

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM MATERIAL
FRESADO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

LUIZ PAULO VIEIRA DE ARAUJO JUNIOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr Marcos Antonio Garcia Ferreira

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

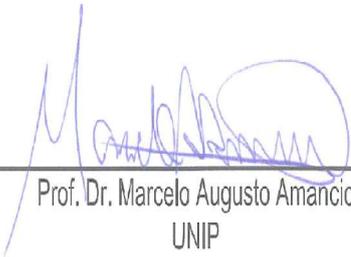
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luiz Paulo Vieira de Araújo Júnior, realizada em 23/04/2019:



Prof. Dr. Marcos Antonio Garcia Ferreira
UFSCar



Prof. Dr. Francis Massashi Kakuda
UFSCar



Prof. Dr. Marcelo Augusto Amancio
UNIP

Vieira de Araújo Júnior, Luiz Paulo

ESTUDO SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM MATERIAL
FRESADO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA / Luiz Paulo Vieira de
Araújo Júnior. -- 2019.

122 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador: Marcos Antonio Garcia Ferreira

Banca examinadora: Marcos Antonio Garcia Ferreira, Francis Massashi
Kakuda, Marcelo Augusto Amancio

Bibliografia

1. Estabilização de Solos. 2. Material Fresado. 3. Solos Tropicais. I.
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

DEDICATÓRIA

A Deus e a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por estar me concedendo a oportunidade de concluir mais uma etapa profissional;

À minha família, mãe, irmã e noiva por todo suporte, por acreditarem em mim mesmo quando eu só via dificuldades;

Ao meu orientador Professor Marcos Antônio Garcia, pela sugestão do tema e pelas orientações;

À professora Suely, pelas contribuições;

Ao Professor Francis pelo auxílio na parte laboratorial;

Aos técnicos do Laboratório de Estradas Luiz Antônio e Sidney, e ao técnico do Laboratório de Concreto, José;

À Capes, pelo apoio financeiro, sem a qual seria impossível o desenvolvimento deste estudo;

À UFSCar e ao Programa PPGEU, pelo suporte necessário;

Sem demais, meus sinceros agradecimentos a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

No Brasil, o meio de transporte mais utilizado por pessoas e para a locomoção de cargas é o rodoviário, sendo que, das rodovias pavimentadas, constata-se que a maioria possui revestimento asfáltico, bem como as vias urbanas. Entretanto, para manter essas vias em condições aceitáveis de trafegabilidade e segurança, são necessárias intervenções regulares de manutenção ou restauração. Entre esses processos de reabilitação do revestimento asfáltico, existe o processo de fresagem da capa asfáltica que gera, conseqüentemente, uma grande quantidade de resíduos que necessitam de um destino final. Nesse caso, o reaproveitamento do material fresado é um tema importante a ser estudado, pois, além de conter propriedades que podem proporcionar um aumento de resistência nas camadas de pavimento, pode reduzir os custos de execução gerando menores impactos ao meio ambiente, uma vez que o material a ser descartado será reutilizado. Para, além disso, não é necessário extrair os materiais das jazidas, bem como a não necessidade de áreas para depósitos. A partir desse cenário, podemos destacar que a importância do presente estudo foi buscar uma alternativa para o reaproveitamento dos resíduos. Nesse sentido, tivemos como objetivo avaliar o comportamento e o desempenho das misturas de solos tropicais lateríticos e não lateríticos com material fresado de revestimento asfáltico para possível utilização em camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos flexíveis para vias urbanas. A metodologia empregada de caráter experimental procedeu de acordo com as seguintes etapas: escolha e coletas de cinco solos da região de São Carlos-SP; identificação dos solos, a saber: solos 1, 2, 3, 4 e 5; realização de ensaios de caracterização dos solos; e, por fim, classificação de acordo com a metodologia MCT e HRB. Assim, o material fresado de revestimento asfáltico foi coletado e realizado ensaios de caracterização do resíduo, sendo o mesmo utilizado na mistura sem nenhum processo de tratamento. A parte experimental através de ensaios de Índice Suporte Califórnia (ISC) simultâneo na energia Normal e Intermediária de compactação, no qual foram aplicadas uma variação das porcentagens de material fresado em relação aos solos puros utilizados. As porcentagens foram acrescidas em proporções pré-definidas de 10% em 10% do material reciclado (fresado) em substituição ao solo até atingir 50%. Avaliou-se a variação do ISC e da expansão em diferentes teores de umidade para os solos puramente como para as diferentes misturas. Portanto, com base nos resultados dos ensaios realizados dos solos os analisados verificou-se que o emprego de material fresado em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos de baixo volume de tráfego ou pavimentos urbanos, pode sim ser uma alternativa tecnicamente viável, desde que atendidas as condições para aplicação.

Palavras-chave: Estabilização de Solo, Material Fresado, Solos Tropicais, Camadas de Pavimento, Ensaio em Laboratório.

ABSTRACT

In Brazil, the most commonly used means of transport for people and the locomotion of loads is the road, and the paved roads show that most of them have asphaltic coating, as well as urban roads. However, to maintain these roads under acceptable traffic and safety conditions, regular maintenance or restoration interventions are required. Among these processes for the rehabilitation of the asphalt coating, there is the milling process of the asphalt layer, which consequently generates a large amount of waste that needs a final destination. In this case, the reuse of the milled material is an important topic to be studied, since, besides containing properties that can provide an increase of resistance in the layers of pavement, can reduce the execution costs generating less impacts to the environment, since the material to be discarded will be reused. In addition, it is not necessary to extract the materials from the deposits, as well as the need for no deposit areas. From this scenario, we can highlight that the importance of the present study was to seek an alternative to the reuse of waste. In this sense, we had as objective to evaluate the behavior and performance of the mixtures of lateritic and non-lateritic tropical soils with milled asphalt material for possible use in base layers, sub-base and reinforcement of subgrade of flexible pavements for urban roads. The experimental methodology was carried out according to the following steps: selection and collection of five soils of the region of São Carlos-SP; identification of soils, namely: soils 1, 2, 3, 4 and 5; conducting soil characterization tests; and, finally, classification according to the MCT and HRB methodology. Thus, the asphalt milled material was collected and the characterization of the residue was carried out, being the same used in the mixture without any treatment process. The experimental part by means of simultaneous Support California Index (ISC) tests in the Normal and Intermediate compaction energy, in which a variation of percentages of milled material was applied in relation to the pure soils used. The percentages were increased in pre-defined proportions of 10% in 10% of the recycled material (milling) in substitution to the soil until reaching 50%. The variation of the ISC and the expansion in different moisture contents for the soils purely as for the different mixtures were evaluated. Therefore, based on the results of the tests carried out on the soils analyzed, it was verified that the use of milled material in layers of subgrade reinforcement, sub-base and base of low traffic pavements or urban pavements, can be an alternative technically feasible, provided that the conditions for application are met.

Keywords: Soil Stabilization, RAP, Tropical Soils, Pavement Layers, Laboratory Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pavimento flexível.....	21
Figura 2. Camadas que compõe um pavimento flexível.....	21
Figura 3. Estados físicos de misturas granulométricas.....	27
Figura 4. Localização da cidade de São Carlos – SP.....	44
Figura 5. Formação geológica da cidade de São Carlos adaptado da CPRM.....	44
Figura 6. Coleta de solos - Solo 1 (à esquerda) e Solo 2 (à direita)	45
Figura 7. Coleta de solos - Solo 3 (à esquerda) e Solo 4 (à direita).....	46
Figura 8. Coleta do solo - Solo 5.....	46
Figura 9. Coleta do material fresado de revestimento asfáltico.....	47
Figura 10. Trecho de manutenção no qual foi obtido o material fresado.....	47
Figura 11. Material fresado seco ao ar.....	48
Figura 12. Esquema de compactador MCV.....	50
Figura 13. Ensaio de perda de massa por imersão.....	50
Figura 14. Material fresado quarteado.....	51
Figura 15. Material fresado sendo adicionado ao solo.....	51
Figura 16. Corpos de prova imersos para análise da expansão.....	52
Figura 17. Ensaio de resistência ISC.....	52
Figura 18. Ensaio de massa específica.....	53
Figura 19. Curva granulométrica do Material Fresado.....	55
Figura 20. Recipientes com os materiais retidos em cada peneira.....	56
Figura 21. Curva granulométrica do material fresado sem o ligante.....	57
Figura 22. Ensaio de limite de liquidez.....	58
Figura 23. Ensaio de limite de plasticidade.....	59
Figura 24. Curva granulométrica dos solos.....	60
Figura 25. Classificação MCT.....	62
Figura 26. Massa específica VS umidade do solo 1 (LA) na energia normal.....	64
Figura 27. ISC e expansão do solo 1 (LA) na energia normal.....	64
Figura 28. Massa específica VS umidade do solo 2 (NA') na energia normal.....	66
Figura 29. ISC e expansão do solo 2 (NA') na energia normal.....	66
Figura 30. Massa específica VS umidade do solo 3 (LA') na energia normal.....	68
Figura 31. ISC e expansão do solo 3 (LA') na energia normal.....	68
Figura 32. Massa específica VS umidade do solo 4 (LA) na energia normal.....	70
Figura 33. ISC e expansão do solo 4 (LA) na energia normal.....	70
Figura 34. Massa específica VS umidade do solo 5 (NG') na energia normal.....	72
Figura 35. ISC e expansão do solo 5 (NG') na energia normal.....	72
Figura 36. Massa específica VS umidade do solo 1 (LA) na energia intermediária.....	74
Figura 37. ISC e expansão do solo 1 (LA) na energia intermediária.....	74
Figura 38. Massa específica VS umidade do solo 2 (NA') na energia intermediária.....	76
Figura 39. ISC e expansão do solo 2 (NA') na energia intermediária.....	76
Figura 40. Massa específica VS umidade do solo 3 (LA') na energia intermediária.....	78
Figura 41. ISC e expansão do solo 3 (LA') na energia intermediária.....	78
Figura 42. Massa específica VS umidade do solo 4 (LA) na energia intermediária.....	80
Figura 43. ISC e expansão do solo 4 (LA) na energia intermediária.....	80
Figura 44. Coeficiente de ajuste na energia normal.....	82
Figura 45. Coeficiente de ajuste na energia intermediária.....	84
Figura 46. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) Natural energia normal.	95
Figura 47. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 10% M.F. energia normal.....	95
Figura 48. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 20% M.F. energia normal.....	96
Figura 49. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 30% M.F. energia normal.....	96

normal.....	96
Figura 50. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 40% M.F. energia normal.....	97
Figura 51. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 50% M.F. energia normal.....	97
Figura 52. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') Natural energia normal.....	98
Figura 53. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 10% M.F. energia normal.....	98
Figura 54. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 20% M.F. energia normal.....	99
Figura 55. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 30% M.F. energia normal.....	99
Figura 56. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 40% M.F. energia normal.....	100
Figura 57. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 50% M.F. energia normal.....	100
Figura 58. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') Natural energia normal.....	101
Figura 59. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 10% M.F. energia normal.....	101
Figura 60. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 20% M.F. energia normal.....	102
Figura 61. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 30% M.F. energia normal.....	102
Figura 62. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 40% M.F. energia normal.....	103
Figura 63. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 50% M.F. energia normal.....	103
Figura 64. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) Natural energia normal.....	104
Figura 65. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 10% M.F. energia normal.....	104
Figura 66. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 20% M.F. energia normal.....	105
Figura 67. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 30% M.F. energia normal.....	105
Figura 68. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 40% M.F. energia normal.....	106
Figura 69. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 50% M.F. energia normal.....	106
Figura 70. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') Natural energia normal.....	107
Figura 71. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 10% M.F. energia normal.....	107
Figura 72. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 20% M.F. energia normal.....	108
Figura 73. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 30% M.F. energia normal.....	108
Figura 74. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 40% M.F. energia normal.....	109
Figura 75. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 50% M.F. energia normal.....	

normal.....	109
Figura 76. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) Natural energia intermediária.....	110
Figura 77. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 10% M.F. energia intermediária.....	110
Figura 78. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 20% M.F. energia intermediária.....	111
Figura 79. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 30% M.F. energia intermediária.....	111
Figura 80. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 40% M.F. energia intermediária.....	112
Figura 81. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 50% M.F. energia intermediária.....	112
Figura 82. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') Natural energia intermediária.....	113
Figura 83. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 10% M.F. energia intermediária.....	113
Figura 84. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 20% M.F. energia intermediária.....	114
Figura 85. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 30% M.F. energia intermediária.....	114
Figura 86. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 40% M.F. energia intermediária.....	115
Figura 87. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 50% M.F. energia intermediária.....	115
Figura 88. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') Natural energia intermediária.....	116
Figura 89. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 10% M.F. energia intermediária.....	116
Figura 90. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 20% M.F. energia intermediária.....	117
Figura 91. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 30% M.F. energia intermediária.....	117
Figura 92. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 40% M.F. energia intermediária.....	118
Figura 93. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 50% M.F. energia intermediária.....	118
Figura 94. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) Natural energia intermediária.....	119
Figura 95. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 10% M.F. energia intermediária.....	119
Figura 96. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 20% M.F. energia intermediária.....	120
Figura 97. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 30% M.F. energia intermediária.....	120
Figura 98. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 40% M.F. energia intermediária.....	121
Figura 99. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 50% M.F. energia intermediária.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros para Base e Sub-base estabilizadas granulometricamente.....	28
Tabela 2. Características dos solos tropicais.....	29
Tabela 3. Resumo dos trabalhos referentes à pesquisa.....	37
Tabela 4. Localização dos solos coletados.....	46
Tabela 5. Massa específica do agregado miúdo.....	54
Tabela 6. Massa específica do agregado graúdo.....	54
Tabela 7. Absorção do material fresado.....	55
Tabela 8. Ensaio de Peneiramento.....	58
Tabela 9. Ensaio Limite de liquidez.....	59
Tabela 10. Ensaio Limite de Plasticidade.....	59
Tabela 11. Massa específica dos solos.....	60
Tabela 12. Composição granulométrica dos solos.....	61
Tabela 13. Parâmetros para a classificação HRB.....	61
Tabela 14. Ensaio de mini-MCV.....	62
Tabela 15. Resultados do solo 1 (LA) na energia normal.....	65
Tabela 16. Resultados do solo 2 (NA') na energia normal.....	67
Tabela 17. Resultados do solo 3 (LA') na energia normal.....	69
Tabela 18. Resultados do solo 4 (LA) na energia normal.....	71
Tabela 19. Resultados do solo 5 (NG') na energia normal.....	73
Tabela 20. Resultados do solo 1(LA) na energia intermediária.....	75
Tabela 21. Resultados do solo 2 (NA') na energia intermediária.....	77
Tabela 22. Resultados do solo 3 (LA') na energia intermediária.....	79
Tabela 23. Resultados do solo 4 (LA) na energia intermediária.....	81
Tabela 24. ISC na energia normal.....	71
Tabela 25. ISC na energia intermediária.....	81
Tabela 26. Coeficientes de ajuste e equações de regressão energia normal.....	83
Tabela 27. Porcentagem de ganho de ISC na energia normal.....	83
Tabela 28. Coeficientes de ajuste e equações de regressão energia intermediária...	84
Tabela 29. Porcentagem de ganho de ISC na energia intermediária.....	84
Tabela30. Resultados do Solo 1 (LA) Natural – energia normal.....	95
Tabela31. Resultados do Solo 1 (LA) 10% M. F. – energia normal.....	96
Tabela32. Resultados do Solo 1 (LA) 20% M. F. – energia normal.....	96
Tabela33. Resultados do Solo 1 (LA) 30% M. F. – energia normal.....	97
Tabela34. Resultados do Solo 1 (LA) 40% M. F. – energia normal.....	97
Tabela35. Resultados do Solo 1 (LA) 50% M. F. – energia normal.....	98
Tabela36. Resultados do Solo 2 (NA') Natural – energia normal.....	98
Tabela37. Resultados do Solo 2 (NA') 10% M. F. – energia normal.....	99
Tabela38. Resultados do Solo 2 (NA') 20% M. F. – energia normal.....	99
Tabela39. Resultados do Solo 2 (NA') 30% M. F. – energia normal.....	100
Tabela40. Resultados do Solo 2 (NA') 40% M. F. – energia normal.....	100
Tabela41. Resultados do Solo 2 (NA') 50% M. F. – energia normal.....	101
Tabela42. Resultados do Solo 3 (LA') Natural – energia normal.....	101
Tabela43. Resultados do Solo 3 (LA') 10% M. F. – energia normal.....	102
Tabela44. Resultados do Solo 3 (LA') 20% M. F. – energia normal.....	102
Tabela45. Resultados do Solo 3 (LA') 30% M. F. – energia normal.....	103
Tabela46. Resultados do Solo 3 (LA') 40% M. F. – energia normal.....	103
Tabela47. Resultados do Solo 3 (LA') 50% M. F. – energia normal.....	104
Tabela48. Resultados do Solo 4 (LA) Natural – energia normal.....	104
Tabela49. Resultados do Solo 4 (LA) 10% M. F. – energia normal.....	105
Tabela50. Resultados do Solo 4 (LA) 20% M. F. – energia normal.....	105

Tabela51. Resultados do Solo 4 (LA) 30% M. F. – energia normal.....	106
Tabela52. Resultados do Solo 4 (LA) 40% M. F. – energia normal.....	106
Tabela53. Resultados do Solo 4 (LA) 50% M. F. – energia normal.....	107
Tabela54. Resultados do Solo 5 (NG') Natural – energia normal.....	107
Tabela55. Resultados do Solo 5 (NG')10% M. F. – energia normal.....	108
Tabela56. Resultados do Solo 5 (NG') 20% M. F. – energia normal.....	108
Tabela57. Resultados do Solo 5 (NG') 30% M. F. – energia normal.....	109
Tabela58. Resultados do Solo 5 (NG') 40% M. F. – energia normal.....	109
Tabela59. Resultados do Solo 5 (NG') 50% M. F. – energia normal.....	110
Tabela60. Resultados do Solo 1 (LA) Natural – energia intermediária.....	110
Tabela61. Resultados do Solo 1 (LA) 10% M. F. – energia intermediária.....	111
Tabela62. Resultados do Solo 1 (LA) 20% M. F. – energia intermediária.....	111
Tabela63. Resultados do Solo 1 (LA) 30% M. F. – energia intermediária.....	112
Tabela64. Resultados do Solo 1 (LA) 40% M. F. – energia intermediária.....	112
Tabela65. Resultados do Solo 1 (LA) 50% M. F. – energia intermediária.....	113
Tabela66. Resultados do Solo 2 (NA') Natural – energia intermediária.....	113
Tabela67. Resultados do Solo 2 (NA') 10% M. F. – energia intermediária.....	114
Tabela68. Resultados do Solo 2 (NA') 20% M. F. – energia intermediária.....	114
Tabela69. Resultados do Solo 2 (NA') 30% M. F. – energia intermediária.....	115
Tabela70. Resultados do Solo 2 (NA') 40% M. F. – energia intermediária.....	115
Tabela71. Resultados do Solo 2 (NA') 50% M. F. – energia intermediária.....	116
Tabela72. Resultados do Solo 3 (LA') Natural – energia intermediária.....	116
Tabela73. Resultados do Solo 3 (LA') 10% M. F. – energia intermediária.....	117
Tabela74. Resultados do Solo 3 (LA') 20% M. F. – energia intermediária.....	117
Tabela75. Resultados do Solo 3 (LA') 30% M. F. – energia intermediária.....	118
Tabela76. Resultados do Solo 3 (LA') 40% M. F. – energia intermediária.....	118
Tabela77. Resultados do Solo 3 (LA') 50% M. F. – energia intermediária.....	119
Tabela78. Resultados do Solo 4 (LA) Natural – energia intermediária.....	119
Tabela79. Resultados do Solo 4 (LA) 10% M. F. – energia intermediária.....	120
Tabela80. Resultados do Solo 4 (LA) 20% M. F. – energia intermediária.....	120
Tabela81. Resultados do Solo 4 (LA) 30% M. F. – energia intermediária.....	121
Tabela82. Resultados do Solo 4 (LA) 40% M. F. – energia intermediária.....	121
Tabela83. Resultados do Solo 4 (LA) 50% M. F. – energia intermediária.....	122

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

% - percentagem

a – absorção de água

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BR – Rodovia Federal

CBR – Califórnia Bearing Ratio

c' – coeficiente angular metodologia MCT

d' – coeficiente angular metodologia MCT

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes

e' – índice da classificação MCT

ES – Especificação de Serviço

Ms – massa específica do agregado na condição seca

Mh – ,massa específica do agregado na condição Saturada Superfície Seca

L – Leituta da balança hidrostática

γ – Massa específica dos grãos

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura Compactada Tropical

ME – Método de Ensaio

MF – Material Fresado

MCV - Moisture Condition Value – Valor da condição de umidade

NBR – Norma Brasileira

Pi – Perda de massa por imersão

SAFL – Solos arenoso finos lateríticos

H – umidade do material

HRB - Highway Research Board

TRB – Transportation Research Board

Md - Massa desprendida;

Mt - Massa total do corpo de prova;

A - A altura do corpo de prova em (mm);

UCS – Sistema Unificado de Classificação

A = massa do agregado seco

B = massa do agregado na condição saturada seca

N.P. – Não plástico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos geral.....	18
1.3 Objetivos específicos.....	18
1.4 Estrutura do trabalho.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Definição de pavimentos	20
2.2 Camadas do pavimento flexível	21
2.3 Materiais das camadas do pavimento	23
2.3.1 Solos	23
2.3.2 Agregados para as camadas dos pavimentos.....	23
2.4 Estabilização de solos.....	24
2.4.1 Estabilização granulométrica.....	24
2.5 Solos tropicais.....	28
2.6 Reciclagem de pavimentos a partir de resíduos da fresagem.....	29
2.7 Trabalhos referentes ao presente estudo.....	31
3 METODOLOGIA	43
3.1 Seleção e caracterização da área.....	43
3.2 Coleta de solos.....	45
3.3 Material fresado	46
3.4 Ensaio no material fresado	47
3.5 Ensaio nos solos.....	48
3.6 Ensaio nas misturas.....	50
3.7 Análise estatística.....	52
4 RESULTADOS	53
4.1 Material Fresado	53
4.1.1 Massa específica	53
4.1.1.1 Passantes na peneira de 4,8 mm	53
4.1.1.2 Retidos na peneira de 4,8 mm	54
4.1.2 Absorção	54
4.1.3 Granulometria com ligante asfáltico.....	55
4.1.4 Granulometria sem ligante asfáltico.....	56
4.2 Solos	57
4.2.1 Peneiramento	57
4.2.2 Limites de Consistência	58
4.2.2.1 Limite de Liquidez	58
4.2.2.2 Limite Plasticidade	59
4.2.3 Massa Específica	60
4.2.4 Análise granulométrica conjunta	60
4.2.5 Classificação HRB	61
4.2.6 Classificação MCT	62
4.3 Ensaio nas misturas.....	63
4.3.1 Energia Normal	63
4.3.1.1 Solo 1 (LA) com suas respectivas misturas.....	63
4.3.1.2 Solo 2 (NA') com suas respectivas misturas.....	65
4.3.1.3 Solo 3 (LA') com suas respectivas misturas.....	67
4.3.1.4 Solo 4 (LA) com suas respectivas misturas.....	69

4.3.1.5 Solo 5 (NG') com suas respectivas misturas.....	71
4.3.2 Energia Intermediária	73
4.3.2.1 Solo 1 (LA) com suas respectivas misturas.....	73
4.3.2.2 Solo 2 (NA') com suas respectivas misturas.....	75
4.3.2.3 Solo 3 (LA') com suas respectivas misturas.....	77
4.3.2.4 Solo 4 (LA) com suas respectivas misturas.....	79
4.4 Estudo de ISC na energia normal VS energia intermediária.....	81
4.5 Análise Estatística.....	82
4.6 Análise dos Resultados.....	85
5. CONCLUSÃO	87
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	90
ANEXOS.....	95

1. INTRODUÇÃO

O solo é considerado um material complexo, por se tratar de uma estrutura que é dependente do relevo, do clima, da temperatura e de sua rocha de origem, apesar disso, é o material mais utilizado no ramo da construção civil devido sua grande disponibilidade, porém, o seu uso de forma natural, muitas vezes, não é o mais adequado pelo fato de não atender aos requisitos necessários como camadas de pavimentos. Sendo assim, uma das formas de promover ao solo condições de uso para fins em pavimentação é através da estabilização de solos (SANTOS, 2015).

