preliminares são seguidas de: a) espalhamento, no qual são homogeneizados mediante ação combinada de discos e motoniveladoras, atentando-se em remover materiais ou fragmentos indesejados; b) compactação, cuja etapa requer estabelecimento prévio do número de passadas dos equipamentos a fim de atingir o grau de compactação especificado e c) acabamento realizado na pista devidamente preparada, na largura desejada e nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada, não devendo ser inferior a 10 cm e superior a 20 cm. O acabamento deve ser executado pela ação conjunta de motoniveladora e de rolos pneumáticos e liso-vibratórios.

A sub-base não deve ser submetida à ação do tráfego nem ser expostas à ação de intempéries que prejudiquem sua qualidade, enquanto que a camada de base, para ser submetida à ação do tráfego, passa por inspeções nas quais os materiais utilizados na execução da base devem ser examinados, mediante a execução procedimentos descritos minuciosamente no escopo da norma DNIT 011/2004-PRO, que contém regras para serem seguidas no planejamento, implantação, implementação e verificação da gestão da qualidade em obras rodoviárias do DNIT, realizadas por terceiros, utilizando registros dos resultados do controle estatístico, em relatórios de acompanhamento, estabelecendo tratamento às “não conformidades” na execução, que devem ser corrigidas e verificadas posteriormente, para então conformidade nesta norma.

2.4. RESÍDUO CERÂMICO: CONTEXTO HISTÓRICO E PROCESSO PRODUTIVO DO POLO OLEIRO

A produção de cerâmica vermelha é uma atividade produtiva com diversas cerâmicas espalhadas pelo Brasil, cuja produção é de 2,5 bilhões de peças anualmente, com a maior concentração das indústrias ceramistas localizada na região sudeste. ANICER (2010) explicou que o setor é importante para a economia do Brasil, respondendo por cerca de 4% do PIB nacional, dentro de um mercado que fechou o ano de 2010 com crescimento de 12%. Nesse cenário, a região Norte emerge como um importante ator na fabricação de tijolos e telhas nacional, tendo uma participação considerável na produção mensal e grande geração de empregos. No que se refere ao estado do Amazonas, a produção de cerâmica vermelha está concentrada nos municípios de Manacapuru e Iranduba, entretanto, este último apresenta-se como o principal polo oleiro-cerâmico do estado, sendo responsável por 75% de toda a produção de cerâmica vermelha do estado, o que representa, em termos quantitativos, 35 toneladas de tijolos por mês, conforme dados do SEBRAE (2008). Além disso, o polo oleiro-cerâmico de Iranduba movimenta, em média, 80% da construção civil amazonense, gerando, somente no município, cerca de 2.000 empregos diretos e indiretos e abrangendo um total de 6.000 trabalhadores, entre prestadores de serviço e fornecedores, de acordo com dados apresentados pela ACERAM (2012).

2.4.1. O polo oleiro ceramista dos Municípios de Iranduba e Manacapuru

O setor cerâmico no estado do Amazonas não teve a mesma evolução da indústria cerâmica no restante do país, que foi fortemente influenciada por imigrantes europeus, no período colonial e pós-colonial, com evolução à medida que aquela região se transformava em império, enquanto a cerâmica amazonense permanecia estagnada, adotando técnicas portuguesas mantidas por seus descendentes.

A economia amazonense deu um salto na metade do século XIX, devido à exploração da borracha, e conseqüentemente, o setor cerâmico recebeu investimentos e passou a utilizar tecnologia europeia, chegando a um padrão equivalente às grandes capitais europeias da época.

Posteriormente, o setor entrou novamente em colapso com o declínio do preço da borracha, só retomando o crescimento com a expansão econômica e elevado crescimento urbano e populacional da capital, a partir da instalação da Zona Franca de Manaus, que favoreceu o surgimento de empresas cerâmicas no período de 1965 a 1975, que produziam tijolos de dois, quatro e oito furos, tijolos maciços, combogós, telhas, tubos cerâmicos e conexões, porém, com a introdução das chapas de amianto, a diversidade do setor foi reduzida, ficando restrita à produção de tijolos de oito furos e posteriormente, na última década, ressurgiu a indústria de telhas e tijolos maciços.

Mais tarde, na década de 1980, a expansão urbana para a região de Cacau-Pirêra, hoje distrito de Iranduba, favoreceu a migração das principais olarias existentes em Manaus, permanecendo apenas algumas olarias de pequeno porte.

Chaves (2001) relatou que a primeira fábrica de tijolos do município de Iranduba data o ano de 1946, época em que a cidade ainda era distrito de Manaus, tendo sido pioneira a Cerâmica Marajó, que ainda hoje opera na fabricação desse tipo de produto. Em 10 de dezembro de 1981, a Vila de Iranduba se tornou um município autônomo, sendo elevada à categoria de cidade, recebendo o mesmo nome.

Segundo Trindade (1999), os fatores que contribuíram para o deslocamento desse setor industrial, da capital para Iranduba, além da expansão urbana, foram: 1) grande quantidade de depósitos de matéria-prima argilosa; 2) proximidade com o centro consumidor de Manaus; 3) incentivos fiscais para as vendas destinadas à Zona Franca de Manaus e instalação de empresas no interior, além de incentivos financeiros através de financiamentos públicos de baixo custo; 4) elevada oferta de mão-de-obra não especializada e barata e, 5) expansão da malha urbana de Manaus, valorizando os imóveis da área. Esses fatores contribuíram para a criação de novos polos cerâmico-oleiros, a partir de Iranduba e margens do rio Ariáú, abrangendo o município de Manacapuru.

O polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru, conforme dados apresentados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2000) é constituído por aproximadamente 30 indústrias oleiras em funcionamento nos dois municípios, as quais constituem um setor de destaque na economia local. A produção desse polo está atrelada à demanda da capital Manaus, que concentra maior parte da população e mais de 90% da renda do Amazonas.

De acordo com Paiva et al. (2007), o polo oleiro de Iranduba produzia cerca de oito milhões/mês de tijolo cerâmico, cujo maior consumidor é Manaus, que absorve quase 95% dessa produção, sendo que, devido ao processo fabril rudimentar e manual, há uma perda média de 4 % de produtos queimados, gerando, de acordo com Seye et al (2003), o equivalente a 9600 ton/ano de resíduo cerâmico, o qual é depositado indevidamente, de acordo com Campelo et. al (2006), em pátios das olarias ou em locais inadequados, como leitos de rios, gerando problemas ambientais.

2.4.2. Matéria-prima para produção de tijolos

As matérias-primas usadas na produção de produtos cerâmicos são os solos argilosos. Santos (1975) definiu argila como um material terroso, de granulação muito fina, que adquire certa plasticidade quando umedecido com água. Batista (2004) classificou as argilas em duas categorias: argilas primárias e argilas secundárias ou sedimentares. As primeiras são formadas no mesmo local da rocha mãe, são pouco atacadas pelos agentes atmosféricos, possuem partículas mais grossas, coloração mais clara e têm sua plasticidade reduzida, porém de grande dureza e alto nível de fusão, enquanto que as argilas sedimentares foram transportadas para mais longe da rocha mãe pela água, pelo vento e degelo. Essas argilas são mais finas e mais plásticas que as primárias, podendo, entretanto, conter impurezas ao se misturarem com a matéria orgânica.

Independentemente da classificação existe uma grande variedade de argilominerais na composição das argilas cujos principais são os dos grupos da caulinita, montmorilonita e illita. Além dos argilominerais, existem na composição das argilas, os minerais acessórios, como: quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro, titânio, sílica e manganês, entre outros.

As massas cerâmicas sofrem variações intensas nas suas propriedades físico-químicas devido ao seu processamento, e a argila é utilizada normalmente, devida sua faixa granulométrica ser composta por partículas com dimensão inferior a 0,005 mm. O tamanho das partículas de uma massa cerâmica é uma característica de fundamental importância, pois as propriedades físicas como plasticidade, absorção de água, módulo de ruptura a flexão a seco e após a queima, são influenciadas pela granulometria e imprescindíveis para obtenção de um produto cerâmico de qualidade.

Nascimento (2005) afirmou que o conhecimento da distribuição granulométrica e a forma das partículas constituintes da massa cerâmica podem evitar falhas na formação do produto no processo de extrusão, baixa resistência mecânica, aumento da absorção de água e, conseqüentemente, porosidade aparente alta.

As massas cerâmicas para produção de peças devem ser compostas de materiais plásticos e não-plásticos, visto que os materiais não-plásticos, como a areia, atuam como desplastificantes nas composições, reduzindo a plasticidade destas quando misturados com os materiais argilosos. Segundo Pracidelli (1997), uma massa cerâmica composta somente por argilas plásticas apresenta grandes dificuldades no processo de moldagem, secagem e queima. Neste caso, há a necessidade de misturar argilas e materiais não plásticos moídos, dosando-se grãos finos, médios e grossos de modo a obter uma distribuição granulométrica adequada.

A composição química da massa cerâmica também pode favorecer a excessiva plasticidade das argilas e seu comportamento refratário, por isso o conhecimento da composição química fornece informações importantes para seu uso específico. Os minerais constituintes da massa cerâmica podem influenciar o comportamento térmico do corpo cerâmico, até certo ponto. Sanchez-Muños (2002) explicou que as interações entre as matérias-primas e minerais constituintes, presentes no corpo verde, podem ser afetadas por qualquer alteração no tratamento térmico, visto que a importância desses elementos está relacionada à capacidade de diminuir a temperatura da formação da fase líquida, durante o processo de queima.

A maioria dos produtos cerâmicos apresenta elevada porosidade, decorrente da baixa temperatura de queima, variando de 850 °C a 950 °C. Riella (2002) e Vieira (2002) apontaram a reformulação da massa cerâmica aumentando o teor de fundentes ou a temperatura de queima, como alternativas para a redução da porosidade, pois os fundentes, ao longo do processo de queima, se transformam em líquido, favorecendo o preenchimento dos poros do material e contribuindo para densificação.

Segundo Kingery (1976), os fundentes mais utilizados na indústria cerâmica são as matérias-primas com elevado percentual de óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e com baixa perda ao fogo, pois formam a fase líquida por fusão própria, ou em reação com a sílica (SiO_2) proveniente da decomposição dos argilominerais, em temperatura superior a 700°C.

Atualmente a indústria cerâmica vem evoluindo, com o aprimoramento das técnicas dos processos cerâmicos encurtando o tempo de queima, a fim de produzir materiais de melhor qualidade. Por isso, interações mútuas entre minerais podem ser largamente reduzidas, quando se aumenta a taxa de queima. Por estes e demais fatores, se faz necessário conhecer a matéria-prima, antes de se proceder a fabricação de tijolos, telhas ou outro produto cerâmico, pois sua composição granulométrica e sua composição química afetam no resultado do produto final.

2.4.3. Processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha

A fabricação dos materiais cerâmicos compreende uma sequência de etapas de manufatura para o processamento do solo, sendo que, pelo menos uma vez, deve ocorrer a queima em temperatura elevada, para promover as reações físicas e químicas. O detalhamento dessas pode ser visualizado na Figura 1, por meio do fluxograma do processo produtivo, entrada e saída de insumos da indústria de cerâmica vermelha.

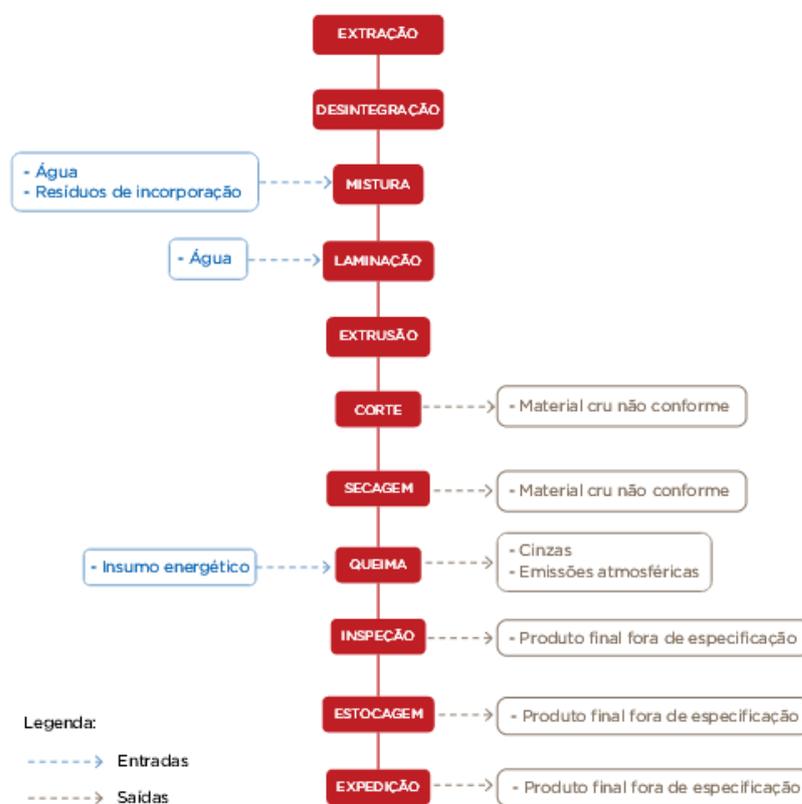


Figura 1. Fluxograma do Processo produtivo, entrada e saída de insumos da indústria de cerâmica vermelha, adaptado da Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM.

Fonte: FIEMG (2013)

O processo produtivo das indústrias cerâmicas do polo oleiro ceramista dos municípios de Iranduba e Manacapuru ainda é feita de forma manual, com sutis diferenças entre uma ou outra indústria cerâmica, e, em face deste fator, será descrito mais detalhadamente no capítulo referente aos materiais e métodos, o processo produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, fornecedora do resíduo cerâmico utilizado nesta pesquisa.

2.5. ASPECTOS GEOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DOS MUNICÍPIOS CONSTITUITES DO POLO OLEIRO DE IRANDUBA E MANACAPURU

Nos municípios de Iranduba e Manacapuru está instalado o maior polo oleiro de cerâmica vermelha do Estado do Amazonas, que conforme estudos geológicos realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM- BRASIL (2010) dispõe de extensas áreas de depósitos aluvionares e de alteração, constituindo as principais fontes de matéria-prima para a produção de tijolos e telhas. Esses estudos fornecem a indicação de um grande potencial de argila para as indústrias de cerâmica vermelha da região, com inferência de grandes reservas geológicas.

Em relação ao tipo de argilas que compõe essas reservas, Cabral (2008) afirmou que existem três tipos de materiais argilosos conhecidos e empregados no Amazonas: 1) Argilas muito plásticas que se encontram nas aluviões recentes que se relacionam aos ambientes de planície de inundação, sendo amplamente empregadas na indústria da cerâmica vermelha; 2) Argilas pouco plásticas, mosqueada e pouca arenosa, oriundas de depósitos residuais, formados a partir de alteração de rochas da formação Alter do Chão, responsável pela totalidade da produção de tijolos cerâmicos desse e; 3) Argilas levemente arenosas oriundas de latossolos e que tem utilização na construção de aterros, no preparo de argamassa e também na produção de cimento.

O conhecimento dos aspectos geológicos, pedológicos e geomorfológicos, da área de influência do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru elucidada uma série de questionamentos acerca da locação e permanência das indústrias de cerâmica vermelha no local, além de ampliar a visão em relação a influência das transformações geológicas no solo da região, propiciando a aquisição de características físicas e químicas, que viabilizem a produção de peças cerâmicas em grande escala.

2.5.1. Características geológicas - geotécnicas do município de Iranduba e Manacapuru

Os municípios de Iranduba e Manacapuru localizam-se à margem esquerda do rio Solimões e de acordo com o censo demográfico realizado em 2010, pelo Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística – IBGE possuem população de 40.781 e 85.141 habitantes, respectivamente.

A interligação entre Manaus e os municípios constituintes do polo oleiro, representado na Figura 2, era feita parcialmente, por meio de transporte fluvial até bem pouco tempo, sendo necessária a travessia do rio Negro, por balsa ou pequenos barcos, até a localidade de Cacau Pirêra, distrito de Iranduba, seguindo então por via terrestre.. Porém, com a conclusão da obra da Ponte sobre o rio Negro, em 24 de outubro de 2011, o acesso ao município passou a ser realizado unicamente por via terrestre, através da rodovia estadual Manuel Urbano, AM-070, que liga a capital aos municípios de Iranduba, Manacapuru e Novo Airão.

Conforme Campelo et al. (2004), o polo oleiro concentrado no município de Iranduba localiza-se entre os quilômetros zero e quatro da rodovia Manuel Urbano, enquanto que em Manacapuru, a concentração das olarias se dá principalmente na região do lago do Ubim, entre os quilômetros 38 e 45 da rodovia. Geralmente, as olarias estão posicionadas próximas às jazidas, e em muitas delas, a argila é extraída da margem esquerda do rio Solimões, onde ambos os municípios se localizam, com áreas territoriais de 2.354 Km² e 7.062 Km² e distando 25 km e 79 km, em linha reta, na direção NW-SE da cidade de Manaus.

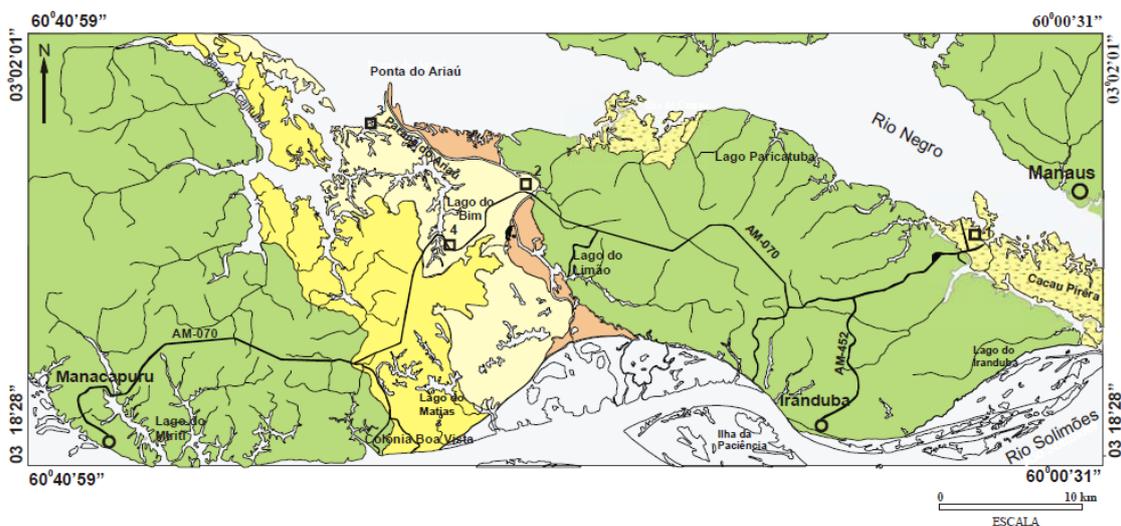


Figura 2. Localização do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru.

Fonte: Campelo et al. (2004)

Conforme Soares (2007), os municípios de Iranduba e Manacapuru situam-se na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste da Bacia do Amazonas, uma bacia do tipo intracratônica, com área de aproximadamente 500.000 km² e preenchimento predominante de rochas siliciclásticas, essencialmente paleozóicas, intrudidas no Mesozóico por diques e soleiras de diabásio. De acordo com Caputo (1984), essas rochas atingem espessura máxima de 5.000 m. A bacia tem forma alongada e eixo deposicional orientado W/SW-E/NE, limitada pelos arcos Purus e Gurupá a oeste e leste, como mostra a Figura 3, bem como pelo Escudo das Guianas, ao norte pelo Escudo Brasileiro a sul, que integram o Cráton Amazônico.

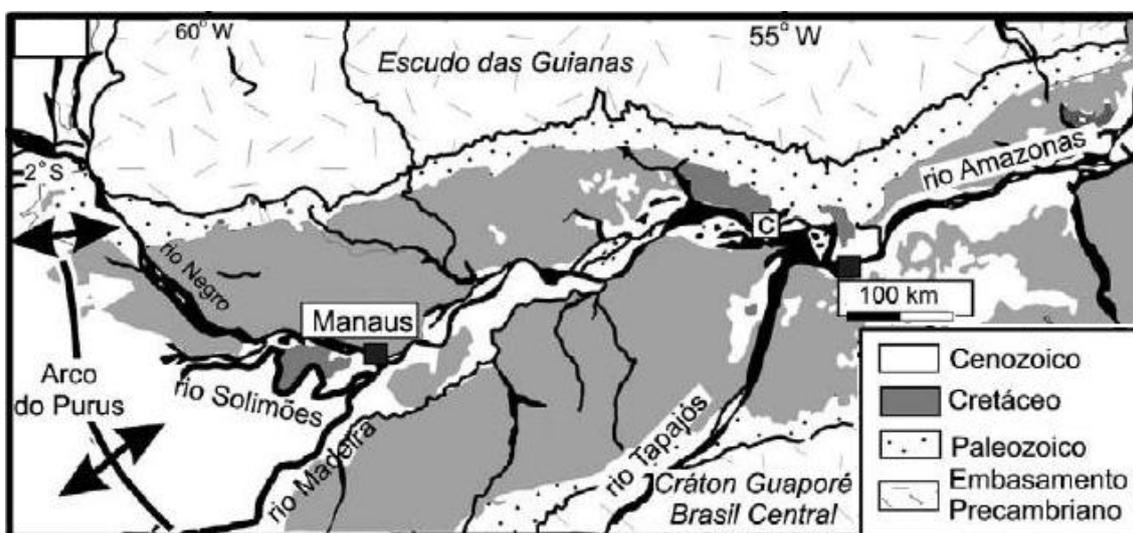


Figura 3. Exposição da Formação Alter so Chão ao longo do Rio Amazonas.

Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2012)

Souza e Nogueira (2009) afirmam que atualmente, as duas propostas mais aceitas subdividem o Cráton Amazônico em províncias geocronológicas, cuja evolução envolveu ciclos orogênicos, com retrabalhamento de crosta continental e adição de material juvenil, conduzidos por mecanismos da moderna tectônica de placas.

Silva et al. (2008) afirmam que o vale do paraná do rio Ariáú, região entre Iranduba e Manacapuru, compreende o antigo leito do rio Negro, um dos rios principais que compõem a Bacia Amazônica, que estivera cerca de 50 km à jusante da atual posição, e que teve seu desvio de curso, em direção à Manaus, após o preenchimento sedimentar nessa área de confluência fluvial.

O expressivo pacote de sedimentos argilosos, utilizados pelas indústrias ceramistas situadas naquele setor, comprova o antigo curso desse rio. A Figura 4 identifica os rios principais que compõem a Bacia Amazônica.



Figura 4. Delimitação da Bacia Amazônica e seus rios principais: (1) Rio Amazonas; (2) Rio Solimões; (3) Rio Negro; (4) Rio Xingu; (5) Rio Tapajós; (6) Rio Jurema; (7) Rio Madeira; (8) Rio Purus; (9) Rio Branco (10); Rio Juruá; (11) Rio Trombetas; (12) Rio Uatumã e (13) Rio Mamoré.
Fonte: Agência Nacional De Transportes Aquaviários - ANTAQ (2013)

Geologicamente, os municípios de Iranduba e Manacapuru estão situados em uma planície de dissecação, visualizados claramente em imagens de satélites e normalmente individualizados em cartas topográficas. Esse relevo compreende uma faixa territorial constituída por sedimentos clásticos, representados por materiais argilosos e arenosos da Formação Alter do Chão, assim como sedimentos pelíticos de idade quaternária, normalmente relacionados a porções territoriais associados a terraços inferiores, sujeitos a regimes de sazonalidade hidrografia da região. Devido às características físicas e sedimentológicas brevemente supracitadas esses materiais são normalmente explorados para fabricação de produtos cerâmicos gerando atividades e empreendimentos rentáveis para a economia dos municípios.

A associação entre esses depósitos quaternários e os sedimentos da Formação Alter do Chão são facilmente identificáveis através de observação de sua textura, litologia, mineralogia, estruturas sedimentares e fósseis. Barros & Soares (2000) afirmavam que esses sedimentos recentes, devido à inconsolidação, formam diversos níveis de terraços fluviais, correlativos aos níveis de antigos leitos de rios que se destroncaram ao longo do tempo, influenciados por processos neotectônicos, cujos efeitos são significativos na área. De acordo com Caputo (1984), é nesse contexto geológico que se insere os municípios de Iranduba e Manacapuru, que se localizam no interflúvio entre o rio Negro e rio Solimões, envolvendo terrenos sedimentares, em uma faixa constituída fundamentalmente por sedimentos clásticos, representados por materiais argilosos a arenosos da Formação Alter do Chão, da porção superior da sequência estratigráfica da Bacia do Amazonas.

A Formação Alter do Chão é a unidade mais antiga na Bacia Amazônica, e foi primeiramente definida por Kistler (1954) como sendo composta de arenitos avermelhados, argilitos, conglomerados e brechas intraformacionais. Dino et al. (1999) explicava que essa unidade é pobre em fósseis, pois devido a bacia ser intracratônica, a litologia ser siliciclástica e a deposição em condições de paleoclima quente com semiaridez ser dominante, a mesma não oferece condições adequadas de preservação fóssilífera. De acordo com Dino et al. (1999), foram reconhecidas duas sucessões sedimentares na Formação Alter do Chão, das quais, uma contém arenitos avermelhados com icnofósseis e estruturas pedogenéticas, nos quais, estudos geoquímicos indicam variações de rocha fontes e mudança na seleção granulométrica durante o transporte, deposição e pedogênese pós-deposicional. Segundo Horbe et al. (2006), essas variações ocorreram em paleambiente de planícies abandonadas e rios entrelaçados sob condições de clima seco com tendência a úmido durante o Cretáceo na bacia do Amazonas.

Segundo ainda Silva et al. (2008), o arenito vermelho da Formação Alter do Chão, “arenito Manaus”, como é conhecido regionalmente, é o principal representante aflorante dessa formação na região, mostra intensa deformação por falhas, cujas atuações causam significativas mudanças na paisagem amazônica, inclusive influenciando a dinâmica fluvial dos rios amazônicos, nos quais migrações e mudanças de leitos são frequentes e chegam a alcançar a ordem de algumas dezenas de quilômetros, cujos registros são os extensos pacotes de sedimentos, terraços e lagos ao longo da calha do sistema do rio Amazonas, além de expressivos registros no relevo.

No rio Solimões, que compreende a região de estudo da pesquisa, grandes migrações, surgimento e desaparecimento de bancos de areia, desmoronamento de margens (fenômeno de terras caídas) e o abandono de leito são, muitas vezes, consequência indireta de processos tectônicos. Os exemplos desses mecanismos são alvo de alguns estudos recentes como os de Souza Filho (1999) e Bezerra (2003).

De acordo com D' Antona et al. (2007), o solo resultante do processo de intemperização da Formação Alter do chão é o Latossolo. Conforme o Relatório de Impacto do Meio Ambiente - RIMA, elaborado em 2007, pela Universidade Federal do Amazonas, com o objetivo de levantar dados geotécnicos da área da obra da Cidade Universitária da Universidade do Estado do Amazonas, no município de Iranduba, bem como identificar possíveis jazidas minerais, com possibilidade de uso na própria obra, foram identificados quatro tipos texturais de solo: 1) Maciço rochoso; 2) Solo Arenoso médio esbranquiçado; 3) Solo Laterítico fino a grosseiro (latossolo) (composto de concreções lateríticas) e 4) Solo Argiloso (latossolo).

O maciço rochoso, mostrado na Figura 5, é constituído por rochas areníticas friáveis (Alter do Chão), encontradas em fundo de lavras já exauridas e em falésias do rio Negro.

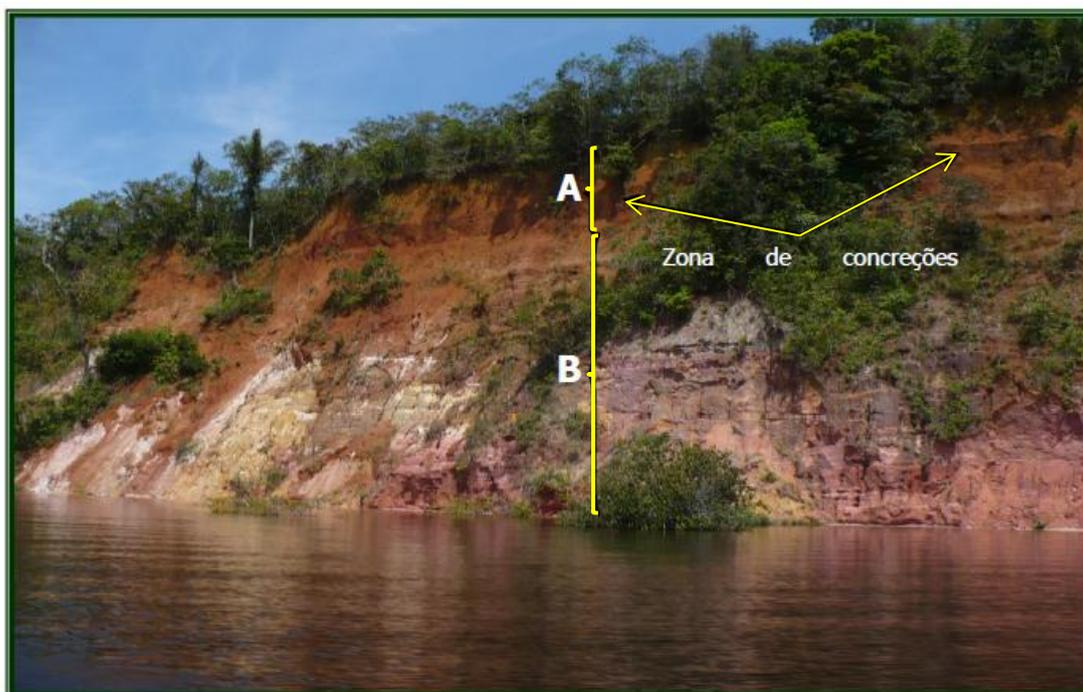


Figura 5. Afloramento de um perfil de latossolo sobre a Formação Alter do Chão, em falésia na margem do rio Negro. A) Topo do perfil, cobertura argilosa com crosta laterítica (baixa vulnerabilidade erosiva). B) – Estratificação Alter do Chão (solo argilo-arenoso, média vulnerabilidade erosiva).

Fonte: UFAM (2007)

O solo arenoso é encontrado principalmente na meia encosta dos platôs, fundos de vale e planícies de inundação, conceituadas por Christofolletti (1980) como a faixas do vale fluvial composta de sedimentos aluviais, periodicamente inundadas pelas águas de transbordamento provenientes do rio. A Figura 6 mostra a ocorrência de depósito arenoso e planície de inundação. São solos de muito alta vulnerabilidade erosiva. De acordo com Ab'Saber (2004), os areais são muito frequentes em algumas áreas da Amazônia, essas áreas são chamadas pelo autor de manchas de areias brancas, podendo ter origem natural, conforme herança histórica da paisagem Amazônica.



Figura 6. Heterogeneidade Paisagística de Iranduba. A) Planície de inundação. B) Depósitos arenosos.
Fonte: Abreu et. al (2012)

O solo laterítico, ilustrado na Figura 7, é geralmente, encontrado na meia encosta até as cristas dos platôs. Possui granulação variando de fino a grosseiro. O levantamento realizado pela UFAM (2007), em conjunto com a geologia local e o processo de laterização em clima tropical, indicam que pode haver na região, mais áreas com ocorrências de laterita em condições iguais de uso na construção civil. São solos de muito baixa vulnerabilidade erosiva.



Figura 7. A) Granulação média do material laterítico. B) Afloramento de maciço latossólico.
Fonte: UFAM (2007).

O último perfil encontrado, o solo argiloso, mostrado na Figura 8, é encontrado no topo dos perfis de latossolo e têm predominância em maior parte da região. Segundo D' Antona et al. (2007), esse tipo de solo tem alto potencial em produzir argilas, pois a área que está próximo ao rio Negro, possui influência da oscilação do lençol freático, ajudando a formá-las. Devido suas características físicas e sedimentológicas, o mesmo é um solo composto por diversos tipos de argilas, normalmente explorado pelas indústrias de cerâmica vermelha do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, para fabricação de produtos cerâmicos como: tijolos, lajotas e telhas, gerando atividades e empreendimentos rentáveis para a economia dos dois municípios.



Figura 8. Afloramento de maciço latossólico com concreções lateríticas em topo de platô. A) Topo do perfil, solo argiloso B) Na base, maciço laterítico. Ambos com baixa vulnerabilidade erosiva, com grande viabilidade de uso na construção civil.

Fonte: UFAM (2007)

Por fim, o solo dos municípios de Iranduba e Manacapuru caracteriza-se por sua diversidade paisagística, com suas variedades de cores e texturas, sendo facilmente identificáveis quando observados, com predominância do latossolo, fator que favorece a permanência das olarias do polo oleiro ceramista do estado do Amazonas.

2.6. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS DOS SOLOS DA CIDADE DE MANAUS

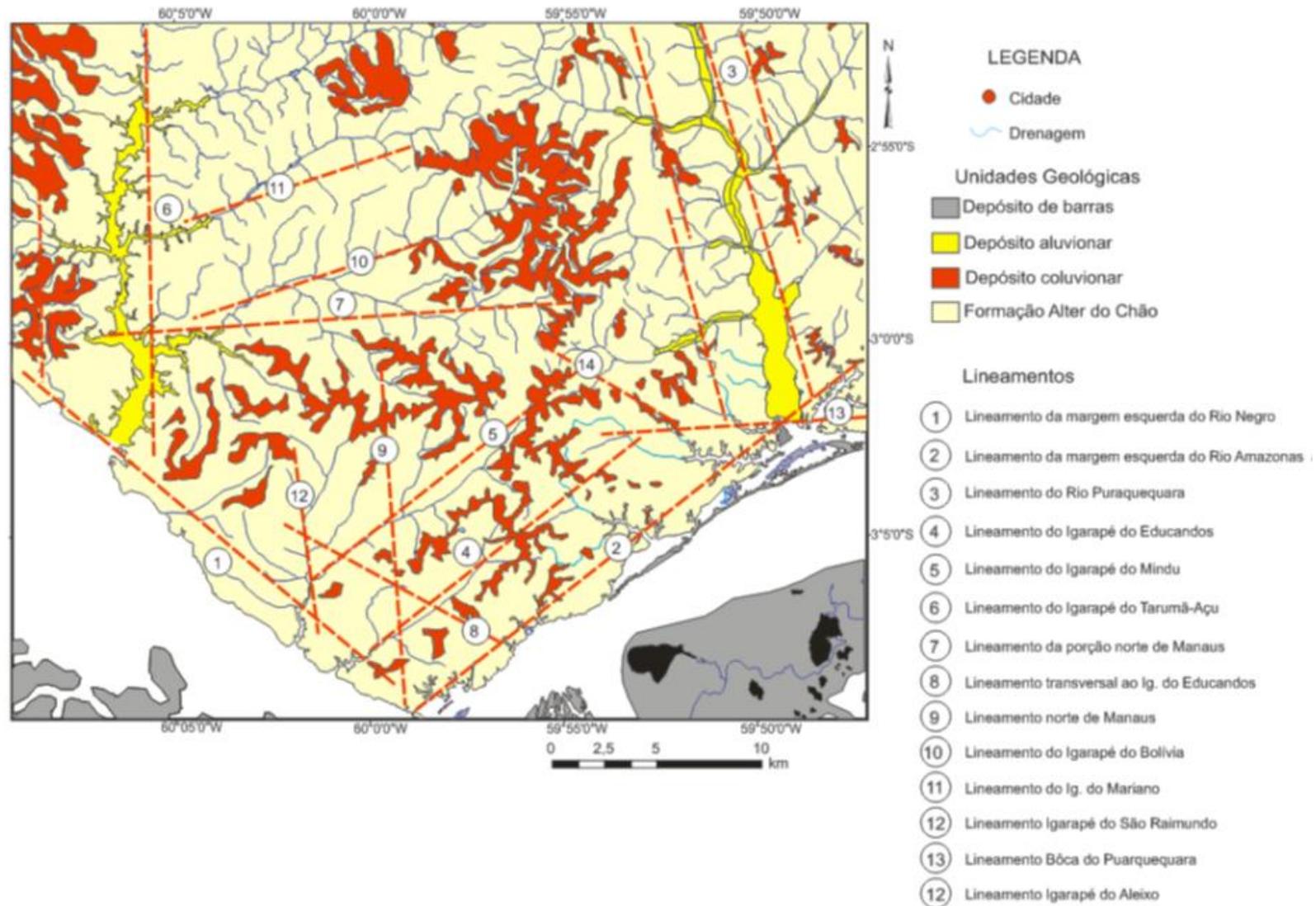
Por tratar-se do solo a ser estabilizado nessa pesquisa, o mesmo será brevemente explanado acerca de suas características geomorfológicas. Segundo Sombroek (1996), na capital amazonense aflora um denso pacote sedimentar argilo-arenoso amarelado, de idade cenozóica, relacionado à “argila de Belterra”, do Pará.

A origem desse pacote sedimentar é controversa, alguns autores como Kotschoubey (1981) consideram-na uma unidade sedimentar do período Terciário, cujo ambiente era semi-árido, outros como Sombroek (1996) consideram essa unidade como sendo de origem lacustre, no Terciário, enquanto Fernandes Filho (1997) e Costa (1994) definem esta unidade como um horizonte argiloso, derivado de alterações *in situ* de sedimentos da Formação Alter do Chão, considerando que o pacote sedimentar seja resultante, do intemperismo de crostas lateríticas ferruginosas e aluminosas. Devido às divergências entre as hipóteses da procedência e formação dessa unidade na região da cidade de Manaus, e não sendo essa informação de extrema relevância, em relação ao escopo deste trabalho, denomina-se a mesma como sendo uma cobertura argilosa do Terciário/Quaternário, visto que tal terminologia abrange todas as hipóteses citadas, sem entraves para aplicação do material, ao fim que se destina nessa pesquisa.

Em Manaus, foram descritas duas unidades predominantes de solos: os latossolos e os podzóis. Vieira (1975) afirmou que os latossolos são solos não hidromórficos, com perfil normalmente profundo, são solos envelhecidos, ácidos, com boa drenagem, apesar de serem muitas vezes argilosos. Sua composição química é composta por sesquióxidos, argilo-minerais silicatados (grupo da caulinita), quartzo e outros minerais silicatados, fortemente resistentes à intemperização. São encontrados sob a vegetação de florestas densa, aberta e mista, em relevo plano e suave ondulado ou ondulado.

Souza (1991) explicou que os solos com horizonte podzol são pouco profundos, imperfeitamente drenados, extremamente lavado, de coloração esbranquiçada, devido ao acúmulo de húmus e sesquióxidos ou ferro e/ou alumínio. Na região Norte ocorre apenas o Podzol hidromórfico, que são solos minerais hidromórficos com horizonte B podzol ou espódico, subjacente a um horizonte A2 alábico. Possuem sequência de horizontes A1, A2, Bh ou Bhir e C, com nítida diferenciação entre os horizontes, são ácidos e possuem elevada saturação com alumínio trocável e por consequência, apresentam baixa fertilidade. A Figura 9 mostra o mapa de lineamentos morfoestruturais, obtido a partir obtido a partir da análise integrada de lineamentos de relevo, drenagem, modelo SRTM e imagens de Satélite Landsat. (Silva, 2005)

Figura 9. Mapa de lineamentos morfoestruturais da cidade de Manaus



Fonte: Silva (2005)

CAPITULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será identificado o tipo da pesquisa, apresentação dos materiais utilizados/produzidos e suas respectivas procedências, assim como a descrição das metodologias empregadas na caracterização das matérias-primas utilizadas na presente pesquisa.

3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Caracterizada como experimental, a pesquisa em questão tem como objeto de estudo, o resíduo cerâmico proveniente do polo oleiro ceramista dos municípios de Iranduba e Manacapuru no Amazonas, utilizado como elemento constituinte de camadas de base e sub-base de pavimento, em forma de agregado graúdo, na estabilização de um solo típico da cidade de Manaus.

O procedimento experimental desta pesquisa está dividido em duas fases. Na primeira fase foram confeccionadas quatro misturas de solo natural com quatro faixas percentuais de resíduo cerâmico, as quais serão denominadas de MSR (Mistura Solo-Resíduo) e, na fase seguinte, mais quatro misturas, desta vez, com solo estabilizado com adição de 30% de areia, e quatro faixas percentuais de resíduo cerâmico, as quais serão referidas no decorrer desta dissertação com a sigla MSAR (Mistura Solo Arenoso-Resíduo).

O Resíduo Cerâmico utilizado como agregado graúdo foi caracterizado através dos ensaios físicos e mecânicos, sendo a maioria deles realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) e no Laboratório de Materiais (LEM) da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. Apenas o ensaio de desgaste por abrasão *Los Angeles* e o ensaio de Difração de Raios-X foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, do Instituto Federal do Amazonas – IFAM e no Laboratório de Química do Departamento de Geociências, da Universidade Federal do Amazonas respectivamente.

Por fim, foi avaliado o comportamento dos materiais envolvidos no dimensionamento de uma estrutura de pavimento típica para nossa região, mediante uso de um programa computacional denominado SisPav.

Foram analisados ainda o Solo Natural (SN) e o Solo Estabilizado com Areia (SA), por meio dos ensaios de granulometria, massa específica real e aparente, limites de Atterberg, ensaios de compactação nas energias intermediária e modificada e Índice Suporte Califórnia - ISC, nas mesmas energias do ensaio de compactação, sendo que foram preparadas três espécimes de cada amostra, para cada procedimento, objetivando maior precisão dos resultados.

Após a britagem, o resíduo cerâmico foi adequado à faixa pré-determinada, para posterior confecção das oito misturas solo-resíduo, de ambas as fases da pesquisa. As misturas Solo-Resíduo (MSR), foram caracterizadas física e mecanicamente pelos ensaios de granulometria, massa específica real e aparente, limites de Atterberg, ensaios de compactação nas energias intermediária e modificada e Índice Suporte Califórnia - ISC, nas mesmas energias do ensaio de compactação. As misturas da segunda fase da pesquisa, as Misturas Solo Arenoso – Resíduo (MSAR) foram caracterizadas física e mecanicamente pelos mesmos ensaios pelos quais foram submetidas as misturas da primeira fase, porém, além desses procedimentos, foram realizados ensaio de Módulo de Resiliência (MR), no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, e posteriormente para uma análise mais detalhada das misturas com melhor comportamento resiliente, foi realizado novamente no Laboratório de Tecnologia de pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes, da Universidade de São Paulo-USP, onde também foi realizado o Método das pastilhas – MP, em amostras de solo natural (SN), afim de verificar consistência, contração e expansão, definindo assim, o comportamento do solo, suas características e por fim, o tipo de solo.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais constituintes das misturas utilizados nesta pesquisa foram: solo natural, resíduo cerâmico e areia. Os procedimentos de coleta e amostragem dos materiais para a execução dos ensaios tecnológicos foram realizados de acordo com as normas técnicas usuais.

3.2.1. Solo Natural

O solo utilizado nos ensaios dessa pesquisa é proveniente da região Norte do Campus da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, mais precisamente da área de construção do Centro de Convivência da Faculdade de Tecnologia - FT, na cidade de Manaus, em uma profundidade de um a dois metros, para evitar o excesso de matéria orgânica acumulada na superfície. As amostras de solo coletadas são típicas do subleito dos pavimentos locais, com predominância de fração argilosa.

A Figura 10 mostra o local onde foram coletadas as amostras de solo, com referência do local $3^{\circ} 5' 16,21'' S / 59^{\circ} 57' 45,60'' W$.



Figura 10. Mapa do local da coleta do Solo Natural.

Fonte: Google Earth

As amostras coletadas no campo foram acondicionadas em sacos plásticos com capacidade de 50 kg, devidamente identificados e posteriormente conduzidos para o Laboratório de Pavimentação (LABPAV), da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas.

Após a coleta, as amostras de solos foram colocadas em bandejas, para secagem ao ar livre pelo período de 24 horas, em seguida, foram destorroadas na destorroadora e homogeneizadas, para, então, serem passadas na peneira de abertura 4,8 mm e condicionadas em embalagens plásticas de 5 kg por amostra, para posterior realização dos ensaios físicos e mecânicos.

As etapas de beneficiamento do solo e preparação das amostras para realização dos ensaios físicos estão expostas na Figura 11 a seguir.



Figura 11. Etapas do beneficiamento e preparação das amostras de Solo Natural: A) Armazenamento após coleta; B) Amostras identificadas; C) Destorroadora/extrusora; D) Solo natural em processo de destorroamento mecânico; E) Solo destorroado e F) Quarteamento para separação das amostras parciais.

Os ensaios pelo quais foram submetidas as amostras de solo, compreendem a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, determinação dos seus limites de consistência, massa específica aparente e real dos grãos e posteriormente, o Ensaio das Pastilhas - MCT, os quais foram executados segundo as normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e do extinto Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER, hoje, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, conforme mostra a Tabela 2.

Para efeito do presente estudo, fica convencionado referir-se ao solo sem a adição de areia, com a terminologia solo natural (SN).

Tabela 2. Ensaios realizados no solo natural e suas respectivas normas.

ENSAIOS	NORMAS TÉCNICAS
Preparação de Amostras para ensaio de caracterização	DNER-ME 041/94
Análise Granulométrica	DNER-ME 051/94
	DNER-ME 080/94 NBR 7181/84
Classificação granulométrica - Rochas e Solos	NBR 6502/95
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade	NBR 7180/94
	DNER-ME 082/94
Solos – Determinação da Densidade Real	DNER- ME 093/94
	NBR 6508/84
Ensaio de Compactação	NBR 7182/86
	DNER-ME 129/94
Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas	DNER-ME 049/94
Solo - Índice de Suporte Califórnia	NBR 9895/87
Método das Pastilhas – MP	

3.2.1.1. Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do solo, ou em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

O ensaio de granulometria é dividido em duas partes distintas, utilizáveis de acordo com o tipo de solo e as finalidades do ensaio para cada caso particular. São elas: análise granulométrica por peneiramento e análise granulométrica por sedimentação. Os solos grossos (areias e pedregulhos), possuindo pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada utilizando-se somente o peneiramento. Em solos possuindo quantidades de finos significativas, como é o caso do solo utilizado nessa pesquisa, deve-se proceder ao ensaio de granulometria conjunta, que engloba as fases de peneiramento e sedimentação. Os procedimentos estão de acordo com os métodos de ensaio: NBR 7181/84 - Solos – Análise granulométrica, DNER-ME 051/94 - Solo-análise granulométrica e DNER-ME 080/94 - Solos – Análise granulométrica por peneiramento.

A determinação da granulometria do solo natural foi feita por peneiramento e sedimentação. A sequencia desse ensaio está ilustrada nas Figuras 12, 13 e 14.



Figura 12. Análise Granulométrica: A) Peneiramento fino: Peneiras com abertura equivalente de 0,075 mm a 1,19 mm. B) Peneiramento grosso: Peneiras de Abertura equivalente de 2,00 mm a 50,8 mm. C) Ensaio de Sedimentação na fração mais fina de solo, com granulometria inferior a 0,075 mm.

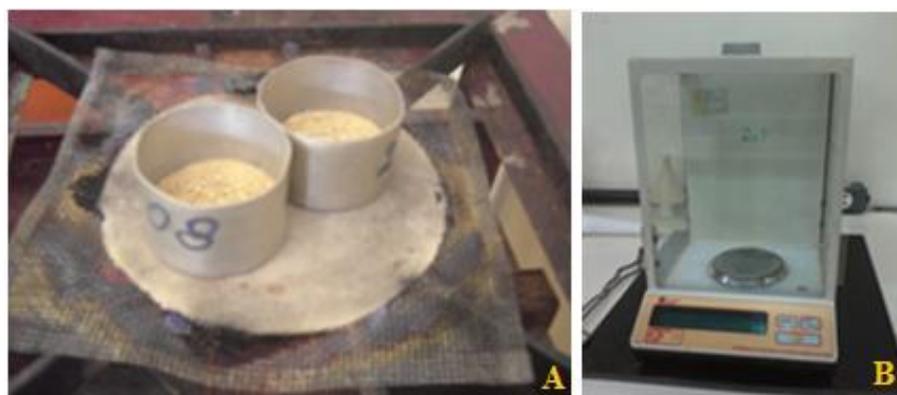


Figura 13. Determinação da umidade higroscópica: A) cápsulas com amostras de solo no fogareiro sob tela de amianto, a fim de retirar a umidade do solo e obter sua massa seca (ms). B) balança de precisão para pesagem das cápsulas e amostras de solo, antes e após o fogareiro.

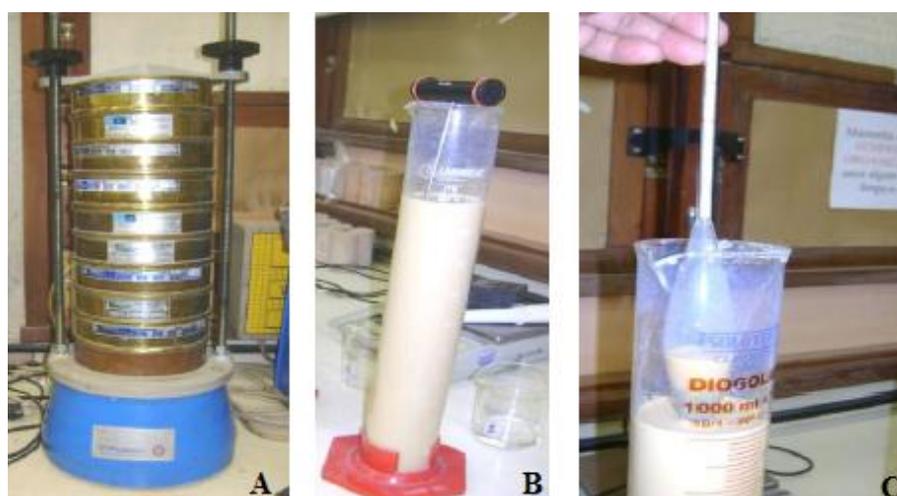


Figura 14. Sequências dos ensaios de granulometria do solo Natural: A) Agitador de peneiras. B) Ensaio de sedimentação. C) Leitura com densímetro.

3.2.1.2. Limites de consistência

A argila, por ser uma fração muito fina de solo, necessita da realização dos ensaios de caracterização de sua plasticidade e liquidez. Quanto menores as partículas, maior a superfície específica, e seu comportamento relacionado à água depende das características dos minerais presentes. A consistência de um solo é mensurada por meio dos ensaios que determinam seus Limites de Liquidez (LL) e Limites de Plasticidade (LP), conhecidos como limites de Atterberg ou de consistência, ilustrados na Figura 15. que determinam o Índice de Plasticidade (IP).



Figura 15. Ensaios de determinação dos limites de consistência: A) Aparelho de Casagrande para determinação do Limite de Liquidez e (B) Moldagem do cilindro de solo para determinação do Limite de Plasticidade.

3.2.1.3. Massa específica real

Segundo Lambe e Whitman (1990), a massa específica real dos sólidos de um solo é relacionada aos minerais constituintes e da percentagem de ocorrência desses minerais no solo. O conhecimento da massa específica dos sólidos é necessário para caracterizar o solo, quanto aos valores dos seus índices físicos. O método de ensaio usado para determinar o índice foi o padronizado pelo DNER- ME 093/94, no qual é usado um picnômetro para determinação da massa específica real dos solos, conforme ilustra a Figura 16.



Figura 16. Sequência do ensaio de massa específica real do solo: A) Fervura dos picnômetros; B) Descanso em água em temperatura ambiente e medição de temperatura; e C) pesagem do picnômetro.

3.2.1.4. Ensaio de compactação

A compactação é um método de estabilização de solos por aplicação de alguma forma de energia, seja de impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica, a fim de conferir ao solo, um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento e conseqüentemente, uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

O solo natural foi compactado de acordo com as normas NBR 7182/86 - Ensaio de Compactação e DNER-ME 129/94 – Solos - compactação utilizando amostras não trabalhadas.

Por se tratar de aplicação em sub-base e base estabilizada, as normas que orientam acerca dos padrões para tal aplicação sugerem energia de compactação acima da energia normal, então, nesta pesquisa, as amostras do solo natural serão submetidas, às energias de compactação intermediária e modificada, respectivamente.

O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra, conforme mostra a Figura 17. Através do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo, com os quais é possível traçar a curva de compactação do solo.



Figura 17. Ensaio de Compactação: A) amostras para determinação de pontos de compactação. B) homogeneização das amostras. C) compactação com soquete. D) cilindro de solo compactado. E) amostras de solo compactado para determinação de umidade e posteriormente peso específico. F) extração do cilindro de solo compactado.

3.2.1.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ensaio California Bearing Ratio - CBR ou Índice de Suporte Califórnia – ISC, tem como objetivo estimar a resistência de um solo compactado para sua utilização em bases, sub-bases e subleitos de pavimento, sob condições de saturação. O ensaio é padronizado pelas Normas NBR 9895/87- [Solo - Índice de Suporte Califórnia](#) e DNER-ME 049/94 - Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. A sequência do ensaio no laboratório é ilustrado na Figura 18.



Figura 18. Etapas para determinação do Índice de Suporte Califórnia: A) compactação da amostra de solo de acordo com umidade ótima e grau de compactação pré-determinados; (B) pesagem do conjunto amostra + cilindro; (C) componentes utilizados para preparação do conjunto cilindro + amostra para imersão; (D) colocação das cargas para pressão durante a imersão; (E) imersão das amostras; (F) defletômetro indicando leitura da expansão; (G) prensa do ensaio de CBR e (H) extração da amostra.

3.2.1.6. Método das Pastilhas

O método das pastilhas de solos auxilia na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos tropicais. A versão do método das pastilhas utilizada no solo natural, nesta pesquisa, foi elaborada por Godoy e Bernucci (2002), com vários aprimoramentos em relação à versão original de Villibor e Nogami (1981). As principais características observadas são: a contração por perda de umidade, expansão por reabsorção d'água, a resistência à penetração de cone após reabsorção, a quantidade de água reabsorvida após secagem, entre outros aspectos. O método utiliza equipamentos, materiais e procedimentos simples. A avaliação destas características coloca o solo analisado, em um grupo classificatório, conforme a Tabela 4.

Tabela 3. Guia de identificação de solos tropicais proposto

Classes de solos	Características	CONTRAÇÃO (%)	INCHAMENTO (%)	PENETRAÇÃO CONE 10 g (mm)	PENETRAÇÃO CONE 30 g (mm)	ÍNDICE DE REABSORÇÃO
	Grupos de solos					
LATERÍTIOS	TÍPICOS	> 2	< 1	0	0	negativo
	ARGILOSOS	≥ 6	≤ 10,5	≤ 4	≤ 6	< 0,6
	ARENOSOS	2 – 6				
	AREIAS	≤ 2				
TRANSICIONAIS	ARGILOSOS	≥ 6	5,5–13,0	3 – 5	6 – 8	0,3 – 0,9
	ARENOSOS	2 – 6				
	AREIAS	≤ 2				
NÃO-LATERÍTIOS	ARGILOSOS	≥ 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 0,4
	SILTOSOS	2 – 4	9 – 15	≥ 6	≥ 11	0,4 – 0,7
	ARENOSOS	2 – 6	> 8	≥ 4	≥ 8	> 0,4
	AREIAS	≤ 2	> 5	≥ 4	≥ 8	> 0,4

Fonte: Godoy e Bernucci (2002)

As demais características complementam o conhecimento do comportamento do solo, as quais são: granulometria resultante do peneiramento no preparo da amostra, umidade de moldagem da pasta de solo, resistência a seco de esfera de solo moldada, tempo de ascensão de água por capilaridade, trincas na pastilha após reabsorção de água, e tipo e tempo de interação de esfera de solo imersa em água. A sequência desse método está ilustrada nas Figuras 19 e 20.



Figura 19. Método das pastilhas. A) Espatulação do solo por 8 minutos; B) Penetração do cone por 5 mm; C) Moldagem das pastilhas; D) Pastilhas retiradas da estufa, onde são colocadas em posição vertical. E) Pesagem das pastilhas após estufa. F) Medição da contração das pastilhas com o paquímetro.



Figura 20. Método das pastilhas. A) Preparação dos recipientes com água e papel filtro para absorção de água por capilaridade; B) Repouso das pastilhas na água por 3 horas; C) Esferas de solo moldadas na palma da mão; D) Observação do tempo de ascensão da água; E) Medição da expansão resultante da absorção de água, com o paquímetro; F) Trincas resultantes da absorção de água. G) penetração de cone; H) Imersão das esferas em água destilada e I) esmagamento das pastilhas entre os dedos e entre o polegar e uma superfície dura.

3.2.2. RESÍDUO CERÂMICO

O resíduo cerâmico utilizado nesta pesquisa é proveniente de falhas do processo produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, indústria integrante do polo oleiro dos municípios Iranduba e Manacapuru, e situada na Estrada do Brito, S/N, Município de Iranduba. A Figura 21 mostra os pontos de coleta do resíduo cerâmico.



Figura 21. Pontos de coleta do Resíduo Cerâmico.

Fonte: Google Earth

O resíduo cerâmico, ao qual nos referiremos no decorrer desta pesquisa pela sigla RC, foi coletado de três lotes distintos, dispostos na área externa da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA. Após a coleta, o mesmo foi acondicionado em sacos de ráfia, como ilustra a Figura 22, no total de 400 kg preliminarmente, e em seguida, armazenado na área externa do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas (LABPAV), para posterior triagem, britagem e realização dos ensaios de caracterização.



Figura 22. Resíduo Cerâmico. A) Pilha de resíduo cerâmico no pátio lateral esquerdo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA; B) Pilha de resíduo cerâmico no pátio lateral direito da indústria; C) Pilha maior de resíduo cerâmico depositado nos fundos da indústria; D) Coleta de tijolos descartados e E) Armazenamento para posterior utilização na pesquisa

3.2.2.1. Processo Produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA

A Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA está localizada na Estrada do Brito, s/n, no município de Iranduba. Suas jazidas de argila, mostradas na Figura 23, nas quais é extraída a matéria-prima que dá origem às peças confeccionadas, se localizam a poucos metros da indústria, em uma área de várzea, que fica submersa durante o período da cheia do rio Negro, limitando, assim o tempo de extração da argila restrito ao período da vazante, período no qual é coletada a quantidade necessária para a produção do restante do ano. A extração da argila é realizada a céu aberto, durante os períodos de seca dos rios e igarapés, com a utilização de pá carregadeira e caminhão basculante.



Figura 23. Vista da entrada da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA e suas jazidas de argila

As argilas passam por um período de descanso após sua extração, chamado de sazonalidade que, segundo Zandonadi & Ioshimoto (1991), consiste na sua estocagem em períodos de tempo que variam de seis meses a dois anos.

A exposição desse material às intempéries provoca a lavagem de sais solúveis, o alívio de tensões nos blocos de argilas, melhora sua plasticidade e provoca a homogeneização da distribuição de umidade. Este processo confere às argilas, características tecnológicas superiores às daquelas do material diretamente extraído da jazida, melhor trabalhabilidade nos equipamentos de conformação e nas demais etapas do processo produtivo, proporcionando ganhos de produtividade e melhoria na qualidade do produto final.

Na indústria em questão e nas demais olarias do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, após a extração as argilas são depositadas nos pátios das indústrias, como é exposto na Figura 24, em camadas cujas espessuras e alternância das mesmas dependem dos tipos de argilas e das propriedades desejadas da mistura final.

Segundo Abreu et al. (2012), as argilas exploradas são principalmente a gibsita e esgoetita e suas formações se dão principalmente pela oscilação do lençol freático e pelo trabalho de transporte do rio Negro. Um exemplo disso são as argilas mais escuras, que são resultado do processo de deposição do rio. O tempo de sazonalidade da argila extraída para uso na produção na Indústria Cerâmica Rio Negro é de seis meses, devido aos longos períodos de inundação da área de localização da jazida.



Figura 24. Argila extraída depositada no pátio da olaria, em processo de sanzonamento.

Após o período de sazonalidade, a argila segue para o destorroador, a fim de quebrar torrões e diminuir sua granulometria para posterior mistura. Então, é colocada em depósitos, onde é misturada manualmente ou mecanicamente, dependendo do nível tecnológico da indústria, sendo que nesta fase são retirados galhos, torrões e outras impurezas, para obtenção de partículas menores, maior plasticidade e melhor contato superficial entre os componentes do solo.

Segundo Abreu et al. (2012), os tijolos produzidos na Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, são obtidos a partir da mistura da massa cerâmica compostas por dois tipos de argilas, uma mais clara, rica em óxidos de alumínio e outra mais escura, rica em óxidos de ferro, as quais são mostradas na Figura 25. Após a seleção, inicia-se o processo de amassamento, cujo objetivo é preparar a matéria-prima para moldagem.



Figura 25. Argilas extraídas com granulometrias e colorações diferentes.

Fonte: Abreu et al. (2012)

A operação de moldagem tem por objetivo dar forma desejada a massa cerâmica e para esse intento podem ser empregados os processos de moldagem: a) à seco por prensagem (com umidade de até 10%); b) com pasta plástica consistente (com 20 a 35% de umidade); c) com pasta plástica mole (com 25 a 40% de umidade) e d) com pasta fluída (com umidade de 30 a 50%). Esses valores de teor de umidade do solo variam conforme o percentual de argila da massa cerâmica.

O processo de moldagem da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA é realizado com a massa cerâmica usada para confecção das peças, em estado plástico consistente, obtida em um misturador. Em visitas técnicas a algumas olarias do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru, foi verificada a implantação de misturadores, que ao misturarem diferentes tipos de argilas, obtêm uma massa padronizada, mais resistente e produtiva, que segundo os gerentes, ocasionaram a diminuição do índice de perdas.

Após a moldagem, a massa segue para a extrusora, movida por força mecânica, que empurra a massa, pressionando-a através de boquilhas apropriadas, a fim de formar objetos com dimensões pré-estabelecidas. Em sequência ao procedimento de extrusão, as mesmas seguem para o processo de laminação, no qual as peças cerâmicas são cortadas com cortadores manuais ou automáticos, usados para dar a dimensão desejada ao produto. Finalizada essa etapa, as peças são inspecionadas visualmente, selecionadas e encaminhadas para o setor de secagem, enquanto que as peças defeituosas são reintroduzidas na etapa de preparação de massa.

Segundo FIEMG (2013), as indústrias cerâmicas utilizam um dos dois tipos de secagem em suas peças: natural ou artificial, cujas vantagens e desvantagens estão expostas na Tabela 4. .

Tabela 4. Vantagens e desvantagens dos processos de secagem manual e artificial

Tipo de secagem	Vantagem	Desvantagem
Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo com geração de calor; • Favorece locais com boas condições climáticas para secagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo elevado de secagem; • Dependência do fator climático; • Pode afetar a qualidade das peças; • Baixa produção.
Artificial	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tempo de secagem; • Maior produtividade; • Redução de perdas; • Melhoria na qualidade das peças. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo com geração de calor; • Requer mais conhecimento técnico do operador; • Exige equipamentos e controles, como termômetros e higrômetros.

Fonte: FIEMG, 2013.

Na Indústria Cerâmica Rio Negro, a secagem é feita de forma artificial, realizada em uma estrutura de alvenaria, que aproveita o calor gerado dentro dos fornos, no momento de resfriamento. Esse calor, em vez de ir direto para a atmosfera, passa pelo secador, acelerando a secagem dos produtos, ganhando tempo na queima e reduzindo o consumo de combustível. Esse método de secagem, conforme os gerentes das olarias, seca 45 mil tijolos a cada 16 horas. Após o período de secagem, as peças cerâmicas seguem para o forno, para a queima. As etapas, desde a coleta à laminação das peças cerâmicas, estão expostas na Figura 26.



Figura 26. Processo Produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA: (a) Transporte da matéria-prima extraída das jazidas, em caminhão basculante (b) pilha de argila para sazonalização; (c) destorroadora; (d) preparação da massa cerâmica; (e) extrusão e conformação das peças cerâmicas; (f) inspeção para verificação de peças resultante de falha no processo, após a etapa de laminação.

De acordo com Nascimento (2005), a queima faz com que argila adquira estabilidade e resistência mecânica, devido a algumas alterações físicas e químicas decorrentes desse processo.

Os principais fenômenos e alterações que podem ocorrer na queima de um corpo cerâmico são os seguintes: Aquecendo-se a argila até 150°C, ela perde a água de capilaridade, de moldagem e a água proveniente da matéria orgânica; Nas temperaturas entre 350°C até 450°C, ela perde água adsorvida e vai enrijecendo. A partir de 450°C até 550°C ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos; em temperaturas acima de 570°C, inicia-se a transformação de quartzo, de sua forma cristalina alfa para beta, acompanhada de uma violenta expansão durante o aquecimento, e de beta para alfa durante o resfriamento, acompanhado de fortes retrações. Acima de 700°C, começam a se desenvolver reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que dão a massa cerâmica características como dureza, estabilidade, resistência mecânica, dando início a sinterização. Entre 850°C a 950°C. os carbonatos se decompõem e liberam CO₂ e transformam-se em óxidos e, finalmente, acima de 1000°C, os sílico-aluminatos formam uma quantidade de vidro, que aglutina os demais elementos, proporcionando mais resistência, dureza, compacidade e impermeabilidade às peças cerâmicas.

Ocorrem diversas reações no cozimento, dependendo de alguns fatores como a temperatura alcançada, da velocidade de aquecimento, de esfriamento, tipo de forno e do combustível usado.

O cozimento da argila pode ser feito em fornos contínuos e em fornos intermitentes. Nos primeiros, a produção é contínua, já no segundo, os lotes devem ser queimados um de cada vez. O forno intermitente comum é o mais fácil e de menor custo para se construir. Normalmente, sua forma é retangular ou circular, com lados de até 10 metros e altura de 6 metros aproximadamente. Nesse tipo de forno, é colocada mais de cinquenta milheiros de tijolos, através de uma porta, que é lacrada com barro e tijolo, após ter sido acesa a fornalha. O tempo de cozimento é aproximadamente de uma semana e mais cinco dias para esfriar.

O forno túnel, inventado em 1877, é um forno contínuo com rendimento superior a mais de 50% que o anterior. Seu funcionamento se assemelha a um túnel extenso, em que a fornalha encontra-se no centro, e as peças cerâmicas são colocadas em vagonetas móveis, que se movimentam lentamente, sofrendo um pré-aquecimento no início do trajeto, queimando diretamente ao passar pelo centro e esfriando até sair do túnel. Quando não se deseja o contato da chama com as peças, usa-se, então o forno mufla, que utiliza uma caixa interna que ao redor da qual circula o calor.

A Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, dispõe de seis fornos, mostrados na Figura 27, sendo três fornos tipo chama reversível, cuja estrutura é constituída de câmara com abóboda fechada e com crivos no piso do forno, por onde passam os gases de combustão da queima em direção aos dutos de tiragem para atingirem a chaminé. Dois fornos tipo paulistinha do tipo reversível, que têm forma retangular e dispõe de queimadores laterais e por fim, um forno Hoffman semi-reversível, com formato retangular, cujo interior é constituído por duas longas galerias contínuas, sem paredes transversais e que se encontram nas extremidades do forno. Uma sequência de portas laterais é necessária para permitir o carregamento e descarregamento do forno.

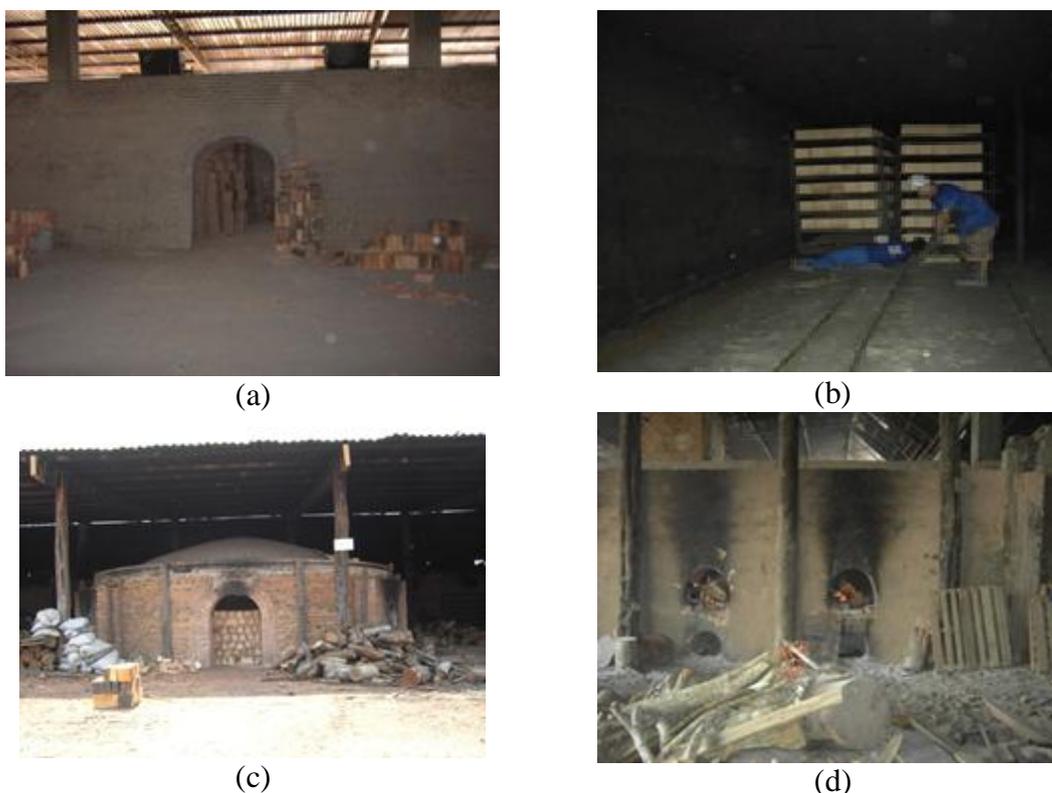


Figura 27. Fornos da Indústria Cerâmica Rio negro: (a) forno tipo paulistinha do tipo reversível; (b) forno Hoffman semi-reversível; (c) forno tipo chama reversível; (d) sequência de portas laterais para carregamento e descarregamento de insumos energéticos ao forno.

Após a queima das peças cerâmicas, ocorre a inspeção visual final e posterior descarte das peças que apresentam estado de não conformidade. O processo produtivo da Indústria cerâmica Rio Negro LTDA, desse ponto até a expedição das peças para comercialização, está exposto na Figura 28.



Figura 28. Processo Produtivo da Cerâmica Rio Negro LTDA: (a) Descarte de peças com ocorrência de má conformação; (b) Queima dos produtos em conformidade; (c) secagem natural das peças cerâmicas; (d) Chaminé oleira; (e) empacotamento das peças cerâmicas em pallets; (f) expedição dos tijolos cerâmicos para comercialização.

Aquém à finalização do processo produtivo, as peças não conformes, que apresentam defeitos decorrentes de falhas do processo, são descartadas, gerando grandes pilhas de resíduo cerâmico, como ilustra a Figura 29.



Figura 29. Pilhas de Resíduo cerâmico resultante de falhas do processo produtivo da Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA.

Outro fator importante para uma queima eficiente é o combustível utilizado para alimentar os fornos. Maciel et al. (2012) afirmaram que a lenha nativa era a principal matéria-prima usada nos fornos de queima de tijolos nas olarias do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru, sendo que a maioria das empresas comprava esse material dos pequenos produtores rurais, os quais não tinham permissão dos órgãos ambientais como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente - IBAMA e o Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas- IPAAM, para desmatar, transportar e comercializar a madeira às olarias. Alguns produtores foram bastante resistentes no processo de troca da base de material de queima de tijolos, pois acreditavam que não conseguiriam alcançar as altas temperaturas necessárias para a queima das peças cerâmicas. Porém, o aumento das fiscalizações e aplicações de multas resultou em uma adequação das indústrias, sinalizando às agências de proteção ambiental, o interesse em enquadrar-se na lógica do “desenvolvimento sustentável”.