A estabilização de solos é o procedimento executado para promover ao solo aumento de resistência e estabilidade, com o objetivo de ser empregado nas camadas inferiores do pavimento, existindo três tipos de estabilização de solos: a mecânica, procedimento executado através da aplicação de diferentes energias de compactação; química, é o procedimento executado por meio de acréscimos de cimento ou cal; e a granulométrica, que é o procedimento executado através de acréscimo de materiais com granulometria diferente do solo local. (SENÇO, 2007).

Atualmente, percebe-se que existe uma deficiência econômica nas prefeituras brasileiras. Essa dificuldade não é atual e reflete no cumprimento de suas atividades como, por exemplo, no que se refere à instalação e manutenção dos pavimentos urbanos. O déficit de pavimentos é grande em todas as regiões e, com relação aos pavimentos urbanos, abrange desde vias locais até vias de grande porte.

Para melhor entender a deficiência do sistema rodoviário, foi desenvolvido pelo CNT (2017) uma Pesquisa Gerencial das Rodovias, no qual ficou verificado que cerca de 78,7% da rede rodoviária nacional é composta de rodovias não pavimentadas, sendo 69,5% rodovias estaduais transitórias, estaduais e municipais.

Segundo Villibor e Nogami (2009), cidades como São Paulo e Guarulhos, por exemplo, necessitam pavimentar grandes áreas, mostrando que o déficit das vias urbanas a serem pavimentadas sendo que e, em regiões mais carentes de recursos públicos é ainda maior. Os fatos expostos demonstram a necessidade de promover técnicas de pavimentação que tornem as obras mais econômicas.

Nos dias atuais, existe uma grande necessidade de construção e conservação das estradas vicinais e vias urbanas nos municípios, pois, tais vias possibilitam o rápido

escoamento da produção e a interligação com rodovias principais. No entanto, na maioria dos municípios isto não é realizado pelo motivo das técnicas de estabilização de solos não se enquadrarem na realidade econômica brasileira, e também pelo fato de procurarem empregar na pavimentação materiais pétreos como, por exemplo, a brita graduada, sendo este de alto custo, o que dificulta a aquisição pelos gestores públicos.

Além do mais, os gestores públicos, em muitas situações, provêm de poucos recursos tecnológicos, deixando-os restritos às normas tradicionais. A dificuldade é que, para as vias urbanas com baixos volumes de tráfego, os procedimentos tradicionais tornam as estruturas superdimensionadas, encarecendo os pavimentos. Assim, os solos tropicais, devido suas propriedades geotécnicas e sua grande ocorrência, são recomendados o emprego em camadas inferiores do pavimento.

Outra possível solução para o déficit de pavimentos que pode ser tomada é a utilização de materiais alternativos locais que tenham custos inferiores aos tradicionais, sendo o produto da fresagem de pavimentação asfáltica um desses materiais alternativos, desde que garantida a boa qualidade técnica.

Tendo em vista as circunstâncias apresentadas, fica evidenciada a necessidade de avaliar o comportamento das misturas de solo tropical local/material fresado para uso em camadas de pavimentos, com o objetivo de diminuir os passivos ambientais de restauração da pavimentação, com exploração das jazidas e descartes em locais inadequados, obtendo materiais a custos inferiores aos tradicionais.

1.1 Justificativa.

Rotineiramente, vem-se realizando com certa frequência, serviços de restauração nos pavimentos já bastante envelhecidos da malha viária urbana e de rodovias. Com isso, tem-se gerado um volume considerável de material fresado nos pátios de residência das prefeituras, causando certa preocupação quanto a sua disposição final. Por outro lado, ocorre a escassez de materiais adequados tradicionalmente usados para a composição das diversas camadas do pavimento. Sendo assim, desde que atendam os requisitos técnicos para o seu uso, o material fresado pode ser empregado diminuindo a necessidade de exploração das jazidas.

Alguns trechos têm sido recuperados através da reciclagem, a partir da fresagem do revestimento e, muitas das vezes, de parte da camada de base. No entanto, percebe-se que a técnica não está difundida, principalmente, nos órgãos das cidades de pequeno porte, levando às secretarias de obras a optarem por técnicas tracionais de extração de materiais pétreos e a realizar estabilização química das camadas, o que onera o preço da obra.

Diante do exposto acima, considerando a existência de poucas pesquisas referentes ao assunto e a necessidade de maior difusão da técnica, este trabalho foi proposto na tentativa de propagação dos benefícios técnicos, para que a prática da reciclagem possa se tornar uma atividade rotineira nas vias urbanas como possível solução em mistura com solos locais, tornando assim a execução de pavimentos mais econômica, em especial, para os cofres públicos, além de diminuir os passivos ambientais devido ao descarte incorreto.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico e o desempenho da mistura solo tropical e material fresado do revestimento asfáltico, visando aplicação em camadas dos pavimentos urbanos.

1.3 Objetivos específicos

- a) Classificar os solos segundo a metodologia MCT e a norma tradicional HRB (atual TRB);
- b) Avaliar as propriedades físicas dos materiais, a saber: dos solos e do material fresado;
- c) Analisar a viabilidade técnica do emprego da mistura solo/material para emprego em camadas do pavimento, através dos resultados de ensaio de ISC.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2, descrevemos os conceitos que embasaram a pesquisa sobre o comportamento do pavimento, estabilização granulométrica, conceitos de solos tropicais e material fresado. Ao final do capítulo, apresentamos trabalhos que contribuíram para a presente pesquisa, sendo eles: artigos, teses e dissertações; no capítulo 3, desenvolvemos a metodologia que baseou o trabalho, sendo

dividida nas seguintes etapas: caracterização da região estudada, coleta dos solos, coleta do material fresado, caracterização do solo, caracterização do material fresado, ensaio das misturas solo-material fresado, análise estatística e análise dos resultados; já no capítulo 4, mostramos os resultados obtidos e verificamos quais solos foram aptos para emprego em camadas inferiores do pavimento; no capítulo 5, por sua vez, apresentamos a conclusão obtida com o desenvolvimento dessa pesquisa; e, por fim, o capítulo 6 traz algumas sugestões de trabalhos futuros para complementação e continuidade do tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado os conceitos e fundamentos teóricos norteadores, bem como um aporte de pesquisas que contribuíram para o presente estudo.

2.1 Definição de Pavimentos

A estrutura de um pavimento possui várias camadas com espessuras definidas que são construídas sobre um terreno de fundação, com a finalidade de resistir aos esforços do tráfego e as intempéries do cotidiano (BERNUCCI et al., 2008).

Conforme a definição de Senço (2007), o pavimento é um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assentam sobre um semiespaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito. Destina-se técnica e economicamente a resistir: aos esforços verticais e aos esforços horizontais, além de melhorar as condições de rolamento.

Segundo definição apontada pela norma NBR 7207/82, o pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem que se destina economicamente e simultaneamente em seu conjunto, a saber: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; e resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Balbo (2007), afirma que os pavimentos podem ser classificados de duas maneiras: flexíveis e rígidos. A estrutura de um pavimento rígido é composta por revestimento de uma placa de concreto (Cimento Portland), sub-base e subleito; já a estrutura de pavimento flexível é construída com revestimento de cimento asfáltico de petróleo - CAP.

Um pavimento flexível sob carregamento apresenta um campo de tensões concentrado, enquanto que um pavimento rígido apresenta um campo bem mais disperso com tensões distribuídas em uma área maior (BALBO, 2007), como podemos observar na Figura 1, a seguir, que ilustra um pavimento flexível:

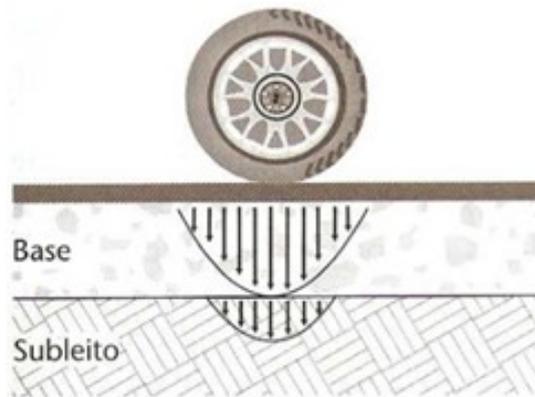


Figura 1. Pavimento flexível (BALBO, 2007).

No entanto, Balbo (2007) salienta que esses termos podem ser inadequados para classificar um pavimento quando se toma apenas o revestimento como referência, pois o comportamento mecânico deste pode não ser representativo devendo-se, nestes casos, delimitar qual o tipo de material do revestimento.

2.2 Camadas do pavimento flexível

De acordo com Balbo (2007), o pavimento flexível é constituído pelas seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, conforme ilustra a Figura 2:

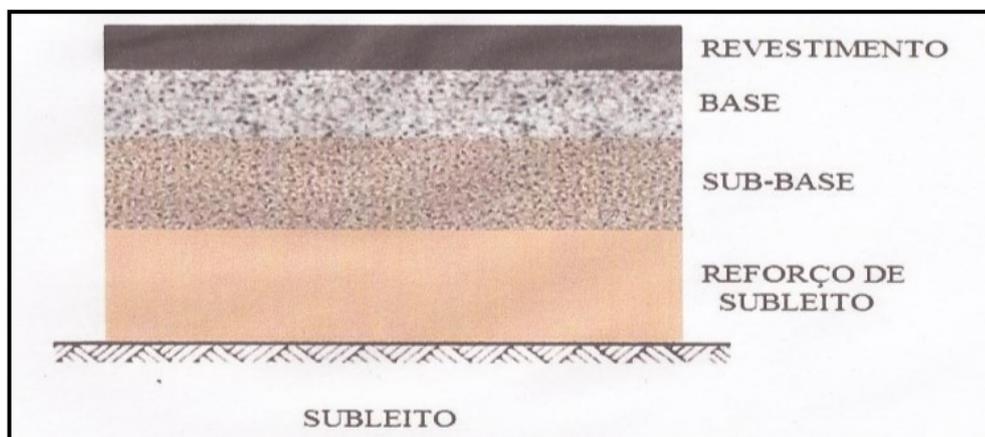


Figura 2. Camadas que compõe um pavimento flexível (BALBO, 2007).

Assim, Balbo (2007) define as camadas de um pavimento, a saber:

- Revestimento: é camada que recebe diretamente os esforços do tráfego, tendo por objetivo proporcionar conforto e segurança aos seus usuários. É projetada para resistir aos esforços sobre ela atuantes e para resistir ao desgaste;
- Base: é a camada destinada a resistir e a distribuir aos esforços verticais do rolamento;

- Sub-base: é camada projetada para corrigir o subleito e completar a base quando, por motivo justificável, não for aconselhável construir o pavimento sobre o leito de fundação (terraplanagem);
- Reforço do subleito: é a camada constante transversalmente e variável longitudinalmente de acordo com as exigências de projeto, que tem por objetivo melhorar as qualidades do subleito e reforçar a sub-base e, por motivos técnicos e econômicos, executado sobre o leito regularizado;
- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento.

A camada de base destina-se a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Segundo a regra geral — com exceção dos pavimentos de estrutura invertida —, o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço de subleito; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito (SENÇO, 2007).

Papagiannakis & Masad (2008) salientam que as propriedades da base têm um papel vital na integridade estrutural e desempenho dos pavimentos. Em pavimentos flexíveis, esta camada deve ser dimensionada de modo a ter resistência suficiente para absorver as solicitações impostas pelo tráfego, distribuindo-as de forma atenuada sobre o subleito.

Quando, em função desse dimensionamento, a camada de base se tornar muito espessa, procura-se dividi-la em duas camadas criando-se uma sub-base, geralmente, de menor custo (BALBO, 2007).

Os materiais utilizados nas camadas do pavimento são usualmente constituídos por: agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros, podendo ser classificados segundo o seu comportamento frente aos esforços em: granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

2.3 Materiais das camadas do pavimento.

2.3.1 Solos

O solo é o material de construção civil mais antigo, complexo, desconhecido e frequentemente utilizado. Definir o que é solo não é uma tarefa fácil, pois, dependendo de sua aplicação, sua definição mudará.

Para Senço (2007), uma definição que possivelmente atenderia a todas, é que o solo é uma formação natural, de estrutura solta e removível, de espessura variável resultante da transformação de uma rocha-mãe, passível de sofrer influência de diversos processos físicos, físico-químicos e biológicos.

Santos (2015) afirma que, para aplicação em engenharia civil, o solo pode ser considerado como qualquer acumulação formada por partículas minerais e vazios preenchidos por água ou ar, cuja estrutura depende dos processos envolvidos durante a sua formação e está diretamente associada ao intemperismo da rocha. Portanto, o processo de origem do solo depende do clima, relevo, tempo e o tipo de rocha de origem. Todos estes fatores definem as principais características do solo como a mineralogia, cor, textura, plasticidade e estrutura das partículas, determinando sua relevância para as diversas aplicações para engenharia civil.

Devido às necessidades humanas no final do século XIX e, principalmente, no início do século XX, houve grandes movimentações de terra fazendo com que estudos relacionados à melhoria de solos fossem desenvolvidos, tendo como finalidade assentar cada vez maiores cargas sobre os solos de fundação. Com a execução de obras vultosas, os pesquisadores passaram a ter um maior interesse pelos solos. E, a partir desse instante, originou-se a Mecânica dos Solos, sendo essa a ciência que estuda os solos com maior profundidade (SENÇO, 2007).

Com a ocorrência de catástrofes, a ciência pôde contribuir para diminuir os desmoronamentos e as mortes com estudos voltados para a falta ou ineficiência no controle tecnológico das obras.

2.3.2 Agregados para camadas de pavimentos

Ligantes asfálticos, agregados e, em alguns casos, produtos complementares, devem originar estruturas de um pavimento capazes de suportar os esforços a que serão submetidas durante sua vida útil. Para isso, é necessário que o Engenheiro ou técnico responsável saiba

selecionar os agregados com propriedades de maneira a se obter bons desempenhos e durabilidade.

Conforme a norma ABNT NBR 9935/2005, define-se os agregados da seguinte maneira: material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e concretos. Bernucci et al. (2008) explica que o agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado.

Bernucci et al. (2008) salienta que o desempenho dos agregados é importante e, sendo assim, sua característica geológica, propriedade mineralógica, capacidade de alteração, fratura sob o tráfego, capacidade de degradação, composição química, tendência à abrasão e potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície devem ser estudados. Os mesmos autores ainda afirmam que a diversidade de agregados é enorme, contudo, é necessário que cada agregado tenha utilizações específicas inviabilizando muitas fontes em potencial.

De maneira sucinta, os agregados são classificados em três grandes grupos: quanto à natureza, quanto ao tamanho e em relação à distribuição dos grãos. Quanto à natureza, pode ser natural, artificial e reciclado, a saber:

- Os naturais: são obtidos por processos naturais de desmonte e escavação, utilizados em estruturas de pavimento da forma como são encontrados na natureza. Podem ser subclassificados, ainda, por quatro diferentes tipos: ígneos, sedimentares, metamórficos, areias ou pedregulhos (NASCIMENTO, 2011).
- Os artificiais: são os agregados resultantes de processos industriais como de alto-forno ou aciaria, fabricados para fins específicos como argila calcinada ou argila expandida. Segundo Bernucci et al. (2008), os agregados artificiais mais empregados na atualidade são os de escória, resultante dos subprodutos da indústria de aço. Ainda, os mesmos autores reforçam que é necessário um estudo desses agregados antes de sua utilização, pois podem apresentar problemas de expansibilidade e heterogeneidade, requerendo tratamento antes de seus empregos, no entanto, podem apresentar características de alta resistência ao atrito.
- Os reciclados: com toda a demanda para reuso dos materiais, esta categoria vem crescendo de maneira significativa e, em alguns países, é a principal fonte de agregados. De acordo com Nascimento (2011), devido ao grande número de

intervenções e à reciclagem dos pavimentos, bem como às restrições ambientais, é que se percebe que o agregado está ganhando espaço.

Outra classificação que o agregado pode ter é em relação ao seu tamanho, podendo ser graúdo, miúdo e filler (material de enchimento), de acordo com as especificações do (DNIT 031/2004 – ES):

- Graúdos: são os agregados que ficam retidos na peneira nº10, a exemplos: seixos, cascalhos, britas e etc;
- Miúdos: são materiais com tamanhos entre 0,075 e 4,8 mm, alguns exemplos são as areias, pó de pedra e etc;
- Filler: são os agregados em que pelo menos 65% passam na peneira nº200 (com a malha 0,075mm), que são os vários tipos de cimento, cal e etc.

Os diversos agregados também podem ser classificados quanto à sua granulometria, podendo ser: graduação densa, aberta, uniforme ou descontínua. Bernucci et al. (2008), afirmam que a distribuição da granulometria dos agregados é uma das principais características que atua no comportamento de uma estrutura de um pavimento, influenciando em propriedades como: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade e resistência à umidade.

Os pavimentos são executados com a finalidade de resistir a muitos esforços aos quais serão submetidos, sem que sofram deformações acima do aceitável. Os principais danos são a fadiga e a deformação permanente (BERNUCCI et al., 2008).

Para serem realizados pavimentos duráveis e resistentes aos esforços, é necessário conhecimento das propriedades dos agregados que irão compor a estrutura. Medina e Motta (2005) mencionam que o entendimento da estrutura de um pavimento concebido em camadas, no qual devem estar computadas todas as tensões e deslocamentos solicitados, devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e motivam a escolha dos materiais que irão compô-la, sendo a disciplina de mecânica dos pavimentos responsável por essa escolha.

O período de seleção dos materiais é uma etapa preliminar realizada com o objetivo definir quais materiais serão utilizados na estrutura do pavimento mediante sua disponibilidade. Segundo Bernucci et al. (2008), os materiais compactos de pavimentação, em sua maioria, devem ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com

a estrutura. Podem ser agregados, solos e, em algumas situações, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, e demais materiais.

Para os agregados graúdos e miúdos são realizados ensaios embasados na tecnologia tradicional. Já para os agregados com porções de finos, os que passam na peneira nº 200, normalmente, exige um cuidado maior no emprego nos pavimentos por causa da sua plasticidade. Essa é uma ideologia norte-americana e europeia, no qual o uso dos finos aumenta a deformabilidade, reduz a permeabilidade e a rigidez. Além disso, causa um efeito agravante que é a expansão volumétrica na presença de água, o que pode ocasionar perda de resistência.

2.4 Estabilização de Solo

Segundo Van Impe (1989), há 3000 anos, a melhoria dos solos era empregada na construção de templos da babilônia construídos com bambu, madeira ou palha para reforçar o solo, sendo considerada a técnica mais antiga da construção civil.

Vargas (1977) denomina como estabilização dos solos o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência estável às cargas, à erosão ou ao desgaste, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade, através da adição de substâncias que lhe conferem uma coesão por cimentação ou aglutinação dos grãos.

Ainda segundo o autor, muitas vezes não é possível uma simples correção do material a ser utilizado, mesmo que se disponha de solos em que predominam pedregulhos, areias, siltes ou argilas. Nesse caso, é necessário a composição artificial de solo estabilizado usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada.

2.4.1 Estabilização Granulométrica

As camadas com materiais que não empregam estabilização com ligante hidráulico ou asfáltico são denominadas de camadas granulares. Recebem estabilização puramente mecânica por compactação e adensamentos dos materiais por não possuírem coesão e por não resistirem à tração, trabalham sob esforços de compressão. Quando bem graduadas, são denominadas de misturas estabilizadas granulometricamente (BERNUCCI et al., 2008).

A estabilidade granulométrica de misturas depende do tamanho das partículas (distribuição granulométrica), do formato das partículas, da densidade relativa e do atrito interno. Dentre estes fatores, a distribuição granulométrica e a proporção de material fino para

material grosso são considerados os aspectos mais influentes na resistência ao cisalhamento devido ao atrito gerado entre as partículas. Sendo que, um material granular concebido para a máxima estabilidade deve possuir fricção interna alta para resistir à deformação imposta pelas cargas (YODER e WITCZACK, 1975).

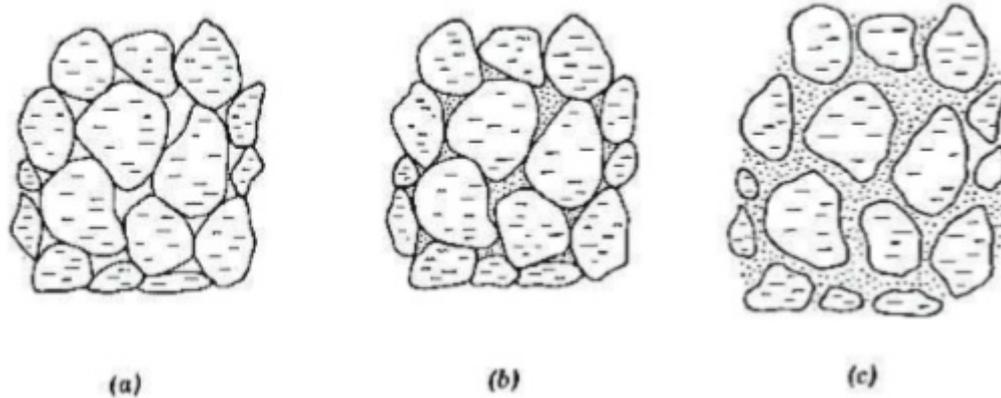


Figura 3. Estados físicos de misturas granulométricas (YODER e WITCZACK, 1975).

A Figura 3 ilustra os três estados distintos de misturas granulométricas:

- a) Materiais que não possuem finos têm a sua resistência pelo contato grão-a-grão e baixa densidade devido à falta de finos, mas é permeável e não suscetíveis às baixas temperaturas. É de difícil manuseio durante a construção, pois existem poucos finos;
- b) Contêm material fino suficiente para preencher os vazios entre o material graúdo, alta densidade e alta resistência. É mais resistente que o 3.a, manuseio de moderada dificuldade, sendo considerado ideal do ponto de vista da estabilidade;
- c) Grande quantidade de finos, não havendo contato grão-a-grão; densidade e estabilidade menor do que 3.b; manuseio relativamente fácil durante a construção.

É notório que, através dos exemplos, a estabilidade de misturas é dependente da distribuição granulométrica, de forma que grandes quantidades ou nenhuma presença de finos prejudicam o desempenho da mistura.

Balbo (2007) afirma que, para as bases de pavimentos, as misturas o contato grão-a-grão deve ter prioridade, desde que atendam as faixas granulométricas dadas em norma.

Um dos parâmetros que influenciam a estabilização é a resistência mecânica do agregado, que deve ser suficiente para reter aproximadamente a mesma distribuição granulométrica durante a compactação e a posterior utilização pelo tráfego, pois, o fator determinante no sucesso do emprego da estabilização granulométrica é a correta compactação do material, o que lhe confere grande resistência aos esforços verticais de compressão.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) – atual Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT) – através das suas especificações de serviço:

- ✓ DNER – ES – 301/97 – Sub-base Estabilizada Granulometricamente;
- ✓ DNER – ES – 303/97 – Base Estabilizada Granulometricamente;

O DNIT estabeleceu os procedimentos de execução, os parâmetros de aceitação e qualidade para materiais de base e sub-bases estabilizadas granulometricamente. Os principais parâmetros de aceitação encontram-se na Tabela 1, abaixo:

Tabela 1. Parâmetros para Base e Sub-base estabilizadas granulometricamente

Parâmetro Normalizado		Base (%)	Sub-Base (%)
Índice de Suporte Califórnia	$N \leq 5 \times 10^5$	≥ 60 **	$\geq 20^*$
	$N \leq 5 \times 10^6$	≥ 80 **	
Expansão (%)		$\leq 0,5$	≤ 1
Limites de Liquidez - LL (%)		≤ 25	-
Equivalente de areia para LL > 25 (%)		≤ 30	-
Índice de Plasticidade (IP)		≤ 6	-
Desgaste de Abrasão Los Angeles (%)		≤ 55	-
Composição de dentro de uma das faixas estabelecidas na própria norma		Sim	-
Fração retida na peneira nº 10 deve ser constituída de partículas duras e isentas de substâncias prejudiciais		sim	sim

Fonte: DNER-ES 301/97 e DNER-ES 303/97.

*Para as energias normal e intermediária.

** Para as energias intermediária e modificada.

Os índices apresentados na Tabela 1 embasarão o presente estudo.

2.5 Solos tropicais

Para seleção e classificação dos materiais constituintes das camadas do pavimento, empregam-se técnicas tracionais embasadas na distribuição granulométrica, peneiramento e limites de Atterberg, como é o caso da metodologia HRB. No entanto, segundo Bernucci et al. (2008), a deficiência desta tecnologia é que são previstos materiais em proporções consideráveis passante nas peneiras nº 200, que são as frações finas.