O uso do combustível ecológico foi incentivado pelo Projeto Oleiro e Cerâmico, do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE em Amazonas e pelo Programa de Apoio a Pesquisa e Inovação, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, ambos implantados em 2007.

Atualmente, entre os materiais que as olarias de Iranduba e Manacapuru, inclusive a Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA, usam para abastecer os fornos durante a queima das peças cerâmicas, estão os caroços de frutas, como o açaí, abundante na região e de alto poder calorífico, serragem e madeira reciclada de sobras da construção civil, conforme ilustra a Figura 30.



Figura 30. Materiais utilizados para a queima de peças cerâmicas na Indústria cerâmica Rio Negro: (a) pilha de madeira reciclada e (b) pilha de serragem utilizada como matriz energética para os fornos.

Um fator significativo em relação à manutenção das indústrias cerâmicas nos municípios de Iranduba e Manacapuru é o custo relacionado às perdas de produção, que aumentam o preço do produto final, que em um cenário de crise econômica como o atual, oneram mais recursos para a permanência dessas indústrias no local. Outro fator relevante é a especulação imobiliária, que cresceu após a construção da ponte Rio Negro, valorizando economicamente os terrenos, nos quais estão localadas as olarias, resultando em várias negociações de venda.

O resíduo cerâmico coletado na Indústria Cerâmica Rio Negro LTDA foi submetido aos ensaios de caracterização listados na Tabela 5 a seguir

Tabela 5. Ensaios de caracterização do Resíduo Cerâmico.

Ensaio	Método
Granulometria do agregado	DNER-ME 083/98
Determinação da absorção e densidade real de agregado graúdo	DNER-ME 195/97
Determinação da perda de massa após fervura	DNER-ME 230/94
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98
Agregado Graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809/2006
Composição mineralógica	Difração de raios-X

3.2.2.2. Granulometria

A utilização dos resíduos cerâmicos na pavimentação, na forma como são encontrados nas olarias, é quase que impraticável. As sobras são normalmente encontradas ainda em forma de blocos, e não como cacos de pequenas dimensões e a sua aplicação direta, na forma de blocos, em camadas de pavimentos, certamente acarretaria em sérios problemas, em virtude das deformações motivadas pela quebra destes quando as cargas do tráfego começassem a atuar, devido à forma lamelar do resíduo. Para contornar essa situação e aproximar às situações do uso do material descartado coletado, as amostras foram preliminarmente classificadas, para então, ser iniciado o processo de caracterização.

Preliminarmente, as amostras coletadas foram secas ao ar por um período de 24 horas, logo depois passaram por um processo de trituração manual, pois não se dispunha de britador ou triturador específico.

Nas pesquisas relacionadas ao tema, geralmente são utilizados britadores que permitem a obtenção de materiais granulares nas faixas granulométricas de agregados graúdos e miúdos. Inicialmente, tentou-se britar o material em um moinho de bolas convencional, mas o resultado obtido em termos de granulometria não foi o esperado, pois apenas duas frações foram obtidas: uma com grãos maiores e uniformes (praticamente um só diâmetro de partículas), e a outra apenas constituída de pó.

Posteriormente, foi usada a máquina de abrasão Los Angeles, na qual o resultado também não foi satisfatório, devido à fragilidade do resíduo, que apresentou granulometria bastante diversificada, sendo a maioria transformada em pó.

Finalmente, por esses fatores, optou-se pela trituração do resíduo com o próprio cilindro de compactação, visando permitir uma distribuição granulométrica mais contínua, como mostra a Figura 31.



Figura 31. Tratamento preliminar do resíduo cerâmico: A) secagem ao ar livre das peças coletadas; B) quebra das peças coletadas no cilindro de Proctor; C) peneiras utilizadas para colocar o resíduo na faixa granulométrica pré-determinada e D) resíduo cerâmico na faixa granulométrica pré-determinada.

Em seguida, as amostras foram passadas na peneira segundo a faixa granulométrica relacionada ao agregado graúdo e pré-estabelecida previamente: 4,8 mm a 25 mm, conforme ilustra a Figura 32.



Figura 32. Faixa granulométrica do resíduo cerâmico; A) material retido na peneira #3/4" ou 19 mm; B) material retido na peneira #4 ou 4,8 mm; C) material retido na peneira #1/2" ou 12,5mm e D) material retido na peneira #3/8" ou 9,5 mm.

As granulometrias foram obtidas por meio do processo de peneiramento manual. Após essa etapa, o resíduo foi separado por peneira para ser utilizado nas misturas que foi enquadrado na faixa C da norma DNIT 141/2010 – ES, que define a sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente. Essa regularização permite que todas as misturas sejam moldadas com as frações exatas de cada peneira.

Depois de todos os procedimentos acima citados, o resíduo cerâmico foi devidamente acondicionado em embalagens plásticas, em suas devidas frações, de acordo com o ensaio solicitado.

3.2.2.3. Absorção e massa específica do resíduo cerâmico usado como agregado

Este ensaio permite avaliar a variação da absorção de água, em função da temperatura de queima do agregado. A quantidade de água, ou líquido qualquer, capaz de preencher os poros, define uma propriedade importante dos agregados, sobretudo aqueles produzidos sinteticamente, que é como vamos classificar o resíduo cerâmico utilizado nessa pesquisa.

O método de ensaio utilizado neste trabalho foi DNER-ME 195/97 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo, o qual consiste em lavar certa quantidade de amostra, determinada de acordo com a dimensão máxima do agregado estipulado na Tabela 6, sobre a peneira de 4,8 mm de abertura e, em seguida, secar em estufa até constância de massa, à temperatura de 105 °C a 110 °C.

Tabela 6. Massa mínima para amostra de ensaio

Dimensão máxima do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (Kg)
12,5 ou menor	2
19	3
25	4
38	5
50	8
64	12
76	18
100	40
125	75
152	125

Fonte: DNER-ME 195/97

Ao fim deste prazo, o agregado é imerso em água, à temperatura ambiente, por 24 ± 4 horas. O processo está ilustrado na Figura 33.



Figura 33. Ensaio de determinação de absorção e massa específica do agregado graúdo: A) amostra de material seco; B) peso do agregado submerso em água e C) material seco em estufa.

Na sequência, remove-se toda água do agregado e espalha-o sobre um pano absorvente, enxugando as partículas maiores, a fim de se determinar a massa da amostra na condição saturada superfície seca. Imediatamente após, pesa-se o agregado, por meio de um recipiente acoplado em uma balança e submerso em água à temperatura de 23 ± 2 °C. Em seguida, seca-se a amostra em estufa até constância de massa e pesa-se a mesma, a fim de se calcular a massa específica e absorção, pelas etapas de cálculo:

i cálculo da massa específica do agregado, na condição seca

$$\gamma = \frac{A}{B-C} \quad (1)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado, na condição seca, em g/cm³;

A = massa do agregado seco, em g;

B = massa do agregado na condição saturada, superfície seca, em g;

C = leitura correspondente ao agregado imerso em água;

ii cálculo de percentual de absorção do agregado:

$$a = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

α = absorção do agregado, em porcentagem.

A = massa do agregado seco, em g;

B = massa do agregado na condição saturada, superfície seca, em g;

C = leitura correspondente ao agregado imerso em água

3.2.2.4. Perda de massa do agregado após fervura

Este ensaio objetiva verificar a quantidade de desidratação dos agregados, na qual a norma DNER-EM 230/94 – Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada, estabelece um nível de desgaste menor que 6 %. Como o resíduo cerâmico utilizado na pesquisa passou por processo de queima e não pode ser considerado um agregado natural, utilizar-se-á tais parâmetros de referência para esse índice.

O ensaio consiste em encher até a metade um frasco de vidro (Erlenmeyer) de 500 cm³, com amostra do agregado em questão. Adiciona-se 200 cm³ de água destilada no frasco e coloca-se o conjunto, amostra mais frasco mais água destilada, em uma panela de pressão de uso doméstico, adicionando água destilada à panela, até formar uma lâmina d'água de aproximadamente 2 cm. Em seguida, a panela é fechada hermeticamente e levada ao fogo para ferver por 15 minutos, contados do início da pressão. Ao fim este prazo, deixa-se o frasco com a amostra resfriar até a temperatura aproximada de 27 ° C. Na etapa seguinte do ensaio, o frasco é arrolhado e vibrado por 30 minutos em um agitador de peneiras, como mostra a Figura 34, para que então a amostra seja lavada na peneira n° 40, de 0,42 mm de abertura, e seca em estufa com o cuidado de não perder nada do material retido, nem o material passante nesta peneira.



Figura 34. Etapas do ensaio de desgaste após fervura: A) fervura e B) agitação.

Após as etapas concluídas, com os dados obtidos determina-se, então, a percentagem de desgaste do agregado sintético, aplicando-se a equação ;

$$Desgaste = \frac{\text{massa da amostra passante na peneira } n^{\circ}40}{\text{massa total da amostra}} \times 100 \quad (3)$$

3.2.2.4. Desgaste do resíduo cerâmico utilizado como agregado graúdo por Abrasão Los Angeles

A Abrasão Los Angeles é uma medida preliminar da resistência do agregado graúdo à degradação por abrasão e impacto, entretanto, segundo Roberts et al (1996), observações de campo não mostram uma boa relação entre a perda de abrasão Los Angeles e o desempenho. A experiência mostra que muitos destes agregados produzem excelente desempenho mesmo com valor de abrasão Los Angeles alto. O ensaio Los Angeles foi originalmente desenvolvido no meio dos anos 20 pelo Laboratório Municipal de Ensaio da cidade de Los Angeles, Califórnia, EUA.

O Ensaio de Abrasão Los Angeles no resíduo cerâmico utilizado nessa pesquisa foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos, do Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

O método DNER-ME 035/98 - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”, fixa as condições necessárias para a determinação do desgaste a abrasão de agregados como seixo, pedrisco e pedregulho, enquanto o método DNER-ME 222/94 - Agregado sintético fabricado com argila - desgaste por abrasão, fixa as condições necessárias para a determinação do desgaste por abrasão, do agregado sintético de argila calcinada, realizado na máquina Los Angeles. Levando em conta que o agregado utilizado nessa pesquisa é o resíduo cerâmico, resultante de falha de processo produtivo, utilizar-se-á os parâmetros da norma DNER-ME 222/94, a qual estabelece como limite máximo para o desgaste por abrasão o valor de 35 %.

É determinada a composição granulométrica da amostra, cujo resultado permite enquadrá-la em uma das graduações especificadas pela norma. Cada graduação possui quantidades de amostras parciais que devem ser tomadas por peneiras que contemplem, cerca de 5000 g de amostra total.

O material deste estudo foi enquadrado na graduação A, de acordo com a Tabela 7, ou seja, 1250 g da amostra retida na peneira de 25 mm, 1250 g da amostra retida na peneira de 19 mm de abertura, 1250 g da amostra retida na peneira de 12,5 mm de abertura e concluindo 1250 g da amostra retida na peneira de 9,5 mm de abertura.

Tabela 7. Graduação do material para ensaio de Abrasão Los Angeles

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNER –ME 035-98

Anotou-se a soma das massas das frações das amostras de agregado, que foram colocadas na máquina Los Angeles, juntamente com a carga abrasiva, conforme Tabela 8, composta por doze esferas de aço, perfazendo uma carga total de 5000 + 25 g.

A máquina foi fechada e submetida a um ciclo de 500 revoluções do tambor, em uma velocidade de 30 a 33 rpm, conforme mostra a Figura 35.

Tabela 8. Carga abrasiva para o ensaio de abrasão Los Angeles

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: DNER –ME 035-98

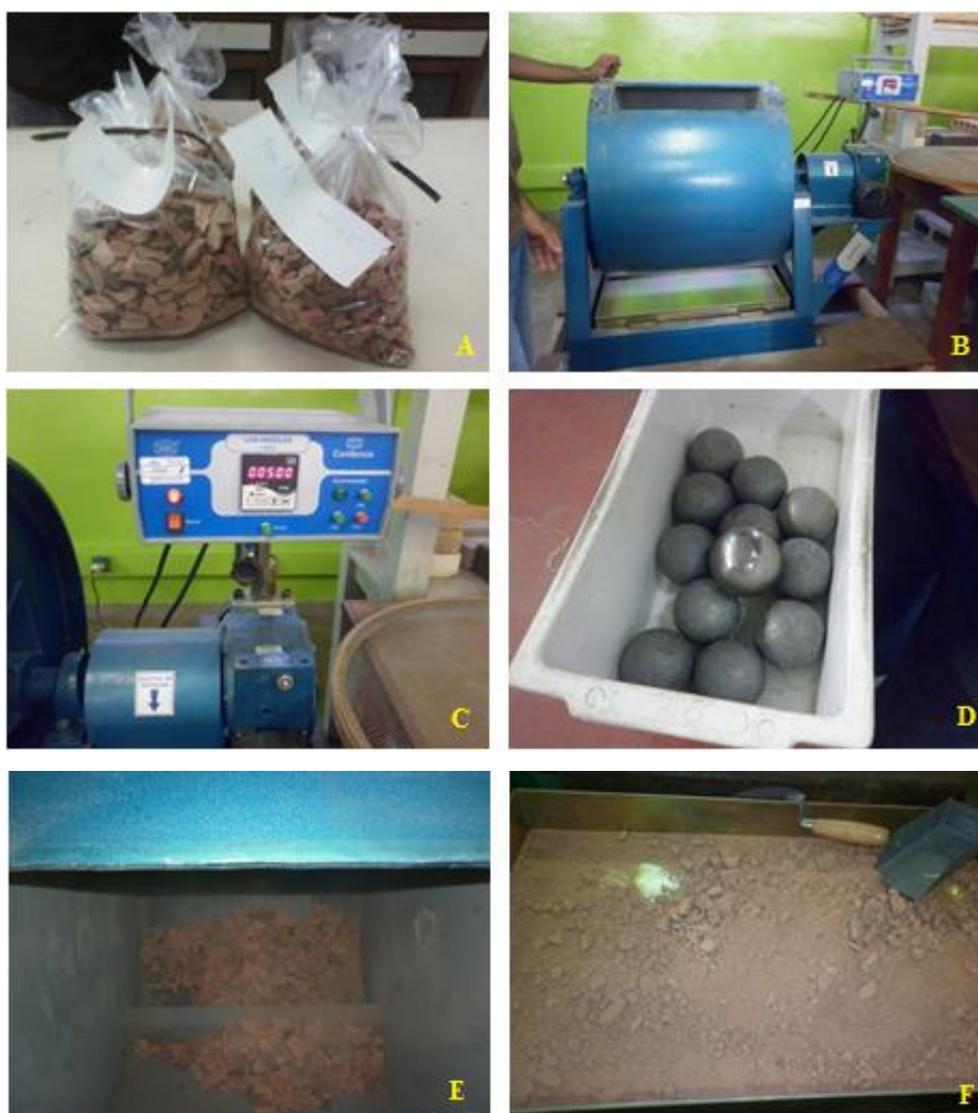


Figura 35. Ensaio de desgaste abrasão Los Angeles: A) Amostras enquadradas na faixa A; B) máquina de Abrasão Los Angeles; C) número de ciclos para o ensaio; D) esferas metálicas utilizadas no ensaio; E) material inserido no tambor e F) material final na bandeja.

Transcorrido este tempo, a amostra foi retirada do tambor, separando-a da carga abrasiva e lavando-a na peneira de 1,7 mm de abertura. O material retido foi seco em estufa até constância de massa. O desgaste por abrasão foi calculado mediante a equação,

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

A_n = abrasão Los Angeles na graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A,B,C,D,E,F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira 1,7 mm).

3.2.2.6. Índice de Forma

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Partículas irregulares ou de forma angular tais como pedra britada, cascalhos e algumas areias de brita tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, devido à sua forma cúbica e afilamento de suas arestas.

Para a determinação do índice de forma dos agregados existem alguns procedimentos: ASTM D 4791/99 – “Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat”, conhecido como Método do Caliper, NBR 7809/06 - Agregado graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro e DNER -ME 086/94 - Agregado – Determinação do Índice de Forma, conhecido como método dos crivos. Além desses, também pode ser utilizada a norma ASTM D 5821 01 – “Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate”, que calcula a quantidade de partículas fraturadas de agregado, o que pode ser relacionado ao índice de forma do material.

O método dos crivos, DNER ME 086/94, fornece um valor adimensional por meio de uma fórmula que relaciona a quantidade de agregado retido em determinado tamanho de crivo circular com a quantidade de agregado retido em um determinado tamanho de crivo retangular. O método do paquímetro, NBR 7809/06, calcula a média ponderada, de acordo com cada fração analisada, das relações entre o comprimento e a espessura de cada uma das partículas de agregado medidas.

Nesta pesquisa, o resíduo cerâmico, na granulometria pré-estabelecida, terá seu índice de forma determinado conforme procedimentos da norma NBR 7809/2006.

A forma do agregado pode ser alongada, esférica, cúbica ou lamelar, sendo que a norma determina que a porcentagem de lamelares deva ser inferior a 30%, pois quebram facilmente ao sofrerem aplicação de carga. A determinação da forma da fração graúda, superior a 4,8 mm, foi feita medindo-se a espessura, largura e comprimento dos grãos para classificação da forma do material. Para este ensaio foram empregados frações do material retidas nas peneiras com aberturas de 25 mm, 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, conforme mostra a Figura 36.



Figura 36. Medição do resíduo cerâmico utilizado como agregados utilizando o paquímetro.

Para execução do método são necessários os seguintes aparelhos: Jogo de peneiras das séries normal e intermediária, paquímetro com resolução de 0,1 mm, aferido e estufa (105 a 110°C), além de que, a amostra do agregado remetida ao laboratório deve ser selecionada de acordo com a NBR 7216/87 - Amostragem de agregados, nas quantidades mínimas de material para realização do ensaio, conforme exposto na Tabela 9.

Tabela 9. Quantidade mínima de material para ensaio de determinação do Índice de forma

Fração granulométrica (abertura da peneira em mm)	Massa mínima da amostra inicial (kg)
19	5
19 e 25	10
25 e 37,5	15
37,5	20

Fonte: NBR 7809/06

A sequência de procedimentos inicia-se com a secagem da amostra em estufa mantida a $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ até massa constante, para posteriormente realizar a análise granulométrica, de forma a dividi-la em frações utilizando as séries normal e Intermediária. Após essa etapa, desprezam-se as frações passantes na peneira com abertura de 9,5 mm e aquelas cujas porcentagens retidas individuais, sejam iguais ou menores que 5%. Cada fração obtida deve ser quarteada até obtenção do número de grãos obtidos na equação

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_1 \dots + F_n} \times F_1 \quad (5)$$

Onde:

200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

N_i - número de grãos a serem medidos na fração i ;

F_i - porcentagem em massa retida individual correspondente a fração i

$F_1 + F_2 + \dots + F_n$ - soma das porcentagens em peso retidas individuais das frações obtidas.

Após essa etapa, deve-se calcular o índice de forma de cada uma das frações ensaiadas, pela média ponderada de quatro das relações entre comprimento e a espessura de todos os grãos medidos. O resultado deve ser arredondado ao décimo mais próximo. A norma NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos, aborda os requisitos gerais para utilização do resíduo da construção civil como material granular e destinado a uso em pavimentos, indica para o índice de forma do agregado graúdo valor inferior a três, parâmetro esse, que será utilizado na discussão dos resultados desse índice.

3.2.2.7. Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)

A difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais. Os raios-X, ao atingirem um material, podem ser espalhados, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios-X, após a colisão com o elétron, muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de raios-X.

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que os efeitos de difração dos raios-x podem ser observados em vários ângulos. A intensidade difratada, dentre outros fatores, é dependente do número de elétrons no átomo. Adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço, de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos. Os dados gerados pelo ensaio são compilados em difratogramas, onde a intensidade dos picos de difração está relacionada com os respectivos ângulos de difração, que variam no decorrer da análise, segundo a Lei de Bragg.

A análise geoquímica em Difração de Raios-X (DRX) foi realizada no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas, no equipamento Lab X_XRD-600 Shimadzu-X ray difractometer. A amostra foi separada em duas frações, constituindo-se inicialmente pela fração de solo passada na peneira de abertura de 2,00 mm e a segunda fração constituída por argila, separada por processo de sedimentação.

3.2.3. AGREGADO MIÚDO (AREIA)

3.2.3.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica da areia padronizada pela norma DNER ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica, foi realizada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas, pelo processo de peneiramento manual. A Tabela 10 mostra as peneiras utilizadas neste ensaio.

Tabela 10: Malha das peneiras do ensaio de granulometria.

Peneira	
Polegadas	Abertura (mm)
3/8	9,5
4	4,8
10	2,0
40	0,42
80	0,18
200	0,074

Fonte: DNER – ME 083/98

3.2.3.2. Massa específica real (Chapman)

O ensaio de massa específica real foi realizado no Laboratório de Pavimentação (LABPAV), da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, de acordo com as normas DNER-ME 194/98 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco Chapman e NBR 9776/87 - Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do Frasco de Chapman, colocando-se cerca de 500 g de areia material, previamente seca em estufa, no frasco de Chapman, com água até a marca de 200 cm³ e agitando o conjunto areia+ água, a fim de eliminar as bolhas de ar, como mostra a Figura 37.



Figura 37. Método do frasco de areia (Chapman)

A massa específica real do agregado miúdo foi calculada pela equação

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (6)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³

L = leitura no frasco Chapman (volume ocupado pelo conjunto água+areia).

3.2.4. MISTURAS SOLO-RESÍDUO

Como já mencionado anteriormente, o procedimento experimental desta pesquisa foi dividido em duas fases: Na primeira fase foram confeccionadas quatro misturas de solo natural com quatro faixas percentuais de resíduo cerâmico, denominadas MSR (Mistura Solo-Resíduo) e na segunda fase da pesquisa mais quatro misturas foram confeccionadas, desta vez com solo estabilizado com 30% de areia e com quatro faixas percentuais de resíduo cerâmico, as MSAR (Mistura Solo Arenoso-Resíduo). Cada mistura de ambas as fases da pesquisa é composta por resíduo cerâmico britado com faixa granulométrica compreendida entre 4,8 mm e 25 mm e usado como agregado graúdo. O diferencial de ambas é que na primeira fase, as misturas contêm apenas solo natural e o resíduo cerâmico, enquanto que, as misturas da fase posterior são compostas por resíduo cerâmico, usado como agregado graúdo, areia, utilizada como agregado miúdo e solo natural. As misturas da primeira e segunda fase da pesquisa foram caracterizadas através dos ensaios listados na Tabela 11.

Tabela 11. Ensaios realizados nas Misturas solo-resíduo e suas respectivas normas.

ENSAIOS	NORMAS
Preparação de Amostras para ensaio de caracterização	DNER-ME 041/94
Análise Granulométrica	DNER-ME 051/94
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade	NBR 7180/94
Solos - Massa Específica dos Grãos	DNER- ME 093/94
Ensaio de Compactação	NBR 7182/86
Determinação do Índice de Suporte Califórnia	DNER-ME 049/94
Ensaio de Módulo de Resiliência	DNER-ME 131/94

3.2.4.1. Dosagem das Misturas

Para se iniciar as dosagens das misturas, primeiramente foi necessário britar e adequar o resíduo cerâmico à faixa granulométrica relacionada ao agregado graúdo, compreendida entre 4,8 mm e 25 mm, segundo a norma DNER-ME 035/95 - Peneiras de malha quadrada para análise granulométrica. Como já mencionada, após algumas tentativas de britagem, optou-se pela britagem do resíduo no cilindro de compactação, utilizando o soquete do ensaio de Proctor.

O soquete utilizado para a britagem foi o mesmo utilizado em experimentos nos quais se faz necessário a aplicação do Proctor Normal e os resíduos que não cabiam no cilindro foram quebrados manualmente com auxílio de um pequeno martelo.

Depois de adequadas à faixa granulométrica determinada, foram iniciadas as dosagens para confecção das misturas Solo-Resíduo (MSR) e posteriormente, das misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR), nas proporções expostas na Tabela 12:

Tabela 12. Percentual de materiais utilizados nas misturas solo-resíduo das duas fases da pesquisa.

Misturas Solo-Resíduo Cerâmico (MSR)		
Mistura	Percentual de Material (%)	
	Solo Natural (SN)	Resíduo Cerâmico (RC)
MSR-1	20%	80%
MSR-2	40%	60%
MSR-3	60%	40%
MSR-4	80%	20%
Misturas Solo Arenoso-Resíduo Cerâmico (MSAR)		
Mistura	Percentual de Material (%)	
	Solo Arenoso (SA)	Resíduo Cerâmico (RC)
MSAR-1	20%	80%
MSAR-2	40%	60%
MSAR-3	60%	40%
MSAR-4	80%	20%

Nota: Solo Arenoso (SA) é a amostra de Solo Natural com acréscimo de 30% areia.

A Figura 38 ilustra as etapas da dosagem das Misturas Solo Arenoso-Resíduo Cerâmico (MSAR), na qual foi aplicado o mesmo procedimento na dosagem das Misturas Solo-Resíduo.



Figura 38. Etapas da dosagem das Misturas Solo Arenoso - Resíduo: A) Pesagem do agregado miúdo (areia); B) Frações pesadas de solo natural, areia e resíduo; C) mistura dos materiais e D) mistura finalizada na faixa pré-determinada.

3.2.4.2. Análise granulométrica das Misturas Solo-Resíduo

A granulometria das misturas solo- resíduo está enquadrada na faixa C da norma DNIT 141/2010 - ES - Base estabilizada granulometricamente, que trata da especificação de serviço para bases estabilizadas granulometricamente e define a sistemática empregada na execução da camada de base do pavimento composta por solo estabilizado granulometricamente.

Após a britagem do resíduo, o mesmo foi passado nas peneiras com aberturas correspondente a 25 mm, 19 mm e 4,8 mm e dosado com os demais materiais, para confecção das misturas com granulometria correspondente à faixa granulométrica dessa pesquisa.

As análises granulométricas foram feitas conforme a norma DNER-ME 051/94 – Solos - Análise granulométrica, utilizando para o peneiramento grosso as peneiras de abertura correspondente a 50,8 mm, 38 mm, 25,4 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2 mm, no agitador de peneiras, como mostra a Figura 39.



Figura 39. Granulometria das Misturas Solo Resíduo: A) peneiras utilizadas para o ensaio de análise granulométrica e B) agitador mecânico de peneiras.

3.2.4.3. Limites de Atterberg das Misturas Solo-Resíduo

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade das misturas solo-resíduo foram realizados seguindo as instruções das normas NBR 6459/84 e NBR 7180/94 , com os mesmos procedimentos adotados para determinação dos limites de consistência do solo natural.

3.2.4.4. Massa Específica Real das Misturas Solo-Resíduo

A massa específica dos grãos referente às misturas solo-resíduo foi determinada através do método de ensaio DNER- ME 093/94, com os mesmos procedimentos adotados para determinação da massa específica real do solo natural.

3.2.4.5. Ensaio de Compactação das Misturas solo resíduo

A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia e através do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia.

Por se tratar de sub-base e base estabilizadas, as misturas foram compactadas de acordo com a norma NBR 7182/86 e de acordo com as normas DNIT 141/2010 – ES e DNIT 139/2010 – ES os padrões que orientam acerca dos padrões para tal aplicação sugerem energia de compactação acima da energia normal, então, na pesquisa em questão, submeter-se-ão as misturas solo-resíduo às energias de compactação intermediária e modificada, respectivamente, sem saturação prévia do RC, devido à alta absorção do resíduo, porém para que o RC não absorvesse a água da mistura a ponto de afetar a adesão dos elementos da mistura durante a compactação, borrifou-se uma pequena quantidade de água sobre o resíduo, pouco antes da mistura dos materiais.

Os procedimentos referentes ao ensaio de compactação são os mesmos descritos no ensaio de compactação do solo natural. Porém, com a dosagem das frações de cada material de sua composição, de acordo com o percentual de cada mistura.

3.2.4.6. Índice de Suporte Califórnia das Misturas Solo-Resíduo

O ensaio CBR ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) estima a resistência ao funcionamento de um solo compactado para sua utilização em camadas de pavimentos.

O ensaio em questão foi feito de acordo com a norma DNER-ME 049/94 e os procedimentos e cálculos para determinação dos resultados foram os mesmos descritos na determinação do Índice suporte Califórnia das amostras de solo natural.

3.2.4.7. Ensaio de Determinação do Módulo de Resiliência (MR)

Segundo Balbo (2007), Módulo de Resiliência (MR) é a capacidade dos materiais de pavimentação de não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga causadora das deformações.

Wesseling (2005) expõe que o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos, quando submetidos a carregamentos de carga repetidos, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas, onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos.

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) simula em laboratório, o que acontece em campo: o comportamento mecânico da mistura que compõe a camada de pavimento, na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada. Nos ensaios triaxiais de carga repetida, uma tensão vertical é aplicada no topo da amostra, sempre no esforço de compressão, de forma cíclica, promovendo um carregamento e descarregamento, dependendo da frequência e intensidade que se deseja, enquanto a tensão confinante permanece constante. Numa fase inicial, promove-se o acondicionamento do material a ensaiar, eliminando ou minimizando os efeitos da deformação plástica. A segunda fase é a realização do ensaio para obtenção do módulo resiliente (MR), com aplicações de pares de tensões-desvio e confinante, medindo-se a deformação específica resiliente. Com ambas as medidas são possíveis obter o módulo para qualquer par de tensões-desvio e confinante, permitindo determinar o comportamento elástico do material, em função das tensões que atuam no pavimento. Os procedimentos para a realização do Ensaio Triaxial Dinâmico, para a determinação do Módulo de Resiliência em amostras de solos, são descritos no método DNER ME 131/94 - Solos – Determinação do Módulo de Resiliência.

Os corpos de prova das quatro Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR) ensaiados no Laboratório de Pavimentos do Departamento de Geotecnia da COPPE/UFRJ, foram moldados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas e transportados via aérea, em condições específicas, para conservação de suas características, enquanto que, os corpos de prova ensaiados em conjunto com o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal de São Paulo, foram moldados in loco. Para moldagem dos corpos de prova enviados a Universidade Federal do Rio de Janeiro, fez-se necessário moldá-los com um cilindro para concreto com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, adaptado no colarinho para que o mesmo não se desprendesse durante a compactação. As misturas foram moldadas aplicando a energia intermediária e a modificada, com 26 e 55 golpes do soquete grande, respectivamente.

Foram moldados seis espécimes de cada mistura, sendo três referentes à energia intermediária e três referentes à energia modificada, moldados com as suas umidades ótimas e massa específica máxima, determinadas no ensaio de compactação.

Foram moldados vinte e quatro corpos de prova. Todos foram embalados com filme plástico, para que não fosse alterada a umidade ótima de cada mistura e então, foram acondicionadas em uma caixa de madeira, com suas devidas proteções, para evitar o deslocamento dos corpos durante o trajeto como mostra a Figura 40.



Figura 40. Etapas da Confeção dos corpos de prova da Mistura Solo Arenoso-Resíduo para envio a COPPE/UFRJ: A) Confeção das misturas; B) corpo de prova moldado; C) corpos de prova embalados com filme plástico e acondicionados em isopor para conservação da umidade ótima e D) corpos de prova embalados com filme plástico e com proteção ao deslocamento, acondicionados na caixa de madeira.

Após a preparação e acondicionamento, os corpos de prova foram enviados, por via aérea, ao Laboratório de Pavimentos do Departamento de Geotecnia da COPPE/UFRJ, para que fosse realizado o ensaio para determinação do Módulo de Resiliência (MR).

Ao chegar a seu destino, os corpos de prova foram desembalados, à medida que foram sendo ensaiados, e então foi colocado o cabeçote sobre o corpo de prova e o mesmo foi envolvido com uma membrana de látex, estando assentado em uma base porosa. Para garantir o confinamento elástico, também foi colocada uma membrana elástica no cabeçote e na base do aparelho, conforme mostra a Figura 41.



Figura 41. Sequência dos procedimentos de preparação do corpo de prova para o ensaio de Módulo de Resiliência: A) Retirada do filme plástico para colocação da membrana de látex; B) posicionamento em base porosa e C) colocação da membrana no cabeçote e base do aparelho.

O Módulo de Resiliência de cada corpo de prova é obtido pelo valor médio de três fases de aplicação de carregamento, que varia de 5 a 10 golpes por fase, de acordo com a porcentagem de variação estabelecida para os valores obtidos nos deslocamentos resilientes, medidos por dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT – “Linear Variable Differential Transduce”, ligados a um microcomputador, que conta com um sistema eletrônico de aquisição de dados, convertendo as leituras realizadas pelos LVDTs em valores digitais e transferindo-as a um microcomputador. A Figura 42 ilustra a montagem do corpo de prova no aparelho de ensaio e ajuste dos transdutores.



Figura 42. Montagem do corpo de prova para realização do ensaio: A) Fixação dos transdutores mecânicos-eletromagnéticos do tipo LVDT no corpo de prova; B) Ajuste do invólucro cilíndrico da câmara na placa superior de vedação e C) Equipamento montado para realização do ensaio.

As condições do ensaio são programadas, com os dados do material, do molde e da energia de compactação utilizada registrada na tela de comando do ensaio, inicia-se então o condicionamento, que é a aplicação de 500 vezes o par de tensões desvio e confinante, com os níveis de tensões apresentados na Tabela 13, a fim de minimizar os efeitos da deformação plástica e do histórico de tensões. O aparelho tem frequência de aplicação de carga de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e a duração da aplicação de carga é de 0,10 segundo e 0,90 segundos de repouso de descarregamento.

Tabela 13. Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
0,07	0,07	2
0,07	0,21	4
0,105	0,315	4

Durante a fase de ensaio para obtenção do módulo, são aplicados os níveis de tensões apresentados na Tabela 14. Aplicam-se cerca de cinco vezes a tensão-desvio, caso o programa registre bom sinal.

Tabela 14. Níveis de tensões utilizados durante o ensaio triaxial dinâmico especificado pela COPPE/UFRJ.

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,155	4
0,069	0,069	2
	0,103	3
	0,137	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

Ao término do ensaio, os valores e os gráficos são verificados no monitor, para serem impressos. Caso todos os pontos tenham sido computados ou nenhuma anomalia verificada, o ensaio pode ser dado como terminado e o corpo-de-prova deve ser retirado imediatamente, para pesagem e secagem em estufa, como mostra a Figura 43.



Figura 43. Finalização do Ensaio de MR: A) pesagem do corpo de prova e B) secagem em estufa até constância de massa.

Após análise dos resultados de módulo de resiliência obtidos previamente na COPPE/UFRJ, a mistura solo-resíduo com melhor desempenho foi novamente analisada acerca de sua resiliência, para que inclusive, fosse realizado o dimensionamento de um pavimento utilizando o método mecanístico com o programa computacional SisPav.

Desta vez, por se tratar de uma amostra menor, os corpos de prova foram moldados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal de São Paulo, onde foram realizados os ensaios. Foram moldados dois corpos de prova para cada tipo de energia utilizada, isto é, dois corpos de prova referentes à energia intermediária, no qual foram aplicados 19 golpes em 5 camadas e dois referentes à energia modificada, com aplicação de 26 golpes em 8 camadas. Todos com dimensões de 10 cm x 20 cm.

Primeiramente, foram dosados todos os materiais da mistura e, então foi acrescentada ao resíduo um pouco de água, para que o mesmo não absorvesse a água da mistura e para que o corpo de prova não fosse moldado em umidade abaixo da ótima.

Após mistura e compactação, os corpos de prova foram extraídos, pesados, colocados em moldes de PVC e colocados em câmara úmida, para preservar sua umidade de moldagem, para posterior realização do ensaio, como mostram as Figuras 44 e 45.