Bernucci et al. (2008) afirmam que, as metodologias tradicionais europeias e norte americanas têm por finalidade diminuir essa fração fina, pois pode provocar perda da

permeabilidade, aumento da deformabilidade, expansão volumétrica e, em consequência, perda de resistência. No entanto, a grande vantagem dos solos tropicais é que essa fração fina pode possuir baixa expansão e capacidade de suporte, capaz de ser aplicado como camadas de pavimento devido ao processo de laterização.

Conforme Bernucci et al. (2008) descrevem, com o aumento das obras de vulto nos países de clima tropical como barragens, estradas, aterros e demais obras destas proporções, intensificaram-se as pesquisas destes solos a fim de avaliar seu comportamento e observar seus resultados divergentes entre os esperados e os resultados que realmente eram obtidos.

Do ponto de vista mecânica e hidráulico os solos tropicais possuem algumas características, que são visualizadas na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Características dos solos tropicais.

Propriedade	SOLOS	SOLOS
	LATERÍTICOS	SAPROLÍTICOS
Contração	Elevadas argilas Baixa (areias)	Média a elevada
Expansão	Baixa	Baixa a elevada
Suporte a seco	Elevado a muito elevado	Médio a elevado
Permeabilidade	Baixa	Baixa a média

Fonte: Balbo (2007)

Balbo (2007) explica que alguns fatos curiosos para quem começa a estudar os solos tropicais lateríticos são que sua porosidade típica (estado natural) e sua resistência muito alta (estado compacto) comparados aos convencionais.

Os professores Nogami e Villibor (1981) da Universidade de São Paulo e do Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo, criaram em 1981 uma classificação para solos tropicais com fins de aplicação em obras viárias, com objetivo de melhor entender o comportamento de solos lateríticos e saprolíticos, sendo que se tinha como referência normas norte-americanas e europeias que eram ineficazes. As experiências observadas com solos tropicais mostraram que a técnica, se bem empregada, podem ter resultados satisfatórios, e que a ocorrência deste tipo de solo em países de clima tropical é enorme.

2.6 Reciclagem de pavimentos a partir de resíduos da fresagem

A reciclagem consiste em reutilizar o pavimento desgastado na construção de uma nova camada, mediante a desagregação do mesmo numa certa profundidade, podendo ser

incorporados à mistura vários aglomerantes (cimento ou emulsão), a água para a hidratação e, eventualmente, agregados para correção granulométrica e/ou aumento da resistência, cujo objetivo da técnica é transformar um pavimento degradado numa estrutura homogênea e adaptado ao tráfego que deverá suportar (FONSECA, 2002).

Para Bonfim (2007), a técnica de reciclagem teve impulso devido à escassez de materiais provenientes do petróleo, com a crise internacional de 1970, a partir de então, técnicos e gestores rodoviários internacionais voltaram-se para a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas através da reciclagem, de maneira a proporcionar condições de trafegabilidade das vias a níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista financeiro.

De acordo com David (2006), data-se que a técnica de reciclagem teve início nos Estados Unidos, em 1915. No entanto, a partir de 1930, a operação perdeu força devido ao aumento da oferta de petróleo. No Brasil, a técnica foi empregada pela primeira vez em 1960 pela prefeitura municipal do Rio de Janeiro, em ruas daquela cidade.

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), a reciclagem dos pavimentos apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação à utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes da pista de rolamento.

Técnicos da área de pavimentação recomendam, ao passo que a estrutura existente não está adequada ao tráfego atual e futuro, o recapeamento. No entanto, se a estrutura do pavimento não estiver adequada para suportar uma nova camada asfáltica, o recapeamento deve ser descartado e a reciclagem deve ser avaliada como uma possível solução (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Fonseca (2009), a reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação onde toda ou parte da camada do pavimento existente são reaproveitadas na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais, permitindo assim obter um pavimento com características semelhantes ou superiores ao pavimento antigo.

Segundo Bernucci et al. (2008) afirmam que, existem numerosas vantagens técnicas em se utilizar a fresagem e a reciclagem nos processos de recuperação de pavimentos degradados, além da questão ambiental, evitando descartes em lugares inadequados e a exploração de recursos minerais escassos. É importante destacar que a fresagem permite a reabilitação de pavimentos sem mudar sua altura, substituindo camadas ao invés de sobrepô-las.

2.7 Trabalhos referentes à pesquisa.

Nesta etapa do capítulo 2, apresentamos alguns estudos que foram pesquisados referentes ao tema do nosso trabalho, como forma de contribuição para o presente estudo.

Inicialmente, destacamos a pesquisa desenvolvida por Poncio et al. (2018), intitulada “*Análise da importância da granulometria do material fresado na estabilização do solo*”, teve por proposta utilizar o material fresado proveniente da camada do revestimento asfáltico já deteriorado, para emprego como camada de sub-base. Os procedimentos metodológicos do trabalho basearam-se em ensaios de caracterização do solo e do material fresado, compactação, ensaios de capacidade de suporte e expansão. O estudo indicou como melhor resultado a mistura com 70% de material fresado e 30% de solo, com o solo passante na peneira de #4.

O estudo realizado por Godoy et al. (2018), intitulado “*Desempenho de misturas de fresado de asfalto - cinza volante - cal, submetidas a condições climáticas severas*”, objetivou avaliar o impacto do teor de cal de carbureto e do peso específico em misturas do fresado (RAP), com e sem adição de sal (NaCl). A metodologia do trabalho baseou-se na análise do desempenho das misturas submetidas em ciclos de molhagem-secagem e congelamento-degelo, para avaliação do índice de porosidade e do teor volumétrico de cal. Os resultados mostraram que ganhos mais significativos no processo de congelamento-degelo foram com acréscimos de 11,8% de sal; com aumento da energia de compactação foi observado um aumento para 20,6%; e com aumento do teor de cal foi de 19,7%.

Na pesquisa desenvolvida por Moura et al. (2018), intitulada “*Dosagem de Mistura de Solo e Material Fresado Melhorada com Cimento para Utilização como Camada de Pavimento Rodoviário*”, objetivou analisar o uso de dois métodos de estabilização de solos, a saber: o químico e o granulométrico, com a incorporação do material fresado – RAP e acréscimos de cimento. O material fresado foi adicionado em proporções de 50% e 70%, o cimento com 2% e 4% em relação à massa seca. Os valores observados mostraram que as misturas melhoradas com cimento apresentaram resultados satisfatórios em comparação com a norma do DNIT 142/2010, com potencial de uso para ser empregado como camada semirrígida de pavimentos.

Já o trabalho realizado por Maciel et al. (2018), intitulou-se “*Dosagem de Misturas de Solo e Material Fresado Melhoradas com Cimento para Uso em Pavimentação a Partir de Ensaio de Compressão não Confinada*”, teve por finalidade analisar as misturas com 50% e 70% do material fresado do revestimento asfáltico, melhorados com 2%, 4% e 5%

de cimento, por meio de ensaio de resistência à compressão simples não confinadas. Os resultados obtidos que, em termos de resistência não confinada e com base nas exigências estabelecidas pela norma DER/PR ESP 11/05, revelaram que as misturas testadas, apesar de promoverem ganhos significativos de resistência ao solo, não se mostraram capazes de serem empregadas como camadas de base ou sub-base de pavimentos flexíveis.

Farias et al. (2018), em seu estudo intitulado “*Melhoramento de solo com incorporação de material fresado de CBUQ para uso em pavimentação*” avaliou as características físicas e mecânicas de misturas com materiais reciclados de revestimento asfáltico, para aplicação em camadas de pavimento rodoviário com acréscimos de areia e do solo natural. O pesquisador obteve resultados significantes para melhora de um solo local classificado como A – 2 – 4, mudando da classificação de um solo com mau comportamento de subleito para adequado como camada de sub-base, com resultados de capacidade de suporte acima de 20% e expansão abaixo de 1%.

O trabalho realizado por Fernandes et al. (2018) intitulado “*Reaproveitamento de Material Fresado em Camadas de Base de Pavimentos Asfálticos Flexíveis*” mostrou que, para alcançar resultados positivos a fim de serem aplicados como camada de sub-base, foi necessário melhorar o solo com acréscimo de 2% de cimento. O objetivo principal do trabalho foi a análise das misturas como camada de pavimento e, para tanto, os procedimentos adotados em seu trabalho foi a realização de misturas de material fresado, bica corrida, brita 1 e cimento.

Hilário (2016) em sua dissertação intitulada “*Uso De Pavimento Reciclado Adicionado com Cimento para Uso Como Reforço de Base Para Rodovias – Estudo De Caso: BR-120*”, teve por objetivo estudar a utilização de pavimento reciclado no reforço de camadas de base em uma rodovia do estado de Minas Gerais. Na metodologia, utilizou os métodos de ensaios em laboratório das misturas (material fresado + cimento + solo local), para empregar como reforço, além do procedimento de acréscimo apenas do cimento. Foram executados os testes, a saber: Índice de Capacidade de Suporte, expansão, módulo de resiliência, compactação, índices de consistência. Os resultados mostraram uma melhora nos parâmetros de resistência. Nos demais parâmetros analisados, não houve mudança, credenciando a mistura a seu uso como base de um pavimento rodoviário.

Santos (2009) em seu trabalho de mestrado intitulado “*Bases Granulares de Agregados Reciclados*”, teve como objetivo principal avaliar a aplicação de agregados obtidos dos pavimentos flexíveis degradados para fins de emprego em camada de sub-base e base de novos pavimentos em obras de reabilitação rodoviária. O estudo menciona as principais técnicas de fresagem e faz referência às várias formas de degradação dos pavimentos

flexíveis. Na parte experimental é descrito, os ensaios em laboratório, tais quais: ensaios de caracterização para os materiais e as misturas recicladas, avaliando seu comportamento.

Na pesquisa desenvolvida por Corrêa et al. (2014), intitulada “*Melhoramento de Solos para Camadas de Pavimentos Rodoviários com Material Fresado e Estabilização Química*”, teve como objetivo analisar a possibilidade de reutilização dos resíduos do material fresado como alternativa de aplicação como camada de sub-base e base de pavimentos rodoviários, através do acréscimos de cimento e cal. Foram realizadas várias misturas com o solo na condição pura e com acréscimos de 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 45% do material fresado em substituição ao solo, posteriormente, foi definida como proporção ideal a mistura com 40% do resíduo, assim foram realizadas misturas com 2%, 3%, 4% e 5% de cal e cimento. Os resultados de capacidade de suporte (ISC) demonstraram ganhos significativos com acréscimos de cimento, variando entre 117 e 127%. As misturas com cal não apresentaram ganhos consideráveis em comparação com o solo puro.

Na pesquisa “*Utilização de Material Proveniente de Fresagem na Composição de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis*” realizada por Garcês et al. (2014), os autores propuseram analisar a utilização de material proveniente de fresagem na composição da estrutura de pavimentos flexíveis, como a principal aplicação em solos do subleito local. O estudo foi realizado através da composição de mistura solo local e material fresado, sendo como testes principais: Índice de Suporte Califórnia e os ensaios de compactação. Os resultados dos ensaios na mistura mostraram um bom ganho de resistência do solo local viabilizando a utilização da mistura. Um trecho de uma avenida localizada na região Sudoeste da Cidade de Goiânia foi executado com um dos resultados obtidos neste estudo. Para fins de observação do comportamento do trecho executado, do total de 500,00 m da avenida 60,00 m, foram executados com a mistura solo local/material fresado.

Dias et al. (2015), em seu trabalho “*Contribuição ao Estudo de Materiais Fresados Incorporados a Um Solo Argilo Siltoso para o Uso em Camadas de Pavimentos Flexíveis*”, objetivou verificar a utilização de material fresado que, incorporado com um solo local característico do interior de São Paulo, possa ser utilizado como camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Os procedimentos realizados foram a incorporação de um solo classificado como argilo-siltoso o material fresado, proveniente da fresagem das ruas e avenidas da Grande São Paulo. A pesquisa se baseou em ensaios em laboratório de análise granulométrica, limites de Atterberg, compactação e Índice de Suporte Califórnia. Verificou-se que misturas com diferentes teores de solo e material fresado apresentaram comportamento satisfatório para serem utilizados como camadas de sub-base de pavimentos flexíveis, no

entanto, como camadas de base a incorporação de solo ao material fresado, não apresentou bons resultados, evidenciando assim características insuficientes para sua utilização.

Na pesquisa de Honorato et al. (2015), intitulada “*Estabilização Solo-Material Fresado para Manaus (AM)*”, os autores propuseram verificar o comportamento de misturas constituídas de material fresado oriundos do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes (SBEG), adicionado ao solo argiloso característico da região, cujas amostras foram provenientes da área onde se localiza a Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Como metodologias foram estudadas composições (90% solo natural + 10% material fresado e 50% solo natural + 50% material fresado), sendo avaliadas quanto ao seu comportamento mecânico pelo ensaio de resistência ao cisalhamento. O trabalho concluiu que o teor de 50% de material fresado proporciona um maior aumento da coesão. Constatou-se, assim, a eficácia do uso do material fresado (passivo ambiental) como partícipe de sub-bases de camadas de um pavimento flexível.

Couto (2009) desenvolveu a pesquisa intitulada “*Estudo de Misturas Solo-Agregado em Bases e Sub-bases Rodoviárias do Rio Grande do Sul: Caracterização de Laboratório e Trecho Experimental*”, que buscou realizar a caracterização em laboratório de uma mistura de solo-agregado, as técnicas construtivas usadas na execução de duas estruturas alternativas de pavimento em que a base e a sub-base, composta por material britado, brita graduada, foi substituída por solo-agregado, nas mesmas espessuras do projeto original. O estudo se desenvolveu num trecho os municípios de Casca e David Canabarro, região Norte do Rio Grande do Sul. Os materiais foram estudados em duas etapas: a primeira etapa, estudados isoladamente; e a segunda etapa, na forma de mistura. Além dos ensaios usuais, foram empregados ensaios triaxiais para determinar o módulo resiliência. Através dos dados obtidos, foi possível realizar uma retroanálise e correlacionar os módulos de resilientes de campo com os de laboratório.

Na tese de Dellabianca (2004) intitulada “*Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando Sua Aplicação em Reciclagem de Pavimento*”, o objetivo foi estudar o comportamento de material fresado de revestimento asfáltico, visando sua aplicação em reciclagem de bases de pavimentos rodoviários. Para o estudo foram realizados diversos ensaios de laboratório no material fresado. Posteriormente, se fez um estudo da percentagem ótima deste material numa mistura com cascalho laterítico de base. Em seguida, fez-se um estudo dos benefícios que a estabilização química proporciona a esta mistura reciclada. Finalmente, foram realizadas algumas simulações numéricas, com a utilização do programa numérico KENLAYER, para se verificar o comportamento estrutural de projetos de reforço e recuperação de pavimentos para diversas alternativas, entre elas, a

alternativa da reciclagem, além de desenvolver um levantamento de custo. Com o trabalho, concluiu-se que a presença do filme asfáltico produz uma redução do ângulo de atrito interno às partículas, aumenta o repique elástico durante o ensaio de compactação, e confere ao fresado um componente de deformação viscosa. Estas propriedades se refletem nos valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC), resistência à compressão simples e módulo de resiliência, tanto do fresado, quanto da mistura com cascalho laterítico de base. As análises mecânicas e econômicas mostraram que a reciclagem de material fresado de revestimento asfáltico e cascalho laterítico de base é uma solução técnica e economicamente bastante viável para pavimentação.

A pesquisa realizada por Silva (2013) intitulada “*Utilização de Resíduo de Fresagem de Pavimentos Asfálticos em Bases Estabilizadas Granulometricamente e em Revestimentos Asfálticos na Cidade de Manaus*”, teve a finalidade de estudar a reutilização do resíduo fresado do pavimento asfáltico, retirado nas manutenções de vias urbanas. Nesse processo de estudo, foram analisados os agregados e o cimento asfáltico de petróleo (CAP) envelhecido, oriundos de pavimento deteriorado e posteriormente fresado, através de análises e ensaios de laboratórios segundo as normas brasileiras (NBR) correspondentes a cada material aplicado na produção das camadas do pavimento, no que diz respeito à confecção de base e ao revestimento asfáltico. Os resultados experimentais da mistura asfáltica reciclada a 100%, do resíduo fresado do pavimento asfáltico avaliadas nessa pesquisa, foram comparados com os resultados obtidos para misturas convencionais e indicaram que tal mistura pode ser usada como alternativa para revestimento de vias urbanas, atendendo os requisitos exigidos em normas referentes ao assunto. As misturas solo de referência com resíduo fresado do pavimento asfáltico (RFA) apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de volume de tráfego pesado. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ressaltando o emprego positivo do RFA para aplicação em camadas de base de pavimentos urbanos. Ressaltou-se ainda que os estudos sobre a utilização desse tipo de resíduo em pavimentação são raros na cidade de Manaus, e que essa pesquisa agregou um conhecimento exploratório do potencial de sua aplicabilidade.

Specht et al. (2013), em seu trabalho intitulado “*Utilização de Material Fresado como Camada de Pavimento: Estudo Laboratorial e Aplicação em Campo*”, avaliou a possibilidade de utilização de material fresado como camada de base e sub-base de pavimento, bem como apresentou um relato do emprego de fresado e fresado estabilizado como camada de pavimento. O material fresado estabilizado mecanicamente indicou CBR de 56%, enquanto que o material fresado estabilizado granulometricamente chegou a 95%, valores absolutamente compatíveis com materiais granulares utilizados em camadas de

pavimento; já os resultados do material fresado estabilizado quimicamente, cumprem os requisitos normativos com um teor de cimento ao redor de 5%, o que, dependendo da obra e da matriz de custos, pode ser a alternativa mais interessante. Os resultados mostram a viabilidade técnica do processo de estabilização de material fresado para aplicação em pavimentação.

Em pesquisa sobre estabilização granulométrica, Silva (2013) realizou ensaios de misturas estabilizadas granulometricamente, empregando ensaios de compactação e capacidade de suporte (ISC – Índice de Suporte Califórnia), com material com resíduo da fresagem de revestimento asfáltico e agregados naturais. Sendo as misturas de 30/70% e 70/30% de material fresado/pó-de-pedra, foram adotados diversos pontos na curva de compactação e, desta forma, os resultados de ISC encontrados em laboratório foram de 56% a 70% (mistura 30/70%) e 34% a 45% (mistura 70/30%). Os resultados apontaram valores dentro aceitáveis pelas normas DNER-ES 301/97 e DNER-ES 303/97, que tratam sobre sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente.

Pinto, Cervo e Pereira (2012), apresentam uma forma de reutilização do material fresado em acostamentos de rodovias, como agente regulador e nivelador. O estudo realizado utilizou o material sem alterações ou adições de insumos, no qual possibilitava o reaproveitamento, além de destinar um local adequado para o resíduo e reduzir custos na manutenção de rodovias. O material analisado apresentou Abrasão Los Angeles de 36,67% e ISC de 38%. Os resultados obtidos indicam que o agregado fresado não é propício para usar em base de pavimentos na faixa de rolamento, porém, apresenta resultados bastante satisfatórios para reutilização nos acostamentos que recebe solicitações bem inferiores, devendo assim ponderar os locais de emprego e sua função estrutural.

Oliveira, Baran e Schmidt (2010), apresentam uma análise de projeto no qual foi adotada a reciclagem profunda de pavimentos como solução de restauração para alguns segmentos da BR-282, entre os municípios de Florianópolis e Lages em Santa Catarina, totalizando aproximadamente 215 km. Para 76 km, onde a situação era mais crítica, foi constatado que a reciclagem profunda com correção granulométrica e adição de cimento era a alternativa mais adequada. Os autores também reforçam que a economia da reciclagem é realmente evidente e tem desempenho satisfatório. Este procedimento é largamente empregado a fim de se avaliar, nas circunstâncias físicas e mecânicas, as estruturas das camadas do pavimento.

Assim, podemos afirmar que os trabalhos ora apresentados mostraram que a técnica fresagem pode ser uma alternativa viável como estabilizante granulométrico da camada do pavimento. Por exemplo, o Estudo de Pinto et al. (2012), apresenta situações reais

da utilização do material fresado em vias com baixo volume de tráfego, obtendo resultados satisfatório.

Pesquisas em laboratório como as que foram desenvolvidas por Specht et al. (2013), Garcês et al. (2014) e Silva (2013), demonstraram que os resíduos de fresagem do revestimento asfáltico, possui propriedades semelhantes de uma brita graduada, sendo possível observar semelhança entre os resultados encontrados no trabalho de Couto (2009), por exemplo, no qual o insumo aplicado foi a brita em conjunto com o solo local.

As demais pesquisas, como as realizadas por Corrêa et al. (2014), Dellabianca (2004) e Moura et al. (2018), sugeriram aplicação do material fresado com cimento, no entanto, através dos trabalhos é possível verificar a utilização baixos teores de cimento (2%), mostrando que o material fresado contribui para o ganho de resistência e pode diminuir o custo de um dos materiais mais caros na estabilização de solos.

Por fim, notou-se através das pesquisas, que o material fresado produto do revestimento asfáltico possui propriedades que sugerem mais estudos e maior frequência na sua utilização, podendo migrar da condição de rejeito para resíduo de fresagem.

A seguir, é apresentada a Tabela 3, resumo dos trabalhos referentes à pesquisa, com as seguintes divisões: Títulos, Tipos de misturas, Proporção solo/agregado, Ensaio realizados e Resultados obtidos.

Tabela 3. Resumo dos trabalhos referentes à pesquisa

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaio realizados	Resultados obtidos
<i>“Análise da importância da granulometria do material fresado na estabilização do solo”</i> realizado por Poncio et al (2018).	Solo e material fresado	<ul style="list-style-type: none"> • 70% material fresado e 30% solo; • 50% material fresado e 50% solo; • 30% material fresado e 70%; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização do solo e material fresado; • Ensaio de compactação, ensaio de capacidade de suporte e expansão. 	O melhor resultado foi a mistura com 70% de material e 30% de solo, com o solo passante na peneira de #4.

Continua

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaio realizados	Resultados obtidos
“ <i>Dosagem de Mistura de Solo e Material Fresado Melhorada com Cimento para Utilização como Camada de Pavimento Rodoviário</i> ” desenvolvida por Moura et al. (2018)	Solo, material fresado e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • 50% material fresado e 50% solo; • 70% material fresado e 30% solo; • Acréscimo de 2% e 4% de cimento; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Capacidade de suporte; 	Os melhores resultados foram os observados com cimento;
“ <i>Dosagem de Misturas de Solo e Material Fresado Melhoradas com Cimento para Uso em Pavimentação a Partir de Ensaio de Compressão não Confinada</i> ” realizado por Maciel et al. (2018).	Solo e material fresado, melhoras com cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • 50% de material fresado; • 70% de material fresado; • acréscimos de 2%, 4% e 5% de cimento; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de resistência à compressão simples não confinadas; 	Apesar de ganhos significativos, não foram observados resultados capazes de serem empregados como camadas de sub-base e base de pavimentos.
“ <i>Melhoramento de solo com incorporação de material fresado de CBUQ para uso em pavimentação</i> ” realizado por et al. Farias (2018).	Solo, areia e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • Material Fresado 10%, 15% e 20% em substituição ao solo; • Com areia e solo local; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio físicos; • Ensaio mecânicos; 	Para um solo classificado como A-2-4, com os ensaios foi possível enquadrá-lo para ser utilizado como camada de sub-base.
“ <i>Reaproveitamento de Material Fresado em Camadas de Base de Pavimentos Asfálticos Flexíveis</i> ” realizado por et al. Fernandes (2018).	Material fresado, bica corrida, brita 1 e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • M.F. 20% e 30%; • Brita 10%; • Bica corrida 70%, 60 e 68%; • Cimento 2%; • Em três misturas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de capacidade de suporte; • Ensaio de resistência à compressão simples; 	Os melhores resultados foram observados com acréscimos de 2% de cimento.

Continua

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaio realizados	Resultados obtidos
“ <i>Uso De Pavimento Reciclado Adicionado com Cimento para Uso Como Reforço de Base Para Rodovias – Estudo De Caso: BR-120</i> ” realizado por Hilário (2016).	Material fresado, solo local e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • Solo local; • Acréscimo de material fresado de 10% em 10% em substituição ao solo e cimento entre 2% e 6%; 	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de Capacidade de Suporte; • Expansão; • Módulo de resiliência; • Compactação; • Índices de consistência; 	A mistura obteve resultados para ser aplicado como camada de base.
“ <i>Bases Granulares de Agregados Reciclados</i> ” desenvolvido por Santos (2009).	Solo local e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • Solo local; • Acréscimos de 10% em 10% até 40% em substituição ao solo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio para a caracterização dos materiais; • Ensaio para as misturas; 	A mistura não resultou para ser empregado como sub-base;
“ <i>Melhoramento de Solos para Camadas de Pavimentos Rodoviários com Material Fresado e Estabilização Química</i> ” desenvolvido por Corrêa et al. (2014).	Solo local, material fresado, cal e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 45% do material fresado em substituição ao solo; • 2%, 3%, 4% e 5% de cal e cimento; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de ISC; • Ensaio de resistência à compressão simples; 	Foram observados resultados com cimento entre 117% e 127%, as misturas com cal não alcançaram resultados significativos em relação ao solo puro.
“ <i>Utilização de Material Proveniente de Fresagem na Composição de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis</i> ” realizado por Garcês et al. (2014).	Solo local e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • Solo local; • Acréscimo do M.F. variando de 5% em 5% até 45% em substituição ao solo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de compactação; • Ensaio de capacidade de suporte; 	Foram observados bons resultados para ser empregado como camada de subleito, sendo realizada uma psita experimental com 60m de comprimento.