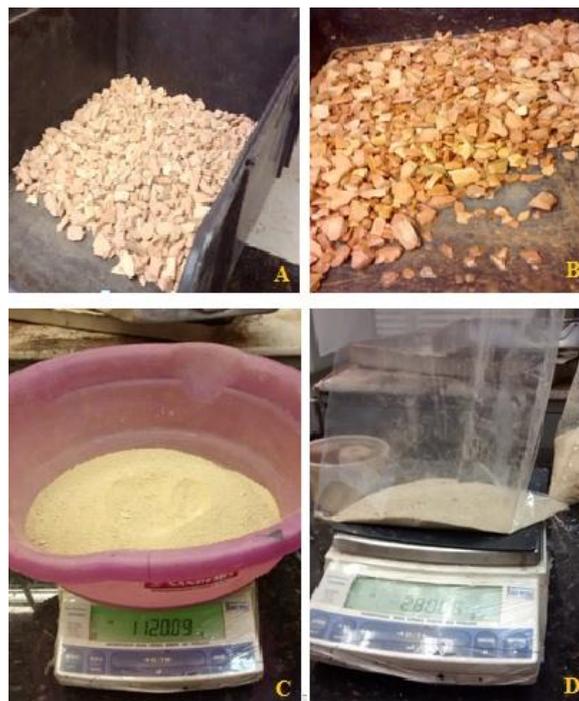


Figura 44. Dosagem dos materiais para preparação dos corpos de prova: A) Pesagem do RC; B) absorção de água acrescentada ao RC antes da moldagem; C) pesagem do SN e D) pesagem da areia.



Figura 45. Confeção dos corpos de prova: A) Compactação e moldagem do CP ; B) extração do CP; C) pesagem do CP e D) colocação do molde de PVC para colocação na câmara úmida.

Após sair da câmara úmida, o corpo de prova é capeado por uma fina camada de gesso nas extremidades para que, ao receber a sequência de cargas repetidas, o corpo de prova não seja danificado, comprometendo o resultado do ensaio. Então, é colocado o cabeçote sobre o corpo de prova, devidamente envolvido pela membrana de borracha, para a colocação do transdutor LVDT, preso ao cabeçote superior e apoiado numa haste guia, que se estende até a base, onde se encontra o parafuso que se aciona externamente à célula, sequência mostrada na Figura 46. Por fim o CP é colocado no invólucro cilíndrico e a placa superior de vedação, os transdutores são ajustados com auxílio do microcomputador, para início do ensaio.

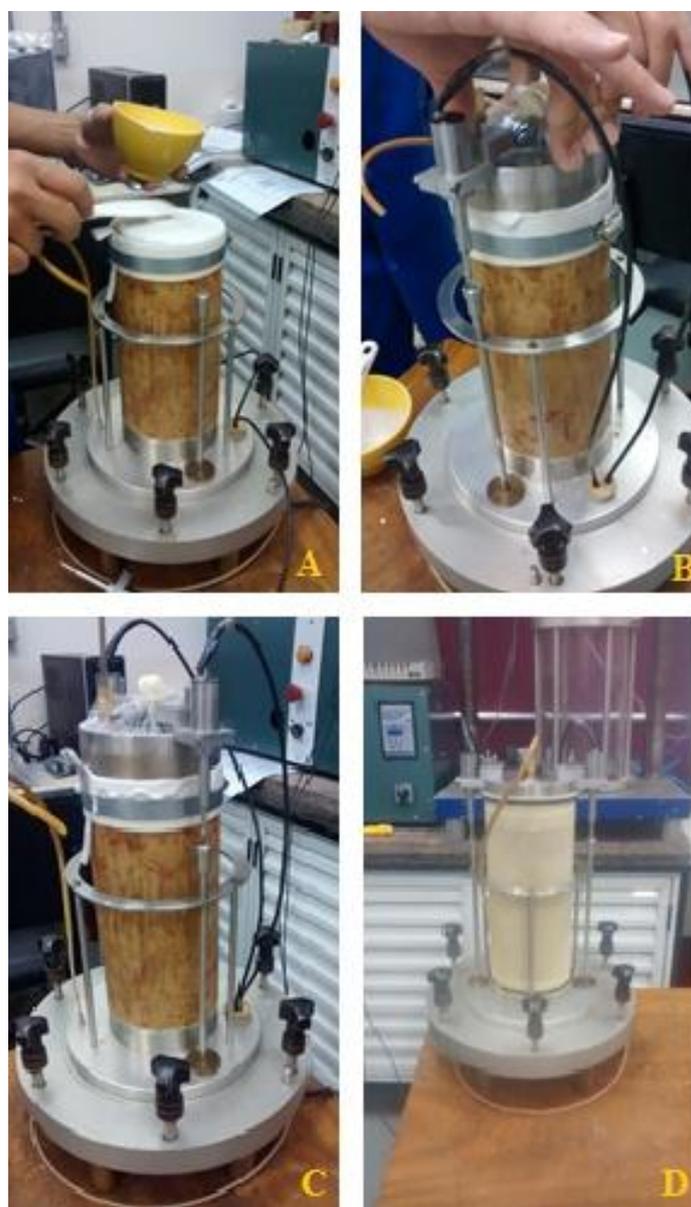


Figura 46. Preparação dos corpos de prova para o ensaio de MR: A) capeamento do CP com gesso; B) retirada do excesso do gesso no CP; C) colocação dos transdutores LVDT e D) colocação da membrana de borracha para colocação do CP na câmara triaxial.

Antes do início do ensaio de determinação do MR, é aplicada no CP, uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar grandes deformações permanentes, que tendem a ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio e reduzir o histórico de tensões no valor do MR. A frequência das cargas repetidas e a duração é a mesma do ensaio realizado na COPPE/UFRJ. São aplicadas 500 repetições para cada tensão desvio, conforme a Tabela 15.

Tabela 15. Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento utilizados pela USP

Tensão confinante σ_3 (kPa)	Tensão desvio σ_d (kPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
68,9	68,9	2
68,9	206,8	4
102,9	309,0	4

Após a fase de condicionamento, deve ser iniciado o processo para determinação do MR, com aplicação de sequência de 18 pares de tensões conforme a Tabela 16, para obtenção das leituras das deformações específicas após 10 repetições de carga.

Tabela 16. Níveis de tensões adotados pela USP, durante o ensaio triaxial dinâmico

Tensão confinante σ_3 (MPa)	Tensão desvio σ_d (MPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
0,021	0,02	2
	0,04	3
	0,06	4
0,035	0,04	2
	0,07	3
	0,10	4
0,050	0,05	2
	0,10	3
	0,16	4
0,069	0,07	2
	0,14	3
	0,21	4
0,103	0,10	2
	0,21	3
	0,31	4
0,138	0,14	2
	0,28	3
	0,41	4

Com os valores das leituras realizadas pelos transdutores LVDT, os dados são observados no monitor, no qual é conectado o equipamento e acompanhado o ensaio, conforme observação nas Figuras 47 e 48, para então inserção dos dados em planilhas elaboradas, para determinação dos módulos de resiliência para cada par de tensões.



Figura 47. Ensaio para determinação do Módulo de Resiliência: A) Monitor para acompanhamento do ensaio; B) CP durante o ensaio triaxial dinâmico; C) ranhuras observadas na membrana de borracha durante o ensaio e D) finalização do ensaio triaxial dinâmico.



Figura 48. Equipamento da USP montado para realização do ensaio para determinação do Módulo de Resiliência e conectado ao microcomputador.

Os dados obtidos através da realização dos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas, que determinam o módulo de resiliência, têm sido utilizados na avaliação de materiais de pavimentação em laboratório, como parâmetro necessário para o cálculo de deformações, posteriormente, utilizados no dimensionamento de pavimentos, utilizando softwares. Atualmente, o módulo de resiliência é um parâmetro-chave para o dimensionamento racional de pavimentos.

Nessa pesquisa, os Módulos de Resiliência (MR) obtidos por meio dos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas para determinação do Módulo de Resiliência, serão utilizados para realização de uma simulação de dimensionamento de pavimentos, utilizando o programa computacional de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav, elaborado por Franco (2007).

3.3. MÉTODO MECANÍSTICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Segundo Medina (2005), a Mecânica dos Pavimentos é uma área da engenharia, que estuda os pavimentos como sendo sistemas em camadas, sujeitos às cargas veiculares.

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa garantir que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não resultará em trincamento da camada de revestimento por fadiga, dentro do período de vida do projeto e que as espessuras das camadas de sua estrutura sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda, considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais.

O volume de tráfego, o peso e pressão das rodas do carregamento, a variação lateral da passagem dos veículos, a qualidade dos materiais, o efeito do clima, da temperatura e da umidade são apenas alguns dos diversos fatores relacionados às deformabilidades excessivas nas estruturas dos pavimentos, e em relação as quais, o projetista não possui valores exatos, elaborando assim, um dimensionamento com parâmetros médios ou característicos, com um risco estatístico adotado como aceitável.

De acordo com Souza (2013), os métodos mecânicos têm princípios de engenharia como base, utilizando dados de desempenho desenvolvidos através da pesquisa sobre diferentes materiais. As estruturas de pavimentos são modeladas para obter tensões e deformações em várias camadas, que estão relacionadas às funções de transferência de propriedades dos materiais utilizados, a fim de prever sua capacidade estrutural.

O projeto mecanicista utiliza um programa computacional para determinar a resposta do pavimento às cargas, em cada uma das camadas do pavimento, solicitando dados da espessura da camada e algumas propriedades do material que compõem as camadas do pavimento. Existem várias pesquisas atuais visando o desenvolvimento de métodos modernos e analíticos de dimensionamento de pavimentos, que variam em relação à complexidade, porém, todos com o objetivo comum de garantir que o pavimento não venha sofrer ruptura estrutural, dentro do período estipulado no projeto.

3.3.1. Sistema computacional SisPav

Segundo Franco (2007) o programa computacional de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav, foi desenvolvido a fim de realizar análises e dimensionamentos de estruturas de pavimentos. Um dos critérios definidos foi a criação uma interface de fácil utilização, com entrada simplificada de dados e com valores sugeridos para fins de anteprojeto.

O SisPav utiliza a teoria da elasticidade de forma simples, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas, por meio do programa AEMC. Duas opções de análise são possíveis de serem realizadas: a primeira delas é o dimensionamento da estrutura, em que o programa analisa os dados de entrada e, por meio de um algoritmo, encontra a espessura da camada que atenda aos requisitos de projeto, e a segunda análise, apenas realiza uma verificação dos dados e requisitos definidos pelo projetista e informa a vida de projeto que a estrutura pode suportar. Em ambas as análises, o programa verifica os danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico ou camadas cimentadas, o projetista pode solicitar as estimativas de afundamento de trilha de roda e danos relativos à deflexão máxima na superfície do pavimento e à tensão limite no topo do subleito.

O método de dimensionamento de pavimentos utilizando o programa SisPav, permite utilizar diversos materiais, conhecidos e especificados, ou ainda, materiais cujo os quais não se conhecem o desempenho em campo. As vantagens encontradas nesse método se resumem em economia de recursos financeiros e ambientais, possibilitando ao projetista utilizar materiais disponíveis próximos às obras que, até então, não poderiam compor uma camada de pavimento por não se enquadrarem em alguma especificação técnica.

O método atende características brasileiras de ensaios laboratoriais, clima, materiais e tráfego, considerando a variação lateral para os diversos eixos na análise de tráfego, sazonalidade das características dos materiais do revestimento ao longo da vida do projeto, utilização de materiais com comportamento elástico, uma base de dados de resultados de ensaios brasileiros para desenvolvimento do modelo de previsão de danos, parâmetros dos materiais e deformações calculadas para o controle de execução no campo, análise de confiabilidade, além das ações climáticas do local onde será construída a estrutura do pavimento, baseado em um banco de informações sobre as temperaturas médias mensais do ar, obtidas das Normas Climatológicas (BRASIL, 1992). Caso o local do projeto não esteja disponível no banco de dados do programa SisPav, as informações poderão ser inseridas de forma manual.

A simulação de dimensionamento de uma estrutura de pavimento típica para região, elaborada e detalhada nessa pesquisa no próximo capítulo dessa dissertação, avaliou o comportamento dos materiais envolvidos no dimensionamento e da estrutura como um todo, mediante uso do programa computacional SisPav.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do solo natural e das oito misturas a serem utilizadas como base e sub-base de pavimentação, além dos resultados referentes ao resíduo cerâmico, utilizado como agregado graúdo, e da areia, utilizada como agregado miúdo, nas quatro misturas da segunda fase da pesquisa, a fim de melhorar algumas propriedades das mesmas.

4.1. RESULTADOS REFERENTES AO SOLO NATURAL

O solo natural objeto deste estudo provém da área da obra do Centro de Convivência da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, como já foi citado no capítulo 3 referente aos materiais e métodos utilizados na pesquisa. Suas características foram conhecidas por meio dos ensaios laboratoriais de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, densidade real, método das pastilhas, Proctor modificado e Proctor intermediário e Índice Suporte Califórnia – ISC, nas referidas energias.

4.1.1. Análise granulométrica do Solo Natural

Após serem preparadas as amostras para ensaio de caracterização, segundo a norma DNER-ME 041/94, a análise granulométrica foi realizada segundo as normas NBR 7181/84, DNER-ME 051/94 e DNER-ME 080/94, pelos processos de peneiramento manual e sedimentação.

A distribuição granulométrica do solo natural está apresentada na Figura 49 e sua faixa granulométrica, na Tabela 17, e através da observação dos mesmos, verifica-se um solo com caráter essencialmente argiloso, com considerável quantidade de finos. Esse tipo de solo possui grãos muito pequenos, apresentam maior retenção de água e conseqüentemente, adquirem plasticidade após contato com uma pequena quantidade de água, no caso de aplicação deste solo em pavimentação, após uma breve chuva.

Quando seco e compactado, sua porosidade diminui consideravelmente, tornando-o rígido. Porém, devido à sua fina consistência, mesmo compactado, ainda permanece suscetível ao excesso de carga, dificultando sua aplicação em pavimentação viária, sem estabilização.

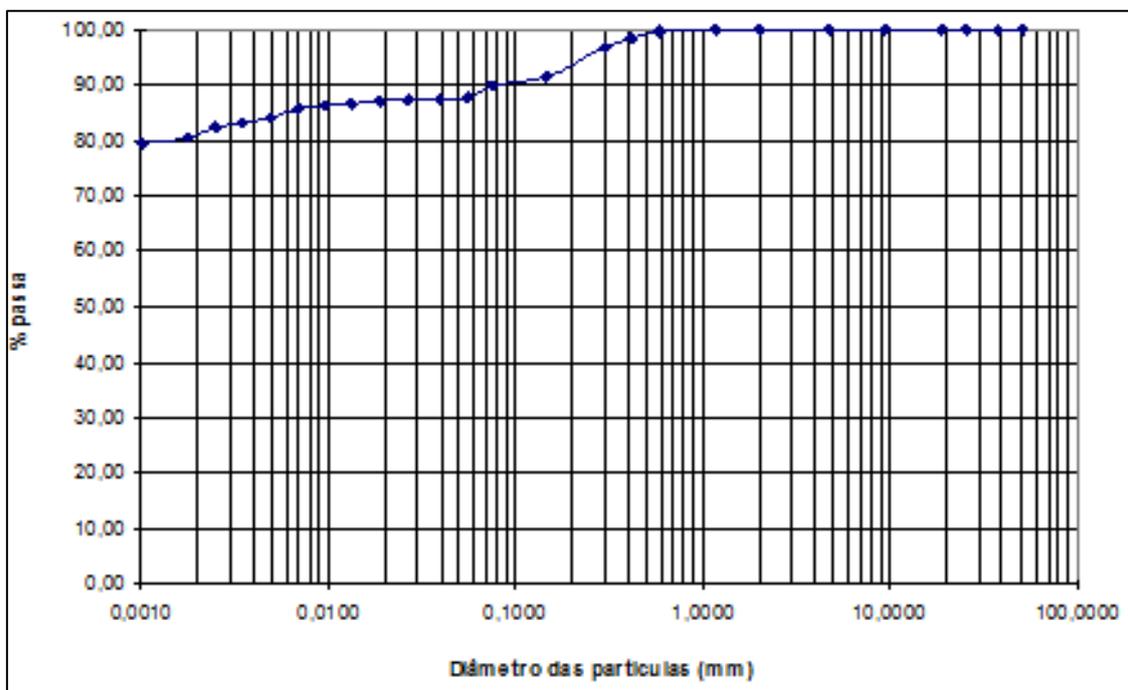


Figura 49. Curva granulométrica do Solo Natural

Observa-se, ainda, na Tabela 17, que o solo a ser usado neste estudo para a confecção de base e sub-base a ser estabilizada granulometricamente, possui quase 90% de sua fração constituinte composta de materiais finos (silte + argila), característica típica de solo amazônico.

Tabela 17. Faixa Granulométrica do Solo Natural

Amostra	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo Natural	0,0	11,24	7,64	81,12

Após verificação dos resultados referentes aos Limites de Plasticidade e Limites de Liquidez, torna-se possível a classificação do solo natural, de acordo com os sistemas de classificação mais empregados na área de pavimentação, que utilizam esses índices como parâmetros.

4.1.2. Limites de Atterberg e Densidade Real

Os ensaios referentes à determinação do Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de plasticidade e Densidade Real, foram realizados a partir das normas NBR 6459/84 e DNER-ME 122/94, NBR 7180/94 e DNER-ME 082/94 e DNER-ME 093/94, respectivamente, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Resultados da caracterização do Solo Natural

Propriedades	Valores
Limite de Liquidez (LL)	80,60 %
Limite de Plasticidade (LP)	42,36 %
Índice de Plasticidade (IP)	38,24 %
Densidade Real	2,61 g/cm ³

O Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) apontam um percentual acima de 80% e de 42%, respectivamente, resultando em um índice de plasticidade de aproximadamente 40%, que de acordo com a Classificação de Jenkins, é um solo classificado como altamente plástico, visto que essa classificação se dá a partir de um índice de plasticidade superior a 15%. Solos muito plásticos têm uma característica essencial para a produção de produtos de cerâmica vermelha, por exemplo, devido à sua capacidade de moldagem, porém não apresentam bom suporte, para uso em pavimentação, sob efeito do “creep” do solo, pela ação do carregamento dinâmico do tráfego.

A densidade real de um solo é relacionada ao peso específico da água e frequentemente necessário para cálculos na mecânica de solos. A maioria dos valores relacionados a este parâmetro, em solos argilosos e siltosos, varia na faixa de 2,6 a 2,9. A densidade real obtida nos ensaios referentes ao solo natural, utilizado nessa pesquisa foi de 2,61g/cm³.

Com os resultados da distribuição granulométrica das partículas e dos limites de consistência do Solo Natural, o mesmo foi classificado como A-7-5, solo argiloso, com mais de 35% do material passando na peneira nº 200, de acordo com o sistema de classificação *Highway Research Board* – HRB, e como CH, argila muito plástica, pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS.

4.1.3. Compactação do Solo Natural

O solo natural foi submetido à compactação nas energias intermediária e modificada, seguindo a orientação das normas NBR 7182/86 e DNER-ME 129/94. Os dados referentes aos resultados da compactação da amostra de solo natural estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Dados referentes à compactação do Solo Natural

Energia de compactação	Umidade ótima (%)	Massa Esp. Máx (g/cm ³)
Intermediária	30,2	1,43
Modificada	28,6	1,47

Abaixo a Figura 50 mostra as curvas de compactação do Solo Natural, referente às energias intermediária e modificada.

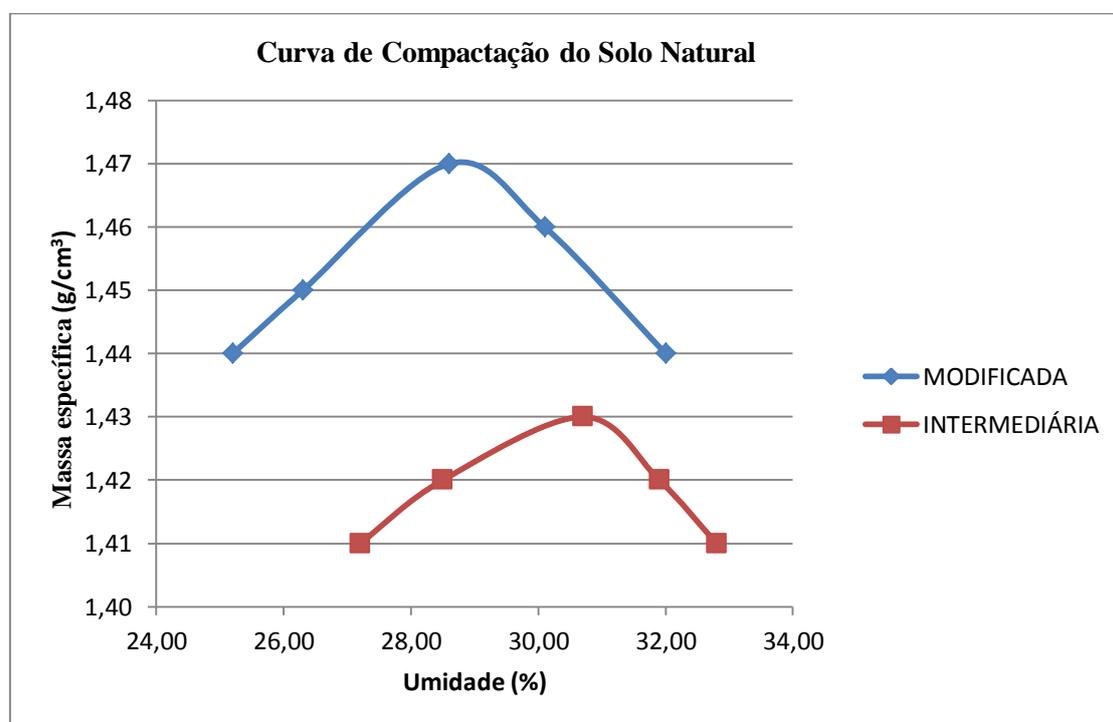


Figura 50. Curvas de compactação do Solo Natural na Energia Modificada e Intermediária

Os solos em estado natural apresentam umidade acima da ótima quando em período de chuvas, e abaixo, quando em períodos de seca. Quando a umidade é baixa, o solo demonstra uma dificuldade maior de ser densificado, apresentando-se rígido. Nessas condições, o solo compactado tem baixa densidade e altos valores de índice de vazios. Ao acrescentar-lhe água, o solo se torna mais trabalhável e o ponto no qual se encontra melhor condição de trabalhabilidade, ou seja, quando com a energia de compactação empregada ocorre o maior agrupamento das partículas do solo, expelindo uma maior quantidade de ar. Essa condição é denominada como ponto de densidade máxima e teor de umidade ótima.

Através da observação da Figura 50, é possível perceber que o Solo Natural, quando compactado com a energia modificada, apresenta maior compactação e maior densidade máxima, devido o maior agrupamento entre suas partículas, como era se se esperar. Essa condição também solicita uma menor quantidade de água para compactação, otimizando o empreendimento, com relação ao custo e desempenho do mesmo no caso de suporte.

4.1.4. Índice Suporte Califórnia - ISC

A compactação de solos permite maior agrupamento de partículas devido à aplicação da energia solicitada, em relação à quantidade de água correspondente a umidade ótima; esses parâmetros, depois de aplicados e submetidos ao ensaio de ISC, fornecem o valor correspondente à expansão e suporte ao carregamento de cargas, em condições de saturação, um parâmetro importante de verificação para sua aplicação em pavimentação.

Os dados referentes a esses parâmetros estão expostos na Tabela 20 e suas curvas de penetração estão expostas nas Figuras 51 e 52.

Tabela 20. Resultados referentes ao Suporte e Expansão do Solo Natural

Energia de Compactação	Expansão (%)	ISC (%)
Modificada	0,15	21,6
Intermediária	0,23	9,82

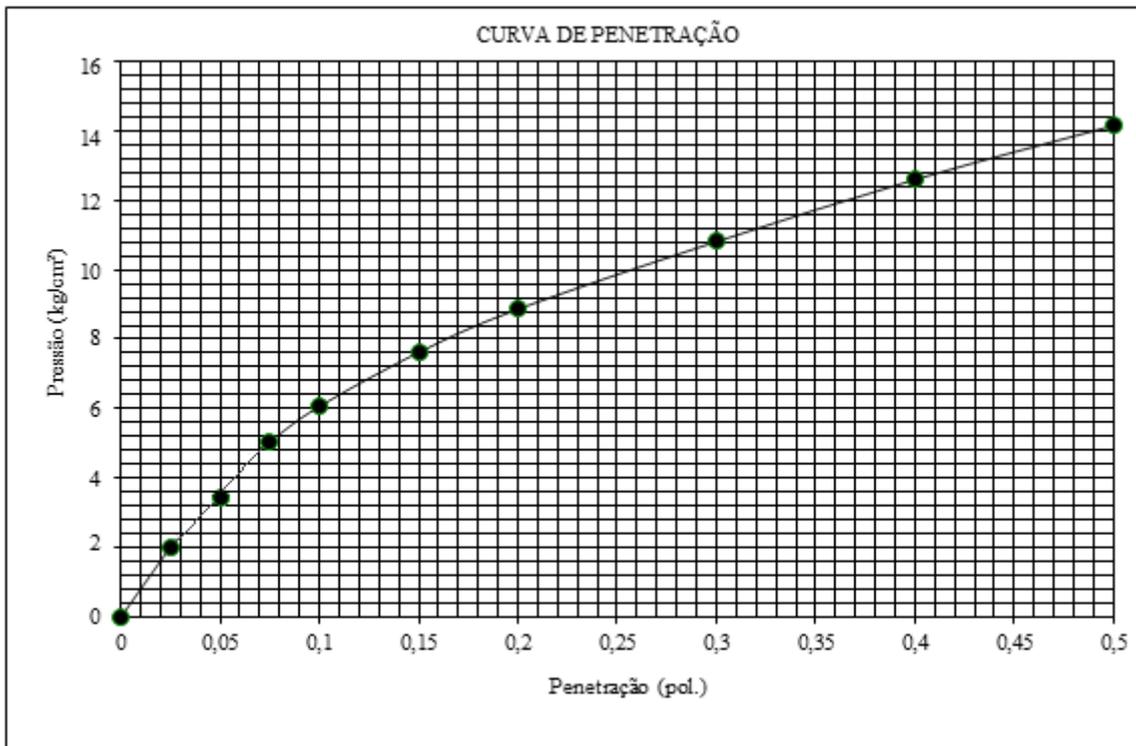


Figura 51. Curva de penetração do Solo Natural na Energia Intermediária

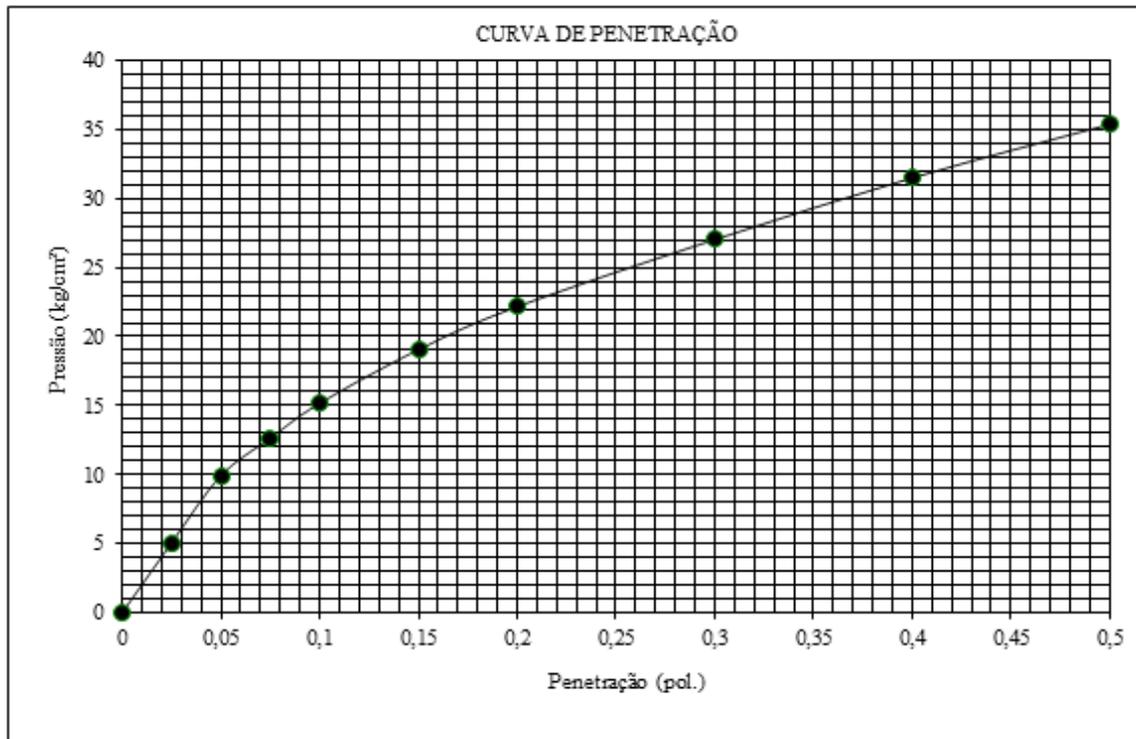


Figura 52. Curva de penetração do Solo Natural na Energia Modificada

Os valores obtidos de ISC, referentes ao solo natural são de 21,6%, em relação à energia modificada e de 9,82 %, em relação à energia intermediária, relacionados às expansões de 0,15 % e 0,23%, respectivamente. Com base na observação desses valores conclui-se que a amostra de solo natural não apresenta parâmetros favoráveis para aplicação em pavimentação, por apresentar valores muito aquém aos solicitados nas normas DNIT 139/2010-ES e DNIT 141/2010-ES, elaboradas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT e que solicitam que, para aplicação em camadas de pavimento, solos devem apresentar ISC superior a 20% no caso de sub-bases e 60% ou 80% em casos de bases, de acordo com o número N de solicitações, e expansões inferiores a 1% e 0,5% respectivamente.

4.1.5. Método das Pastilhas (MP)

O solo utilizado para realizar o ensaio pelo método das pastilhas é o mesmo solo denominado no decorrer desta dissertação pela terminologia “solo natural” e no qual foi realizado o ensaio de classificação pelos sistemas de classificação da HRB e SUCS, baseados na composição granulométrica e Limites de consistência do solo. O mesmo teve seu local de coleta, procedimentos e resultados referentes ao ensaio, apresentados e discutidos em itens anteriores.

Segundo Godoy e Bernucci (2002), a classificação obtida por meio do Método das pastilhas não utiliza a granulometria e os limites de Atterberg como parâmetros de classificação, como as classificações geotécnicas tradicionais, separando os solos tropicais em duas grandes classes: os de comportamento laterítico (L) e os de comportamento não laterítico ou saprolítico (N).

Os solos lateríticos são subdivididos em três grupos: (1) LA - areia laterítica quartzosa; (2) LA' - solo arenoso laterítico e; (3) LG' - solo argiloso laterítico. Enquanto que, os solos de comportamento não laterítico ou saprolítico são subdivididos em quatro grupos: (1) NA – areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico; (2) NA' – misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso); (3) NS' – solo siltoso não laterítico e; (4) NG' – solo argiloso não laterítico.

Os resultados do Solo Natural, em relação a sua consistência consideraram-na como muito plástica, como nas classificações anteriores. Em relação às expansões e trincas foi verificada maior ocorrência de ambas, na superfície da amostra sem anel, cuja contração foi de 17,94 mm e a penetração de 4 mm.

No geral, a contração média do solo natural foi de 18,11 mm, índice que, depois de aplicado na equação correspondente para obtenção do coeficiente c' , associado à argilosidade do solo, encontrou-se o resultado de 1,95. A penetração média foi de 3,3 mm.

Após associação desses valores, no ábaco correspondente à classificação MCT, foi observado que o Solo Natural encontra-se classificado no grupo N, referente aos solos de comportamento não laterítico, mais precisamente no subgrupo NG', que compreende os solos saprolíticos argilosos.

Classificam-se nesse grupo, os solos superficiais pedogenéticos não lateríticos, bem como muitos solos transportados. Geralmente, as aplicações do solo classificado como NG' se restringem a subleito e aterro compactado, conforme a tabela específica de aplicações de solo da metodologia MCT, a qual não será descrita ou apresentada nesse trabalho.

4.2. RESULTADOS REFERENTES AO RESÍDUO CERÂMICO

O processo produtivo que originou o resíduo cerâmico, objeto deste estudo, assim como sua procedência e pontos de coleta para posterior análise, foram descritos no capítulo referente aos materiais e métodos dessa dissertação.

As características do resíduo cerâmico, utilizado como agregado graúdo em camadas de sub-base e base de pavimento foram mensuradas e conhecidas, por meio dos ensaios laboratoriais de granulometria, absorção e densidade real, determinação da perda de massa após fervura, desgaste por abrasão Los Angeles, além de sua composição mineralógica através da técnica de Difração de Raios-X (DRX).

Os resultados referentes a cada procedimento realizado estão descritos no decorrer deste capítulo.

4.2.1. Análise granulométrica do resíduo cerâmico

A análise granulométrica foi realizada segundo a norma DNER-ME 083/98 - Agregados – Análise Granulométrica - Método de Ensaio.

A granulometria foi ajustada na faixa C da norma DNIT 141/2010 – ES, que define a sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento, utilizando solo estabilizado granulometricamente. Essa regularização permite que todas as misturas sejam moldadas com as frações exatas de cada peneira, fim de adequar o agregado a ser utilizado nas misturas da primeira e segunda fase da pesquisa de acordo com as especificações da norma. A distribuição granulométrica do solo natural está disposta na Tabela 21.

Tabela 21. Faixa Granulométrica do Resíduo cerâmico

Peneira (mm)	2" (50,8 mm)	1" (25,4 mm)	3/8" (9,5mm)	4 (4,8mm)
(%)	-	15	50	35

4.2.2. Determinação da Absorção e Densidade real de Agregado Graúdo

Utilizou-se para determinar a absorção e densidade real do RC, o método de ensaio do DNER-ME 195/97 - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Observa-se que o resíduo cerâmico mostrou-se bastante absorcivo e com massa específica aparente reduzida. Devido à elevada porosidade dos grãos e de partículas finas na composição do RC, a determinação da massa específica aparente deste agregado, desde graúdos até os finos, utilizando os procedimentos normalmente empregados aos solos e agregados naturais, não se mostraram aplicáveis, levando a necessidade um procedimento apropriado para este tipo de agregado.

Em relação à absorção, o RC apresentou como menor valor 14,7%; o maior valor foi de 16,8%; o valor médio foi de 15,1%. O método desenvolvido para esta finalidade foi baseado na determinação da absorção na condição saturado superfície seca, a partir do qual é possível a determinação da massa específica aparente do material poroso e sua absorção, cujos resultados constam da Tabela 22.

Os resultados estão condizentes aos valores de massa específica e de absorção dos materiais de cerâmica vermelha citados por Santos (1975) e similares aos valores obtidos por Dias (2004), com o agregado reciclado de telha cerâmica (ART).

Tabela 22. Absorção e Massa Específica do Resíduo Cerâmico

Absorção (%)	Massa específica (g/cm ³)	
	Aparente	Real
15,1	1,81	2,62

O valor da capacidade de absorção calculado considerando a média obtida foi de 15,1%, valor elevado se comparado com valores de absorção dos agregados naturais empregados tradicionalmente na construção civil, como britas de basalto, de granito, cascalhos, etc. Do ponto de vista do emprego em camadas de pavimentação, no entanto, o alto valor da absorção requer apenas que o material a ser utilizado deverá estar saturado, para não interferir nas condições de compactação, fator que pode ser considerado positivo, pois o RC atinge percentual de absorção superior a 80% da absorção máxima, nas primeiras horas.

4.2.3. Determinação da perda de massa após fervura

Este ensaio foi realizado segundo os procedimentos contidos na norma DNER-ME 230/94 – Agregado sintético graúdo de argila calcinada, que estabelece 6% como limite máximo de desgaste, para agregados calcinados, como o Resíduo Cerâmico (RC), utilizado na pesquisa, passou pelo processo de queima durante sua produção, a correlação entre os parâmetros é válida. O RC devidamente adequando na faixa de agregado graúdo utilizado nessa pesquisa apresentou desgaste inferior a 1%, valor este muito aquém do máximo permitido pela especificação, o que demonstra desempenho satisfatório.

4.2.4. Desgaste por Abrasão Los Angeles

Quando submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles normalizado pela norma DNER-ME 035/98, que estabelece os parâmetros necessários para a determinação do desgaste a abrasão de agregados em geral, como seixo e pedra britada, os mesmos não devem apresentar desgaste superior a 55%. Vale ressaltar ainda, que nas normas DNIT 139/2010-ES e DNIT 141/2010-ES que especificam parâmetros referentes aos materiais a serem utilizados em bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, esse desgaste também não pode ser superior a 55%.

Conforme a norma DNER 222/94 - Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão, o mesmo não pode ser superior a 35%, visto que a o resíduo cerâmico em questão passou por processo similar de produção este é um parâmetro a ser considerado. As amostras ensaiadas apresentaram desgaste de 35,4%, apontando que a aplicação do RC, como agregado graúdo em bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente é preliminarmente viável, apesar de se mostrar com abrasão superior no último parâmetro.

4.2.5. Composição mineralógica

Uma microanálise do resíduo cerâmico foi realizada, por meio do ensaio de difração de raios-X. A determinação desses elementos permitiu avaliar a potencialidade ou não de propriedades piroexpansivas da matéria-prima. No difratograma exposto na Figura 53, observa-se a presença da caulinita e de quartzo, pela grande concentração sílica livre (SiO_2). O quartzo é responsável pela propriedade de contração durante a secagem das peças cerâmicas e formadora de fase vítrea, enquanto que ambos os elementos, indicam silicatos, que são argilominerais, e as micas e feldspatos, que são fundentes responsáveis por conferir resistência mecânica, quando sinterizados com temperaturas entre 950 °C e 1000° C.

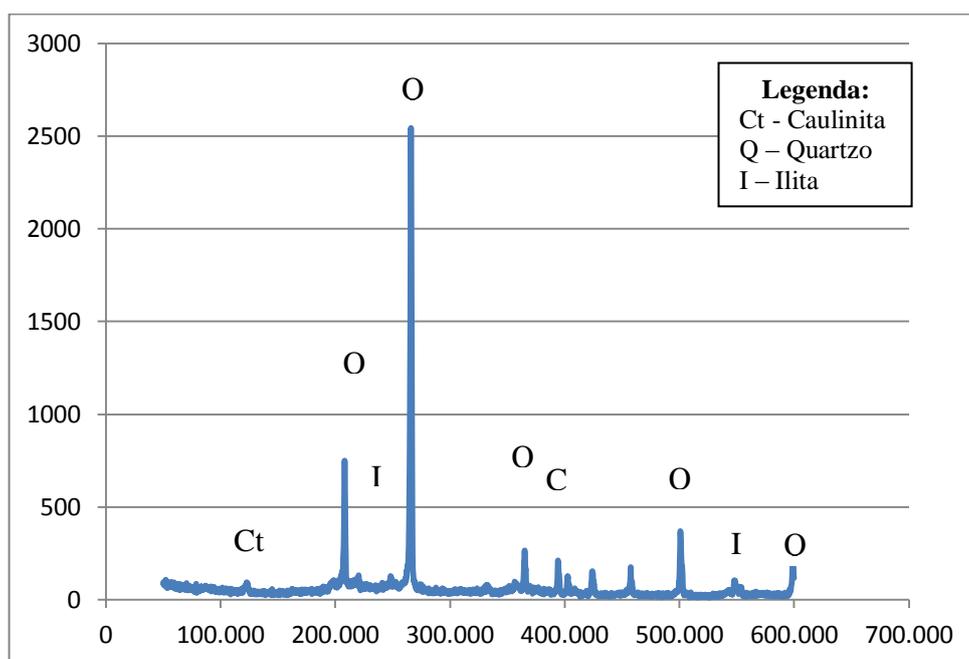


Figura 53. Difratograma da amostra de Resíduo Cerâmico

O Óxido de Alumínio, Al_2O_3 , também encontrado em grande quantidade, está associado principalmente à caulinita, minerais abundantes nesta região. Os dois elementos de maior concentração na amostra analisada foram SiO_2 e Al_2O_3 , elementos estes característicos das massas para produção da cerâmica vermelha.

Pode-se observar também que não foram encontrados argilominerais expansivos como a montmorilonita. Porém, foram observados picos de difração característicos de illita, mineral que apresenta estrutura semelhante à da muscovita, sendo menos expansiva que a montmorilonita.

Estudos do Serviço Geológico do Brasil (2006) revelam que as argilas, extraídas para composição da massa cerâmica dos produtos de cerâmica vermelha, do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru, são constituídas basicamente por quartzo, caulinita, illita/muscovita, esmectita, feldspato e hematita, portanto, os resultados da difração de raios-X se assemelham com os dados de composição.

4.2.6. Índice de Forma

O ensaio de índice de forma de agregado graúdo pelo método do paquímetro foi realizado de acordo com a NBR 7809/2006 e os parâmetros de viabilidade técnica em relação aos requisitos gerais para utilização do resíduo da construção civil, como material granular e destinado a uso em pavimentos, conforme a norma NBR 15116, que indica para o índice de forma do agregado graúdo, valor inferior a três. Em relação à forma dos grãos, Mehta (1994) afirmou que a norma NBR 7389/92 classifica o formato dos grãos do agregado por observação visual, classificando tanto partículas angulosas quanto arredondadas, em alto e baixo grau de esfericidade, conforme se aproximem ou não da forma esférica.

Os resultados obtidos, referentes ao índice de forma do RC, na forma de agregado graúdo reciclado, foram de 2,1, de acordo com os parâmetros da NBR 15116, apresentando-se não lamelar e em relação à norma NBR 7389/92, a amostra apresentou forma angulosa ou ainda, cúbica. O índice de forma do RC utilizado nessa pesquisa atende aos requisitos para emprego como agregado, pois, tais formas são ideais para agregados britados, melhorando a aderência e o empacotamento do material, porém, independente da forma, a interação entre eles deve ser observada, para obtenção de maior atrito interno e maior estabilidade da mistura.

4.3. RESULTADOS REFERENTES AO AGREGADO MIÚDO (AREIA)

Os resultados obtidos, referentes à areia usada neste estudo, estão expostos na Tabela 23 e na Figura 54. Observando ambas, verifica-se uma concentração granulométrica maior na faixa compreendida entre 0,42 mm e 0,18 mm, concluindo-se que 42% da fração desse material é consideradas areia grossa e 56% como areia fina, constituindo-se como agregado de graduação aberta, que conforme Bernucci et al. (2008) apresenta distribuição granulométrica contínua, porém, com menor percentual de material inferior a 0,075mm, para preencher os vazios entre as partículas maiores. Nas frações de menor tamanho a curva granulométrica é abatida e próxima de zero.

Tabela 23. Resultados da caracterização da areia

Ensaio	Método	Resultado	
Massa esp. real	DNER-ME 194/98	2,63 g/cm ³	
Granulometria	DNER-ME 083/98		
Peneira	Abertura (mm)	% retida em massa	% passante em massa
4	4,8	0,82	99,18
10	2,0	3,29	95,89
40	0,42	38,39	57,50
80	0,18	40,56	16,94
200	0,074	15,64	1,28

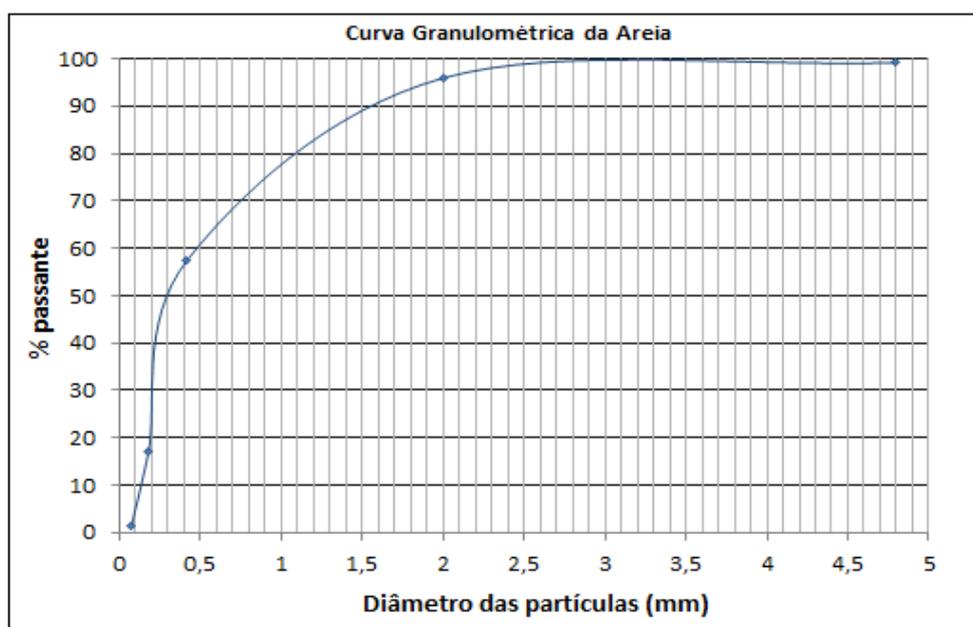


Figura 54. Curva granulométrica da areia

4.4. MISTURAS SOLO-RESÍDUO (MSR)

Nesse item serão expostos os resultados referentes às quatro Misturas Solo-Resíduo (MSR), confeccionadas na primeira fase da pesquisa. Cada mistura é composta por resíduo cerâmico (RC), britado com faixa granulométrica compreendida entre 4,8 mm e 25 mm e usado como agregado graúdo e solo natural. As misturas foram caracterizadas através dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg, Massa específica, Proctor modificado e intermediário, Índice Suporte Califórnia nas mesmas energias de compactação e Modulo de Resiliência.

4.4.1. Granulometria das MSRs

A sequência dos procedimentos de ensaios realizados nas misturas foi a mesma realizada no solo natural. As distribuições granulométricas referentes às misturas da primeira fase da pesquisa estão dispostas nas Figuras 55, 56, 57 e 58, respectivamente.

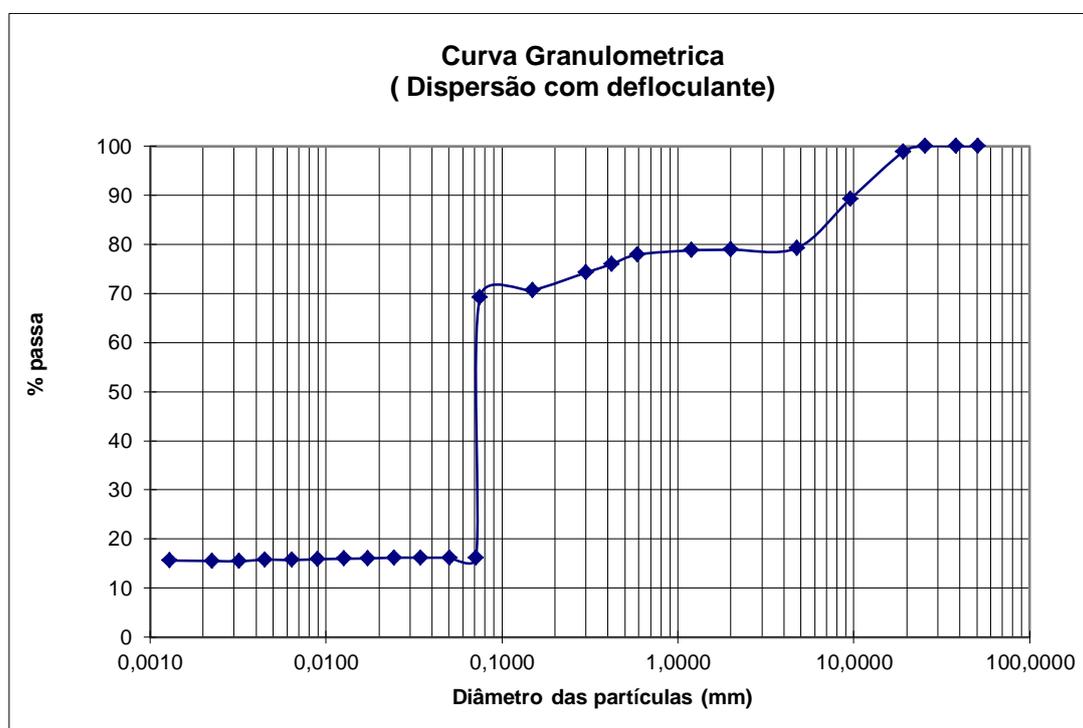


Figura 55. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 1 (MSR-1)

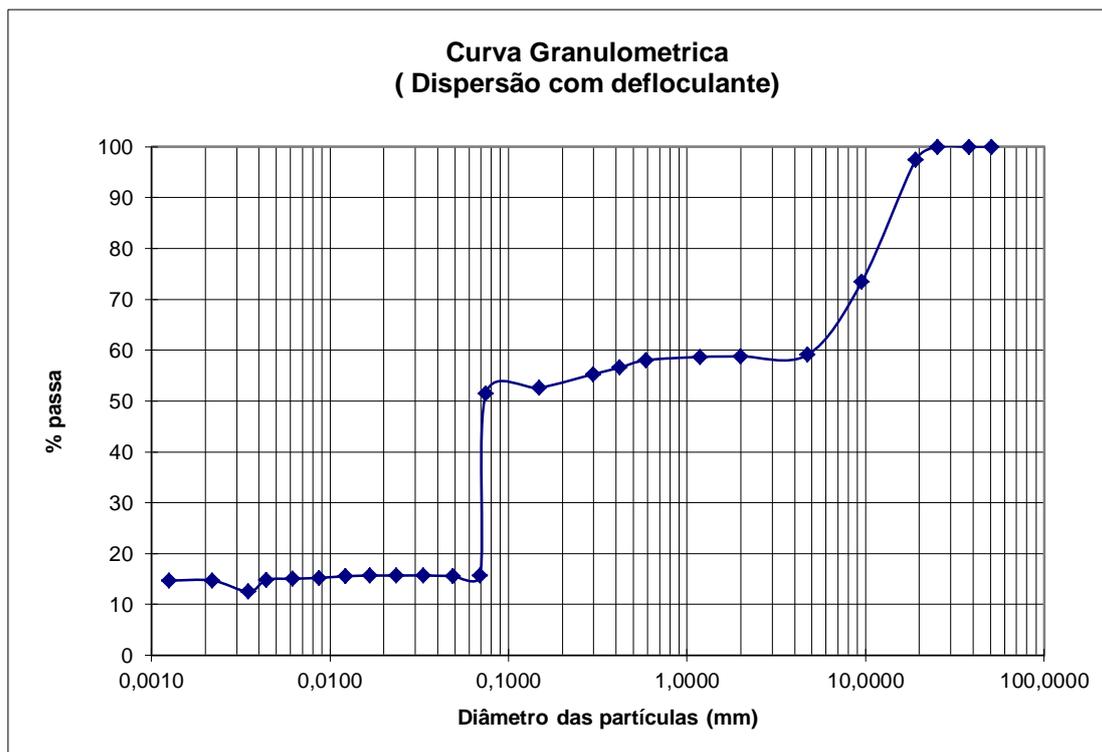


Figura 56. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 2 (MSR-2)

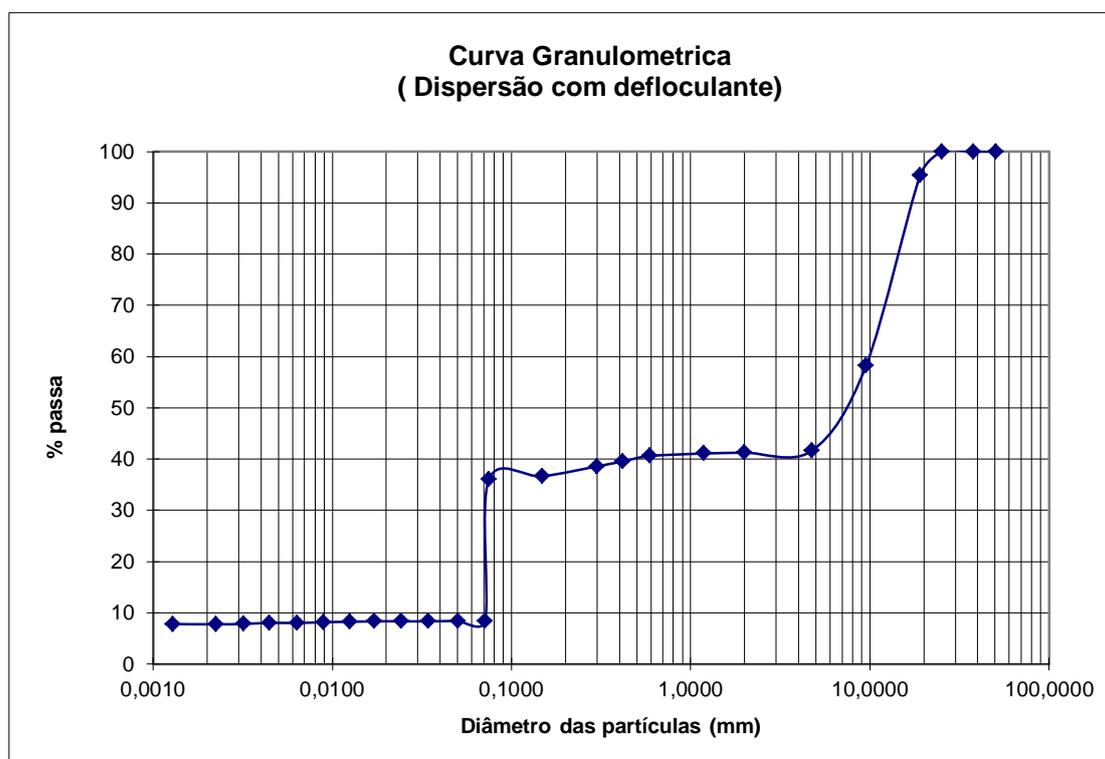


Figura 57. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 3 (MSR-3)

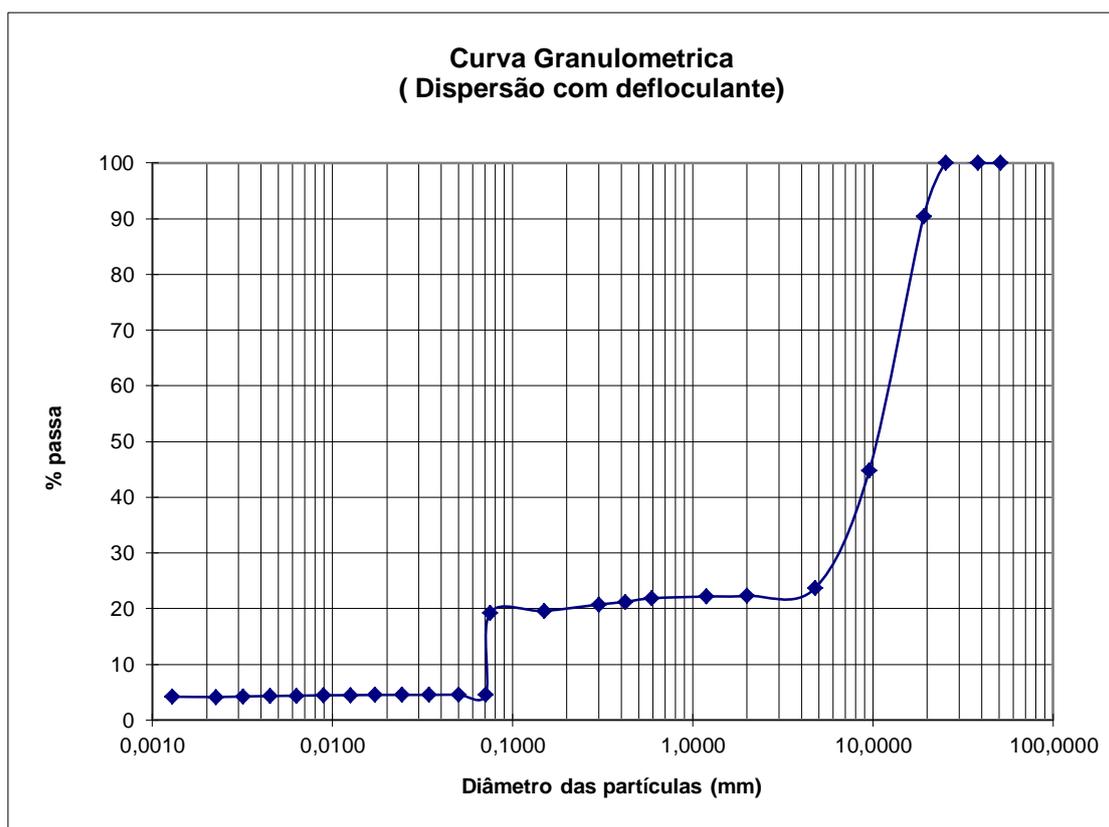


Figura 58. Curva granulométrica da Mistura Solo-Resíduo 4 (MSR-4)

As curvas granulométricas apresentadas nas figuras 55 a 58 demonstram um solo com caráter argiloso, com variações de finos de 37,2% a 10,5% e percentuais de areia que variam de 11,9% a 41,8%. Observa-se também uma queda abrupta na granulometria de todas as misturas, que diminui à medida que o percentual de RC aumenta. Esse fator sugere a inclusão de material com granulometria intermediária, que na pesquisa em questão se deu por acréscimo de agregado miúdo (areia) ao SN, no percentual de 30%, para compor as misturas da segunda fase da pesquisa.

4.4.2. Limites de Atterberg das MSRs

Os Limites de Consistência do solo, tal como os Limites de Liquidez e de Plasticidade, e o Índice de Plasticidade das Misturas Solo-Resíduo são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24. Limites de Atterberg das Misturas Solo-Resíduo

Propriedades	MSR-1	MSR-2	MSR-3	MSR-4
Limite de Liquidez (LL)	81,20%	79,66%	76,92%	74,14%
Limite de Plasticidade (LP)	42,18%	40,08%	38,97%	37,35%
Índice de Plasticidade (IP)	40,02%	39,58%	37,95%	36,79%

Vários autores consideram como sendo de alta plasticidade, os solos que apresentam IP entre 20% e 40%. As misturas da primeira fase da pesquisa apresentam índices de Plasticidade que variam de 36,79% a 40,02% e verifica-se que, à medida que se aumenta a quantidade de resíduo cerâmico na mistura, o IP da mesma é reduzido, uma vez que o RC aumenta a textura da mistura como um todo.

4.4.3. Massa específica das MSRs

O resultado referente à massa específica das misturas solo-resíduo foi obtido por meio do método do Picnômetro, normalizado pela norma DNER-ME 093/94 e estão dispostos na Tabela 25.

Tabela 25. Massa específica das Misturas Solo-Resíduo

MSR-1	MSR-2	MSR-3	MSR-4
2,54 g/cm ³	2,55 g/cm ³	2,57 g/cm ³	2,59 g/cm ³

Observando a Tabela 25, verifica-se que a MSR-1 apresenta massa específica igual a 2,54 g/cm³ enquanto as misturas MSR-2, MSR-3 e MSR-4 apresentam massas específicas de 2,55 g/cm³, 2,57 g/cm³ e 2,59 g/cm³ respectivamente, ou seja, conforme se eleva a proporção de RC à mistura, há um aumento no valor da massa específica da mesma, devido a maior densidade que o RC dispõe, além de melhor preenchimento de vazios, juntamente com os demais elementos constituintes da mistura.

4.4.4. Compactação das MSRs

As misturas Solo-Resíduo foram submetidas às energias de compactação intermediária e a modificada, devido às especificações das normas vigentes referentes à aplicação das mesmas como sub-base e base de pavimentação, respectivamente.

Os dados relacionados à compactação das amostras estão dispostos na Tabela 26 e suas curvas de compactação, em ambas as energias de compactação estão apresentadas nas Figuras 59, 60, 61 e 62.

Tabela 26. Dados referentes à compactação das misturas Solo-Resíduo: Teor ótimo de umidade (W_{ot}) e Massa específica seco máximo (γ_{dmax})

Mistura Solo-Resíduo	Energia Intermediária		Energia modificada	
	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
MSR-1	27,79	1,44	25,96	1,53
MSR-2	22,90	1,52	24,16	1,59
MSR-3	19,39	1,53	22,79	1,60
MSR-4	16,79	1,57	18,96	1,63

Através da observação dos dados referentes à compactação das misturas solo resíduo e dos gráficos de suas curvas de compactação, é possível perceber que, à medida que adiciona-se RC à mistura e aumenta-se a energia de compactação, menor é a quantidade de água utilizada na mistura para esse fim e, conseqüentemente, há um aumento da massa específica máxima. Esse comportamento é similar em ambas energias de compactação, porém, na energia modificada, é necessário uma quantidade ainda menor de água, para atingir a umidade ótima, em relação a mesma proporção de material que compõe a mistura, para compactação na energia modificada.

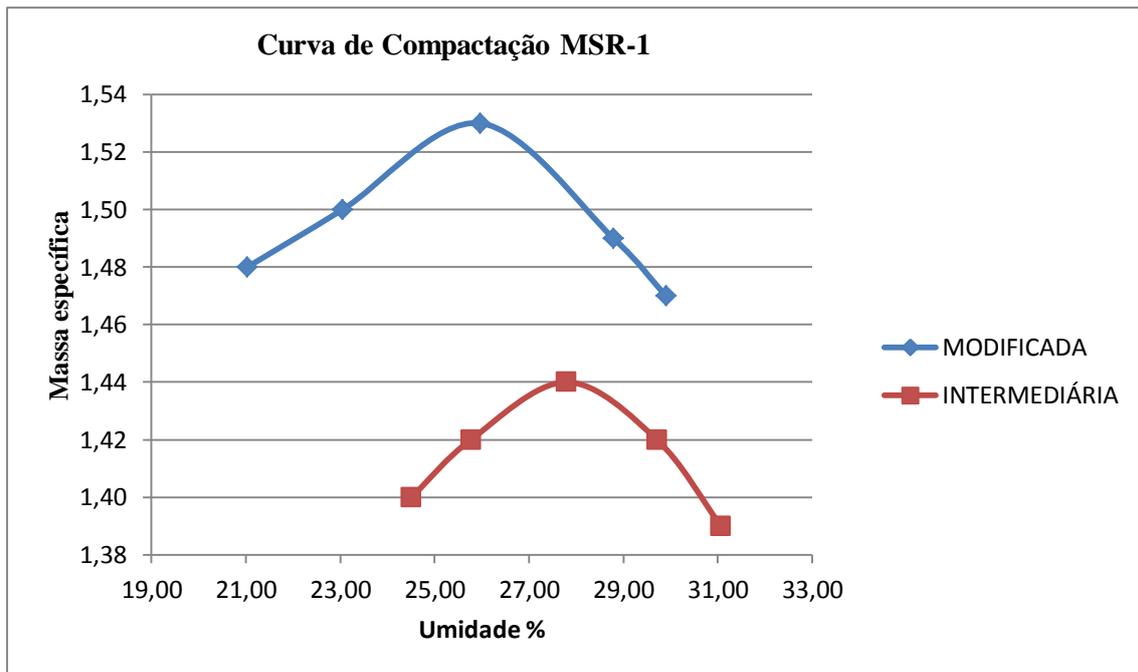


Figura 59. Curvas de compactação da MSR-1 na Energia Modificada e Intermediária

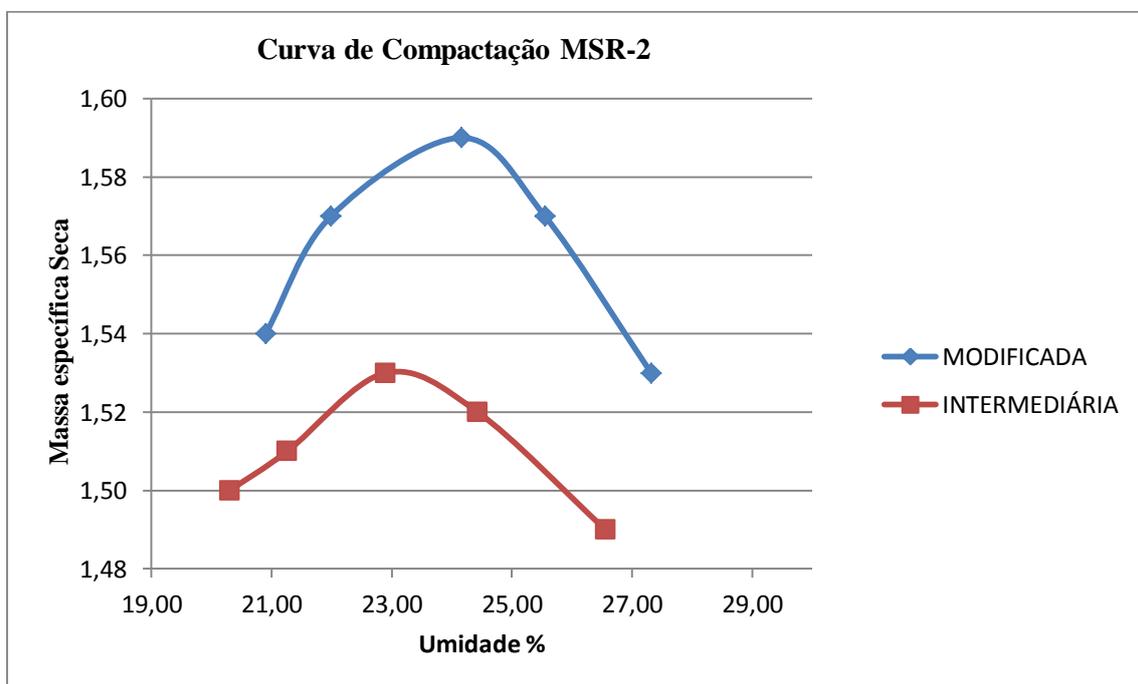


Figura 60. Curvas de compactação da MSR-2 na Energia Modificada e Intermediária

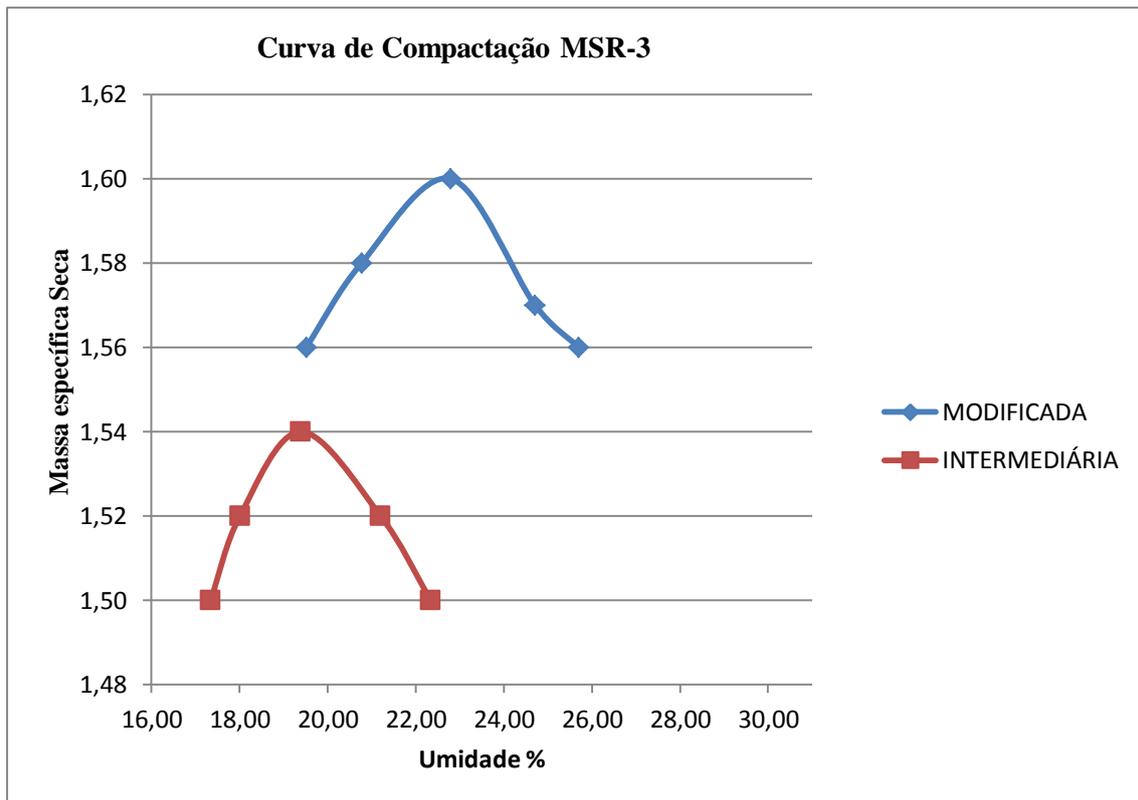


Figura 61. Curvas de compactação da MSR-3 na Energia Modificada e Intermediária

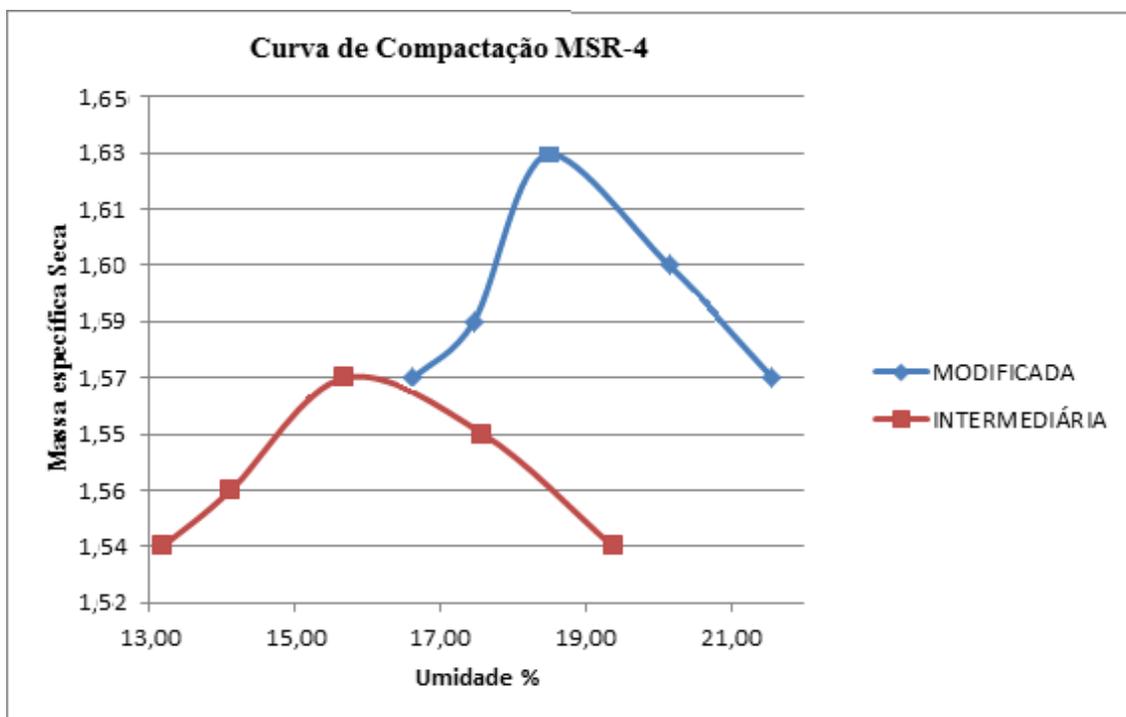


Figura 62. Curvas de compactação da MSR-4 na Energia Modificada e Intermediária

4.4.5. Índice Suporte Califórnia das MSRs

A expansão e o ISC das misturas da primeira fase da pesquisa foram determinados conforme a norma NBR 9895. Nas misturas compactadas com energia intermediária, os resultados em relação às expansões variaram de 0,18% a 0,95%, e de 11,52% a 30,03%, em relação ao ISC, conforme o aumento da proporção de RC na mistura. Os resultados dos ensaios mostraram-se insatisfatórios preliminarmente, devido à baixa capacidade de suporte das misturas e por não atender os parâmetros mínimos acerca de sua aplicação como sub-base e base de pavimento.

Os valores referentes ao ISC das MSRs compactados na energia modificada variam de 13,73% a 36,70% e expansões entre 0,23% e 0,54%. Pode-se constatar um comportamento mecânico de maior suporte, à medida que se adiciona RC e aumenta-se sua energia de compactação, recorrentes nas misturas MSR-1 e MSR-2, porém ambas, independentemente de sua energia de compactação, não apresentam parâmetros favoráveis para serem utilizadas em camada de sub-base ou base, visto que seu parâmetro de referência deve ser superior a 80%, para o número N de repetições do eixo-padrão maior que 5×10^6 .