Continua

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaios realizados	Resultados obtidos
“Contribuição ao Estudo de Materiais Fresados Incorporados a Um Solo Argilo Siltoso para o Uso em Camadas de Pavimentos Flexíveis” realizado por Dias et al. (2015).	Solo argilo-siltoso e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • 90% M.F. e 10% solo; • 80% M.F. e 20%; • 70% de M.F. e 30% de solo; • 60% de M.F. e 40% de solo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Análise granulométrica; • Limites de Atterberg; • Compactação e Índice de Suporte Califórnia; 	Resultados capazes de ser aplicado como sub-base, no entanto, não foram observados resultados capazes de serem aplicados como base.
“Estabilização Solo-Material Fresado para Manaus (AM)” realizado por Honorato et al. (2015).	Material fresado do aeroporto Internacional de Manaus e solo local.	<ul style="list-style-type: none"> • 90% solo natural com 10% material fresado; • 50% solo natural com 50% material fresado 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios de caracterização dos materiais; • Ensaios de capacidade de suporte; • Ensaios de resistência ao cisalhamento; 	O trabalho concluiu que o teor de 50% de material fresado proporciona um maior aumento da coesão.
Estudo de Godoy (2018) com o título: “Desempenho de misturas de fresado de asfalto - cinza volante - cal, submetidas a condições climáticas severas”.	Material fresado com e sem adição de sal (NaCl).	<ul style="list-style-type: none"> • Material fresado com pequenas proporções de NaCl; • Sem adição de NaCl; 	Ensaios o objetivo de avaliar ciclos de molhagem-secagem e congelamento-degelo, para análise do índice de porosidade e do teor volumétrico de cal;	O melhor resultado foi observado com acréscimos de 11,8% de cal no processo de congelamento-degelo, com aumento da energia ISC de 20,6% com aumento da energia.
“Estudo de Misturas Solo-Agregado em Bases e Sub-bases Rodoviárias do Rio Grande do Sul: Caracterização de Laboratório e Trecho Experimental” desenvolvido por Couto (2009).	Brita graduada, solo e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • 20% de solo local e 80% material fresado; • 40% de solo e 60% de material fresado; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios em campo • Ensaios de caracterização dos materiais; • Ensaios de ISC; • Ensaios triaxiais; 	Foi possível observar resultados para ser aplicado como camadas de sub-base.

Continua

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaio realizados	Resultados obtidos
“ <i>Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando Sua Aplicação em Reciclagem de Pavimento</i> ” realizado por Dellabianca	Solo, cascalho laterítico, material fresado e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • Proporções de 2% de cal e cimento; • Acréscimos de 16%, 20%, 25% e 35% de cascalho; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Simulações numéricas com o programa numérico KENLAYER; • Levantamento de custos; 	As análises mostraram que pode ser uma solução técnica e economicamente bastante viável para pavimentação.
“ <i>Utilização de Resíduo de Fresagem de Pavimentos Asfálticos em Bases Estabilizadas Granulometricamente e em Revestimentos Asfálticos na Cidade de Manaus</i> ” realizado por Silva (2013).	Solo e material fresado.	<ul style="list-style-type: none"> • Solo Natural; • 10% em 10% até 40% do RFA em substituição ao solo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de capacidade de suporte e expansão; 	Os resultados foram satisfatórios para emprego em camadas de pavimentos urbanos.
“ <i>Utilização de Material Fresado como Camada de Pavimento: Estudo Laboratorial e Aplicação em Campo</i> ” realizado por Specht et al. (2013).	Material fresado e cimento.	<ul style="list-style-type: none"> • 100% de material fresado; • Acréscimo de cimento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização do material fresado; • Ensaio de capacidade de CBR; • Ensaio de resistência química; 	Os resultados mostraram melhores resultados quando foram acrescidos o cimento, no entanto, foram observados resultados satisfatório sem o cimento, da ordem entre 56% e 95%.
“ <i>Utilização de Resíduo de Fresagem de Pavimentos Asfálticos em Bases Estabilizadas Granulometricamente e em Revestimentos Asfálticos na Cidade de Manaus</i> ” realizado por Silva (2013)	Material fresado e pó-de-pedra.	<ul style="list-style-type: none"> • 30% de material fresado com 70% de pó-de-pedra; • 70% de material fresado e 30% de pó-de-pedra; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio de caracterização dos materiais; • Ensaio de compactação; • Ensaio de capacidade; 	Valores acima da norma para aplicação como base e sub-base.

Continua

Títulos	Tipos de misturas	Proporção solo/agregado	Ensaios realizados	Resultados obtidos
<p><i>“Reutilização de material fresado em acostamento como agente regularizador e nivelador”</i> realizado por Pinto, Cervo e Pereira (2012).</p>	<p>Material fresado sem alterações ou adições de insumo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 100% material fresado; 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios de caracterização do material fresado; • Ensaios de Abrasão Los Angeles; • Ensaios de ISC; 	<p>Não alcançou resultados para ser empregado como base, no entanto foi possível observar resultados satisfatórios para as pistas de rolamento.</p>
<p><i>“Reciclagem de pavimento para restauração da BR 282 em Santa Catarina”</i> realizado por Oliveira, Baran e Schmidt (2010).</p>	<p>Material fresado com cimento;</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Material fresado com acréscimos de cimento entre 2% e 6%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios de capacidade de suporte; • Reciclagem profunda com cimento; 	<p>Os autores mencionaram que foi possível obter uma grande reciclagem com resultados satisfatórios.</p>

3. METODOLOGIA

Neste capítulo foram abordados os pressupostos metodológicos que orientaram no desenvolvimento desta pesquisa e que, conseqüentemente, modelaram a estrutura da dissertação e guiaram para a realização das análises dos dados.

A metodologia aqui apresentada foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

- I – seleção e caracterização da área de estudo;
- II – coleta de solos da área em estudo;
- III – coleta do material fresado de revestimento asfáltico;
- IV – ensaios empregados no material fresado, a fim de se conhecer suas propriedades, a saber: granulometria sem e com o ligante, massa específica (agregados miúdos e graúdos) e absorção;
- V – ensaios nos solos com a finalidade de conhecer suas características e sua natureza, tais como: granulometria conjunta, massa específica, classificação conforme metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) e de acordo norma HRB, e testes para avaliar a capacidade de suporte (ISC) e expansão;
- VI – ensaios realizados nas misturas (solo-material fresado): capacidade de suporte (ISC) e expansão, sendo o resíduo acrescido nas proporções de 10 em 10%, até a proporção de 50% em substituição ao solo, na energia normal e intermediária;
- VII – análise estática;
- VIII – análise dos resultados.

3.1 Seleção e caracterização da área de estudo

Selecionamos a área nas proximidades da cidade de São Carlos, localizada na região centro-leste do estado de São Paulo (Figura 4), a uma distância de 230 quilômetros da capital. Esta cidade é conhecida como a “capital nacional da tecnologia” devido as suas universidades, UFSCar e USP. Possui uma população de aproximadamente 250.000 habitantes, ocupando uma área de 1.137.333 km², considerada a 13ª cidade do estado em números de habitantes. É conhecida também por alojar empresas, como: Faber-Castell, TAM, Volkswagen, Eletrolux, Tecumseh, dentre outras empresas (IBGE/2018).

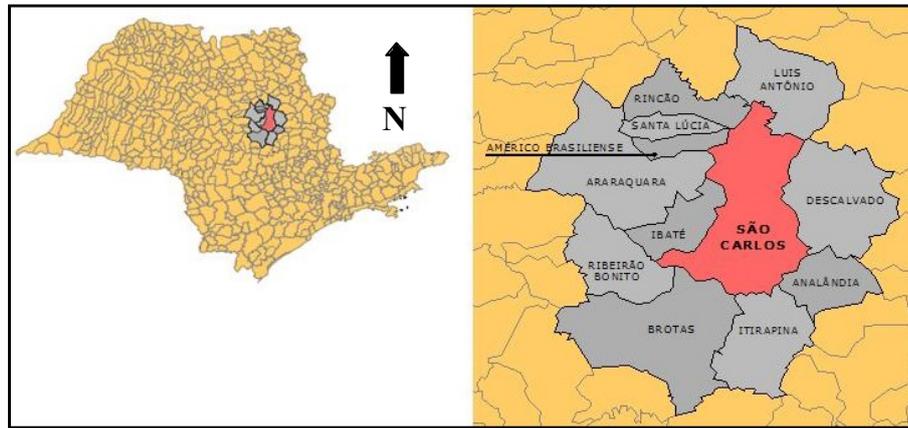


Figura 4. Localização da cidade de São Carlos – SP. Fonte: <http://larissajordao.blogspot.com>

A cidade faz divisa com as cidades de Araraquara, Descalvado, Ibaté, Itirapina e outras, conforme ilustra a Figura 4, ficando assim distante 100 km da cidade de Ribeirão Preto.

De maneira a identificar os solos da região, tivemos como base o mapa geológico da CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais) e pesquisas sobre a região a ser analisada, que são os estudos que tivemos como referência: Mallanconi (2013) e Aguiar (1989), conforme a Figura 5, a seguir:



Figura 5. Formação geológica da cidade de São Carlos adaptado da CPRM (GOOGLE EARTH).

- Sedimentos quaternários;
- Formação Itaqueri;
- Formação Serra Geral;
- Formação Botucatu;

A região encontra-se sobre a bacia do Paraná que tem as seguintes bases de formação geológica: a formação Piramboia, a formação Botucatu, a formação Serra Geral, a formação Itaqueri e sedimentos quaternários (MALANCONI, 2013).

Aguiar (1989) realizou em seu trabalho, a caracterização dos solos da região conforme as classificações tradicionais HRB (atual TRB) e UCS, e também classificou os solos segundo a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical). A partir da metodologia MCT, o pesquisador identificou solos arenosos de comportamento lateríticos (LA') e areias não lateríticas (NA), sendo também identificados solos argilosos de comportamento laterítico e não laterítico.

3.2 Coleta dos solos

Para esta pesquisa foram coletados cinco solos da região em análise (Figura 6), coletando nos locais próximos de Malanconi (2013), de maneira a representar a maior ocorrência de solos da região.

Os solos foram coletados com instrumentos manuais, a saber: trados, pás e enxadas. Teve-se o cuidado de retirar dos solos coletados grama e galhos, pois poderiam interferir nos resultados em laboratório. Posteriormente, foram ensacados (Figuras 6, 7 e 8) e encaminhados para o laboratório de Estradas da UFSCar em São Carlos.



Figura 6. Coleta de solos - Solo 1 (à esquerda) e Solo 2 (à direita) - (AUTOR, 2017).



Figura 7. Coleta de solos - Solo 3 (à esquerda) e Solo 4 (à direita) - (AUTOR, 2017).



Figura 8. Coleta do solo - Solo 5 – (AUTOR, 2018).

Na Tabela 4, a seguir, é descrita a localização dos solos: as rodovias, as coordenadas e as referências próximas na qual foram coletados os solos:

Tabela 4 – Localização dos solos coletados.

Solos	Rodovia	Referências próximas	Coordenadas	
1	SP - 215	Portaria Volkswagen	S: 22° 03' 38,76''	W: 47° 52' 26,13''
2	SP - 318	Acesso Norte UFSCar	S: 21° 58' 60,64''	W: 47° 53' 18,88''
3	SP - 318	Parque Tecnológico	S: 21° 57' 22,56''	W: 47° 53' 32,08''
4	SP - 318	Golfe Dahma	S: 21° 56' 31,62''	W: 47° 53' 41,96''
5*	SP - 215	km 152,4	S: 22° 04' 00''	W: 47° 54' 30''

*Solo 5 - retirado abaixo da linha de seixo.

3.3 Material fresado

O material fresado de revestimento asfáltico foi coletado através de instrumentos manuais como pás e enxadas.

No momento da coleta do material fresado, tomamos o cuidado de evitar os materiais orgânicos. Os materiais foram devidamente ensacados e encaminhados para o laboratório de Estradas da UFSCar de São Carlos (Figura 9).



Figura 9. Coleta do material fresado de revestimento asfáltico (AUTOR, 2017).

O material é produto de intervenções realizadas na rodovia Washington Luiz, entre as cidades de São Carlos e Araraquara (Figura 11).

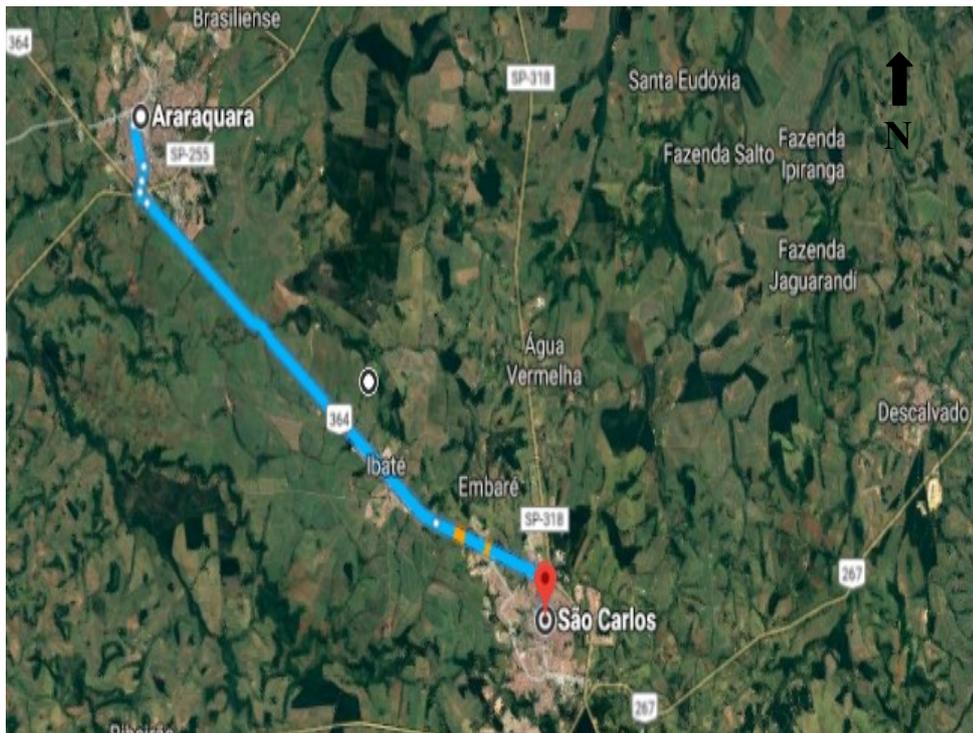


Figura 10. Trecho de manutenção no qual foi obtido o material fresado. Fonte: Google Earth.

3.4 Ensaio no material fresado

Com a finalidade de conhecer as propriedades do material fresado, foram realizados ensaios de caracterização do material.

Antes de iniciar os testes, o material fresado foi seco ao ar, conforme a Figura 11:



Figura 11. Material fresado seco ao ar. (AUTOR, 2018)

Para caracterização do material fresado, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais:

- Extração do ligante: DNER – ME 158/2011;
- Granulometria: DNER – ME 083/98 – Análise Granulométrica de Agregados com e sem o ligante, as granulometrias foram ensaiadas por peneiramento manual;
- Absorção: o ensaio de absorção de agregado foi baseado na DNER ME 195/97 - absorção para agregados graúdos;
- Massa específica: para a análise da massa específica, foram realizados ensaios em separados, os retidos e os passantes na peneira de 4,8 mm:

- ✓ Massa específica do agregado graúdo (retido na peneira 4,8 mm);

Este ensaio foi baseado na DNER ME 195/97 – massa específica para agregados graúdos, determinando-se a massa específica do agregado de resíduo de fresagem de pavimentação asfáltica;

- ✓ Massa específica do agregado miúdo (passante na peneira 4,8 mm);

As massas específicas dos grãos passante na peneira de 4,8 mm foram realizadas conforme a norma DNER ME 194/98 – determinação da massa específica por meio do frasco de Chapmann.

3.5 Ensaio nos solos

Foram realizados também ensaios de maneira a classificar os solos pela classificação tradicional HRB (atual TRB) e pela metodologia MCT. Para complementar a

caracterização dos solos, foram realizados ensaios de granulometria conjunta e executados ensaios de massa específica dos solos coletados, os testes seguiram os seguintes procedimentos, a seguir:

- Granulometria conjunta, conforme as diretrizes da ABNT NBR 7181:1984;
- Massa específica, segundo as recomendações da ABNT NBR 6458:1984;
- Classificação H.R.B. (atual TRB);
Para classificar os solos conforme a norma HRB, foram realizados os seguintes ensaios:
 - ✓ Granulometria: foram realizados ensaios de granulometria, sendo utilizadas neste ensaio somente as peneiras de número 10, 40 e 200;
 - ✓ Limite de liquidez: com o objetivo de obter índices físicos do solo e para classificá-lo de acordo com a norma T.R.B. (Transportation Research Board), foram realizados nos solos o ensaio de limite de liquidez, conforme NBR 6459 (ABNT, 1984);
 - ✓ Limite de Plasticidade: seguindo as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 1984), foi realizado o ensaio de limite plasticidade para classificar os solos, segundo a norma tradicional T.R.B.;
 - ✓ Índice de plasticidade: após os ensaios de limite de liquidez e limite plasticidade, foi possível calcular o índice de plasticidade que é diferença entre o limite de liquidez e o de plasticidade ($IP = LL - LP$).
- Classificação MCT;
Para classificar os solos seguindo as recomendações da metodologia MCT teve como base as seguintes recomendações das normas:
 - ✓ DNER – ME 258/94 - *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV* (Figura 12);



Figura 12. Esquema de compactador MCV. (AUTOR, 2018).

- ✓ DNER – ME 256/94– *Solos compactados por equipamentos em miniatura - determinação de perda de massa por imersão* (Figura 13);



Figura 13. Ensaio de perda de massa por imersão. (AUTOR, 2018).

- Ensaios de ISC (Índice de Suporte Califórnia) dos solos na condição pura de acordo com a norma DNER-ME 49/94.

3.6 Ensaios nas misturas

A mistura solo-material fresado de pavimentação asfáltica foi preparada seguindo as recomendações da norma do DNER-ME 49/94: “*Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*”, sendo os materiais secos ao ar.

A norma orienta que os materiais que ficarem retidos na peneira de 50 mm sejam descartados, sendo que, na mistura solo-material fresado, não ficou retido nenhum material nesta peneira. Também é mencionado na norma que o material que ficar retido na peneira de

19 mm seja substituído pelo material entre as peneiras 19 mm e 4,8 mm. No caso do material em estudo não houve necessidade, pois, todo o material passou na peneira de 19 mm.

Antes de realizar a composição das misturas, o material fresado foi quarteado (Figura 14) de maneira a proporcionar misturas iguais:



Figura 14. Material fresado quarteado (AUTOR, 2018).

Posteriormente, o material fresado de pavimentação asfáltica foi adicionado em substituição ao solo (Figura 15), sendo acrescido nas proporções 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.



Figura 15. Material fresado sendo adicionado ao solo (AUTOR, 2018).

A norma de DNER-ME 49/94: “*Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia, utilizando amostras não trabalhadas*”, estabelece que os materiais devam ser ensaiados acrescentando água de maneira a estabelecer a curva de máxima massa específica, no qual são necessários pelo menos cinco pontos, sendo empregada neste trabalho a energia normal e a intermediária de compactação para os ensaios.

Após a moldagem, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 96 horas. Durante o período de imersão, os corpos de prova ficam sob efeito de uma

sobrecarga de 4540 g em discos anelares que servem para simular o confinamento e o peso sobre o pavimento. Por fim, os resultados da expansão são medidos em períodos de 24 em 24 horas por meio de um extensômetro que esteve ligado à haste de expansão do prato perfurado (Figura 16):



Figura 16. Corpos de prova imersos para análise da expansão (AUTOR, 2018).

Logo após o período de quatro dias imersos, foram realizados os ensaios de resistência por meio de penetração, conforme ilustra a Figura 17, a seguir:



Figura 17. Ensaio de resistência ISC (AUTOR, 2018).

3.7 Análise Estatística

Foram realizadas análises estatísticas dos solos estudados na condição pura e das composições, no teste de ISC, sendo avaliados: o coeficiente de ajuste (R^2), as equações de regressão e o porcentual de ganho de capacidade de suporte de cada composição, na energia normal e intermediária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo, apresentamos os resultados: primeiramente, apresentam-se os resultados da caracterização do material fresado e dos solos da área selecionada; e, posteriormente, os resultados de capacidade de suporte (ISC) e expansão dos solos na condição natural e das misturas solo/material fresado, por fim uma análise estatística da capacidade de suporte dos solos.

4.1 Material Fresado

Serão apresentados resultados dos ensaios que identificaram as propriedades do material fresado.

4.1.1 Massa específica

A massa específica foi dividida em duas etapas no qual foram analisados os resíduos retidos na peneira de 4,8 mm e os passantes na mesma malha.

4.1.1.1 Passantes na peneira de 4,8 mm (fino)

Esta etapa foi realizada seguindo as recomendações da norma do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem DNER ME 194/98 – “*Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*”. A Figura 18, a seguir, ilustra o procedimento realizado:



Figura 18. Ensaio de massa específica (AUTOR, 2018)

A Tabela 5, abaixo, mostra as leituras realizadas no frasco de Chapman:

Tabela 5. Massa específica do agregado miúdo.

Leituras	Leitura no frasco (cm ³)	γ (kg/m ³)
1	434,0	2137
2	437,0	2110
3	435,5	2123
Média	435,5	2123

A média dos resultados mostrou um valor de 2123 kg/m³, demonstrando coerência com resultados da literatura técnica como, por exemplo, os resultados observados por Specht (2013), em seu trabalho.

4.1.1.2 Retidos na peneira de 4,8 mm (grosso)

Para o ensaio de massa específica dos agregados retidos na peneira de 4,8 mm, utilizou-se a norma DNER ME 195/97 – “Agregados: determinação de absorção e densidade de agregado graúdo”.

A seguir, a Tabela 6 mostra os resultados da massa específica do material retido na peneira de 4,8 mm:

Tabela 6. Massa específica do agregado graúdo.

Amostras	γ (kg/m ³)
1	2420
2	2480
3	2470
Média	2460

Sendo a média do resultado final da massa específica de 2460 kg/m³ do material fresado de agregado graúdo.

4.1.2 Absorção

Para a determinação da absorção do material fresado do revestimento de pavimentação asfáltica, utilizou-se a norma DNER ME 195/97 – “Agregados: determinação de absorção e densidade de agregado graúdo”.

A Tabela 7, a seguir, mostra resultados de absorção do material fresado:

Tabela 7. Absorção do material fresado.

Amostras	a (%)
1	1,98
2	1,78
3	1,84
Média	1,86

A absorção do material fresado de pavimentação asfáltica teve como resultado 1,86%.

4.1.3 Granulometria com ligante asfáltico

O resultado do ensaio de granulometria, normalmente, é expresso através de uma curva granulométrica. No eixo das abscissas, são descritos em escala logarítmica, sendo os diâmetros dos grãos ou a abertura das peneiras. Já no eixo das ordenadas, são as porcentagens passantes acumulada em cada peneira em análise. De acordo com a curva, é possível classificar o material em mal graduado, bem graduado e uniforme (DNIT, 2006).

Para a análise granulométrica do material fresado, seguiram-se as recomendações da DNER - ME 083/98, no qual o ensaio foi realizado por peneiramento manual.

A seguir, é apresentado o resultado de granulometria do material fresado com ligante asfáltico (Figura 19):

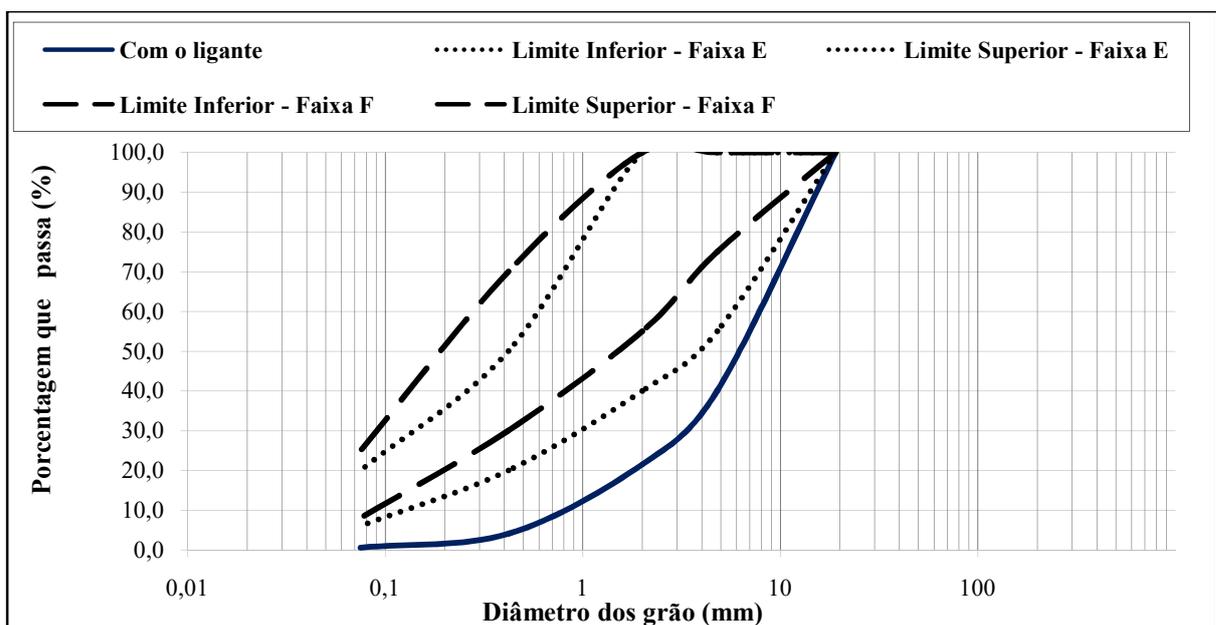


Figura 19. Curva granulométrica do Material Fresado com o ligante.

Os resultados da curva granulométrica do material fresado com o ligante pode ser considerado bem graduado com poucos finos, no entanto, não se enquadraram nas curvas E e F da norma do DNIT 141/2010 para vias com baixo volume de tráfego.

A seguir, a Figura 20 mostra 8 vasilhas de vidro que, após o agregado ser peneirado, identifica os materiais retidos em cada peneira, sendo as peneiras 12,7 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 1,18 mm, 0,42 mm, 0,075 mm e fundo. Nas peneiras de malha mais “grossa”, ficaram retidas as maiores quantidades do material.



Figura 20. Recipientes com os materiais retidos em cada peneira.

De acordo com Barros (2013), este caso pode ser justificado devido a uma aglutinação de partículas menores provocadas pelo ligante asfáltico.

4.1.4 Granulometria sem o ligante asfáltico

A seguir, a Figura 21 descreve a curva granulométrica do material fresado de revestimento asfáltico sem o ligante.

Para descrever a curva granulométrica, foi extraído o ligante asfáltico conforme a norma do DNIT ME – 158/2011, tendo como teor de ligante 4%.

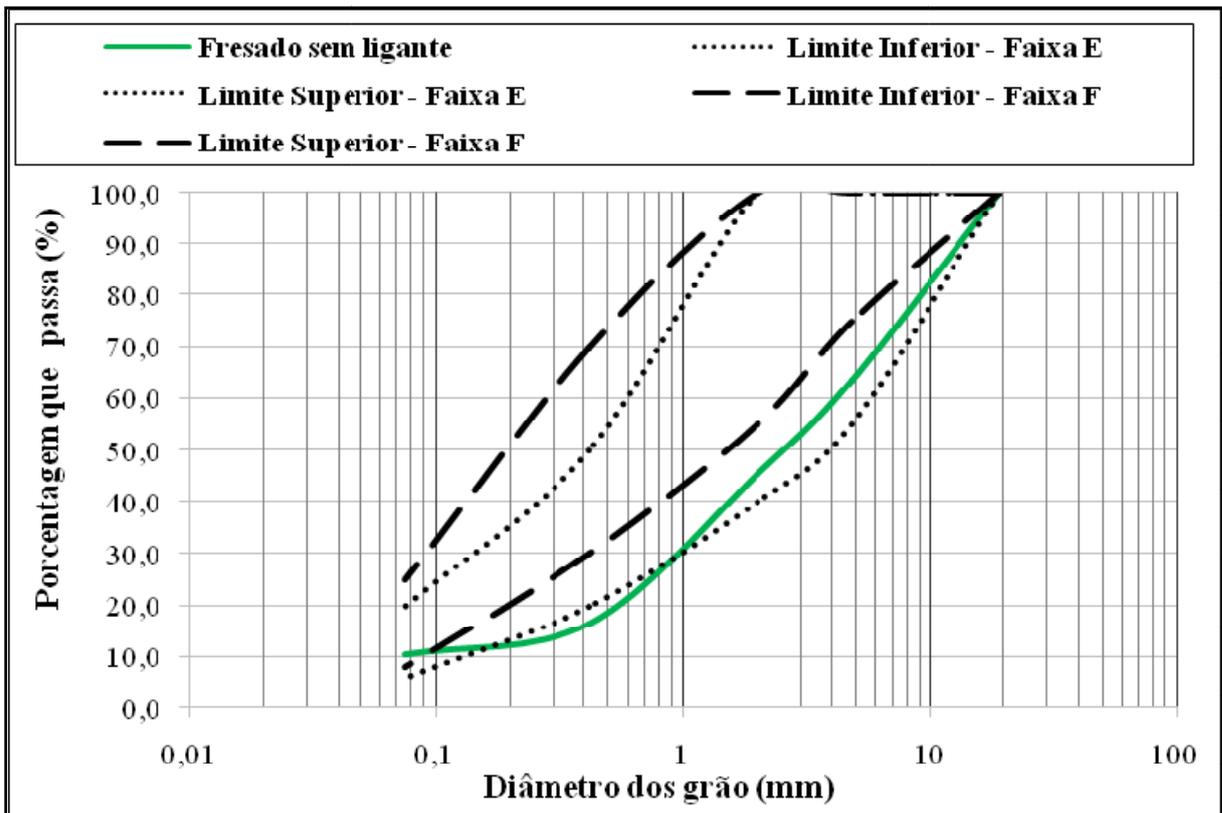


Figura 21. Curva granulométrica do material fresado sem o ligante.

Pelos resultados identificados, é possível observar que material fresado não se enquadrando totalmente nem na Faixa E, e apenas o trecho entre 10% e 30% do resíduo não se enquadrando na faixa F, as curvas E e F foram descritas segundo a norma DNIT 141/2010 para vias com baixo volume de tráfego, no entanto, pelos resultados pode ser considerado um material bem graduado, tendo 10% de finos aproximadamente.

4.2 Solos

Abaixo, serão apresentados os testes que identificaram a natureza dos solos, suas características e suas propriedades.

4.2.1 Peneiramento

A Tabela 8, a seguir, mostra as porcentagens dos materiais retidos nas peneiras de 2 mm, 0,42 mm e na 0,074 dos quatro solos estudados:

Tabela 8. Ensaio de Peneiramento.

Solos	(%) Passada # 2 mm	(%) Passada # 0,42 mm	(%) Passada # 0,074 mm
1	100,00	82,24	15,05
2	100,00	87,53	40,93
3	100,00	81,08	31,60
4	100,00	82,54	19,89
5	100,00	97,15	77,85

Pelos resultados, é possível constatar que os solos 1, 3 e 4 mostram percentagens abaixo de 35% passantes na peneira de nº 200, e os solo 2 e 5 apresentaram resultados acima de 35% retidos na mesma peneira.

4.2.2 Limites de Consistência

De maneira a classificar os solos de acordo com a metodologia tradicional TRB, além do ensaio de peneiramento, são necessários os ensaios de limites de consistências, a saber: limite de liquidez e limites de plasticidade.

4.2.2.1 Limite de Liquidez

O ensaio teve como referência a norma NBR 6459 (ABNT, 1984), a Figura 22, a seguir, ilustra o ensaio:



Figura 22. Ensaio de limite de liquidez (AUTOR, 2018).

É possível notar que o solo 1 e o solo 4 não aparecem nos resultados apresentados, pois não atingiram o limite de liquidez do ensaio e, portanto, os solos são considerados não plásticos.

A Tabela 9, a seguir, descreve os índices obtidos para todos os solos deste estudo:

Solos	Limite de liquidez (%)
1	N.P.
2	30
3	26
4	N.P.
5	66

4.2.2.2 Limite Plasticidade

Normalizado pela ABNT NBR 7180:2016, o ensaio consiste em moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, conforme a Figura 23:



Figura 23. Ensaio de limite de plasticidade (AUTOR, 2018).

A seguir, a Tabela 10 mostra os valores encontrados para o ensaio de limite de plasticidade:

Solos	Limite de plasticidade (%)
1	N.P.
2	20
3	15
4	N.P.
5	43

É possível observar que, de maneira semelhante ao resultado de limite de liquidez do solo 1 e do solo 4, foram considerados não plásticos pelo motivo da predominância de frações de silte e pouca fração de argila nos solos (MALLANCONI, 2013).

4.2.3 Massa Específica

Normatizado pela ABNT NBR 6458:1984, o ensaio consiste em determinar a massa específica dos sólidos passantes na peneira de abertura 4,8 mm. Os índices obtidos nos ensaios estão descritos na Tabela 11, a seguir:

Tabela 11. Massa específica dos solos

Solos	Massa específica (kg/m ³)
1	2680
2	3020
3	2850
4	2390
5	2440

4.2.4 Análise granulométrica conjunta

A ABNT NBR 7181:1984, prescreve a análise granulométrica conjunta, ou seja, por granulometria e sedimentação.

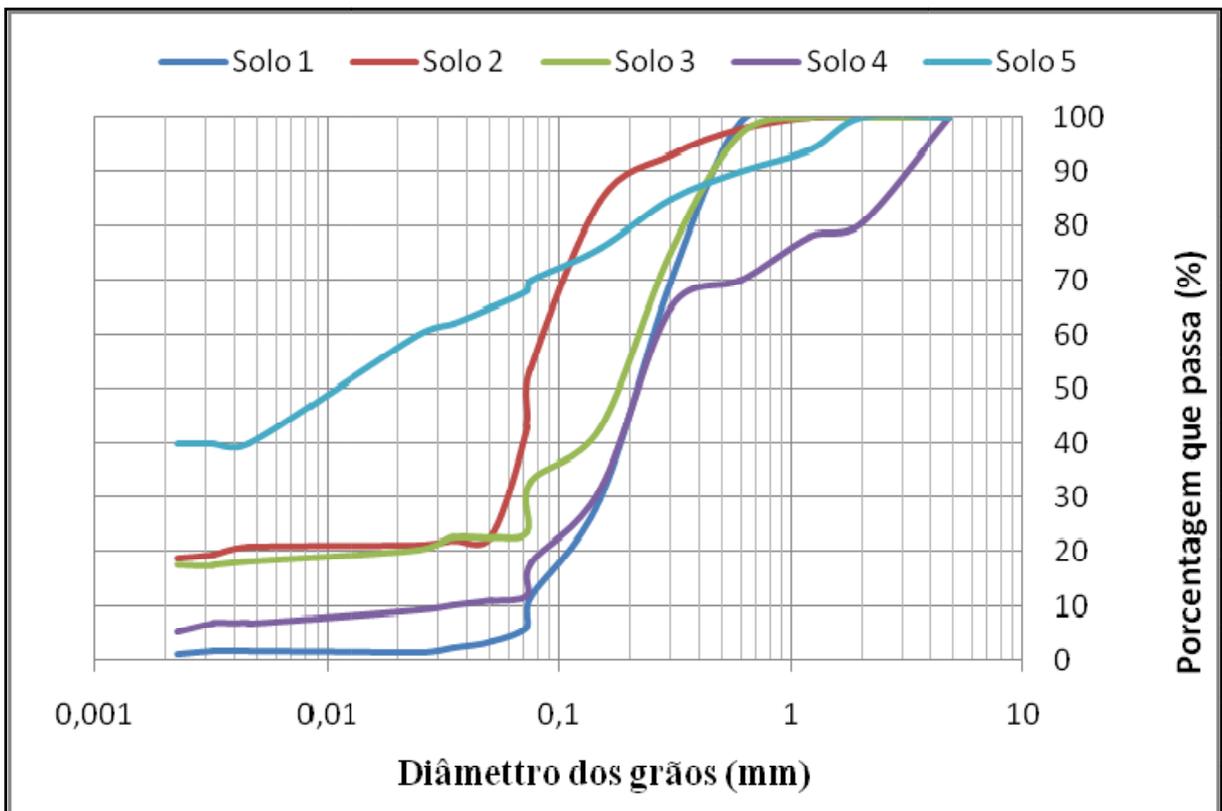


Figura 24. Curva granulométrica dos solos.

Por meio da curva granulométrica (Figura 24), é possível percebermos que os solos 1 e 4 são de graduação aberta, possuindo poucos finos; já os solos 2, 3 e 5 são bem-graduados, tendo graduação contínua.

A Tabela 12 descreve a porcentagem retida em cada fração de solo.

Tabela 12. Composição granulométrica dos solos.

Solos	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
1	1	0	9	88	1	1
2	18	3	22	57	0	0
3	17	4	11	67	1	0
4	4	5	8	62	15	6
5	40	30	21	9	0	0

Para Nogami e Villibor (2009), um dos parâmetros necessário para que um solo seja empregado como camada de pavimento é que o mesmo passe integralmente na peneira de abertura de 2,00 mm (nº 10), o que ocorre praticamente em todas as situações apresentadas.

Os solos 1, 2, 3, 4 e 5 podem ser assim classificados, respectivamente: areno-argiloso com pedregulho, areno-argiloso com silte, areno-argiloso com silte, areno-siltoso com pedregulho e argilo-siltoso com areia, segundo a metodologia SHPR-Superpave (ASTM C 125, 2005).

4.2.5 Classificação HRB (atual TRB)

A partir dos resultados obtidos do ensaio de limite de liquidez, limite de plasticidade e peneiramento, sendo as peneiras de interesse nºs 10, 40 e 200, foi possível classificarmos os solos conforme a metodologia tradicional HRB (Tabela 13).

Tabela 13. Parâmetros para a classificação HRB.

Solos	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	Passante (nº 200) (%)	Classificação HRB
1	N.L.	N.P.	N.P.	15,05	A-1-b (0)
2	30	20	10	40,93	A-6 (1)
3	26	15	11	31,60	A-2-6 (4)
4	N.L.	N.P.	N.P.	19,89	A-1-b (0)
5	62	36	26	77,85	A-7- 6 (10)

Pelos resultados da referida tabela observa-se que, para emprego em reforço de subleito e sub-base, são indicados os solos 1, 3 e 4, no entanto, não são aplicáveis os solos 2 e 5 como reforço de subleito.

4.2.6 Classificação MCT

Baseada nas recomendações das normas: DNER – ME 258/94 e DNER – ME 256/94, foi realizada a classificação MCT (Miniatura Compactada Tropic), no qual determinou-se o valor dos Mini-MCV das curvas. A Tabela 14, a seguir, apresenta os coeficientes e a classificação pela metodologia MCT.

Tabela 14. Ensaio de mini-MCV

Solos	c'	e'	Classificação MCT	Tipo de Solo
1	0,30	1,14	LA	Areia Laterítica
2	0,90	1,22	NA'	Arenoso não laterítico
3	0,80	1,10	LA'	Arenoso Laterítico
4	0,30	1,35	LA	Areia Laterítica
5	2,1	1,8	NG'	Argiloso não laterítico

Em posse dos parâmetros e' e do coeficiente angular c' , foi possível plotar no ábaco os pontos que identificaram os solos, como mostra a Figura 25, a seguir:

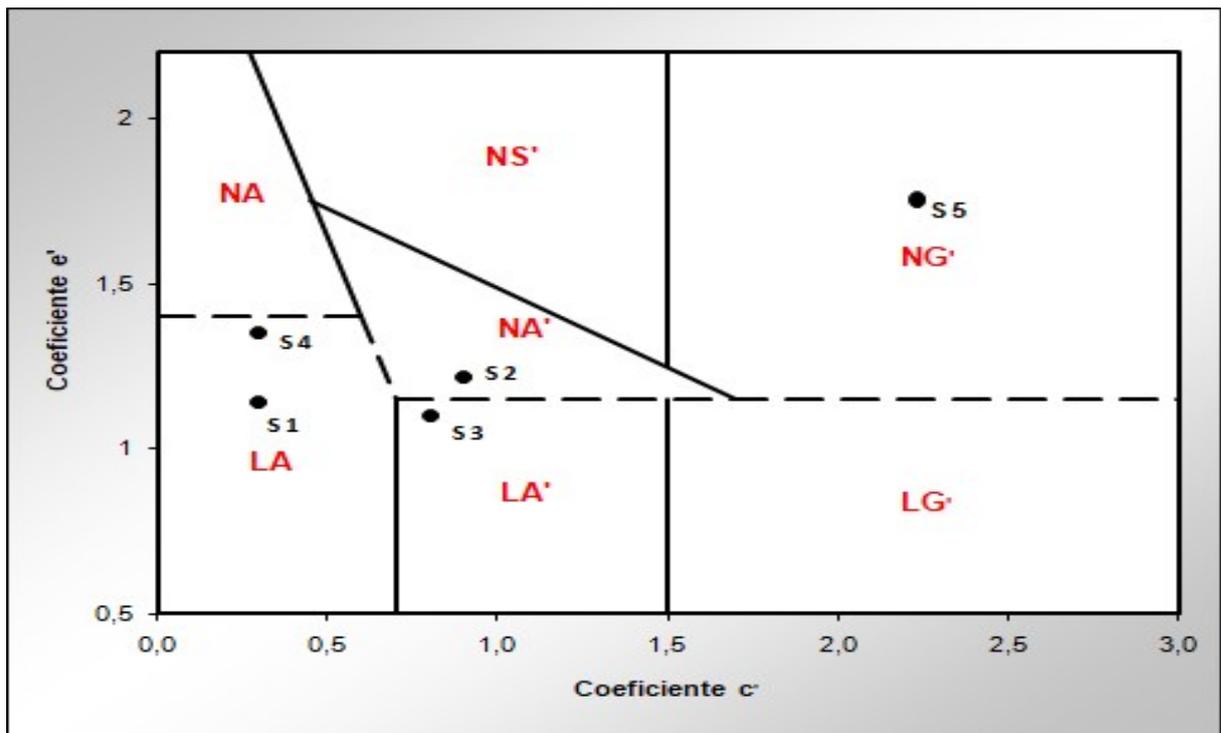


Figura 25. Classificação MCT.

Os solos 1, 2, 3, 4 e 5 foram identificados, segundo a classificação MCT, como: areia laterítica, solo arenoso não laterítico, solo arenoso laterítico, areia laterítica e solo argiloso não laterítico, respectivamente. De acordo com Senço (2007), para aplicação como camadas inferiores de base e/ou sub-base não se recomenda a aplicação dos solos 2 e 5, identificados como solos arenosos e argilosos de comportamento não laterítico, pois, caracterizam-se por serem solos com alta expansibilidade e baixa capacidade de suporte; já os solos 1, 3 e 4 podem ser aplicados como camadas de base e sub-base.

4.3 Ensaio nas misturas

Com a finalidade de se conhecer a umidade ótima, a massa específica máxima, o ISC (Índice de Capacidade Suporte) e a expansão, foram realizados ensaios de capacidade de suporte simultâneos, na energia normal e intermediária, ambos no cilindro de ISC.

A determinação do teor de umidade foram feitas seguindo as recomendações da norma DNER-ME 49/94.

Para avaliar a expansão das misturas e dos solos puros, como recomenda a norma, foi colocado o conjunto em um tanque de água onde permaneceu por no mínimo 4 dias, e as leituras do extensômetro foram medidas diariamente.

4.3.1 Energia Normal

Nesta etapa da pesquisa, apresentamos os resultados de massa específica, de umidade ótima, de ISC das misturas com 10, 20, 30, 40 e 50% do material fresado e com solo na condição natural, de acordo com norma DNER-ME 49/94.

4.3.1.1 Solo 1 (LA) com suas respectivas misturas

A seguir (Figura 26), apresenta os resultados de massa específica e umidade ótima de todas as misturas e do solo natural do ensaio de Proctor na energia normal.

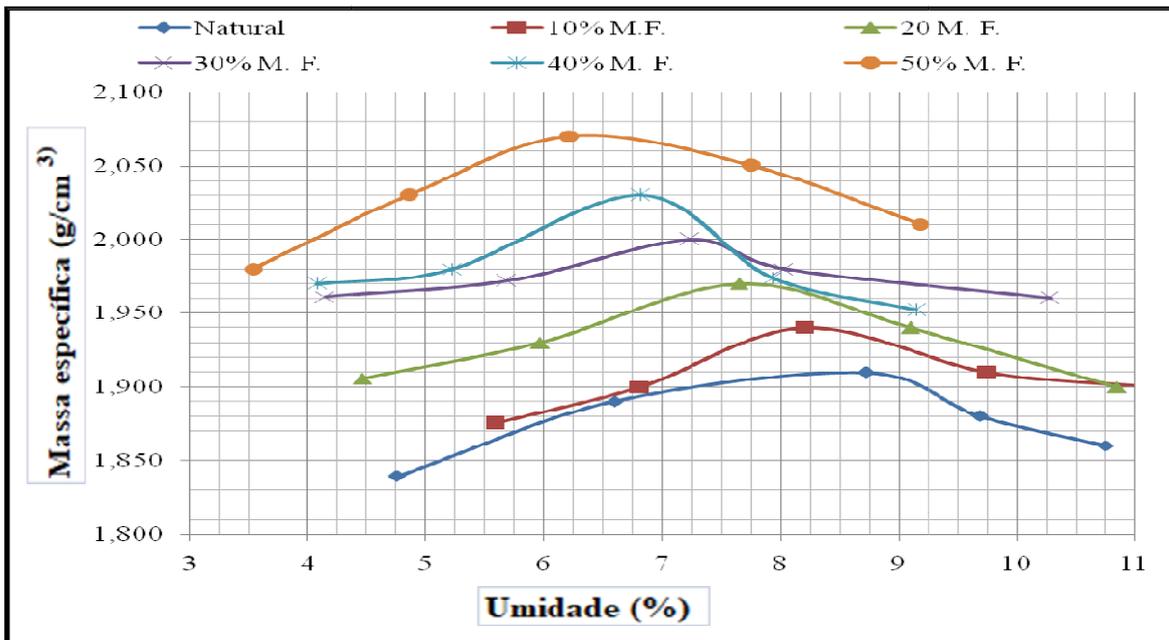


Figura 26. Massa específica VS umidade do solo 1 (LA) na energia normal.

Através da Figura 26, podemos observar que as massas específicas variam 1,91 g/cm³ na condição natural a 2,070 g/cm³ para a mistura com 50 % de material fresado; já com relação às umidades, variaram de 6,22 a 8,72%, das misturas com 50% do resíduo de fresagem para o solo natural.

Os resultados de ISC e expansão estão ilustrados na Figura 27 do solo 1 (LA), as curvas de ISC e expansão do solo natural e das composições em função da umidade estão no ANEXO A.