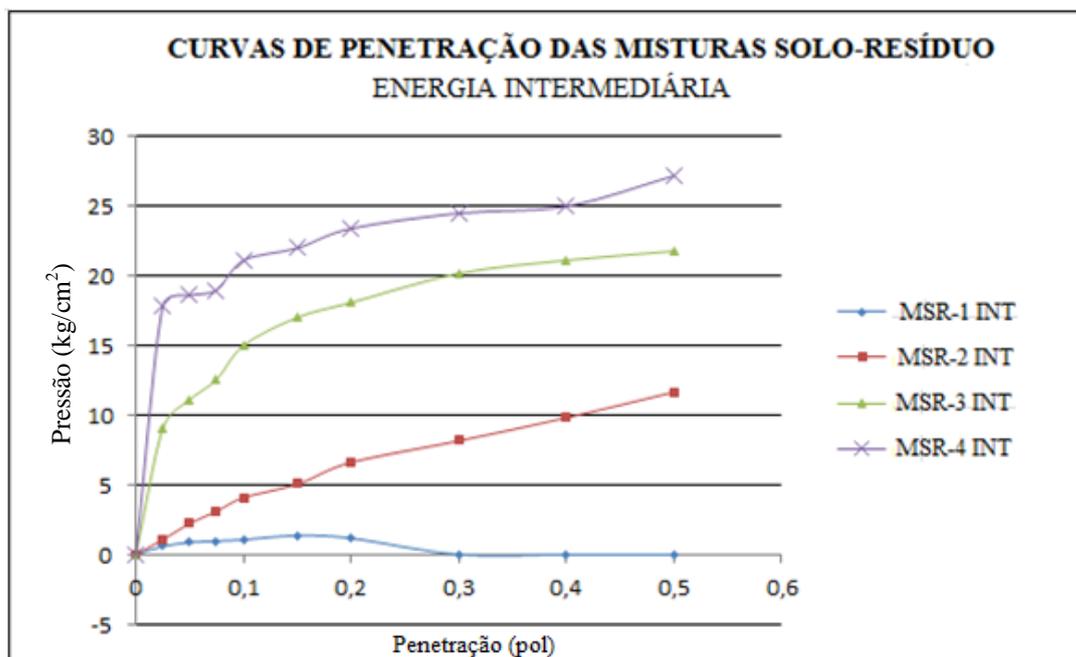
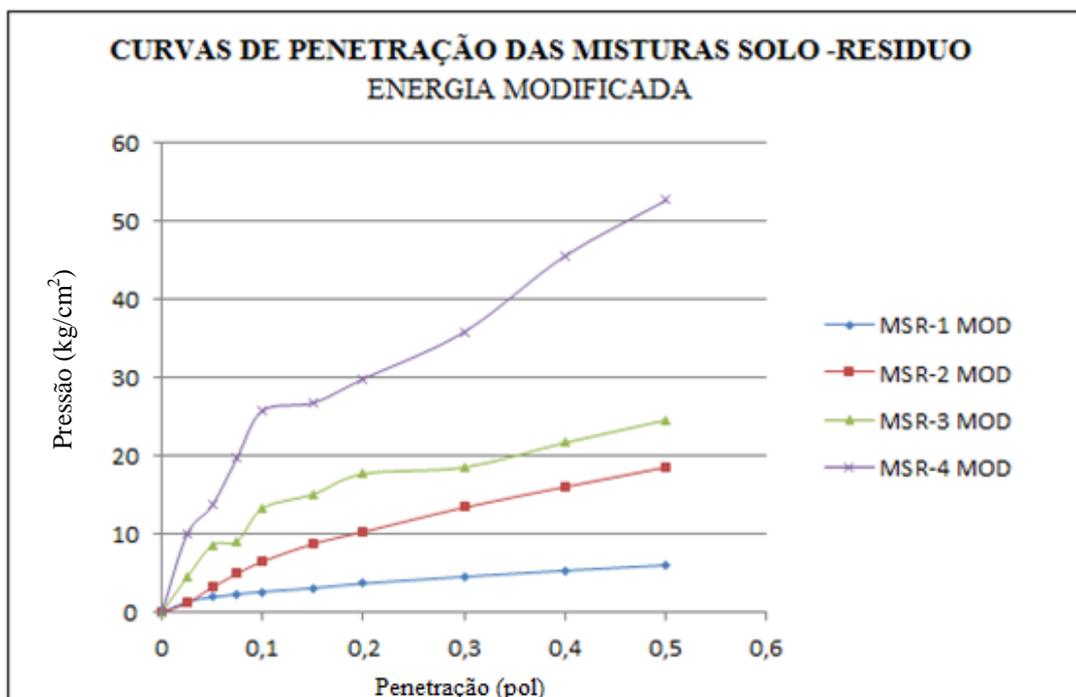
Em contrapartida, verificou-se um comportamento mecânico atípico na mistura MSR-3, na qual foi verificada uma diminuição do ISC, a medida que se aumenta a energia de compactação, sugerindo assim, preliminarmente, que o efeito da energia de compactação modificada pode estar fragmentando o RC em maior proporção, diminuindo assim, o suporte da mistura. Ainda sobre a mistura MSR-3 compactada na energia intermediária e em relação às misturas MSR-4, compactadas em ambas as energias de compactação, as mesmas atendem aos parâmetros técnicos para aplicação apenas em sub-bases, pois o valor do ISC nessa camada deverá ser maior que 20%, independentemente do valor do número N, conforme a norma vigente.

Em relação às expansões, todas as misturas apresentam valores inferiores a 1%, sendo esse um parâmetro favorável para materiais para aplicação em sub-bases e bases, pois, os mesmos devem apresentar expansões inferiores a 2% e 1%, respectivamente.

Os resultados referentes aos dados encontrados ao término do ensaio de compactação estão dispostos na Tabela 27 e suas curvas de penetração foram apresentadas nos gráficos expostos nas Figuras 63 e 64.

Tabela 27. Resultados de CBR das Misturas Solo-Resíduo: ISC e Expansão

Mistura Solo- Resíduo	Energia Intermediária		Energia modificada	
	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)
MSR-1	0,18	11,52	0,23	13,73
MSR-2	0,62	15,81	0,53	14,26
MSR-3	0,78	21,30	0,61	18,90
MSR-4	0,95	30,03	0,54	36,70

**Figura 63.** Curvas de penetração das Mistura Solo-Resíduo compactadas com energia intermediária**Figura 64.** Curvas de penetração das Mistura Solo-Resíduo compactadas com energia modificada

4.5. MISTURAS SOLO ARENOSO - RESÍDUO (MSAR)

Uma vez que as misturas solo-resíduo não apresentaram resultados satisfatórios, fora, então, adicionado ao solo natural, o percentual de 30% de agregado miúdo (areia), para confecção das misturas da segunda fase da pesquisa, denominadas Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR). Nesse item são apresentados os resultados referentes a essas misturas.

Cada mistura é composta por resíduo cerâmico britado, empregado como agregado graúdo e adequado à faixa granulométrica entre 4,8 mm e 25 mm; areia, utilizada como agregado miúdo; e solo natural. As misturas foram caracterizadas por meio dos ensaios de granulometria, limites de Atterberg, massa específica, Proctor modificado e intermediário, índice Suporte Califórnia nas mesmas energias de compactação e Módulo de Resiliência.

4.5.1. Limites de Atterberg das Misturas Solo Arenoso - Resíduo (MSAR)

A Tabela 28 apresenta os resultados referentes aos limites de consistência das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR). Nota-se, que quanto maior é a adição de agregados á mistura, observa-se uma queda no percentual do LL da mistura, indicando a diminuição da capacidade do solo em absorver água. Esse parâmetro indica uma queda ainda mais acentuada, se comparada com as misturas da primeira fase, sem adição de areia em sua composição. A adição do percentual de 30% de areia ao solo natural, na segunda fase da pesquisa, sem alteração do percentual de agregado graúdo foi a responsável pela alteração desse parâmetro.

Tabela 28. Limites de Atterberg das Misturas Solo Arenoso - Resíduo

Propriedades	MSAR-1	MSAR-2	MSAR-3	MSAR-4
Limite de Liquidez (LL)	38,30%	36,70%	34,90%	32,85%
Limite de Plasticidade (LP)	20,01%	18,12%	16,13%	14,03%
Índice de Plasticidade (IP)	18,28%	18,58%	18,77%	18,82%

As Normas DNIT 139/2010-ES e DNIT 141/2010-ES, que normalizam e estipulam parâmetros e especificação de serviço para sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente recomendam que, os materiais que compõem a mistura de solo para aplicação em camada de base devem apresentar $LL \leq 25\%$ e $IP \leq 6\%$. Quando esses limites forem ultrapassados, recomenda-se que o percentual de agregado miúdo areia seja igual ou superior a 30%, medida já executada na primeira fase.

4.5.2. Massa Específica das MSARs

O resultado referente à massa específica das misturas Solo Arenoso - Resíduo se deu da mesma forma das misturas da primeira fase da pesquisa: por meio do método do picnômetro, normalizado pela norma DNER-ME 093/94. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29. Massa específica das Misturas Solo Arenoso-Resíduo

MSAR-1	MSAR-2	MSAR-3	MSAR-4
2,56 g/cm ³	2,57 g/cm ³	2,59 g/cm ³	2,61 g/cm ³

Observando a Tabela 29, verifica-se que a adição do percentual de 30% de agregado miúdo às misturas, à medida que se adiciona RC ao solo, nas proporções de 20%, 40%, 60% e 80%, eleva o valor referente à massa específica, gradualmente, sugerindo maior preenchimento dos vazios do solo. A MSAR-1 tem massa específica igual a 2,56 g/cm³ enquanto as misturas MSAR-2, MSAR-3 e MSAR-4 apresentam massas específicas de 2,57 g/cm³, 2,59 g/cm³ e 2,61 g/cm³, respectivamente.

4.5.3. Compactação das MSARs

As misturas Solo Arenoso-Resíduo foram submetidas a duas energias de compactação, a intermediária e a modificada, exatamente como as Misturas Solo-Resíduo, devido às especificações requeridas pelas normas que regulamentam a aplicação dos materiais que as compõe, como sub-base e base de pavimento, respectivamente.

Os dados referentes à compactação das MSAR, nas energias intermediária e modificada, estão dispostos na Tabela 30 e suas curvas de compactação, apresentadas nos gráficos das Figuras 65, 66, 67 e 68.

Tabela 30. Dados referentes à compactação das misturas Solo Arenoso-Resíduo: Teor ótimo de umidade (W_{ot}) e Peso específico seco máximo (γ_{dmax})

Mistura Solo-Resíduo	Energia Intermediária		Energia modificada	
	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
MSAR-1	19,81	1,62	17,96	1,66
MSAR-2	18,91	1,64	16,66	1,69
MSAR-3	17,25	1,66	15,60	1,71
MSAR-4	15,68	1,68	15,09	1,72

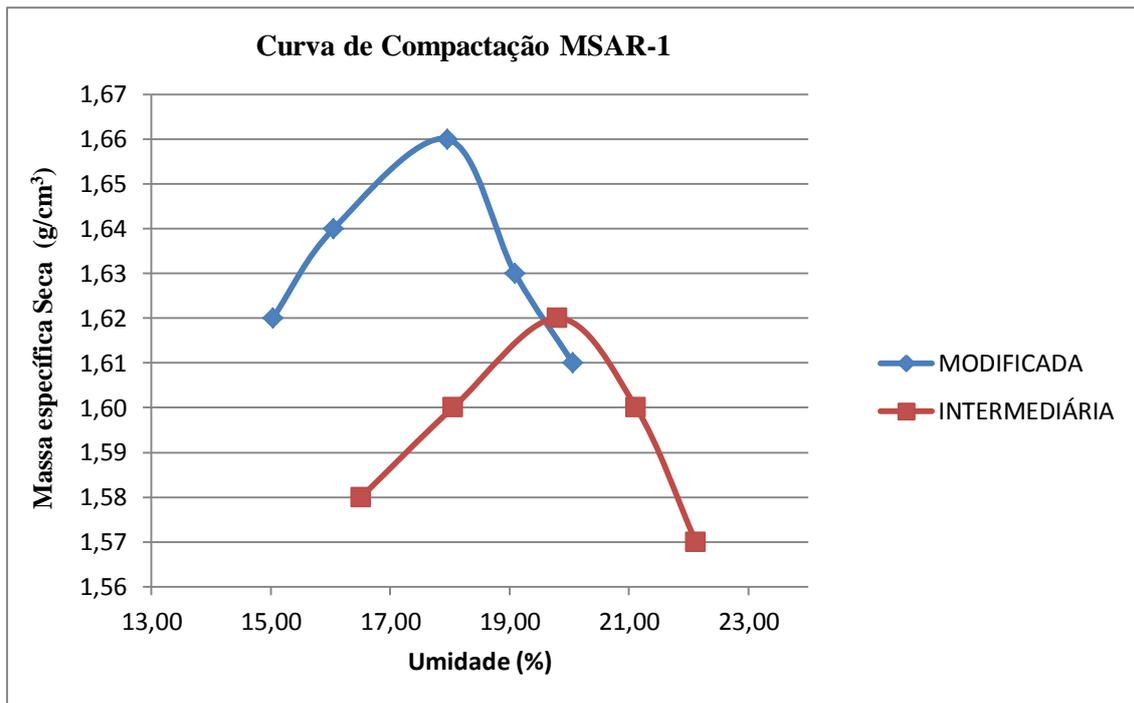


Figura 65. Curvas de compactação da MSAR-1 na Energia Modificada e Intermediária

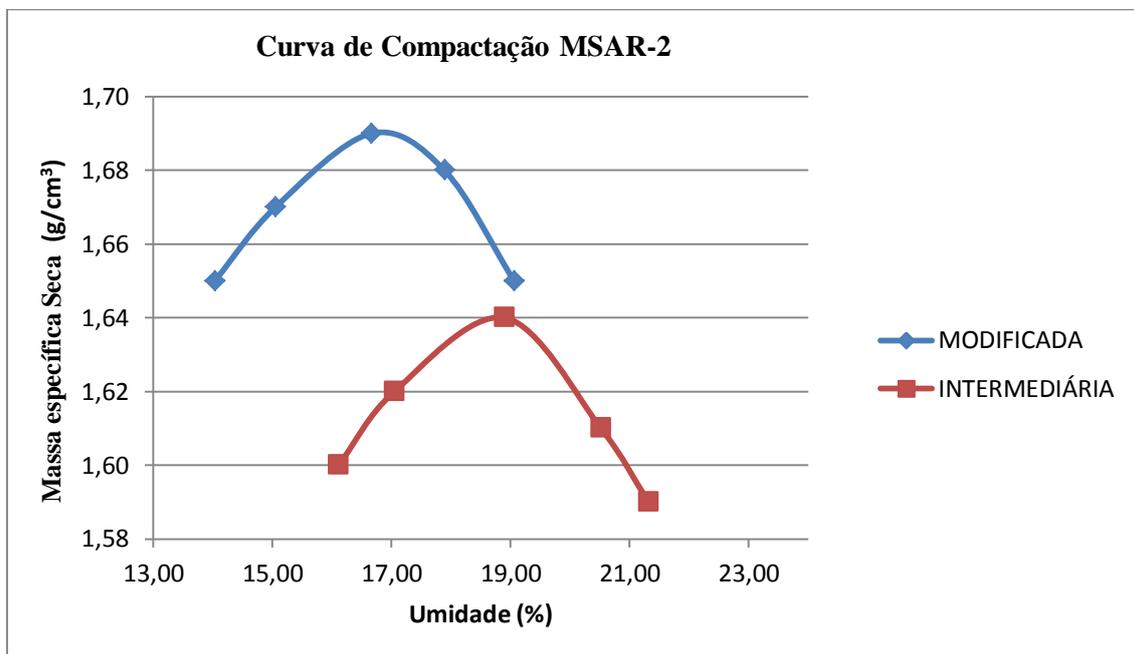


Figura 66. Curvas de compactação da MSAR-2 na Energia Modificada e Intermediária

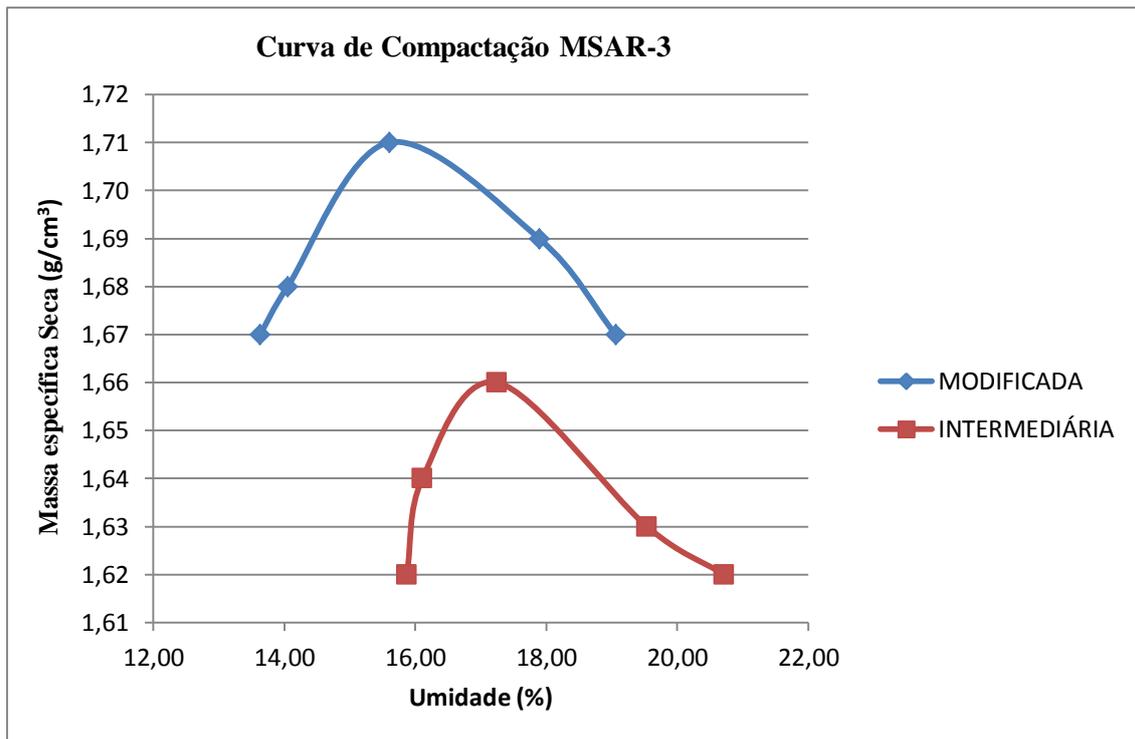


Figura 67. Curvas de compactação da MSAR-3 na Energia Modificada e Intermediária

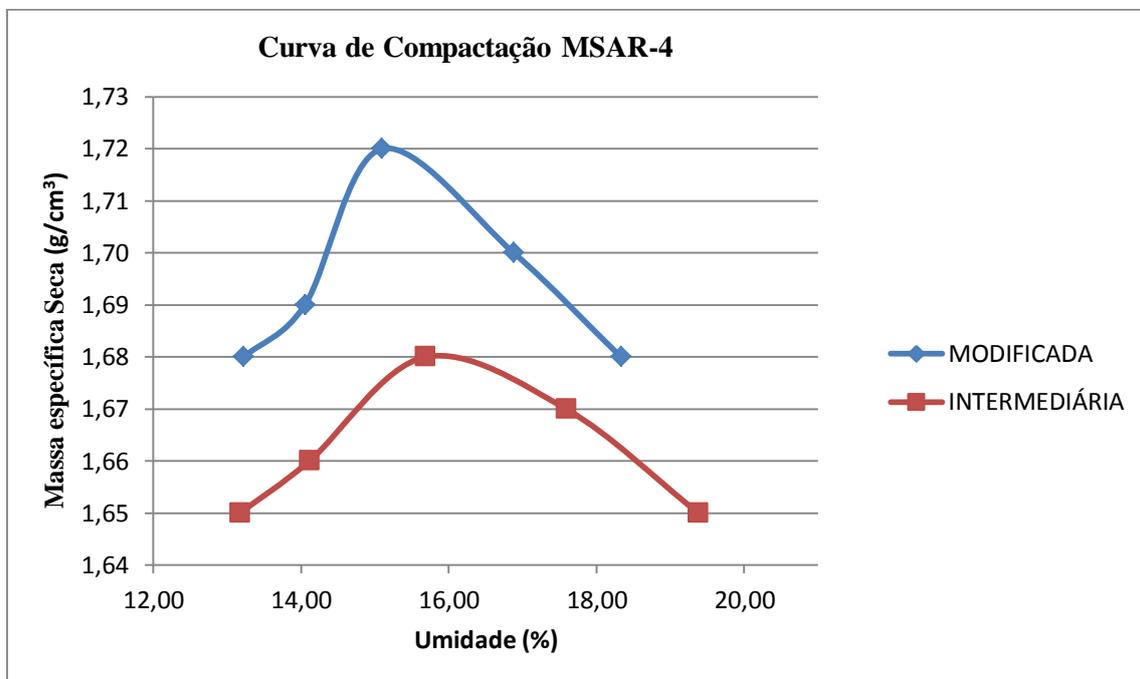


Figura 68. Curvas de compactação da MSAR-4 na Energia Modificada e Intermediária

Através da observação dos dados e curvas de compactação, é possível perceber que, à medida que adiciona-se resíduo cerâmico à mistura e aumenta-se a energia de compactação, menor é a a umidade ótima e, por consequência, há um aumento dos valores referentes a massa específica máxima, visto que na composição dessas misturas contém resíduo cerâmico utilizado como agregado graúdo e areia, envolvidos no solo natural, ocorrendo uma estabilização granulométrica. Uma vez que o solo em sua composição original apresenta uma insuficiência de agregados com partículas de diâmetros intermediários, tornando o solo muito argiloso e, portanto inadequado para utilização ao fim que se destina nessa pesquisa, que é a sua utilização como sub-base e base de pavimento viário. A estabilização granulométrica com o RC e a areia torna-se viável, sob o ponto de vista técnico devido ao bom entrosamento entre as partículas da mistura devido à adição da areia permitiu, e econômico, visto que a obtenção do RC não onerou custos à pesquisa.

4.5.4. Índice Suporte Califórnia das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR)

A expansão e o Índice Suporte Califórnia das Misturas Solo Arenoso – Resíduo foram determinadas conforme as normas DNER-ME 049/94 e NBR 9895/87. As curvas de compactação das misturas estão expostas nas Figuras 69 e 70 e os dados obtidos estão dispostos na Tabela 31.

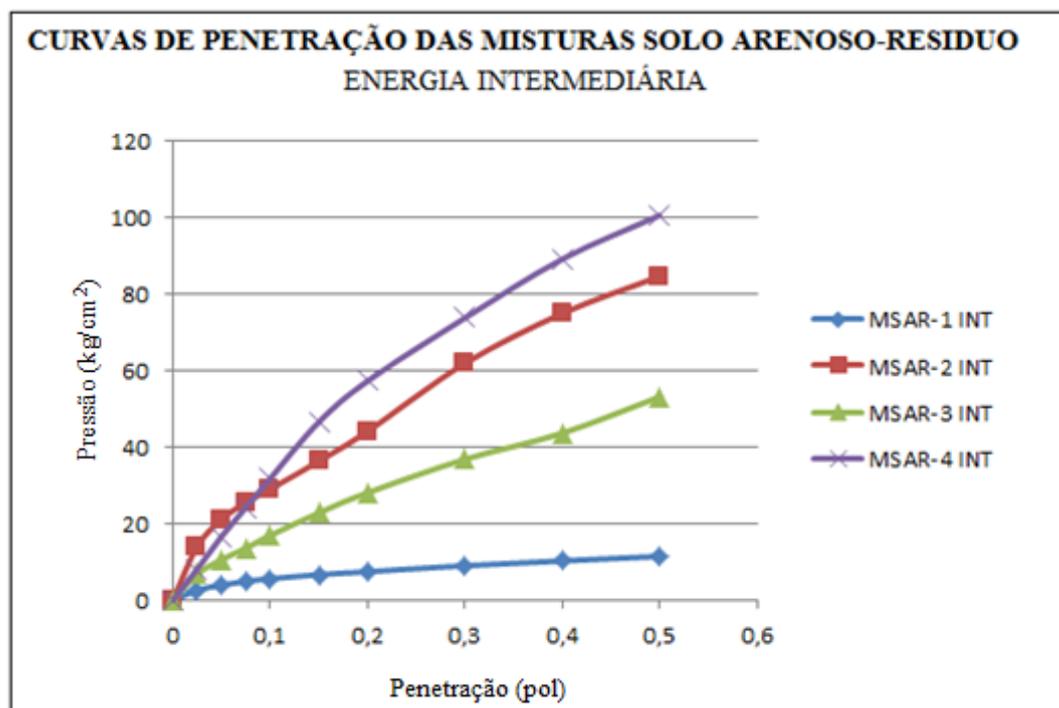


Figura 69. Curvas de penetração das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia intermediária.

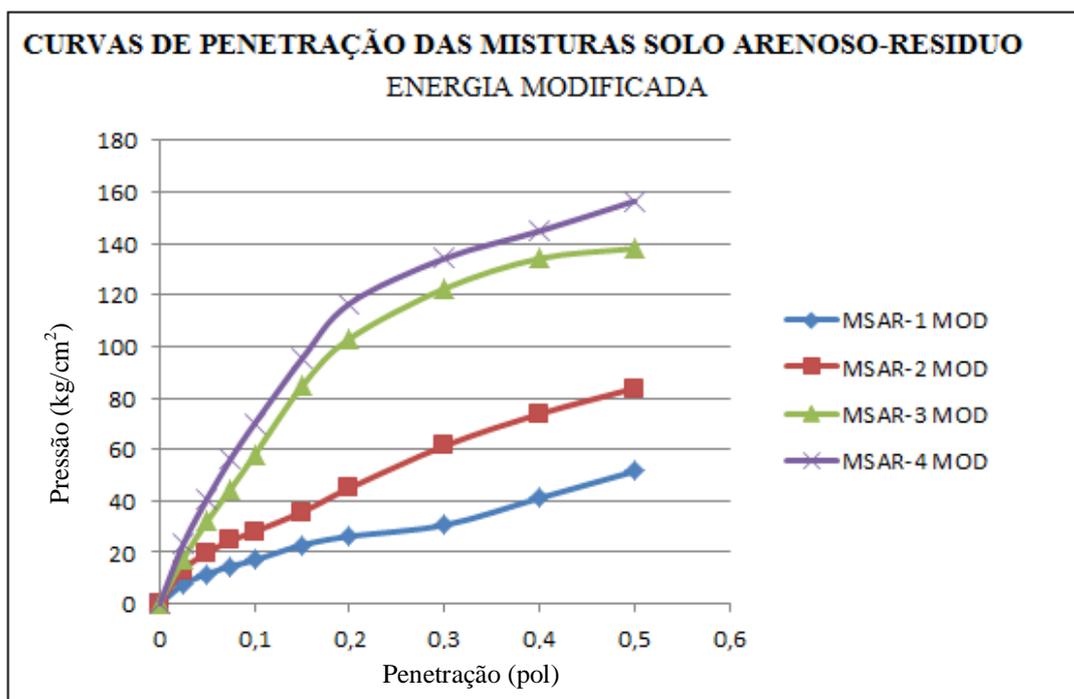


Figura 70. Curvas de penetração das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia modificada.

Tabela 31. Resultados de CBR das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR) : ISC e Expansão

MSAR	Energia Intermediária		Energia modificada	
	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)
MSAR-1	0,71	18,16	1,05	24,10
MSAR-2	0,10	24,20	1,01	39,97
MSAR-3	0,13	41,48	0,09	82,27
MSAR-4	0,02	45,35	0,05	99,55

As misturas compactadas com energia intermediária apresentaram expansões dentro da faixa permitida, para a aplicação de misturas com função de sub-base e base de pavimento, ou seja, inferiores a 1%. A MSAR-1 compactada nessa energia não mostrou comportamento mecânico favorável, limitando sua utilização como subleito de pavimento viário, cujos parâmetros requerem um ISC mínimo de 5%. As demais misturas compactadas com energia intermediária, que apresentaram ISCs variando entre 24,20 % a 45,35 %, podem ser utilizadas como sub-base de pavimento. Observando as curvas de penetração das MSARs, compactadas com energia intermediária, verificou-se um comportamento atípico em relação à MSAR-2, justificado pela adição de uma proporção maior de RC à mistura, se comparada com a MSR-1.

Em relação às misturas compactadas com energia modificada, as misturas MSAR-1 e MSAR-2, apresentaram expansões um pouco acima de 1%, mas, inferiores a 2% e ISCs com valores de 24,10 % e 39,97%, que indicam uma possível utilização de ambas como sub-base de pavimento, enquanto que as misturas MSAR-3 e MSAR-4, compactadas com energia modificada apresentaram expansões inferiores a 1% e excelente suporte com ISCs de 82,27% e 99,55%, quando o parâmetro de referência para a utilização em bases é 80%. Pode-se constatar também que, por meio da observação dos dados, que, à medida que se adiciona agregado graúdo e um percentual fixo de agregado miúdo à mistura, e aumenta-se a energia de compactação, o solo estabilizado com RC adquire maior suporte, em relação às misturas equivalentes, compactadas com energia de compactação inferior.

4.5.5. Módulo de Resiliência das Misturas Solo-Arenoso Resíduo (MSAR)

Os módulos de resiliência das misturas Solo Arenoso-Resíduo foram determinados segundo a norma DNER ME 131/94 - Solos – Determinação do Módulo de Resiliência, a partir dos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, com instrumentação interna à câmara triaxial. A influência mútua entre carga-estrutura com seus efeitos sobre a deformação e ocorrência de tensões nas camadas dos pavimentos torna necessária uma abordagem dentro do conceito de que essa estrutura possui um conjunto de camadas sobrepostas, com diferentes propriedades e espessuras reagindo de forma particular aos esforços aplicados pelos veículos.

A Tabela 32 apresenta os módulos resilientes das MSAR, nas energias intermediária e modificada, resultantes das tensões confinantes as quais as amostras foram submetidas em seis ciclos de valores e a Figura 71 mostra o gráfico referente a essa variação.

Tabela 32. Módulo de Resiliência das Misturas Solo Arenoso-Resíduo (MSAR)

MSAR	Módulo de Resiliência (MPa)	
	Energia Intermediária	Energia Modificada
MSAR-1	248	303
MSAR-2	274	307
MSAR-3	380	365
MSAR-4	527	488

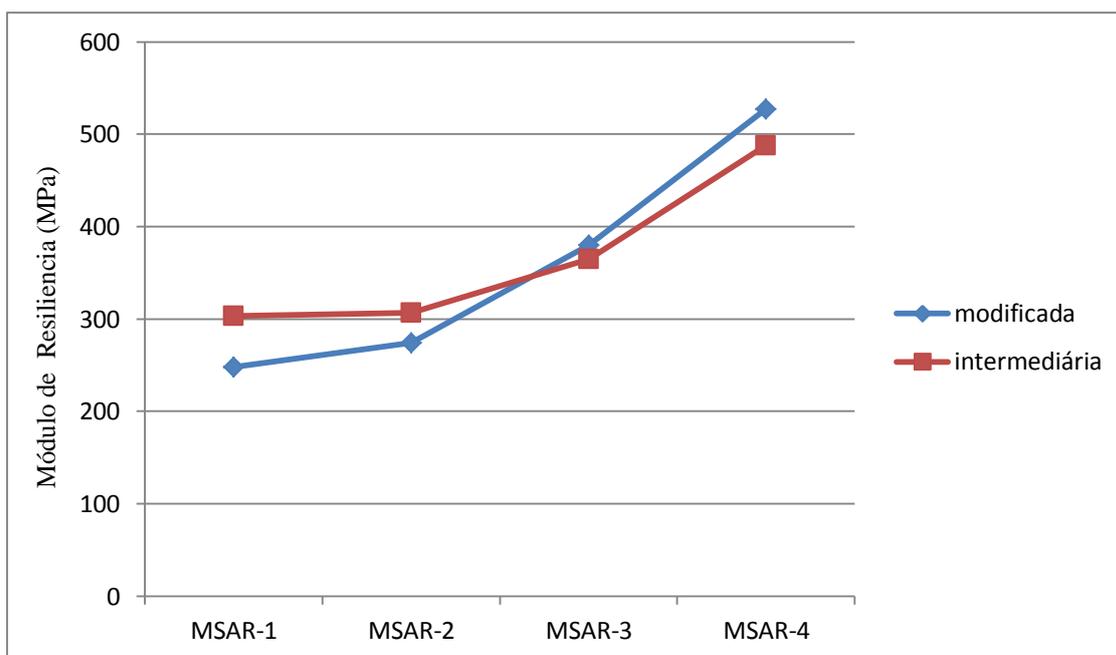


Figura 71. Módulos de Resiliência das Mistura Solo Arenoso-Resíduo, compactadas com energia modificada e energia intermediária.

Observando os dados dispostos na Tabela 32 e o comportamento resiliente das MSARs, na Figura 71, verifica-se um aumento do módulo de resiliência conforme acréscimo de RC e aumento da energia de compactação, nas amostras relacionadas às misturas MSAR-1 e MSAR-2, alcançando o valor de 307 MPa referente ao CP da MSAR-2 compactada com energia modificada.

Esse padrão sofre alteração nas misturas MSAR-3 e MSAR-4, que contém um percentual de 60% e 80% de RC, respectivamente. Em relação a essas misturas, as mesmas apresentaram maiores MRs nos CPs compactados com energia intermediária. Na amostra referente à MSAR-3, o MR foi de 380 MPa e MSAR-4 de 527 MPa, em comparação com as amostras compactadas com energia modificada, que obtiveram MRs de 365 MPa e 488 MPa, respectivamente. Esses resultados sugerem um comportamento mecânico similar ao observado nos resultados obtidos no ensaio de ISC nas mesmas misturas. De acordo com Miceli (2006), vários fatores podem influenciar o MR de misturas de solo, entre eles estão: o tipo de agregado, a faixa granulométrica do resíduo utilizado para estabilização do solo, densidade e umidade da mistura, energia de compactação aplicada, entre outros.

Após o ensaio de MR, observou-se a desfragmentação do CP, devido à quebra excessiva do RC, ocasionada pela elevada energia de compactação da energia modificada, alterando a faixa granulométrica utilizada nas misturas.

Comportamento similar foi observado, nos CPs moldados com misturas na proporção de 50% de solo argiloso e 50% de Agregado Reciclado de Telha (ART), ensaiados por Dias (2004), que após ensaios de determinação da distribuição granulométrica do ART, comprovou quebra das partículas do agregado, com degradação ainda mais elevada para a maior energia de compactação.

Os valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência nas MSAR-4 caracterizam os maiores valores de MR relacionados às Misturas Solo Arenoso-Resíduo analisadas nessa pesquisa, podendo caracterizar que estas misturas podem desenvolver deformações permanentes, pois o aumento do módulo de resiliência favorece a maior absorção de tensões, deixando o material mais suscetível ao trincamento por fadiga. As tensões são proporcionais aos módulos, então, conclui-se que a mistura MSAR-4, compactada com energia intermediária é ligeiramente mais rígida que as demais misturas, portanto, esta mistura vai absorver mais tensões que as demais.

Após verificação dos resultados de todos os ensaios, a MSAR-3 foi selecionada como melhor mistura para continuidade da pesquisa, devido a apresentar bom suporte mecânico, confirmado no ensaio de ISC, utilizando uma proporção de RC inferior à MSAR 4. Porém, devido à verificação de alteração no padrão do MR das misturas, previamente ensaiadas na COPPE, optou-se por verificar o MR da MSAR-3, para confirmação de seus respectivos módulos resilientes, para então iniciar-se a simulação de dimensionamento de um pavimento.

A confirmação dos resultados referentes ao MR das MSAR-3 foi feita através do ensaio de módulo de resiliência realizado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. Nessa verificação posterior, optou-se por moldar os corpos de prova no próprio laboratório, por se tratar de uma amostra menor e devido aos resultados anteriores. Foram moldados quatro corpos de prova da MSAR3 com dimensões de 10 cm x 20 cm, dois para cada tipo de energia de compactação. Os resultados referentes a esse ensaio podem ser observados na Tabela 33.

Tabela 33. Módulo de Resiliencia MSAR 3 ensaiados na Politécnica da USP.

MSAR	Módulo de Resiliência (MPa)	
	Energia Intermediária	Energia Modificada
MSAR-3	345	310

Os resultados referentes ao MR da MSR-3 demonstraram pouca variação em relação ao ensaio prévio, realizado na COPPE/UFRJ, o que descarta a suspeita preliminar, de que o transporte dos CPs, naquela ocasião, tivesse alterado suas estruturas e conseqüentemente, seus resultados de MR. Porém, foi verificado que, conforme a energia de compactação aumenta, nessa mistura, o MR tende a diminuir, confirmando assim, após o ensaio, o maior esmagamento do RC, fator que torna a mistura mais compacta e mais rígida, portanto, mais suscetível às deformações, quando compactadas com energia modificada.

4.6. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PELO MÉTODO MECANISTICO, UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL SISPAV

Objetivando a aplicação prática do material analisado nessa pesquisa a uma via da cidade de Manaus, foram empregados resultados dos ensaios técnicos no programa computacional SisPav, a fim de dimensionar uma estrutura de pavimento, empregando o Solo Natural, estabilizado granulometricamente com RC, como agregado graúdo e areia, como agregado miúdo.

O método considera o tempo total de vida de serviço dividido em sub-períodos. Em cada um, considera variações do tráfego, clima e parâmetros dos materiais, incluindo o envelhecimento do ligante asfáltico.

O cálculo de tensões determina dano considerando efeito da variação lateral dos veículos na rodovia. Esses danos são acumulados obtendo o dano total na estrutura comparado com limites predefinidos dos critérios de ruptura e caso não sejam adequados, novas espessuras são selecionadas e processo repetido até que fiquem dentro de limites aceitáveis de tolerância.

A mistura MSAR-3 foi escolhida para o dimensionamento, devido apresentar resultados de ISC compatíveis aos requisitos relacionados à aplicação como sub-base e base de pavimento. A quantidade de RC utilizado nessa mistura é inferior à quantidade utilizada na MSAR-4, que conseqüentemente requer maiores detalhes na aplicação técnica e maiores custos com britagem e logística do material. No decorrer desse texto serão detalhados o procedimentos referentes a cada grupo de entrada de dados no programa computacional SisPav, desenvolvido por Franco (2007).

4.6.1. Estudo de Tráfego

O tempo de vida do projeto estipulado é de 10 anos, considerando a abertura ao tráfego em 2015 e final, em 2025. O dimensionamento do tráfego empregado pelo SisPav considera o efeito de cada configuração de eixo, existente no banco de dados do programa, como mostra a Figura 72, e a partir da qual, o programa calcula tensões e deformações nos pontos suscetíveis da estrutura, considerando ainda, a variação lateral do tráfego no acúmulo de danos no pavimento, à porcentagem de veículos na faixa de projeto, dimensões entre os eixos, dimensões entre as rodas, tempo de vida útil do projeto, alinhamento crítico do projeto e a variação anual de tráfego.

O detalhamento do tráfego feito pelo *software* considera o eixo e o volume de tráfego para composição do número N, diferentemente das metodologias que fazem o detalhamento do tráfego por meio de veículos pesados e seus eixos correspondentes, além do volume de tráfego da via. O cálculo é realizado pelo programa com o intuito de facilitar a composição do projeto, caso o mesmo não tenha dados detalhados acerca do estudo de tráfego.

	Configuração do semi-eixo	Descrição do eixo	Limite do Peso Bruto (kg)	Limite com Tolerância (kg)
1		<i>eixo simples isolado</i>	6.000	6.450
2		<i>dois eixos simples (direcional)</i>	12.000	12.900
3		<i>dois eixos simples (pneus extralargos)</i>	17.000	18.275
4		<i>três eixos simples (pneus extralargos)</i>	25.500	27.413
5		<i>eixo simples de quatro rodas</i>	10.000	10.750
6		<i>dois eixos de quatro rodas (em tandem)</i>	17.000	18.275
7		<i>dois eixos de quatro rodas</i>	15.000	16.125
8		<i>três eixos em tandem de quatro rodas</i>	25.500	27.413
9		<i>conjunto de dois eixos (especial)</i>	13.500	14.513

Figura 72. Configuração de eixos utilizada pelo programa computacional SisPav.

Fonte: Franco (2007)

Segundo Franco (2007), a pressão de inflagem de pneus e o peso dos veículos influenciam no cálculo do número N realizada pelo SisPav, devido a esse fator, nessa pesquisa utilizou-se o valor de 0,800 MPa, tendo como justificativa que esse valor é aproximado ao valor utilizado e sugerido por alguns fabricantes de pneus, e em relação ao peso dos veículos, utilizou-se a referência legal por eixo, situação esta que nem sempre condiz com a realidade dos veículos que trafegam na cidade.

A via selecionada para a simulação do dimensionamento foi uma rua coletora principal, denominada Av. Cravina dos Poetas, localizada no conjunto habitacional Ajuricaba, bairro Planalto, na Zona Centro Oeste da cidade de Manaus, cujas coordenadas são 3°03'44.2"S 60°02'41.1"W. A mesma apresenta tráfego meio pesado, com tráfego mais intenso nos horários de pico: 06:00h às 08:30h, pela manhã e de 17:00h às 19:30h, no período da noite. A Figura 73 mostra a localização da via e os dados referentes ao tráfego, coletados sob orientação do Instituto Municipal de Engenharia e Fiscalização do Trânsito – MANAUSTRANS, dispostos na Tabela 34.

Tabela 34. Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego	0.3m
Percentual de veículos na faixa de tráfego	85%
Distância média entre rodas (SX)	0.324m
Distância média entre eixos (SY)	1.200m

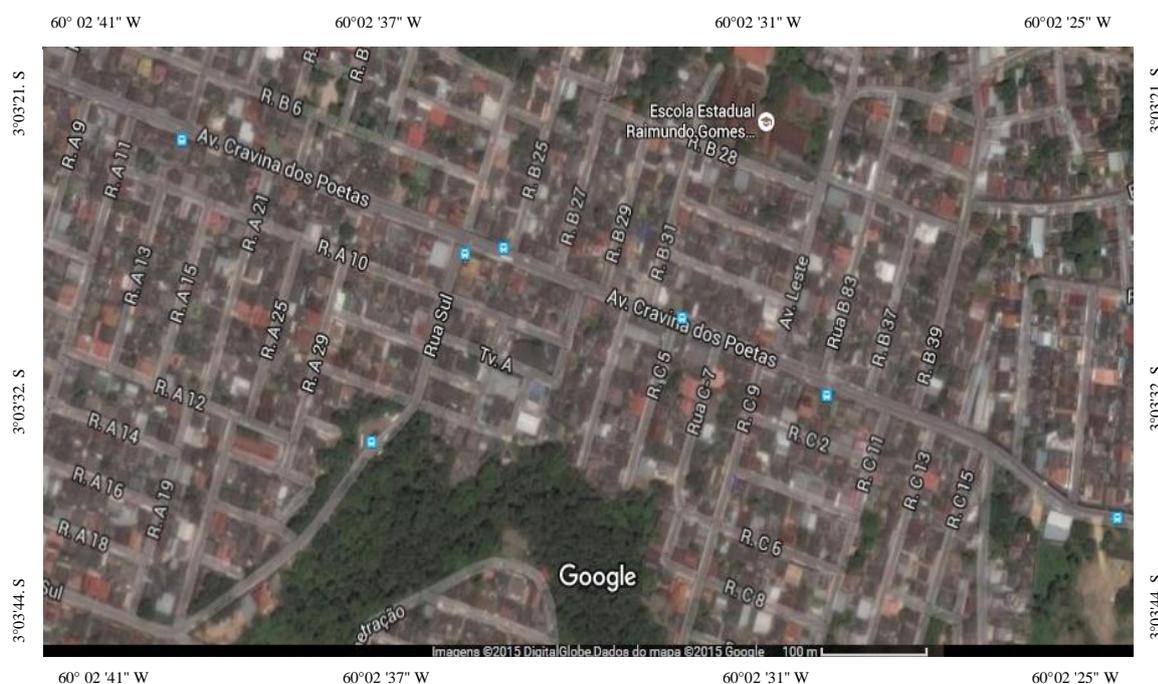


Figura 73. Mapa de Localização da Avenida Cravina dos Poetas.

Fonte: Google Earth

O dados referentes ao tráfego previsto dessa rua, coletados sob orientação do Manaustrans, estão dispostos na Tabela 35 e a inserção desses dados no programa computacional SisPav estão apresentados na Figura 74.

Tabela 35. Tráfego previsto

Item	Tipo	Rodas	Volume	Taxa	Peso (Kgf)	Pressão (MPa)
1	1-Eixo Simples	1	25000	0,000	6000,00	0,800
2	1-Eixo Simples	1	25000	0,000	6000,00	0,800
3	2-Dois eixos Simples (Direcional)	2	25000	0,000	12000,00	0,800
4	3-Dois eixos Simples (Super single)	2	25000	0,000	17000,00	0,800
5	4-Três eixos Simples (Super single)	3	25000	0,000	25500,00	0,800
6	5-Eixo Simples de roda dupla	2	25000	0,000	10000,00	0,800
7	6- Dois eixos duplos	4	25000	0,000	15000,00	0,800

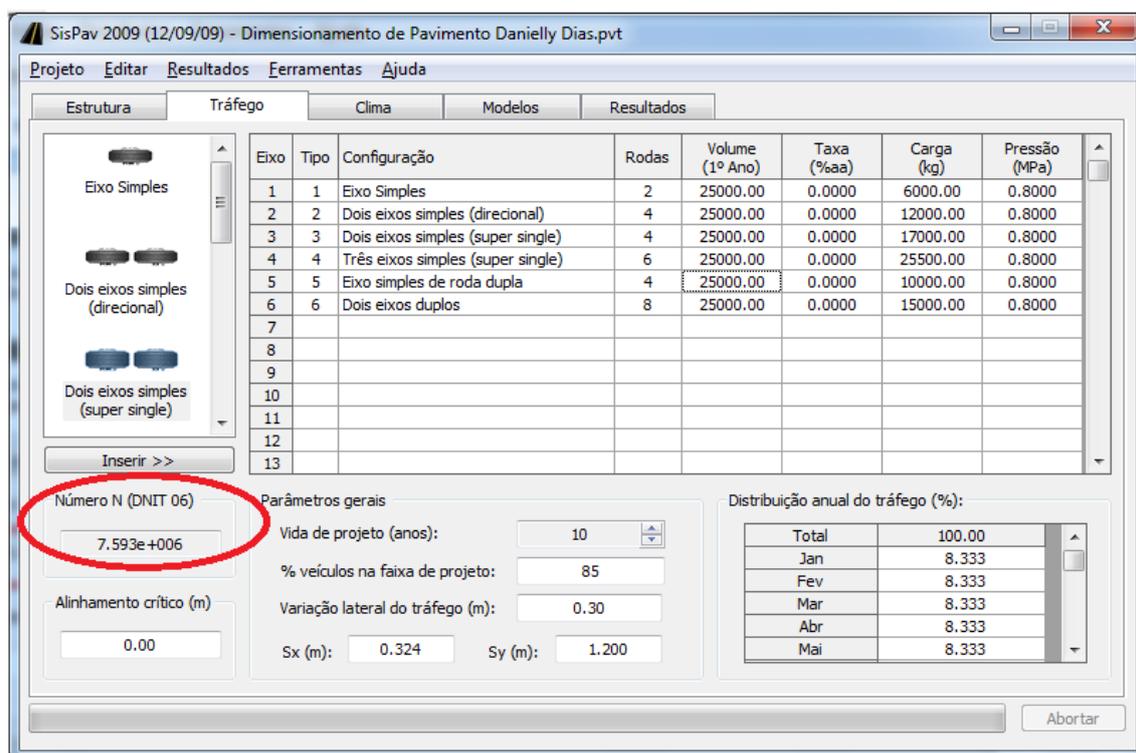


Figura 74. Tela do Programa SisPav após inserção dos dados coletados referentes ao tráfego da via.

4.6.2. Dados referentes ao ambiente e fatores climáticos da região

Os fatores relacionados ao meio físico, no que diz respeito ao clima, é considerado pelo programa SisPav, na avaliação do desgaste do pavimento asfáltico da camada de revestimento. O módulo de resiliência e o coeficiente de Poison da camada são influenciados pelo clima, motivo este que é relevante na conjugação dos efeitos desse desgaste relacionados ao impacto da variação mensal dos carregamentos sobre o tempo de vida do projeto e acúmulo de danos na estrutura.

As informações referentes ao clima, para a cidade de Manaus, estão dispostas na Tabela 36 e as inserções desses dados, na composição do pavimento a ser dimensionado nessa pesquisa, são apresentadas na Figura 75.

Tabela 36. Dados referentes ao clima regional

Local estipulado	Manaus
Mês/Ano de abertura do tráfego	Janeiro/2016
Temperatura Média Anual do Ar	26,70°C

Fonte: Franco (2007)

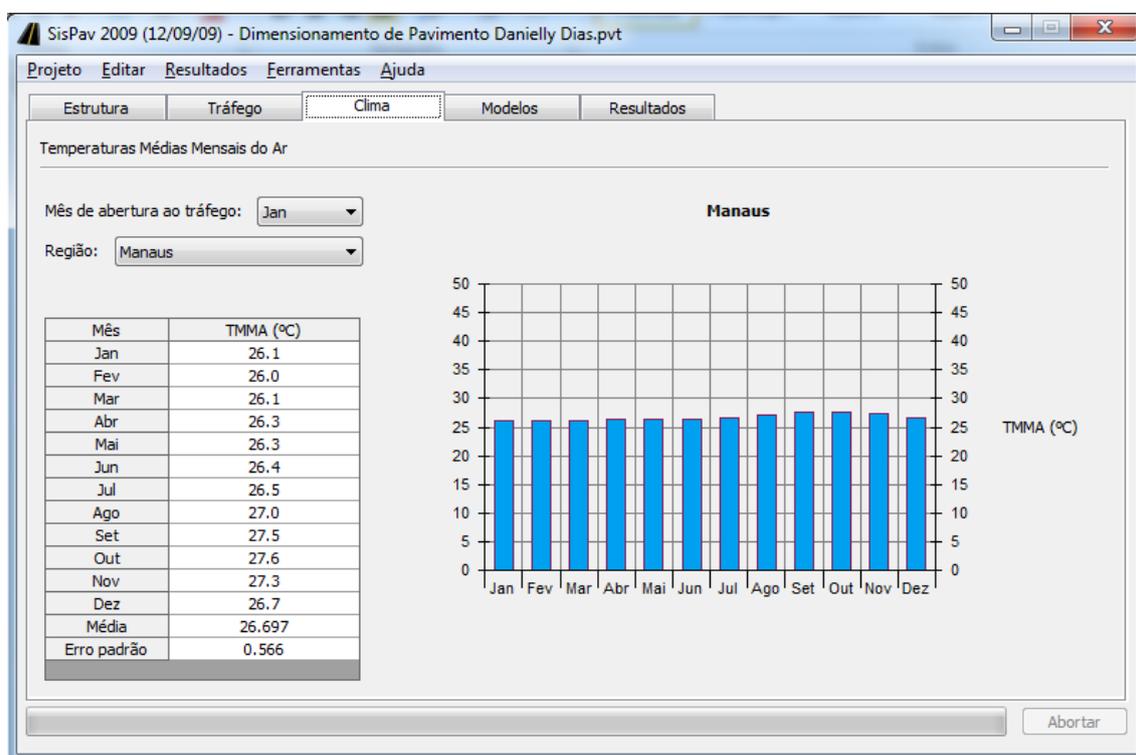


Figura 75. Tela do Programa SisPav após inserção dos dados referentes ao clima de Manaus/AM.

4.6.3. Materiais utilizados na simulação de dimensionamento do pavimento

O estudo proposto nessa dissertação visa avaliar um solo estabilizado com resíduo cerâmico, proveniente do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, e conseqüentemente, aplicá-lo em camadas de sub-base e base de pavimento, utilizando os valores de módulo de resiliência da MSAR-3, obtidos nos ensaios técnicos e apresentados nessa pesquisa.

A estrutura do pavimento será dimensionada da seguinte forma:

- A camada do revestimento aplicada será um revestimento reciclado em Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ, composto de Resíduo fresado do pavimento asfáltico - RFA, na faixa granulométrica adequada à Faixa C do DNIT, proposto por Souza (2013).

- Base: Utilizar-se-á os parâmetros da MSAR-3, quando compactada com a energia intermediária.

- Sub-base: Na primeira análise utilizar-se-á um solo laterítico, com parâmetros sugeridos pelo SisPav e na segunda análise serão inseridos os parâmetros da MSAR-3, quando compactada com a energia modificada.

A escolha das misturas selecionadas para cada camada se deu unicamente devido aos valores de seus módulos de resiliência, pois convencionalmente, as camadas de sub-base devem ser compactadas com energia intermediária, enquanto que, nas camadas de base, a energia modificada deve ser utilizada durante a compactação, o que contradiz a escolha e utilização dos dados referentes às misturas na simulação de dimensionamento do pavimento.

- O subleito aplicado no dimensionamento foi um parâmetro sugerido pelo SisPav, para subleito tipo II, cujos valores de módulo de resiliência podem ser encontrados no Manual de Pavimentação do DNIT (2006) em kgf/cm^2 e convertidos para MPa, por Franco (2007).

Para os materiais granulares e solos lateríticos, os parâmetros de módulo de resiliência são utilizados pelo SisPav, expressos por meio de modelos de comportamento elástico não linear de seu banco de dados, conforme mostra a Figura 76. Porém, cabe ressaltar que o ideal seria ensaiar amostras representativas da camada final de terraplenagem de cada sub-trecho homogêneo.

O cálculo das tensões, deformações e deslocamentos serão realizados pelo método das múltiplas camadas utilizando o programa interno do SisPav e padrão para estes cálculos. Detalhes deste programa podem ser vistos em Franco (2007).

Classe	Material	Modelo
0	Asfáltico	$M_r = f(t^o C)$
1	Granular	$M_r = K_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
2	Argiloso	$M_r = \begin{cases} k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d), & \forall k_1 > \sigma_d \\ k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1), & \forall k_1 \leq \sigma_d \end{cases}$
3	Misturas asfálticas, solo cimentado de módulo elevado ou solo siltoso de módulo baixo	$M_r = \text{constante}$
4	Solos arenosos com bastante argila e solos lateríticos finos	$M_r = \begin{cases} [k_2 + k_3 \cdot (k_1 - \sigma_d)] \cdot \sigma_3^{k_2}, & \forall k_1 > \sigma_d \\ [k_2 + k_4 \cdot (\sigma_d - k_1)] \cdot \sigma_3^{k_2}, & \forall k_1 \leq \sigma_d \end{cases}$
5	Granular (dependente da soma das tensões principais)	$M_r = K_1 \cdot \theta^{k_2}$
6	Argiloso (dependente da tensão desvio)	$M_r = K_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
7	Todos os solos e britas em geral	$M_r = K_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$

Figura 76. Modelos de comportamento resiliente de materiais de pavimentação utilizado pelo SisPav .
Fonte: Franco (2007).

As simulações realizadas pelo SisPav sempre apontarão menores espessuras das camadas que compõem o pavimento, que atendam ao critério de fadiga, devido a um ajuste automático de espessuras com limites de 60 cm para camadas de sub-base e base e 20 cm para revestimento. Em qualquer sistema de dimensionamento mecanístico-empírico é necessário informar espessuras iniciais de todas as camadas, para que o programa realize o ajuste automático de espessura de uma das camadas que for assinalada com um “x”, até atender ao critério de dimensionamento.

Para o dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento, iniciou-se definindo as espessuras das camadas de base e sub-base em 60 cm e ajustando a espessura do revestimento para a menor espessura que atenda à vida de projeto, para, posteriormente, ajustar as espessuras das camadas, por tentativa, a fim de se obter a menor estrutura do pavimento que atenda à vida de projeto.

A Figura 77 mostra a inserção dos dados relacionados à mistura asfáltica reciclada utilizada e a Figura 78 apresenta o modelo de comportamento de fadiga das misturas asfálticas.

Propriedades da camada

Camada selecionada -> 1

Material: Mistura asfáltica

Espessura (m): 0.0800

Coefficiente de Poisson: 0.3370

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa)

3 - Elástico linear

Mr (MPa)	8320.0000
----------	-----------

Parâmetros

Tipo de CAP	CAP 50/70
Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm	63.0
Ao (visc x T)	11.123
VTSO (visc x T)	-3.713
Volume de vazios (%)	3.30
Teor de asfalto (%)	5.0
RBV (%)	77.65
Faixa Granulométrica (DNIT)	Faixa C
% passando #3/4	100.0
% passando #3/8	80.0
% passando #4	58.0
% passando #200	6.0
Identificação	
Massa específica (kg/m³)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 77. Parâmetros da Mistura reciclada com RFA inseridos no SisPav.
Fonte: Souza (2013).

SisPav 2009 (12/09/09) - Dimensionamento de Pavimento Danielly Dias.pvt

Projeto Editar Resultados Ferramentas Ajuda

Estrutura Tráfego Clima Modelos Resultados

Fadiga

- Mistura asfáltica
- Solo-cimento
- Material tratado com cimento
- Deflexões admissíveis

Deformação permanente

- Mistura asfáltica
- Material granular
- Solos lateríticos
- Solos finos, siltosos ou argilosos

Tensão limite no Subleito

Modelo de comportamento: Fadiga de Misturas Asfálticas

$$N_f = fcl \cdot k_1 \cdot \epsilon_t^{k_2} \cdot Mr^{k_3}$$

Restaurar

Parâmetros:

Parâmetro	Valor
Fator Campo-Laboratório (fd):	10000.00
Coefficiente de Regressão (k1):	1.904e-6
Coefficiente de Regressão (k2):	-2.821
Coefficiente de Regressão (k3):	-0.740
Erro padrão (%):	40

Observações:

Fonte: Franco (2007)
 Modelo obtido com base em resultados de 54 ensaios de laboratório da COPPE
 N = 536 pontos e R² = 0,805
 Mr = Módulo de resiliência em MPa
 et = Deformação específica de tração
 Nf = Vida de fadiga

Calcula o dano relativo à fadiga na base da camada de revestimento.

Abortar

Figura 78. Tela do Programa SisPav: Modelo de comportamento de Fadiga de Misturas Asfálticas
Fonte: Franco (2007).

Após inserção dos dados para composição da camada de revestimento, iniciou-se o processo de inserção dos dados para composição da camada de base do pavimento, sendo então utilizados os parâmetros da MSAR-3, quando compactada com a energia Intermediária.

A Figura 79 mostra a inserção de dados da mistura MSAR-3 compactada com energia intermediária, no programa SisPav, para simulação do dimensionamento da camada de base do pavimento proposto.

Camada selecionada -> 2

Material: Material granular

Espessura (m): 0.2000

Coefficiente de Poisson: 0.3500

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa): 3 - Elástico linear

Mr (MPa)	387.0000
----------	----------

Parâmetros

Identificação	MSAR3
Faixa granulométrica	25.0
Umidade ótima (%)	17.25
Massa específica (kg/m ³)	1.66
Energia de compactação	Intermediária
Grau de compactação (%)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 79. Parâmetros da mistura MSAR-3 compactada com energia intermediária, inseridos para o dimensionamento da base do pavimento proposto.

Nessa primeira análise utilizou-se um solo laterítico na camada de sub-base, com parâmetros sugeridos pelo banco de dados do programa SisPav, a fim de observar o comportamento da MSAR-3 como base de pavimento, como mostra a Figura 80.

Propriedades da camada

Camada selecionada -> 3

Material: Solo laterítico

Espessura (m): 0.1700

Coefficiente de Poisson: 0.3500

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa)

3 - Elástico linear

Mr (MPa)	130.0000
----------	----------

Parâmetros

Identificação	
Classificação	
Umidade ótima (%)	
Massa específica (kg/m³)	
Energia de compactação	
Grau de compactação (%)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 80. Propriedades da camada de sub-base utilizando os parâmetros de um solo laterítico, sugeridos pelo banco de dados do programa SisPav.

A Figura 81 mostra a inserção dos parâmetros relacionados ao subleito aplicado no dimensionamento, modelo sugerido pelo SisPav, para subleito tipo II.

Propriedades da camada

Camada selecionada -> SL

Material: Solos finos, siltosos ou argilosos

Espessura (m): 0.2000

Coefficiente de Poisson: 0.2500

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa)

3 - Elástico linear

Mr (MPa)	3000.0000
----------	-----------

Parâmetros

Classificação (DNIT)	Tipo II
CBR (%)	7
% Silte na fração fina #200	50.0
Identificação	
Umidade ótima (%)	
Massa específica (kg/m³)	
Energia de compactação	
Grau de compactação (%)	

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 81. Inserção dos parâmetros referentes ao subleito tipo II.

Após a inserção de todos os dados para o dimensionamento do pavimento proposto, a Figura 82 apresenta a tela do programa SisPav analisando o dimensionamento de pavimento da camada de base constituída por RC reutilizado como agregado graúdo e Solo Arenoso, destinada a receber carregamentos de um tráfego meio pesado.

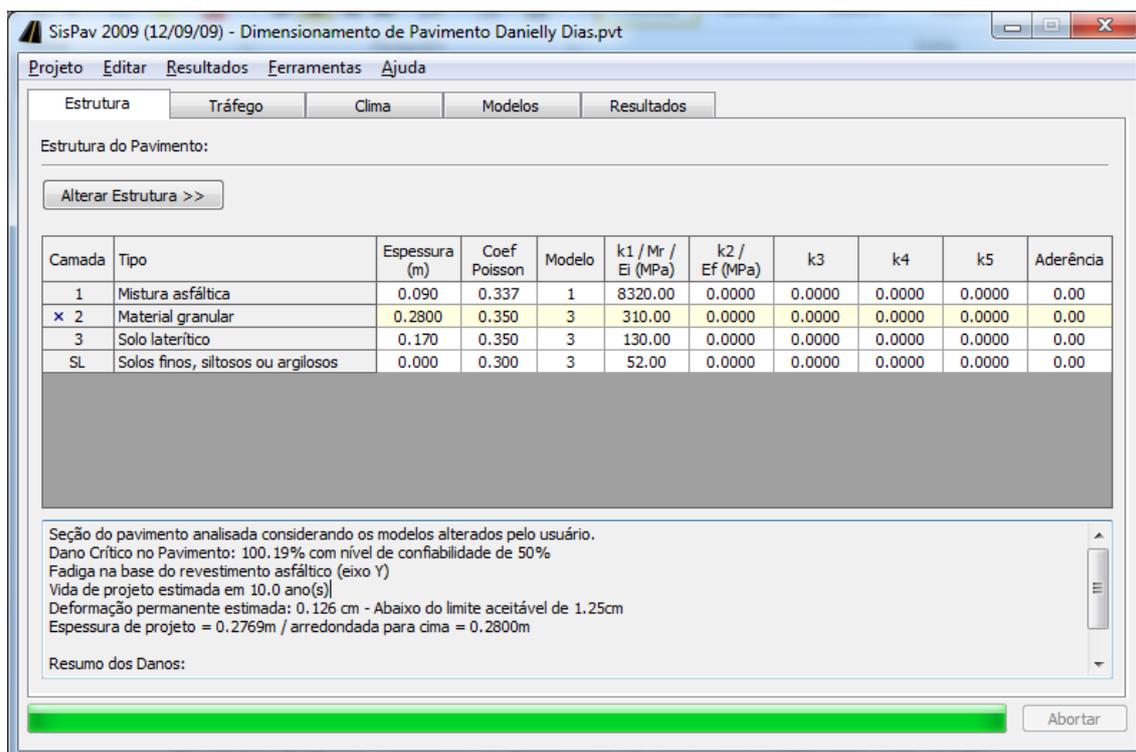


Figura 82. Tela do programa SisPav: Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento com camada de base constituída por MSAR-3 compactada com energia intermediária, para um volume de tráfego meio pesado.

A Tabela 37 apresenta os resultados da análise do dimensionamento do pavimento proposto utilizando os parâmetros da MSAR-3, compactada com energia intermediária, para um tráfego meio pesado e as Figuras 83 e 84 apresentam os gráficos referentes aos danos relativos à fadiga na base do revestimento asfáltico nos eixos.

Tabela 37. Resultados da análise do dimensionamento de pavimento utilizando a MSAR-3 como base de pavimento.

Camada	Material	Espessura (cm)	MR (MPa)	Vida de projeto (anos)
Mistura asfáltica	RFA reciclado	9,0	8320,00	
Base	MSAR-3	28	310,00	10,0
Sub-base	Solo Laterítico	17	130,00	

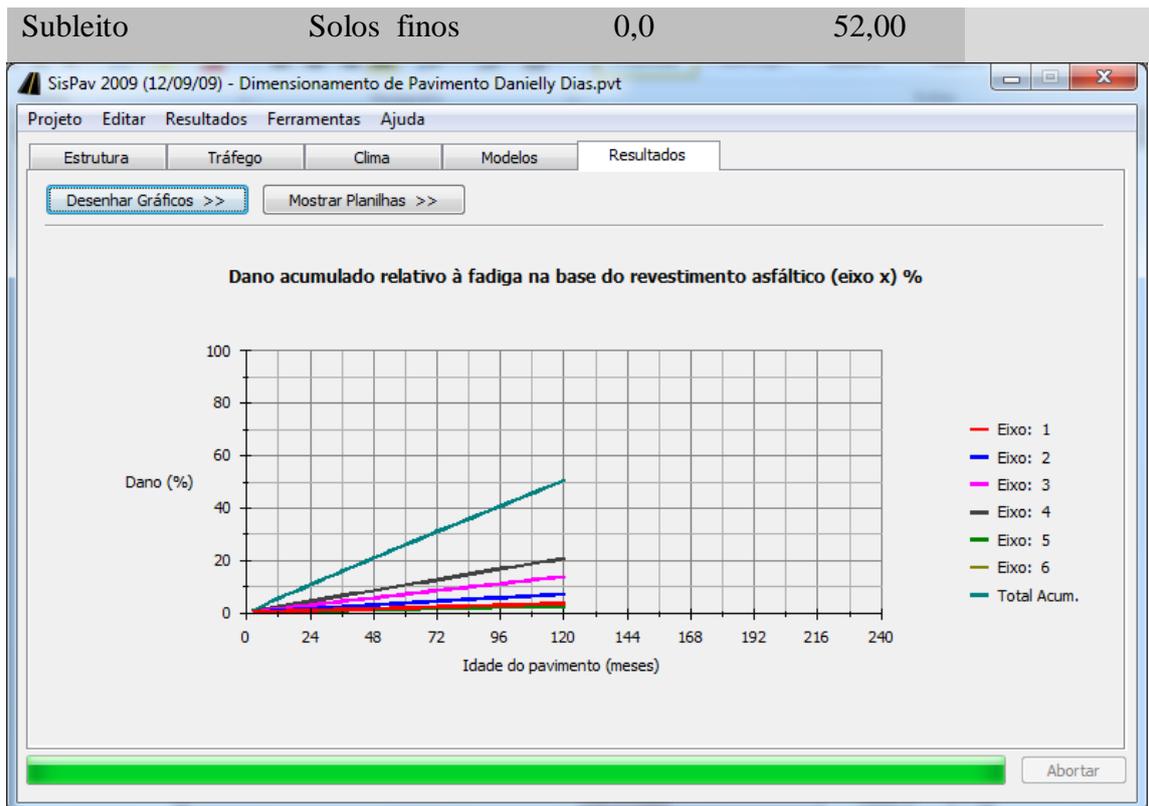


Figura 83. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo x) %.

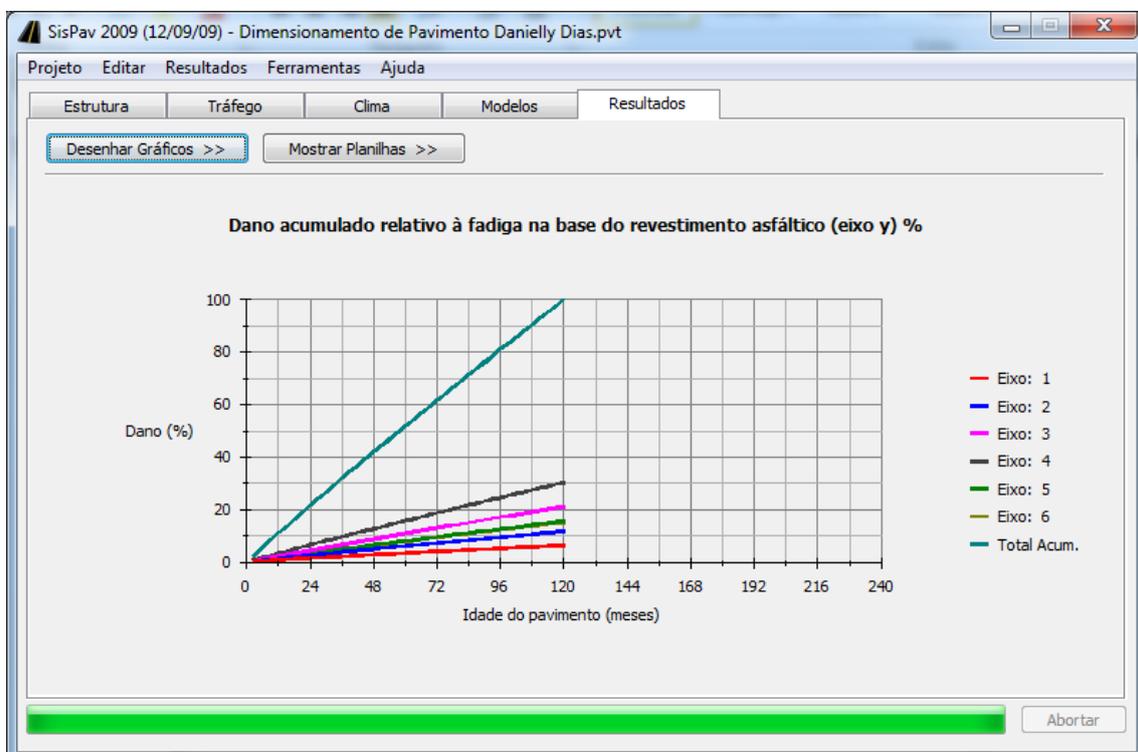


Figura 84. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo y) %.

Posteriormente, foram inseridos os dados para a análise da simulação do dimensionamento de um pavimento proposto, sendo que, dessa vez, o SisPav dimensiona e analisa a composição da camada de sub-base do pavimento, sendo utilizados os parâmetros da MSAR-3, quando compactada com a energia modificada.

A camada de base será a composta por um solo laterítico, com os parâmetros sugeridos pelo SisPav, e as demais camadas, de revestimento e o sub-leito terão os mesmos parâmetros utilizados na simulação anterior.

A Figura 85 mostra a tela do programa SisPav com os parâmetros utilizado para a composição da sub-base do pavimento proposto.

Propriedades da camada

Camada selecionada -> 3

Material: Material granular

Espessura (m): 0.1100

Coefficiente de Poisson: 0.3500

Aderência na interface: 0.0000

Modelo constituinte (MPa)

3 - Elástico linear

Mr (MPa)	384.0000
----------	----------

Parâmetros

Identificação	msar3
Faixa granulométrica	
Umidade ótima (%)	15.60
Massa específica (kg/m ³)	1.71
Energia de compactação	modificada
Grau de compactação (%)	90

Valores sugeridos >> OK Cancel

Figura 85. Parâmetros da mistura MSAR-3 compactada com energia modificada, inseridos para o dimensionamento da sub-base do pavimento proposto.