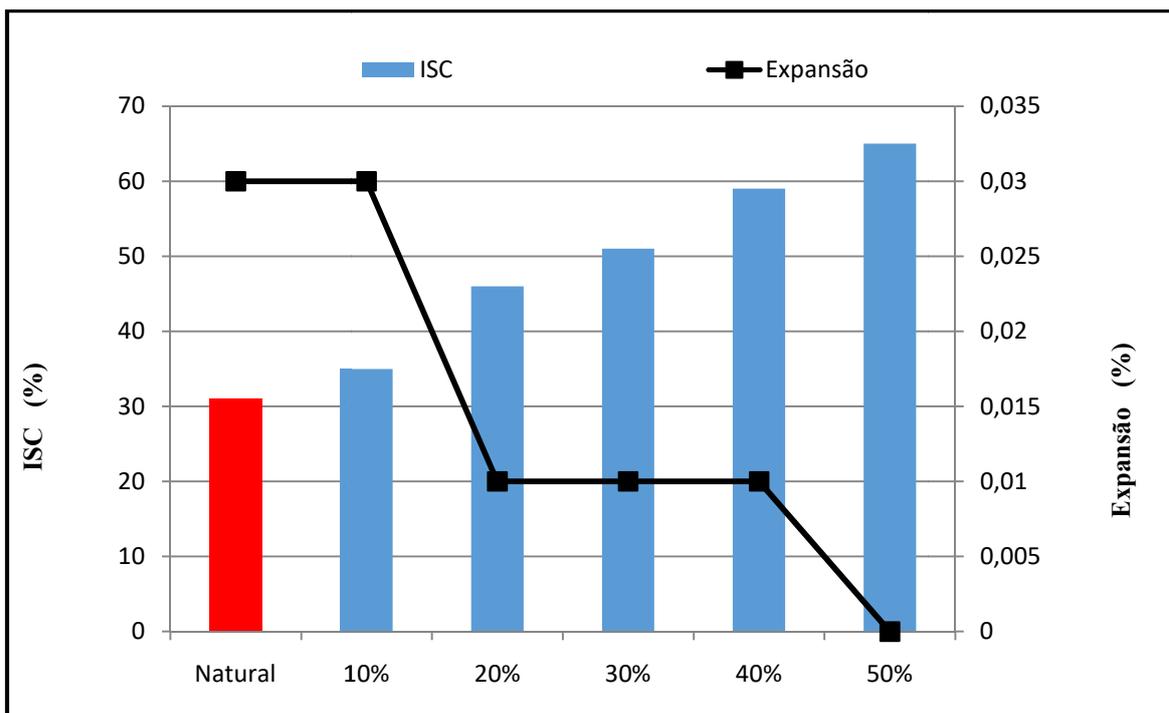


Figura 27. ISC e expansão do solo 1 (LA) na energia normal.

Através dos resultados apresentados (Figura 28), percebemos uma tendência decrescente da expansão, na medida em que se acrescenta o resíduo, sendo que, em todas as misturas e no solo natural, apresentaram índices abaixo do requerido pela norma.

Já com relação aos resultados capacidade de suporte, houve um crescimento de resistência de 34 unidades de ISC quando comparados o solo natural, com a mistura com 50% de material fresado.

A Tabela 15, a seguir, mostra os resultados do solo natural e com todas as misturas.

Tabela 15. Resultados do solo 1 (LA) na energia normal.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	31	1910	0,03	8,72
10 %	35	1940	0,03	8,20
20 %	46	1970	0,01	7,65
30 %	51	2000	0,01	7,24
40 %	59	2030	0,01	6,82
50 %	65	2070	0	6,22

Pelos resultados da Tabela 13, é possível observarmos que o Solo 1 classificado pela metodologia MCT como areia laterítica, sem o material fresado, já obteve capacidade de suporte para ser utilizado como reforço de subleito e sub-base, obtendo resultados acima de 20% de ISC e com expansão abaixo de 1%. Cabe salientar que, o Solo 1 (LA), na aplicação de energia normal, possui resistência suficiente para ser empregado como base, na composição com 50% de solo e 50% de material fresado para vias com baixo volume de tráfego.

4.3.1.2 Solo 2 (NA') com suas respectivas misturas

A Figura 28 e Tabela 16 descrevem os resultados obtidos para massa específica em função da umidade, do ensaio de Proctor na energia normal de compactação.

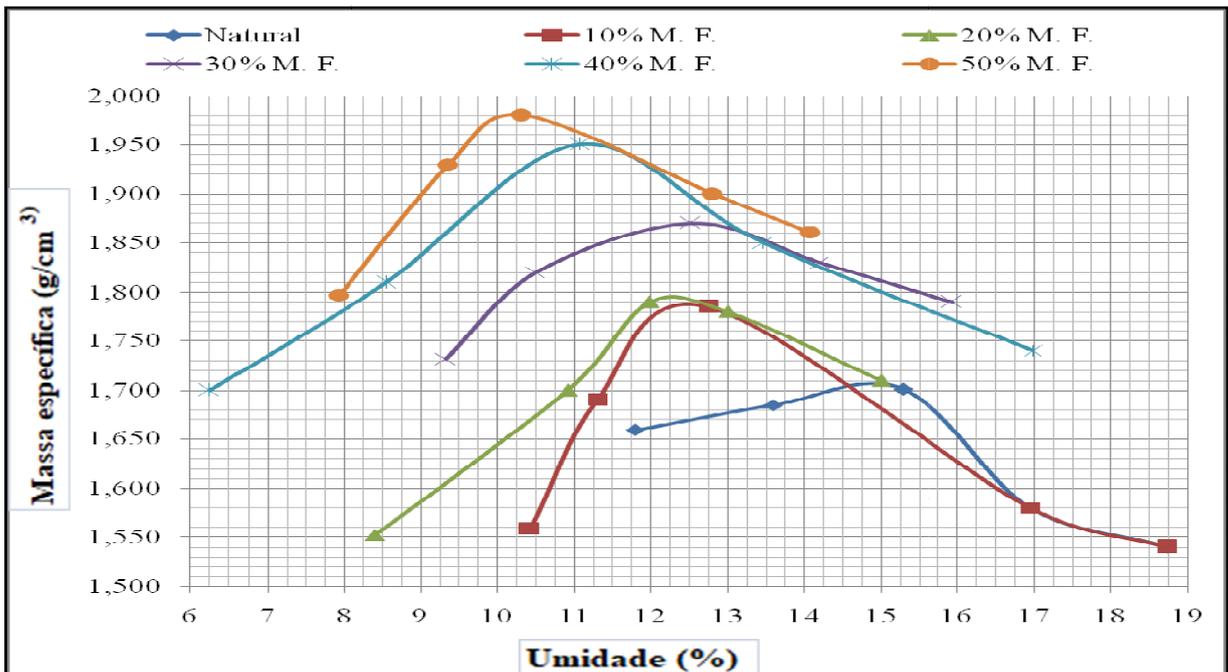


Figura 28. Massa específica VS umidade do solo 2 (NA') na energia normal.

É possível observarmos (Figura 28) que, semelhante aos resultados observados com o solo 1 (LA), à medida que o material fresado é adicionado, a massa específica aumenta, sendo $1,72 \text{ g/cm}^3$ no solo natural e de $1,98 \text{ g/cm}^3$ com 50% do resíduo. Outro fato observado semelhante ao solo 1 (LA) é a tendência decrescente da umidade na medida que são adicionados os resíduos, as umidades variam de 13,50% a 10,32%, do solo puro para a mistura com 50% do resíduo.

A Figura 29 e a Tabela 16 apresentam os resultados de ISC e expansão para o solo 2, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO B.

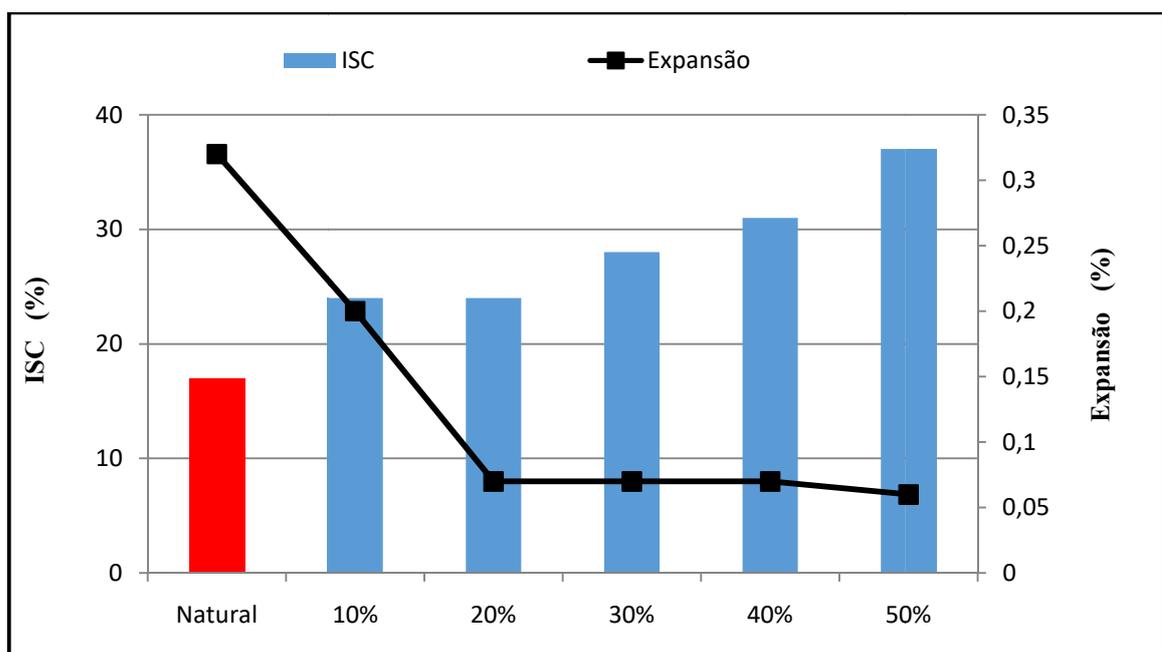


Figura 29. ISC e expansão do solo 2 (NA') na energia normal.

De igual maneira ao solo 1 (LA) com acréscimo do material fresado, houve ganho de resistência, sendo obtidos 14 unidades de ISC do solo natural em relação à mistura com 50% de material fresado. Com relação à expansão, semelhante ao solo 1 (LA), apresentou tendência decrescente, apresentando índices abaixo dos exigidos pela norma.

A Tabela 16, a seguir, descrevem os resultados obtidos para o solo 2 (NA').

Tabela 16. Resultados do solo 2 (NA') na energia normal.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	17	1720	0,32	15,30
10 %	24	1785	0,20	12,50
20 %	24	1800	0,07	12,25
30 %	28	1850	0,07	12,00
40 %	31	1950	0,07	11,07
50 %	37	1980	0,06	10,32

Pelos resultados da Tabela 16, é possível observar que o Solo 2 classificado pela metodologia MCT como solo arenoso não laterítico, a partir da composição com 90% de solo e 10% de material fresado na energia normal de compactação, obteve o índice capaz de ser empregado como reforço de subleito e camada de sub-base, obtendo ISC de 24% e expansão de 0,20%.

4.3.1.3 Solo 3 (LA') com suas respectivas misturas

A seguir, são apresentados os resultados do solo 3 (LA'), quando empregada a energia normal. A Figura 30 e Tabela 17 descrevem os resultados.

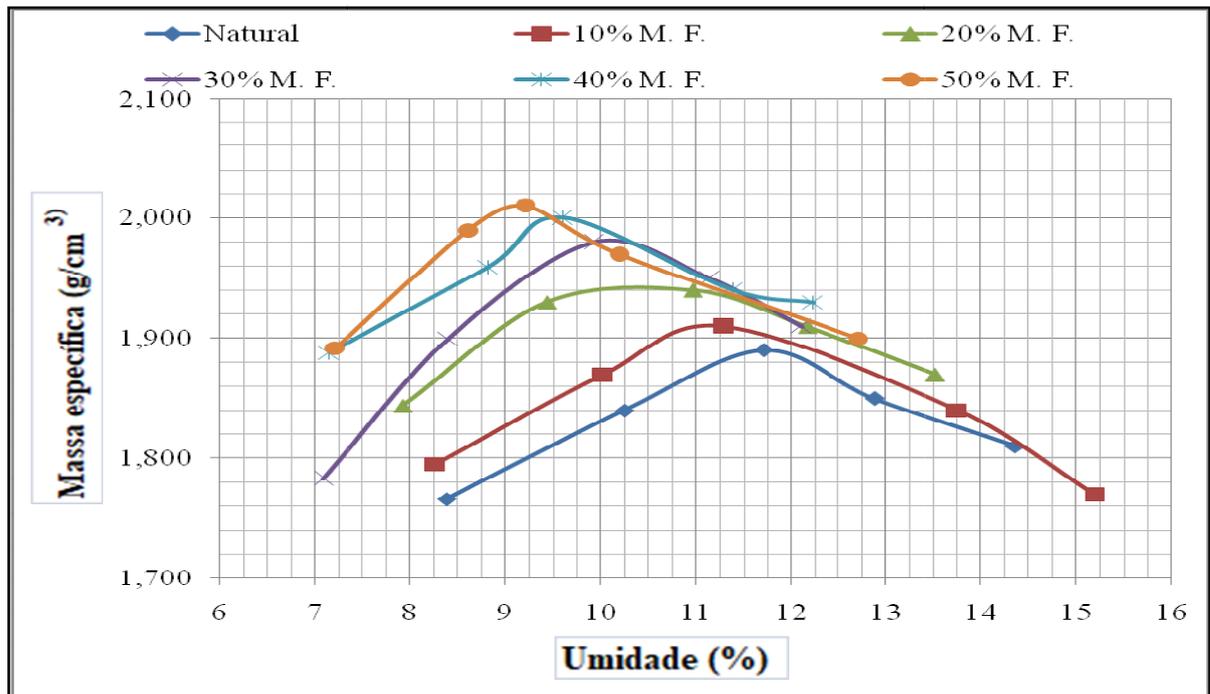


Figura 30. Massa específica VS umidade do solo 3 (LA') na energia normal.

Em posse dos resultados (Figura 30) percebe-se que, igualmente aos casos estudados anteriormente, a massa específica aumentou ao passo em que foi adicionado o material fresado e a umidade diminuiu. Para o solo natural, foi obtida massa específica igual $1,893 \text{ g/cm}^3$ e para a mistura com 50% de material fresado $2,01 \text{ g/cm}^3$. No que se refere à umidade, houve uma variação de 9,21% a 11,75%.

A Figura 31 e da Tabela 17, a seguir, apresentam os valores de ISC e expansão, as curvas de ISC e expansão em função da umidade encontram-se no ANEXO C.

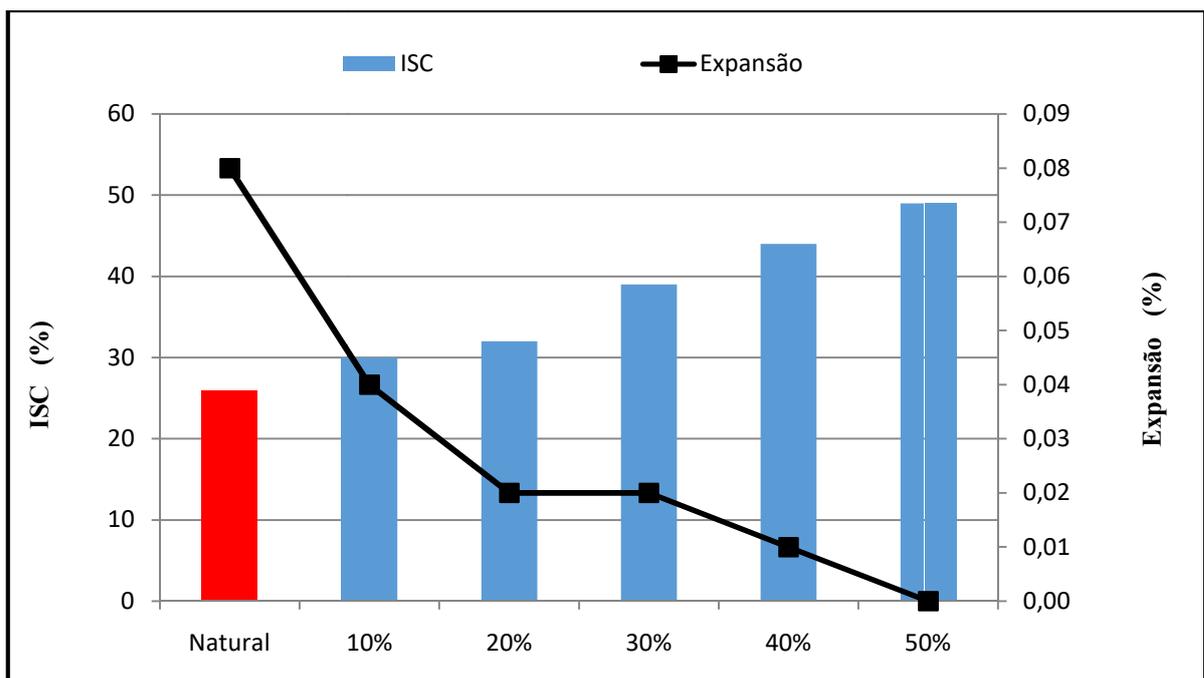


Figura 31. ISC e expansão do solo 3 (LA') na energia normal.

Os resultados revelam que a expansão tendeu a valores decrescentes de igual maneira aos casos já apresentados. Com relação aos índices de capacidade de suporte, houve ganho de capacidade de suporte do solo, sendo observado um aumento de 23 unidades de ISC do solo puro em relação à composição com 50% do resíduo. A Tabela 17, abaixo, apresenta os resultados obtidos com o Solo 3 (LA’):

Tabela 17. Resultados do solo 3 (LA’) na energia normal.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	26	1893	0,08	11,75
10 %	30	1905	0,04	11,25
20 %	32	1944	0,02	10,50
30 %	39	1980	0,02	9,93
40 %	44	2000	0,01	9,50
50 %	49	2010	0	9,21

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que o Solo 3, classificado como arenoso laterítico pela metodologia MCT, sem o material fresado, já possuía capacidade de suporte para ser utilizado como reforço de subleito e camada de sub-base, sendo observados índices de ISC de 26% e expansão 0,08%, obtendo os valores exigidos pela norma.

4.3.1.4 Solo 4 (LA) com suas respectivas misturas

A Figura 32 e a Tabela 18 apresentam os resultados obtidos com o Solo 4 na energia normal.

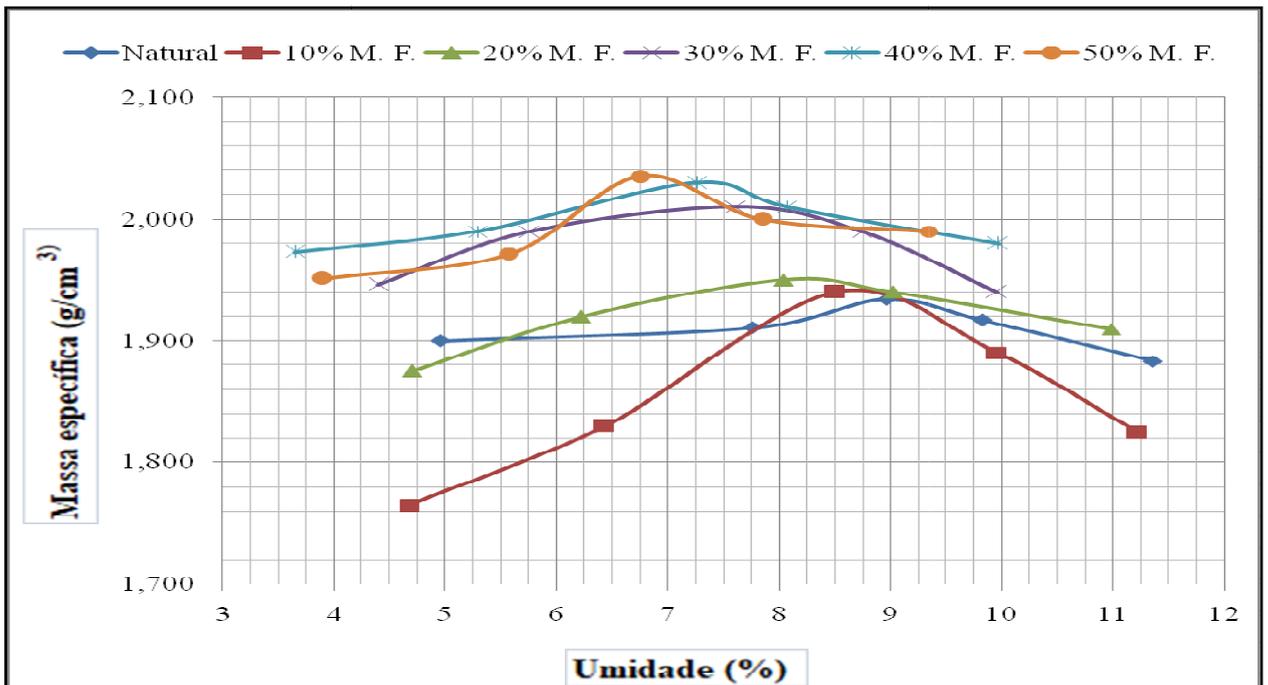


Figura 32. Massa específica VS umidade do solo 4 (LA) na energia normal.

Através dos resultados é possível observar o crescimento da massa específica e um decréscimo da umidade, de igual maneira aos casos anteriormente apresentados, demonstrando semelhança aos solos estudados. A massa específica variou de 1,934 a 2035 g/cm³ e, com a umidade, foram observadas 8,96% para o solo natural e 6,75% para a mistura com 50% de material fresado.

A Figura 33 ilustra os resultados para o ensaio de capacidade de suporte e expansão, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO D.

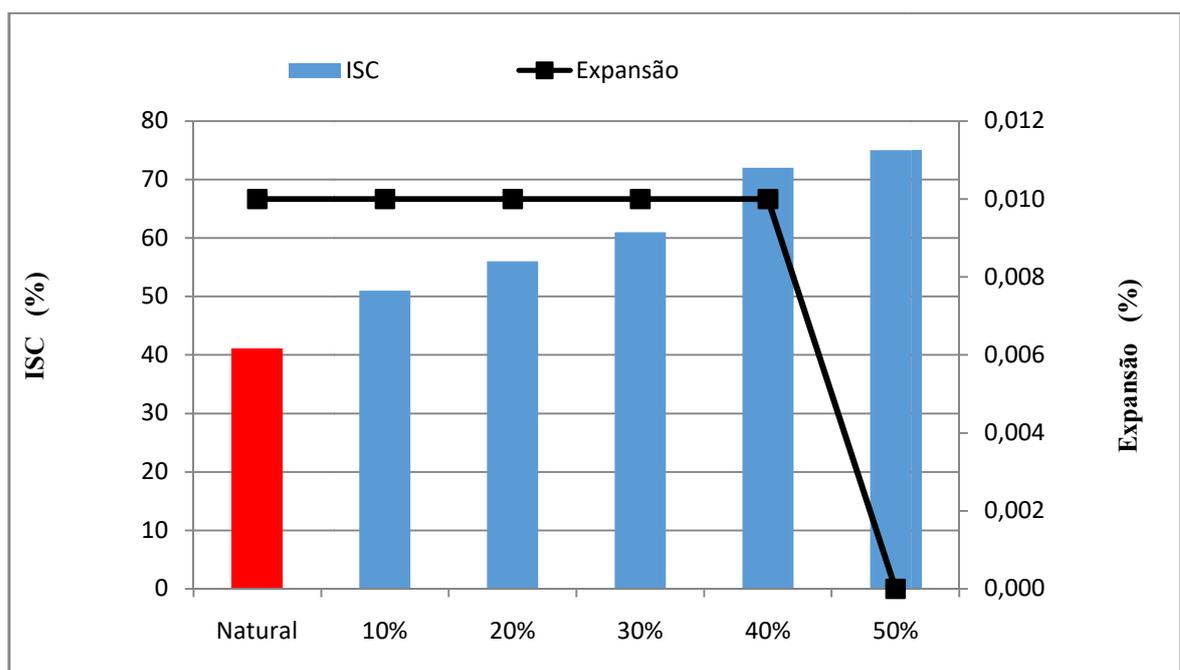


Figura 33. ISC e expansão do solo 4 (LA) na energia normal.

Com relação aos ensaios de ISC, concluímos que foram semelhantes aos solos anteriormente apresentados, percebeu-se que, na medida em que são acrescentados os resíduos existe um ganho de 34 unidades do solo natural em relação à mistura 50% do resíduo. No que se refere à expansão, verificou-se valores constantes até a mistura com 40% de material fresado e 60% de solo, sendo no valor de 0,01%. Na mistura com 50% do resíduo e 50% de solo, ocorreu um decréscimo do índice de expansão obtendo índices de 0%, como é possível verificar pela Figura 33 e a Tabela 18.

A Tabela 18, a seguir, apresenta todos os valores obtidos com o Solo 4 (LA).

Tabela 18. Resultados do solo 4 (LA) na energia normal.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	41	1934	0,01	8,96
10 %	51	1940	0,01	8,50
20 %	56	1950	0,01	8,20
30 %	61	2010	0,01	7,61
40 %	72	2030	0,01	7,26
50 %	75	2035	0	6,75

Pelos resultados da Tabela 18, é possível observarmos que o Solo 4, classificado pela metodologia MCT como areia laterítica, sem o material fresado de compactação, já possui capacidade de suporte para ser empregado como reforço de subleito e sub-base, obtendo índices de 41% de ISC e expansão de 0,01%. É importante destacar que o Solo 4 (LA) do ensaio de Proctor na energia normal de compactação, já apresentou valores pertinentes para ser empregado como camadas de base, a partir da mistura com 70% de solo e 30% de material fresado.