Após a inserção dos dados referentes à todas as camadas que compõem o pavimento proposto, foi solicitado ao programa realizar o dimensionamento. A Figura 86 mostra a tela do programa SisPav, analisando o dimensionamento de pavimento da camada de sub-base constituída por RC reutilizado como agregado graúdo e Solo Arenoso, proposta a fim de receber carregamentos de um tráfego meio pesado.

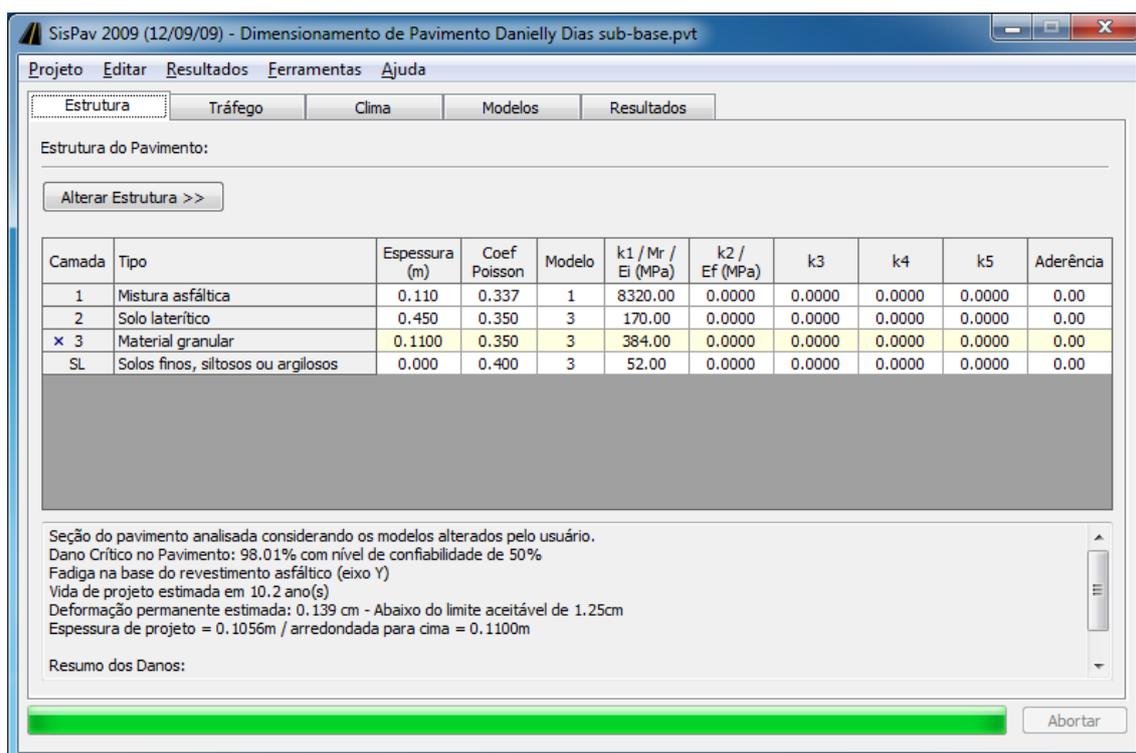


Figura 86. Tela do programa SisPav: Estrutura analisada no dimensionamento de pavimento com camada de sub-base constituída por MSAR-3 compactada com energia modificada, para um volume de tráfego meio pesado.

A Tabela 38 apresenta os resultados da análise do dimensionamento do pavimento proposto utilizando os parâmetros da MSAR-3, compactada com energia modificada, para um tráfego meio pesado e as Figuras 87 e 88 apresentam os gráficos referentes aos danos relativos à fadiga na base do revestimento asfáltico nos eixos.

Tabela 38. Resultados da análise do dimensionamento de pavimento utilizando a MSAR-3 como sub-base de pavimento.

Camada	Material	Espessura (cm)	MR (MPa)	Vida de projeto (anos)
Mistura asfáltica	RFA reciclado	11,0	8320,00	10,2
Base	Solo Laterítico	45	170,00	
Sub-base	MSAR-3	11	384,00	
Subleito	Solos finos	0,0	52,00	

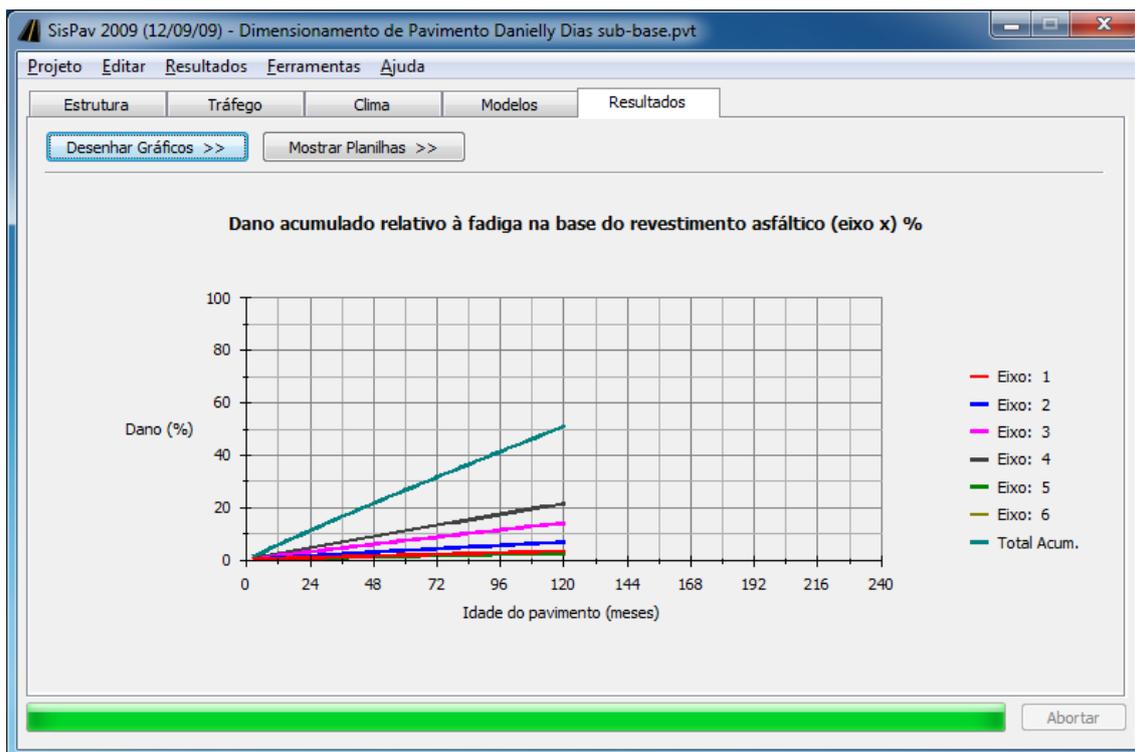


Figura 87. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo x) %.

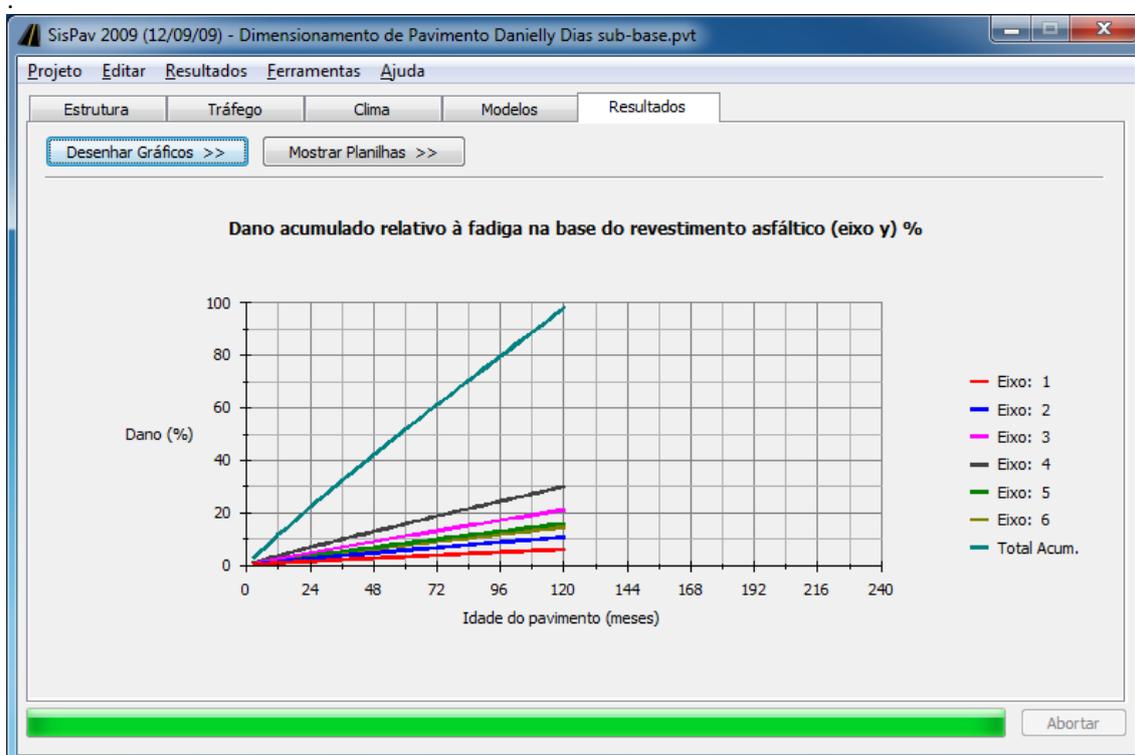


Figura 88. Tela do programa SisPav: Dano relativo à fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo y) %.

As simulações mostraram que as espessuras da camada de revestimento e as camadas subjacentes, estabelecidas no projeto da estrutura dos pavimentos propostos, foram suficientes para suportar um volume de tráfego meio pesado. Na primeira simulação, na qual a camada de base do pavimento foi constituída pela mistura MSAR-3 compactada com energia intermediária, escolha essa justificada pelo valor elevado de seu MR, a fadiga na base do revestimento asfáltico no eixo X foi de 50,56%, enquanto que no eixo Y, a fadiga na base do revestimento asfáltico foi de 100,19%. Enquanto na segunda simulação, na qual a sub-base do pavimento proposto foi a MSAR-3, compactada com energia modificada, a fadiga na base do revestimento asfáltico no eixo X foi de 51,04%, enquanto que no eixo Y a fadiga na base do revestimento asfáltico foi de 98,01%.

Ao inserir os dados com as espessuras pré-determinadas, foi observado, nas primeiras simulações, que ambos os pavimentos não satisfariam ao período de projeto de dez anos, para um volume de tráfego muito pesado, sendo necessários inúmeros ajustes seguidos de tentativas de dimensionamento das espessuras das camadas dos pavimentos propostos. A vida de fadiga se mostrava muito baixa e, eventualmente, as espessuras das camadas subjacentes deveriam ser aumentadas, principalmente na segunda simulação, na qual para que o pavimento fosse considerado viável, a camada de base chegou a uma espessura de 45 cm. No entanto, após demais ajustes, em ambas as simulações de dimensionamento de pavimento, utilizando a MSAR-3 como base e sub-base do pavimento proposto, para um tráfego relativamente meio pesado, a vida de projeto foi atendida, porém, em caso de execução de um trecho experimental, por exemplo, essas espessuras devem ser dimensionadas conforme as execuções convencionais mais adequadas, conforme a aplicação solicitada.

Com essa breve análise exploratória da aplicação do método mecanístico do programa computacional SisPav, o mesmo mostrou a versatilidade do método e a diferenciação necessária do comportamento dos materiais, para composição das camadas de um pavimento, sendo a compatibilidade dos materiais, fundamental.

Naturalmente, muitas opções de dimensionamento de pavimentos poderiam ser ainda tentadas com as misturas dessa pesquisa e parâmetros sugeridos pelo banco de dados do programa, para uma análise final, levando em consideração demais fatores que envolvem a escolha de um pavimento e sua execução, porém, não foi esse o objetivo dessa pesquisa, que limitava a aplicação do RC, na forma de agregado graúdo como elemento constituinte em camadas de sub-base e base de pavimento.

CAPITULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, por meio dos ensaios citados no corpo desta dissertação, foi possível concluir que de modo geral sobre as misturas analisadas e sua aplicação como sub-base e base de pavimento e os materiais que as compõem:

Em relação ao resíduo cerâmico utilizado como agregado graúdo, constatou-se que, apesar de ser um resíduo descartado por falha de produção, o mesmo apresenta condições favoráveis para a sua reutilização, devido demonstrar desgaste à fervura e desgaste à abrasão inferiores aos parâmetros estipulados pelas normas vigentes, além de se verificar, através da análise da composição química e mineralógica do mesmo, que a presença dos elementos que o compõem em sua maioria, inclusive a presença da caulinita, indicador das propriedades ideais para uso na indústria de cerâmica vermelha, que confere boa resistência ao RC, após o mesmo ser submetido a altas temperaturas.

Em regiões carentes de material pétreo, como o estado do Amazonas, a reutilização desse material pode ser considerada uma alternativa técnica e ambientalmente viável, uma vez que a resistência do resíduo cerâmico, com granulometria de agregado graúdo mostrou-se satisfatória, contribuindo para maior durabilidade dos pavimentos e na redução dos impactos ambientais resultantes da exploração de pedreiras e retiradas de seixo do leito dos rios.

Em relação às misturas solo-resíduo da primeira fase da pesquisa, suas propriedades não se mostraram tecnicamente viáveis para aplicação em camadas de sub-base e base de pavimento, por apresentarem ISCs com valores inferiores aos parâmetros estipulados pelas normas vigentes, que recomendam que esse índice, em relação à base, seja superior a 80%.

As Misturas MSR-1 e MSR-2 não atenderam sequer as especificações para subleito de pavimento, enquanto que as Misturas MSR-3 e MSR-4 atenderam aos parâmetros para a aplicação, apenas em camada de sub-base.

Nenhuma das misturas da primeira fase da pesquisa apresentou bom comportamento mecânico e suporte adequado para sua aplicação em base de pavimento, provavelmente, pela ocorrência de pobre interação entre as partículas, ocasionado pela granulometria irregular. Devido a esse fator, a granulometria do solo natural (SN), que compôs as misturas da segunda fase da pesquisa, as Misturas Solo Arenoso- Resíduo (MSAR), receberam adição de um percentual de 30% de agregado miúdo (areia), com a qual foi observado um melhor comportamento mecânico e suporte, em relação às misturas da fase anterior.

Os valores referentes à expansão mostraram-se satisfatórios, apesar da alta absorção do RC. A fim de corrigir ou minimizar os efeitos da elevada absorção do RC, optou-se por saturar o RC, conforme Dias (2004) em suas misturas de solo e agregado reciclado de telhas (ART) para então, iniciar o processo de compactação das MSARs.

Os valores de ISC das misturas MSAR-1 e MSAR-2, compactadas com energia modificada mostraram ótima resistência mecânica para aplicação das misturas em camada de sub- base, porém inviáveis para a aplicação em base de pavimento. As misturas MSAR-3 e MSAR-4 apontaram um excelente resultado acerca do suporte do solo estabilizado, com valores de ISC superiores a 80% quando compactadas em energia modificada, porém, após ensaios para determinação dos módulos de resiliência, os melhores resultados foram obtidos com as misturas compactadas com energia intermediária, devido a menor esmagamento do RC.

As simulações de dimensionamento de pavimento, cuja primeira simulação, na qual a camada de base do pavimento foi constituída pela mistura MSAR-3, compactada na energia intermediária e, a segunda simulação, na qual a sub-base do pavimento proposto foi a MSAR-3, compactada com energia modificada, mostraram que nas duas situações, ambos os pavimentos propostos foram suficientes para suportar um volume de tráfego meio pesado, sendo a vida de projeto, de 10 anos, atendida.

As análises de dimensionamento foram realizadas para que pudesse ser visualizada a aplicação da melhor mistura solo-resíduo, no caso a MSAR-3, na prática, com aplicação do método mecanístico do programa computacional SisPav, com várias possibilidades acerca do dimensionamento de pavimentos, com as misturas confeccionadas nessa pesquisa, juntamente com parâmetros sugeridos pelo banco de dados do programa.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A título de complementação à pesquisa realizada, utilizando o resíduo cerâmico proveniente de descarte, devido à falha de processo produtivo das indústrias que compõem o polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, são apresentadas sugestões para futuras pesquisas, como também recomendações de reuso e exploração do RC como agregado graúdo nas atividades de manutenção e restauração de vias de rolamento, a fim de estimular outras pesquisas, que envolvam o aperfeiçoamento do material para esse fim. Com isso, sugere-se:

- Levantamento das perdas do processo de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha das olarias do polo oleiro ceramista de Iranduba e Manacapuru, a fim de quantizar a perda real e assim, a demanda do material descartado, para posterior planejamento na utilização e gestão desses resíduos.
- Execução e acompanhamento de um trecho experimental de pavimento, utilizando a mistura solo arenoso- resíduo, com as proporções estudadas neste trabalho, para a avaliação das misturas em condições reais de solicitação, em virtude de que as condições de laboratório nem sempre conseguem reproduzi-las.
- Transferência desta metodologia para os segmentos interessados, tanto privados quanto governamentais, buscando permitir o emprego de misturas de solos com agregados reciclados, com benefícios de ordem ambiental, social, tecnológico e mercadológico, pois permitirá o aproveitamento de materiais locais, como no caso em questão, dos resíduos gerados no pólo de produção de cerâmica vermelha, que abrange os municípios de Iranduba e Manacapuru/AM.
- A aplicação de elevada energia de compactação na MSAR-3 confere a ela maior rigidez, devido ao esmagamento do RC. Essa rigidez resulta em alta capacidade de absorver tensões, favorecendo o surgimento de trincas de retração, o que pode causar reflexão de trincas no revestimento, sugerindo um estudo acerca da possibilidade de reflexão das trincas no pavimento constituído pelas MSAR.

- Avaliar o comportamento do módulo de resiliência MSARs com adição de resíduos de outros processos industriais, que atuem como desplastificante, visto que o resíduo cerâmico apresenta um bom potencial para a sua reutilização em camadas de pavimentos rodoviários.
- Simular umidades diversas no RC, utilizado em faixa granulométrica de agregado graúdo, e suas condições de saturação, a fim de observar a influência dos teores de umidade na compactação de misturas solo-resíduo.
- Faz-se necessário encontrar novas metodologias de dosagem, para as misturas confeccionadas com materiais reutilizados ou reciclados, como agregados, uma vez que não existe método específico para esse tipo de mistura e ao fim a que se destina.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **O futuro da Amazônia em risco: é preciso dar um basta à imprevidência com que a região e sua biodiversidade vêm sendo tratadas.** Scientific American Brasil, São Paulo, v. 3, n. 26, p. 98, 2004.
- ABDOU, M. R., BERNUCCI, L. L. B. **Pavimento ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades.** 1º Prêmio AEP-POLI de Iniciação Científica. Associação dos Engenheiros Politécnicos. 2006.
- ABREU, N.R.P; SILVA, D.M; CARVALHO, D.P. SAMPAIO, F.P.R. **Uma abordagem geográfica dos aspectos físicos e dos potenciais econômicos do solo de Iranduba – AM.** REVISTA GEONORTE, Edição Especial, V.2, N.4, p.659 – 667, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Plano Nacional de Integração Hidroviária. Relatório Executivo – Bacia amazônica.** Laboratório de Transportes e Logística – LABTRANS/UFSC. UFSC, 2013.
- ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005. 149 f.
- ARANOVICH, L.A.S. OGURSTSOVA, J. **Estabilização de solos lateríticos argilosos com e sem aditivos.** Anais da 22º Reunião Anual de Pavimentação. Volume I, 709/733. ABPv. Rio de Janeiro.1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA - ABC. **Anuário Brasileiro de Cerâmica** – Junho/2004.
- ASSOCIAÇÃO DOS CERAMISTAS DO ESTADO DO AMAZONAS – ACERAM. **Relatório da APL de Base Mineral.** Central de Resíduos, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502 - Classificação granulométrica - Rochas e Solos.** Rio de Janeiro. 1995. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro. 1984. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 - Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro. 1986. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro. 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica. Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182 - Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro. 1984. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216 - Amostragem de agregados.** Rio de Janeiro. 1982. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389 - Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto- Parte 1 – Agregado miúdo.** Rio de Janeiro. 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2006. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895 - Solo – Índice de suporte Califórnia – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 1987. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935 - Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro. 2011. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro. 2004. 17 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER . **Curso: A implantação de controles para melhoria da qualidade de produto cerâmico.** Rio de Janeiro. ANICER. 2010.

ASTM D4791-99. **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.** ASTM International. West Conshohocke, PA. 1999.

ASTM D5821-01. **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.** ASTM International. West Conshohocken, PA. 2013.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal [manuscrito]: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal.** Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP. Ouro Preto, MG. 2010.114f.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos. São Paulo. [s.n.]. 2007.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R.; MESBAH, A. **Blocos de Concreto de Terra: Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção**. Biblioteca SEBRAE Online. 2005. Disponível em [http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/AE6EC233B84C285B03256F940051465F/\\$File/NT000A3516.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/AE6EC233B84C285B03256F940051465F/$File/NT000A3516.pdf). Acessado em 20 de maio de 2014.

BARBOSA, N.P., GHAVAMI, K. **Terra Crua para Edificações**. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. vol 2. São Paulo. IBRACON. 2007.

BARROS, D. S.; SOARES, E. A. A. **Reconhecimento preliminar dos sedimentos quaternários na região de Manaus-AM**. In: IX Jornada de Iniciação Científica da Universidade do Amazonas. Manaus. Editora da Universidade do Amazonas. 2000. p. 73.

BATISTA, F. G. S. **Caracterização física e mecânica dos agregados de argila calcinada produzidos com solos finos da BR-163/PA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2004. 159f.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Vol. 1, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1982. 529p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. Petrobras/ABEDA. 2006.504 p.

BEZERRA, P.E.L. **Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões - Negro**. Tese de doutorado. Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará da UFPA. Belém, PA. 2003. 335p.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. INMET. Brasília. 1992. Publicação em forma impressa e CD em novembro de 2009.

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2005.

CABRAL E. M. **Fabricação de concreto com agregado de argila calcinada produzida com solo do polo oleiro do Amazonas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – PPGEC/ UFAM. Manaus. 2008.

CAMPELO, N. S. et al. **Ensaio tecnológicos em cerâmica vermelha do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru, AM**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 48, 2004, Curitiba. Anais. São Paulo: ABC. 2004. 1012 p.

CAMPELO, N.S; NOGUEIRA, A. C. R; SILVA, J. F. P. **Fabricação de agregado sintético de argila calcinada no polo oleiro do município de Iranduba, para emprego em infraestrutura viária e da construção civil, no estado do Amazonas.** Estudo de viabilidade técnica, ambiental, econômica e comercial – EVTEC. Programa Amazonas de apoio à pesquisa em empresas. PAPPE/FAPEAM/FINEP. Manaus, 2005.

CAMPELO, N.S. et al. **Estudo da utilização de resíduos cerâmicos queimado ('Chamote') oriundo do polo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru - AM, como aditivo na fabricação de telhas.** Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 44-46, jan./fev. 2006.

CAPUTO M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil.** Tese de Doutorado da University of California. Santa Barbara. 1984. 583 p.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2005. 131p.

CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos.** Projeto Entulho Bom. 188-227 p. EDUFBA/Caixa Econômica Federal. Salvador. 2001.

CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos.** Disponível em: <www.eccosystems.com.br/2008/artigos/reciclagem/6ProjetoParareciclagemdeentulhodematereiaisdeconstrucao>. 2008. Acesso em Maio de 2013.

CHAVES, S. W. Q. **Estudo de mercado da produção de tijolos no município de Iranduba.** Monografia de conclusão do curso de Ciências Econômicas. Faculdade de Estudos Sociais da Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2001. 54 p.

CHAVES, F.J. **Estudo de dosagem de areia-asfalto à frio.** Exame de qualificação ao Doutorado da COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

COSTA, M. L. **Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia.** In: Revista Brasileira de Geociências. V. 21. p. 146-160. 1994.

D'ANTONA, R. J. G.; CRUZ, N. M. C.; BRITO, I. A.; REIS, N. J.; FERREIRA. A. L.; DIAS, M. T. C. **Projeto materiais de construção na área Manacapuru – Iranduba – Manaus - Careiro: domínio Baixo Solimões.** Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Manaus. 2007.

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Thomsom Learning, tradução da 6ª edição norte-americana, São Paulo. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 029/94 - Solos – determinação de expansibilidade.** Rio de Janeiro. 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98- Agregados-determinação da abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro. 1998. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 041/94 - Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 049/94 - Solos – Determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** Rio de Janeiro. 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 051/94 - Solos – análise granulométrica.** Rio de Janeiro. 1994. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 080/94 - Solos – análise granulométrica por peneiramento.** Rio de Janeiro. 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 082/94 - Solos – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 083/98 - Agregados – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 1998. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 086/94. Agregado – determinação do índice de forma.** Rio de Janeiro. 1994. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 093/94 - Agregado – determinação da densidade real.** Rio de Janeiro. 1994. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 122/94 - Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito.** Rio de Janeiro. 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 129/94 - Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas.** Rio de Janeiro. 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 131/94 - Solos – módulo de resiliência de amostras compactadas.** Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 194/98 - Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1998. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 195/97 - Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1997. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 222/94 - Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão.** Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 230/94 - Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada.** Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 011/2004-PRO - Gestão da qualidade em obras rodoviárias – procedimento.** Rio de Janeiro. 2004. 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010-ES - Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço.** Rio de Janeiro. 2010. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010-ES - Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço.** Rio de Janeiro. 2010. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto Argila. Relatório final.** DNPM. Manaus. 2008. 110 f.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2004.

DINO R., SILVA O.B., ABRAHÃO D. 1999. **Palynological and stratigraphic characterization of the Cretaceous strata from the Alter do Chão Formation, Amazonas basin.** In: Anais do Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil e Simpósio sobre o Cretácico de América del Sur, col. 5. UNESP. p. 557-565.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte.** Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

FERNANDES Filho L. A.; COSTA M. L.; COSTA J. B. S. **Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus-Amazonas.** Revista Geociências nº 16, p. 9-33. 1997.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FIEMG. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha.** FIEMG. Minas Gerais. 2013.

FORTES, R.M.; NOGAMI, J.S. **Método Expedito de identificação do grupo MCT de Solos Tropicais, utilizando-se anéis de PVC Rígido**. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação - São Paulo, 1991, v.1, p.591-604.

FORTES, R.M. **Método das Pastilhas para Identificação Expedita do Grupo MCT-Miniatura, Compactada, Tropical**. 1ª Câmara Permanente de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Mackenzie, São Paulo, Brasil, 1997.

FORTES, R.M.; ZUPPOLINI NETO, A.; MERIGHI, J.V. **Proposta de normalização do método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais**. Anais da 11ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana, 2002, Porto Alegre, RS, Brasil.

FRANCO, F. A. **Método de dimensionamento mecanístico - empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

FREITAS, H. B. **Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

GODOY, H. **Identificação e classificação geotécnica de latossolos do Estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – USP. São Paulo. 132 p. 1997.

GODOY, H; BERNUCCI, L. B. **O Método das Pastilhas a compressão das propriedades geotécnicas básicas dos solos – um recurso didático**. ANPET, Artigo, 2002.

HORBE, A.M.C., VIEIRA L.C., NOGUEIRA A.C.R. **Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da bacia do Amazonas**. Revista Brasileira de Geociências, Vol. 36: p. 13-20. 2006.

HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SAN'TANA, W. C. **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luis - MA**. Revista Pesquisa em Foco, V. 17, N.2, p. 6-74, 2009.

INGLES, O. G., METCALF, J. B., **Soil Stabilization: Principles and Practice. Pavement recycling guidelines for state and local governments**. Federal Highway. International, 2002.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo do Comportamento de Misturas Solo-emulsão para Uso em Barragens**. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. UNB. Brasília. 160 f. 2005.

KINGERY, W. D. BOWEN, H. K. UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramic**. Ed. A. Wiley Interscience Publication. New York. 1976.

KISTLER P. **Historical resume of the Amazon Basin**. PETROBRAS/RENOR. Relatório interno 104-A. Belém. 1954.

KOTSCHOBAY, B. **Bauxitas do Médio Nhamundá, Região do Médio e baixo Amazonas – Natureza e Gênese.** In: 33º Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro, RJ. Anais, Vol. 8, 1984.

LAMBE, T. W; WHITMAN, R. V. **Mecânica de Suelos.** Editorial Limusa. México, 1990.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do rio grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 290p.

MACIEL, C.F; VALLE, M. I; MOURAQ, J.M. **Globalização, reestruturação produtiva e controle do trabalho no Polo Oleiro-cerâmico de Iranduba – AM.** Novos Cadernos NAEA. v. 15, n. 1, p. 311-331, jun. 2012.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais e Utilização Solos Lateríticos Locais a partir da Pedologia, e classificação MCT e Resiliência.** Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2004.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos.** Coordenação dos Programas de Pós-Graduação 'de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 1987.

MEDINA, J.M.; MOTTA, L.M.G. **Apostila de Estabilização de Solos.** Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.M.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos.** Ed Interciência. 570p. 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Editora PINI, 1994. 573p.

MENDES, A.C.; TRUCKENBRODII, W.; NOGUEIRA A.C.R. **Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil.** Revista brasileira de Geociências. vol.42 n.º1 São Paulo. 2012.

MICELI, J. G. **Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** 2006. 256 f. Dissertação de M. Sc. Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2005.

MOTTA, J. F. M. ZARNARDO, A. JUNIOR, M. C. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos.** Revista Cerâmica Industrial. vol 6. n 2. 6, p. 28-39. 2001.

NASCIMENTO, R. B. **Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação; Uma Alternativa para o Estado do Acre.** Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. 171p. 2005.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN, 2009. **Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – Práticas de Campo. Rede Ibero-americana PROTERRA.** Disponível em <http://www.redproterra.org>. Acessado em 22 de maio de 2013.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves, MG.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 171 f. 2010.

PAIVA, M.R.P.; HORBE, A.M.C.; MOTTA, M.B. & HORBE, M.A. **Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari AM.** Acta Amaz. Vol.37. p 81-90. 2007.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3º Edição com Exercícios resolvidos.** São Paulo. Oficina de Textos. 363 p. 2005.

PINTO, A.R.A.G. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. PUC-Rio. Brasil. 103p. 2008.

PRACIDELLI, S. MELCHIADES, G. F. **Importância da composição granulométrica de massas cerâmicas vermelhas.** Revista Cerâmica industrial. São Paulo, volume 2, número 1/2 -Jan/Abr. 1997.

REBELO, E. P. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu, Coari-AM.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas, 2009. 115 f.

RESENDE, A. D. **Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2010. 210f.

RESENDE, M.; CURI, M.; REZENDE, S.B.; CORREA, G.F **Pedologia: base para a distinção de ambientes.** NEPUT. Viçosa/MG. 2002.

RIELLA, H. G.; FRANJNDLICH, E. U. de C.; DURAZZO, M. **Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas.** Revista Cerâmica Industrial. Vol. 7. Maio/Junho, 2002.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.** 2. ed. Lanham, Maryland: Napa Research and Education Foundation, 1996.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos - Estudo Laboratorial**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

SALGADO, F. A. **Análise macro-mecânica do Comportamento da Terra como Revestimento Externo, com ou sem Reforço de Fibras Vegetais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. PUC-Rio, Brasil, 143 p. 2010.

SÁNCHEZ-MUÑOZ, L.; CAVA, S.; PASKOCIMAS, C. A.; CERISUELO, E.; LONGO, E.; CARDA, J. B. **Modelamento do processo de gresificação de massas cerâmicas de revestimento**. Revista Cerâmica, vol.48 no.308 São Paulo Oct./Dec. 2002.

SANTANA, H. **Tratamento contra pó em solos de características lateríticas**. In: **23º Reunião Anual de Pavimentação**. ABPV. Florianópolis, SC, 1971.

SANTANA, H. **Estabilização betuminosa de revestimentos primários**. In: **1ª Reunião de Técnicos em Manutenção de Estradas de Rodagem - 1º REMETER**. Fortaleza, CE, 1978.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de Argilas**. 1 ed. Vol 2, Editora Edgarg Blüncher, S. Paulo. 1975.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume**. In: **6ª Reunião de pavimentação urbana**. São Paulo. p.74 – 97. 1995.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Estudo de mercado SEBRAE/ESPM: cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos. Relatório completo**. Série Mercado. Rio de Janeiro: SEBRAE/RJ. 95 p. 2012.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1ª ed. Editora PINI. São Paulo. Vol. 2. 2002.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL- CPRM. **Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas**. Manaus. CPRM. CD-ROM. n. 1. 2006.

SEYE O.; BARBOSA, L.; GÓMEZ, E.; BRAUNBECK, O. **Queima direta de gramínea Projeto Integrado de Biomassa – PIB**. Enc. Energ. Meio Rural, ano 3, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético - NIPE/UNICAMP, Campinas/SP. 2003.

SILVA, C.L. **Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2005. 282p.

SILVA, E. S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. 2013. 219 f.

SILVA, C. L.; MORALES, N. ; CROSTA, A. ; COSTA, S. S. ; RUEDA, J. R. J. . **Analys of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary process of the western Amazon Basin: an approach using satellite images and digital elevation model.** Anais da Academia Brasileira de Ciências , v. 79, p. 693-711, 2008.

SOARES, E. A. A. **Depósitos pleistocenos da região de confluência dos Rios Negro e Solimões, Amazonas.** Tese de Doutorado – Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, 2007. 205 p.

SOLIZ, V.V.P. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 166 f. 2007.

SOMBROEK, W. G. **Amazon Soils. A Reconnaissance of the Soils of the Brazilian Amazon Region.** Wageningen: Centre for Agriculture. Public Document. 292 p.1996.

SOUZA, C. G. **Solos.** In: HAMMERLI, S. M. & FREDRICH, O. M. B. L. (COORD. GERAL). 1991. Geografia do Brasil. FIBGE, Diretoria de Geociências, Rio e Janeiro (RJ). 1991.

SOUZA, V. S e NOGUEIRA, A. C. R. **Seção Geológica Manaus – Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo.** Revista brasileira de geociências. vol.39 n° 1. São Paulo. 2009.

SOUZA FILHO. ; QUADROS, M.L.; SCANDOLARA, J.E.; SILVA, E.P.; REIS, M.R. **Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia-Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, Vol.29, n.4, p.469-476. 1999.

TRINDADE, P. **Análise do desempenho da economia oleiro-cerâmica do município de Iranduba.** Monografia. Manaus: UFAM/. Faculdade de Estudos Sociais, 1999.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM. **Relatório de Impacto Ambiental da Cidade Universitária - EIA/RIMA.** IPAAM. Manaus. 2007. Disponível em: <http://www.ipaam.am.gov.br/arquivos/download/>

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** Mcgraw-Hill do Brasil. São Paulo. 1977.

VIEIRA, L. S. **Manual da Ciência do Solo.** Ed. Agronômica Céres. 464 p. São Paulo. 1975.

VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S.N., **Characterization of Clays from Campos dos Goytacazes, North Rio de Janeiro State (Brazil).** Tile & Brick Int., v. 18, n. 3, pp. 152-157, 2002.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. **Perspectivas de aplicação de solo cal em rodovias: exemplos de pistas experimentais.** In. Anais da Reunião aberta da indústria de cal, 4. 1981. São Paulo. São Paulo: ABPC, p. 212 -234 (Boletim 12).

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. **Características e desempenho de segmentos com base de argila laterítica.** Anais da 24ª Reunião Anual de Pavimentação. Belém. 1990. Vol 1, 291/304. ABPv, Rio de Janeiro, RJ.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. FORTES F. Q.; TONATO J. E. **Pavimentação Urbana de baixo custo com base de argila laterítica.** Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Cuiabá. 1995. Vol 1, ABPv, Rio de Janeiro, RJ.

VIZCARRA, G.O.C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010. 120 f.

WESSELING, D.H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. PPGEC, UFRGS, 2005. 143 f.

ZANDONADI, A. R.; IOSHIMOTO, E. **Cerâmica Vermelha.** Curso Internacional de treinamento em grupo de tecnologia cerâmica. São Paulo: IPT, JICA, 1991.