4.3.1.5 Solo 5 (NG') com suas respectivas misturas

A Figura 34 e Tabela 19, a seguir, apresentam os resultados de massa específica e da umidade do Solo 5 (NG') na energia normal de compactação.

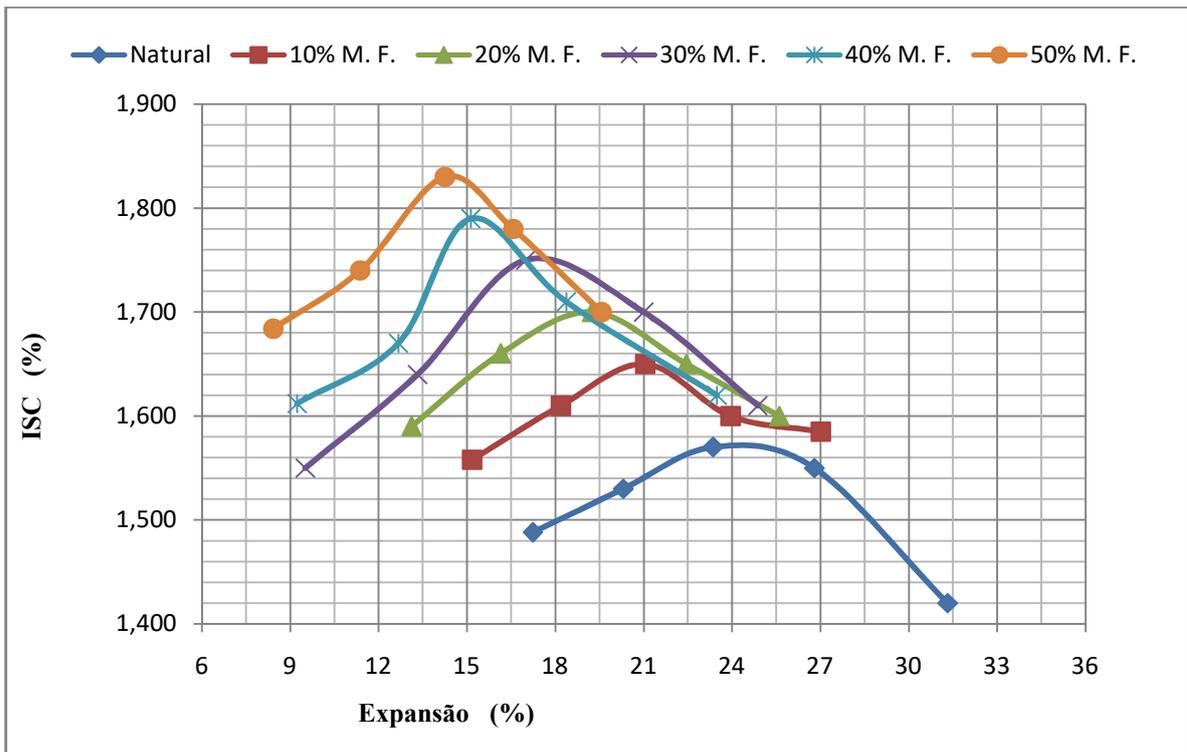


Figura 34. Massa específica VS umidade do Solo 5 (NG') na energia normal.

Com os resultados da Figura 35, acima é possível observar, semelhantemente aos solos anteriormente apresentados, à medida que é acrescentado o material, a massa específica aumenta e umidade decresce. A massa específica teve uma variação de $1,570 \text{ g/cm}^3$ e $1,830 \text{ g/cm}^3$, e a umidade de 23,36% e 14,25%.

A Figura 35 ilustra os resultados para o ensaio de capacidade de suporte e expansão, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO E.

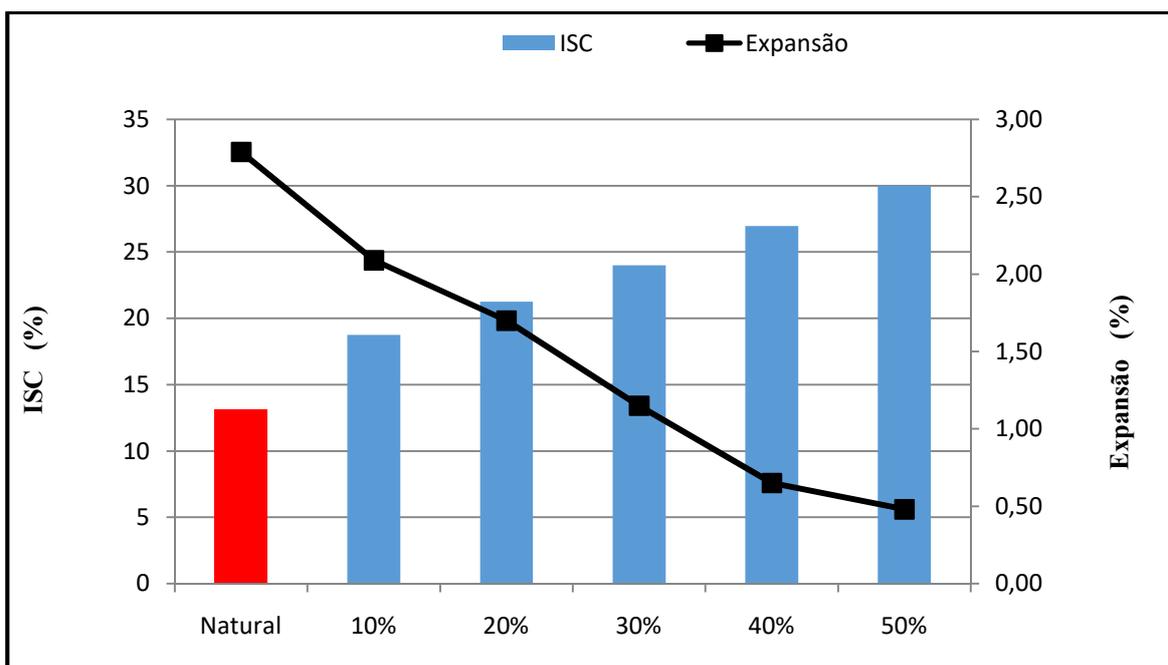


Figura 35. ISC e expansão do Solo 5 (NG') na energia normal.

Com os resultados do ensaio de ISC, podemos observar um ganho de 17 unidades de ISC do solo natural em relação à mistura com 50% de material fresado. No que se que à expansão, de maneira semelhante aos solos apresentados, verifica-se uma tendência decrescente.

Tabela 19. Resultados do Solo 5 (NG') na energia normal.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	13	1570	2,79	24,00
10 %	19	1650	2,09	21,05
20 %	21	1700	1,70	19,25
30 %	24	1750	1,15	17,00
40 %	27	1790	0,65	15,13
50 %	30	1830	0,48	14,25

Os resultados da Tabela 19 revelam que o Solo 5 classificado pelo metodologia MCT como argiloso não laterítico, obteve índices capazes de ser empregado como reforço de subleito e camada de sub-base, a partir da mistura com 60% de solo e 40% de material fresado, sendo possível observar valores de 27% de ISC e 0,65% de expansão, considera esta a mistura ideal para emprego reforço de subleito e como sub-base.

4.3.2 Intermediária

Serão apresentados a seguir, os resultados de: ISC, expansão, massa específica e umidade ótima dos Solos 1, 2, 3 e 4 na energia intermediária, seguindo as recomendações da norma DNER-ME 49/94, sem o resíduo e nas misturas com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de material fresado em substituição ao solo.

4.3.2.1 Solo 1 (LA) com suas respectivas misturas

A seguir, a Figura 36 e a Tabela 20 descrevem os resultados obtidos com o solo 1 (LA) na energia intermediária:

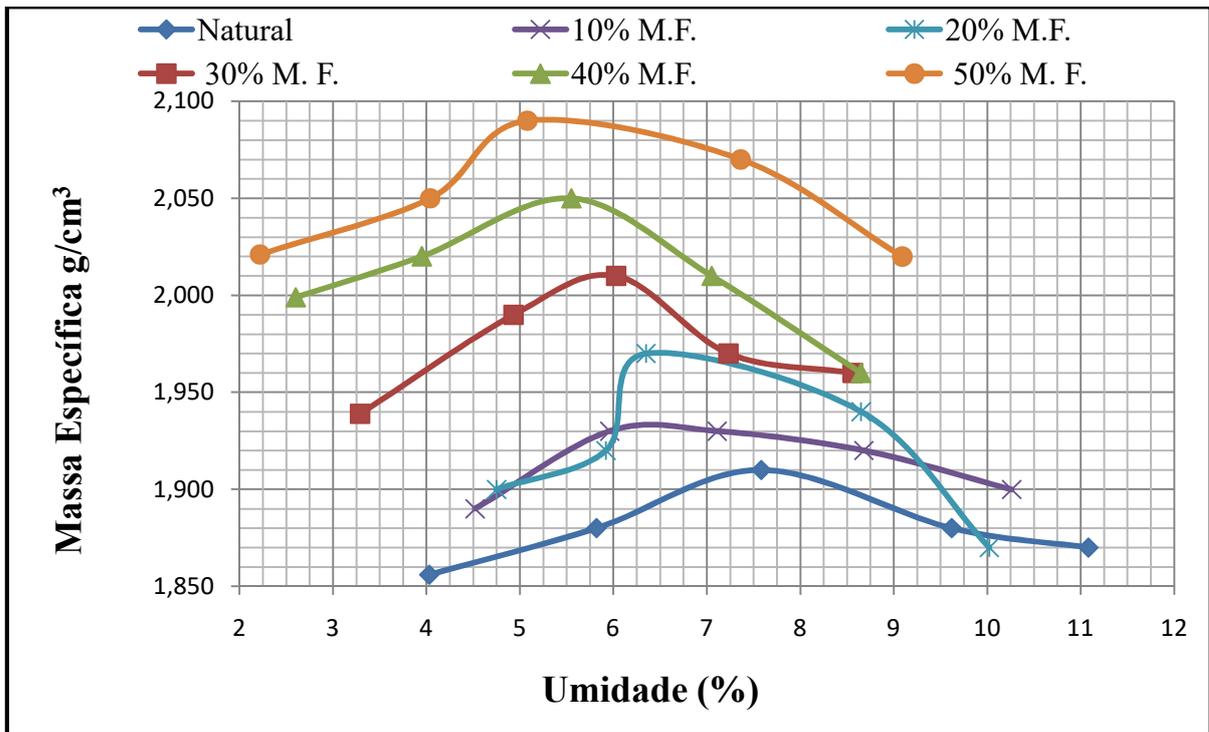


Figura 36. Massa específica VS umidade do solo 1 (LA) na energia intermediária.

É possível observar que, de maneira semelhante aos índices apresentados, os valores seguiram a mesma tendência, à medida que se adiciona o material fresado, a massa específica aumenta e umidade diminui. Nesse caso, os valores de massa específica variaram de $1,910 \text{ g/cm}^3$ a $2,090 \text{ g/cm}^3$, e a umidade teve uma variação de 7,58% a 5,08% do solo natural em relação à mistura com 50% do material fresado.

A seguir, por meio da Figura 37 e da Tabela 20, são apresentados os resultados de ISC e expansão, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO F.

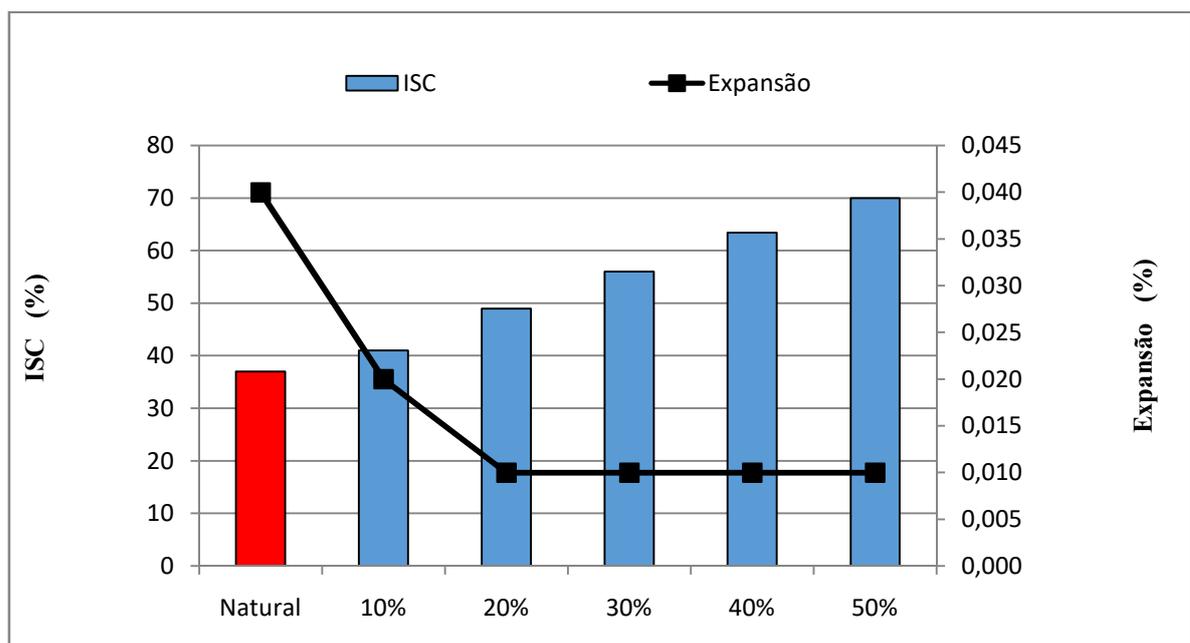


Figura 37. ISC e expansão do solo 1 (LA) na energia intermediária.

Pelos resultados obtidos (Figura 37), é possível perceber que o Solo 1 (LA), quando se aplica a energia intermediária, apresenta ganhos de 33 unidades de ISC, quando comparada a mistura com 50% de material fresado em relação ao solo na condição natural. No que diz respeito à expansão do solo na condição pura e nas misturas, os índices tenderam a decrescer até na mistura com 20% de material, entre a mistura com 30% e 50% material fresado, resultou num valor constante de 0,01%.

A Tabela 20, a seguir, apresenta os demais valores obtidos.

Tabela 20. Resultados do solo 1 (LA) na energia intermediária.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	37	1910	0,04	7,58
10 %	44	1930	0,02	6,50
20 %	49	1970	0,01	6,35
30%	56	2010	0,01	6,03
40%	63	2050	0,01	5,55
50 %	70	2090	0,01	5,08

Os resultados da Tabela 20 acima identificam que o Solo 1 (LA) na energia intermediária de compactação, classificado pela metodologia MCT como areia laterítica, obteve índices para ser empregado como camada base em vias com baixo volume tráfego, a partir da mistura com 60% de solo e 40% de material fresado.

4.3.2.2 Solo 2 (NA') com suas respectivas misturas

A seguir, a Figura 38 e a Tabela 21 apresentam os resultados obtidos de massa específica e umidade do Solo 2 (NA') na energia intermediária.

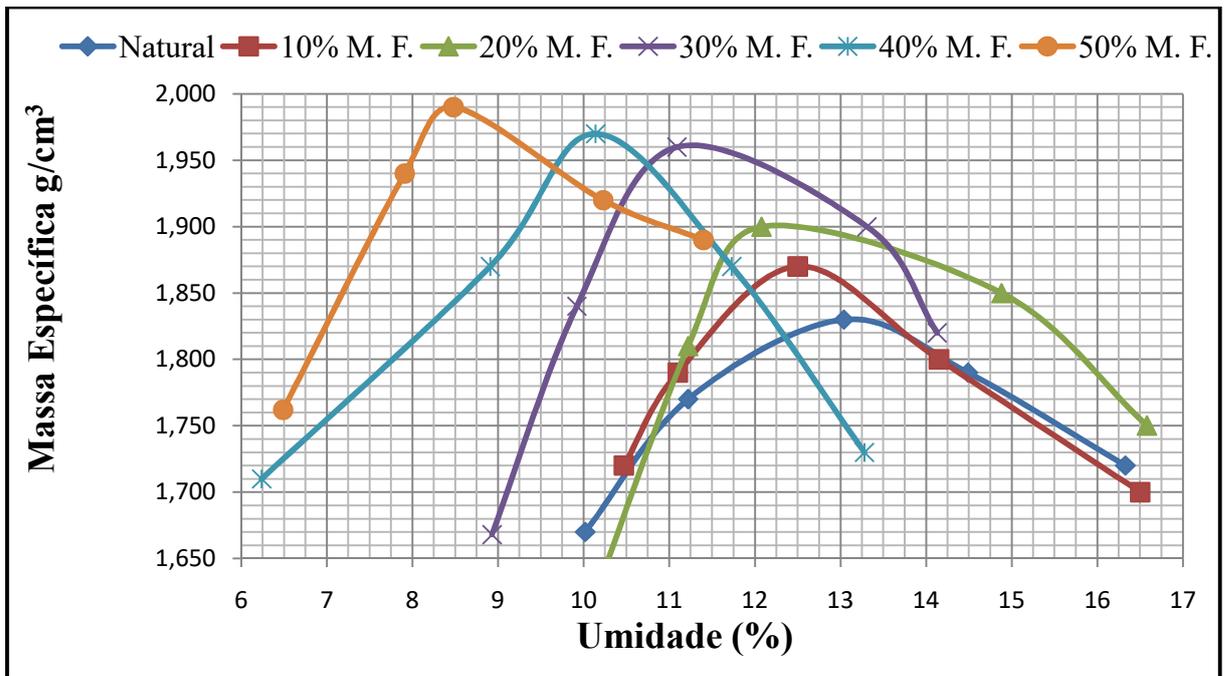


Figura 38. Massa específica VS umidade do solo 2 (NA') na energia intermediária.

Através da Figura 38, percebe-se que Solo 2 (NA') na energia intermediária seguiu a mesma tendência das situações anteriormente apresentadas, sendo que a massa específica cresce quando o material fresado é acrescido e a umidade diminui, a massa específica variou de $1,830 \text{ g/cm}^3$ (solo natural) a $1,970 \text{ g/cm}^3$ (50% do material fresado) e a umidade variou de 13,04% a 8,48%

A Figura 39, a seguir, ilustra os resultados de ISC e expansão do solo 2 (NA'), as curvas de ISC e expansão em função da umidade encontram-se no ANEXO G.

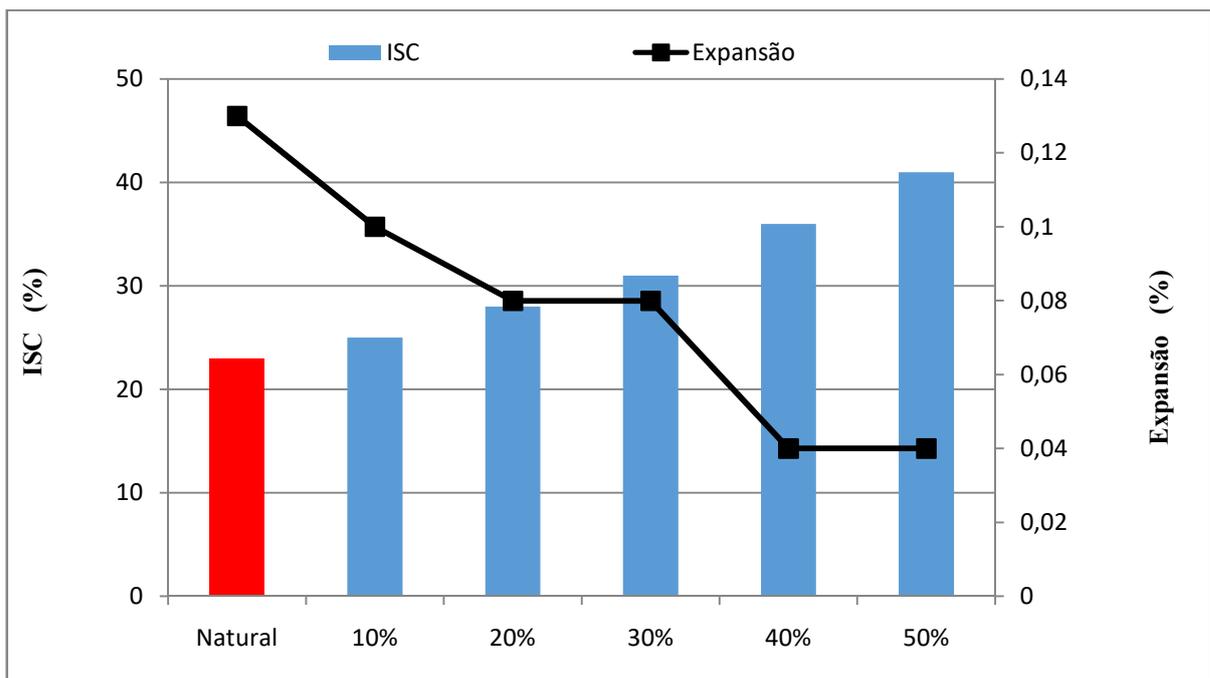


Figura 39. ISC e expansão do solo 2 (NA') na energia intermediária.

Pelos resultados obtidos através da Figura 39, observa-se que Solo 2 (NA') teve ganho de capacidade de suporte de 17 unidades, quando comparada o solo de referência (solo natural) com a mistura com 50% de material fresado. Já com relação à expansão, houve um decréscimo igual aos casos apresentados.

A Tabela 21, a seguir, descreve os demais resultados obtidos.

Tabela 21. Resultados do solo 2 (NA') na energia intermediária.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	23	1830	0,13	13,04
10 %	25	1870	0,10	12,50
20 %	28	1900	0,08	12,08
30%	31	1960	0,08	11,09
40%	36	1970	0,04	12,08
50 %	41	1990	0,04	8,48

Pelos resultados da Tabela 21, é possível perceber que o solo 2, classificado pela metodologia MCT como arenoso não laterítico, com relação à capacidade de suporte (ISC) na energia intermediária de compactação, não obteve índices capazes de serem empregados como camada de base. No que se à expansão, o solo 2 (NA') em condição natural (sem acréscimo do resíduo), apresentou valores possíveis de serem utilizados como camadas de base.

4.3.2.3 Solo 3 (LA') com suas respectivas misturas

A Figura 40 e a Tabela 22, a seguir, apresentam os índices obtidos com o Solo 3 (LA') de massa específica e umidade ótima, na energia intermediária.

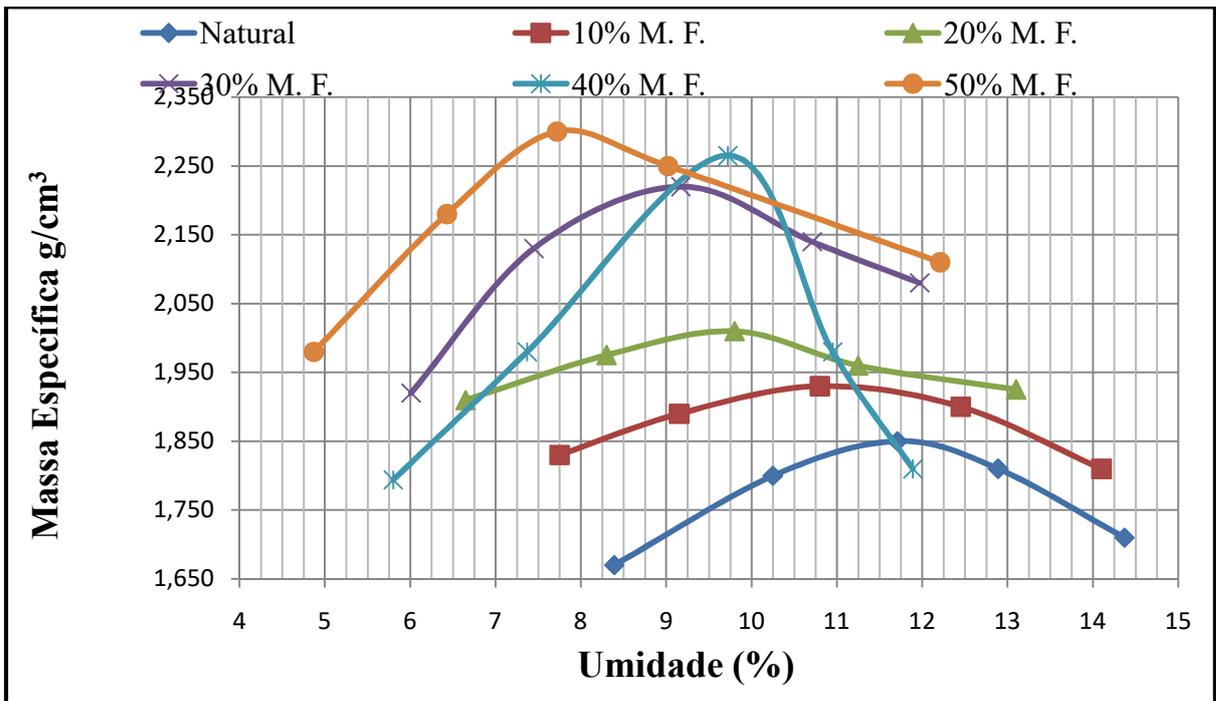


Figura 40. Massa específica VS umidade do solo 3 (LA') na energia intermediária.

Através da Figura 40 identificamos que a massa específica cresce e a umidade decresce, na medida em que se acrescenta o material fresado, seguindo a mesma tendência dos demais casos apresentados. A massa específica variou de 1,85 g/cm³ (solo natural) a 2,3 g/cm³ (50% do resíduo) e a umidade variou de 11,71% (solo natural) a 7,72% (50% do resíduo)

A Figura 41 e a Tabela 22, a seguir, ilustram os resultados de ISC e expansão observados, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO H.

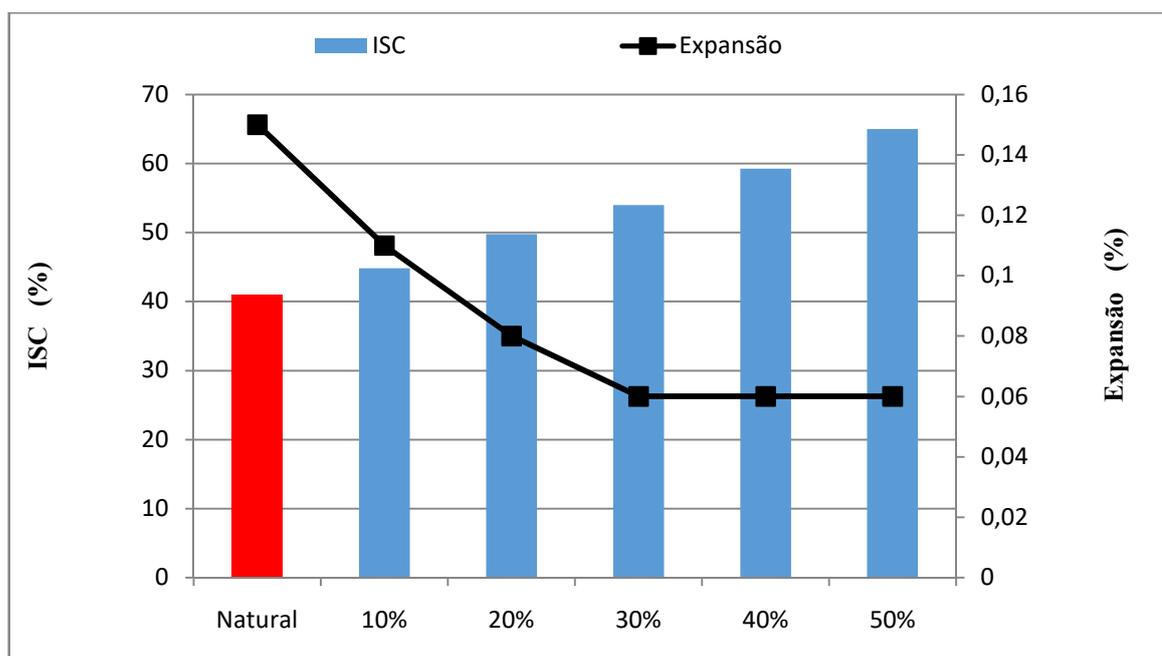


Figura 41. ISC e expansão do solo 3 (LA') na energia intermediária.

Por meio da Figura 41 acima, é possível observar os ganhos de capacidade de suporte do Solo 3 (LA') na energia intermediária de compactação, sendo de 24 unidades quando se compara o solo natural e a composição com 50% de material fresado. Já com relação à expansão, seguiu a mesma tendência das demais situações anteriormente apresentadas, resultando em valores decrescentes.

A Tabela 22, a seguir, apresenta os demais valores observados.

Tabela 22. Resultados do solo 3 (LA') na energia intermediária.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	41	1850	0,15	11,71
10 %	45	1930	0,11	10,80
20 %	50	2010	0,08	9,80
30%	54	2220	0,06	9,17
40%	59	2265	0,06	9,72
50 %	65	2300	0,06	7,72

Os resultados da Tabela 22 acima, mostram que o Solo 3, classificado como solo arenoso laterítico, obteve valores capazes de serem aplicados como camada de base de pavimentos urbanos ou em vias para baixo volume de tráfego, na composição com 50% de solo e 50% de material fresado, alcançando capacidade de suporte de 65% e expansão de 0,06%.

4.3.2.4 Solo 4 (LA) com suas respectivas misturas

A Figura 42 e a Tabela 23, a seguir, mostram os resultados obtidos de massa específica e umidade ótima.

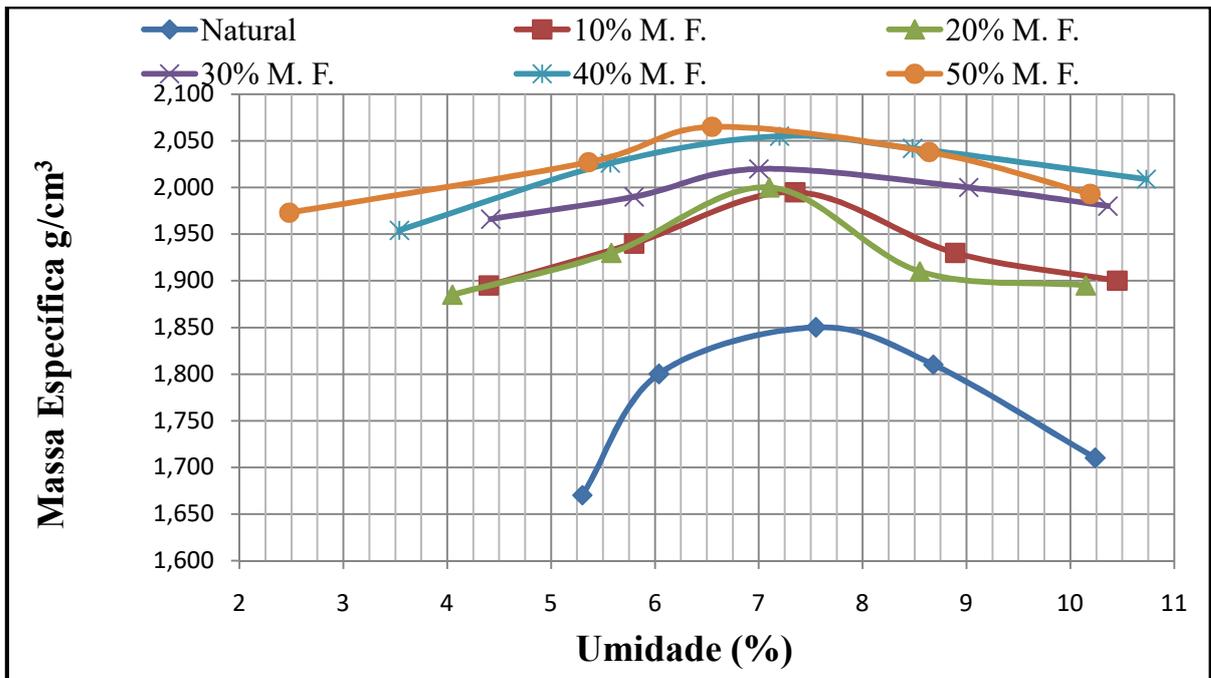


Figura 42. Massa específica VS umidade do solo 4 (LA) na energia intermediária.

De igual maneira as situações apresentadas, através da Figura 42, é possível verificar que a massa específica aumentou e a umidade diminuiu na em que medida em que se adicionou o material fresado, sendo que a amassa específica variou de 1,991 g/cm³ (solo natural) a 2,065 g/cm³ (50% de material fresado), e a umidade variou de 7,55% (solo natural) a 6,55% (50% do resíduo).

Através da Figura 43 e da Tabela 23, apresentam-se os resultados de capacidade de suporte (ISC) e expansão, as curvas de ISC e expansão em função da umidade estão no ANEXO I.

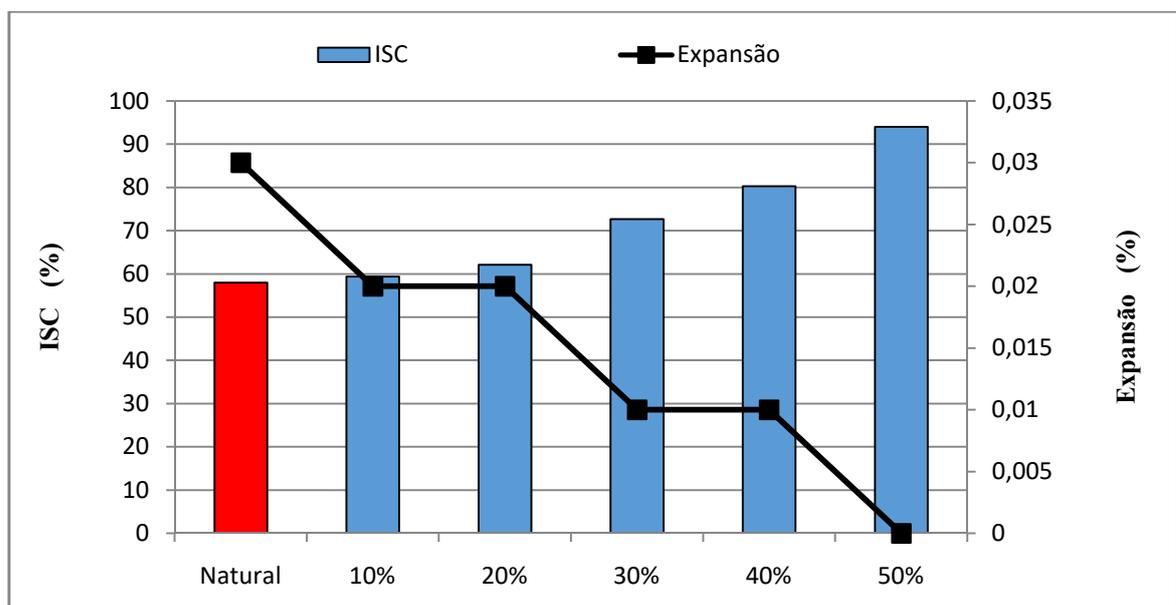


Figura 43. ISC e expansão do solo 4 (LA) na energia intermediária.

Pelos resultados (Figura 43) obtidos acima, verifica-se que o Solo 4 (LA) obteve aumento de 36 unidades, quando comparado o solo de referência com a mistura com 50% de material fresado. Quando se analisa a expansão, apresenta valores decrescentes semelhante aos casos anteriores.

A Tabela 23, a seguir, mostra os demais valores.

Tabela 23. Resultados do solo 4 (LA) na energia intermediária.

Resumo dos resultados	ISC (%)	Massa específica (kg/m ³)	Expansão (%)	H (%)
Natural	58	1991	0,03	7,55
10 %	59	1995	0,02	7,35
20 %	62	2000	0,02	7,10
30%	73	2020	0,01	7,00
40%	80	2055	0,01	7,20
50 %	94	2065	0,00	6,55

Através dos resultados da Tabela 23, é possível observar que o Solo 4, classificado como areia laterítica, obteve resultados favoráveis para serem empregados como camada de base a partir da mistura com 80% de solo e 20% de material fresado, obtendo 62% de ISC e 0,02% de expansão.

4.4 Estudo de ISC na energia normal VS energia intermediária.

A seguir, é apresentada a Tabela 24 com os resultados de ISC (Índice de Capacidade de Suporte) na energia normal de compactação do ensaio de Proctor.

Tabela 24. ISC na energia normal

Solos	1 (LA)	2 (NA')	3 (LA')	4 (LA)	5 (NG')
Natural	32	17	26	41	13
10%	35	24	30	51	19
20%	46	24	33	56	21
30%	51	28	39	61	24
40%.	59	31	44	72	27
50%	65	36	49	75	30

Abaixo, é demonstrada a Tabela 25 com os resultados de ISC (Índice de Capacidade de Suporte) na energia intermediária de compactação do ensaio de Proctor.

Tabela 25. ISC na energia intermediária

Solos	1 (LA)	2 (NA')	3 (LA')	4 (LA)
Natural	37	23	41	58
10%	41	25	45	59
20%	49	28	50	62
30%	56	31	54	73
40%	63	26	59	80
50%	70	41	65	94

É possível observar através dos resultados (Tabelas 24 e 25) de capacidade de suporte, maior eficiência da energia normal de compactação em comparação à energia intermediária, pois os solos e as respectivas misturas analisadas na energia intermediária de compactação, apresentaram poucos ganhos de resistência em comparação à energia normal do ensaio de Proctor. Além do mais, as composições do material fresado com solos 1 e 4 (ambos LA), já apresentaram capacidade de suporte para ser empregado como base de pavimentos urbanos para baixo volume de tráfego.

4.5 Análise estatística

Neste tópico é apresentado uma análise estatística dos resultados de capacidade de suporte.

A Figura 44, a seguir, apresenta os resultados da análise estatística dos cinco solos em estudo, sendo adicionada uma linha de tendência.

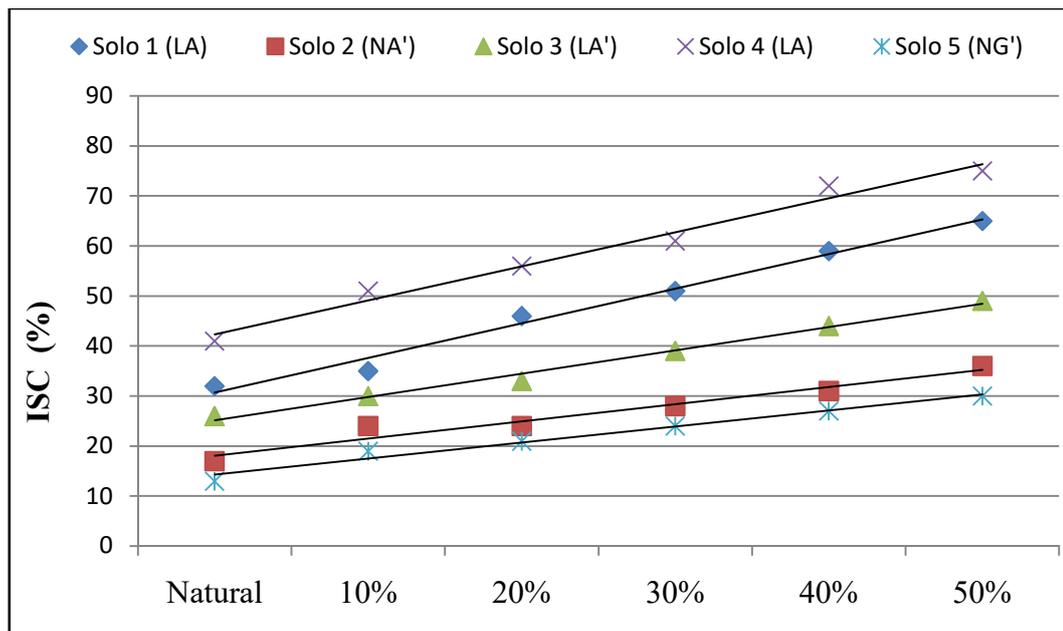


Figura 44. Coeficiente de ajuste na energia normal.

A Tabela 26, a seguir, as equações de regressão e os valores do coeficiente de ajuste (R^2) dos solos em análise na energia normal.

Tabela 26. Coeficientes de ajuste e equações de regressão energia normal

Solos	R^2 (*)	Equações de regressão (*)
Solo 1 (LA)	$R^2 = 0,991$	$y = 7,342x + 21,8$
Solo 2 (NA)	$R^2 = 0,955$	$y = 3,428x + 14,66$
Solo 3 (LA')	$R^2 = 0,986$	$y = 4,828x + 19,6$
Solo 4 (LA)	$R^2 = 0,985$	$y = 6,714x + 35,66$
Solo 5 (NG')	$R^2 = 0,974$	$y = 3,059x + 11,49$

Todos os solos apresentaram coeficientes de ajuste considerados ótimo, ou seja, acima de 0,9, mostrando que os valores observados tiveram pouca ou nenhuma dispersão.

A Tabela 27, a seguir, apresenta os percentuais de ganho dos solos que foram calculados sempre em relação à composição anterior, ou seja, solos com 10% de material fresado em relação ao solo na condição natural, solo com 20% de material fresado em relação ao solo com 10% do material fresado e assim, por diante.

Tabela 27. Porcentagem de ganho de ISC na energia normal

Solos	1 (LA)	2 (NA')	3 (LA')	4 (LA)	5 (NG')
10% M.F.	9%	41%	15%	24%	46%
20% M.F.	31%	0%	10%	10%	11%
30% M. F.	11%	17%	18%	9%	14%
40% M. F.	16%	11%	13%	18%	13%
50% M. F.	10%	16%	11%	4%	11%
SOMA	78%	85%	68%	65%	95%

Pelos resultados (Tabela 27) acima, percebe-se que o solo 2 (NA'), na composição com 80% de solo e 20% de material fresado, não obteve ganhos de resistência. E o solo com maior ganho foi o Solo 5 (NG'), na composição com 90% de solo e 10% de material fresado.

O Solo 5 (NG') apresentou os menores valores de capacidade de suporte em valores absolutos, no entanto, no que se refere a ganho de percentuais de resistência, obteve maior valor (95%). Ao analisarmos o solo com os menores ganhos percentuais, observa-se que o Solo 4 (LA) obteve o menor valor, de 65%.

A Figura 45, a seguir, apresenta o coeficiente de ajuste dos Solos 1, 2, 3 e 4, na energia intermediária.

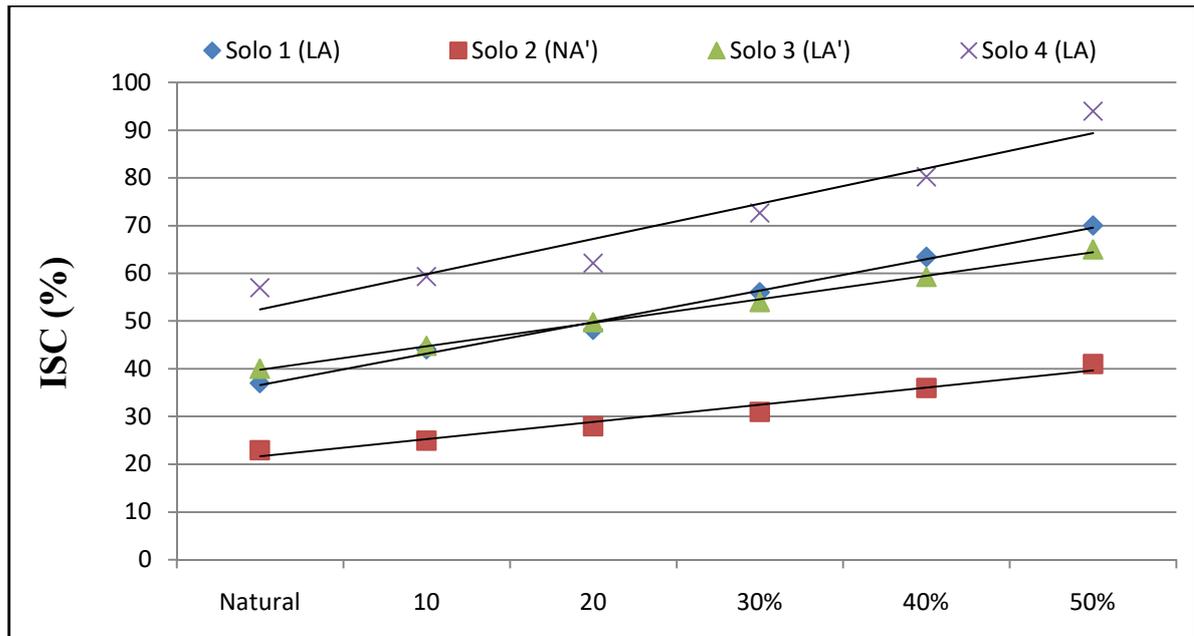


Figura 45. Coeficiente de ajuste na energia intermediária.

A Tabela 28, a seguir, as equações de regressão e os valores do coeficiente de ajuste (R^2) dos solos em análise na energia intermediária.

Tabela 28. Coeficientes de ajuste e equações de regressão energia intermediária

Solos	R^2 (*)	Equações de regressão (*)
Solo 1 (LA)	$R^2 = 0,994$	$y = 7,234x + 45,74$
Solo 2 (NA)	$R^2 = 0,972$	$y = 3,6x + 18,06$
Solo 3 (LA')	$R^2 = 0,995$	$y = 4,787x + 35,54$
Solo 4 (NG')	$R^2 = 0,915$	$y = 7,377x + 45,08$

Os quatro solos estudados na energia intermediária apresentaram coeficiente de ajuste acima de 0,9, mostrando pouca ou nenhuma dispersão.

A Tabela 29, a seguir, apresenta o ganho percentual dos Solos na energia intermediária.

Tabela 29. Porcentagem de ganho de ISC na energia intermediária

Solos	1 (LA)	2 (NA')	3 (LA')	4 (LA)
10% M.F.	11%	9%	9%	2%
20% M.F.	20%	12%	11%	5%
30% M. F.	14%	11%	9%	17%
40% M. F.	13%	16%	10%	10%
50% M. F.	10%	10%	10%	17%
SOMA	68%	57%	48%	52%

Através dos resultados, é possível observarmos que o Solo 4, na mistura com 10% de Material Fresado e 90% do Solo, apresentou o menor percentual de ganho de capacidade de suporte. Com relação ao maior ganho, o Solo 1 na composição com 20% do Material Fresado e 80% do Solo. Nos somatórios dos ganhos percentuais, o Solo 3 apresentou o menor valor (48%) e o Solo 1 o maior (68%).

4.6 Análise dos Resultados

Através dos resultados obtidos, podemos verificar e confirmar o potencial de uso do material fresado.

Para aplicação como sub-base estabilizada granulometricamente, os Solos 1, 2, 3, 4 e 5 em análise apresentaram índices capazes serem aplicados. Os Solos 1 (LA), 3 (LA') e 4 (LA) apontaram valores com o solo na condição pura; já o Solo 2 (NA') mostrou resultado na composição com 10% do resíduo, e o Solo 5 (NG') com 40% do material fresado. Valores semelhantes aos encontrados podem ser verificados no trabalho de Correa et al. (2014) e Garcês et al. (2014).

Com relação à expansão, todos os solos apresentaram valores decrescentes, podendo ser observadas reduções de mais 2%, por exemplo, no Solo 2 (NA') na medida em que adiciona-se o material fresado.

No que se refere à massa específica, os solos em análise apresentaram valores crescentes quando adicionamos o material fresado. Já com relação à umidade, apresentou tendência decrescente em todas as situações. Cabe uma observação: os Solos 1 (LA), 2 (NA'), 3 (LA') e 4 (LA) apresentaram diferenças de aproximadamente 2% de umidade do solo puro com relação à mistura com 50% do resíduo, sendo esses solos arenosos; por sua vez, o Solo 5, classificado como argiloso não laterítico, apresentou uma diferença de aproximadamente 7%.

Com relação à análise estatística na energia normal de compactação, todos os solos apresentaram coeficiente de ajuste (R^2) acima de 0,9, revelando pouca dispersão dos resultados. Nos ganhos percentuais de capacidade de suporte, os Solos 2 (NA') e 5 (NG') apresentaram os maiores valores, mesmo sendo descritos por Senço (2007) e Balbo (2007) como solos contraindicados para aplicação em camadas inferiores do pavimento. No entanto, é possível verificar que o acréscimo do material fresado os fizeram melhorar, tornando-os aptos para utilização.

Para a aplicação como base em vias com baixo volume de tráfego, os Solos 1, 3 e 4, classificados como areia laterítica, solo arenoso laterítico e areia laterítica, respectivamente, apresentaram índices capazes de serem empregados como base de pavimentos urbanos. Já o

Solo 2, classificado como arenoso não laterítico, não apresentou índice para vias com baixo volume de tráfego. Resultados próximos aos descritos podem ser observados no trabalho de Specht et al. (2013) e Silva (2013).

Em relação à expansão, todos os quatros solos testados na energia intermediária de compactação apresentaram valores abaixo dos exigidos pela norma.

No que se refere à massa específica, semelhantemente aos solos estudados na energia normal de compactação, verificamos uma tendência crescente à medida que são acrescentados o material fresado. A umidade também se assemelhou à energia normal de compactação, sendo observada tendência decrescente.

Em tese, os valores de R^2 ficaram acima de 0,9, mostrando pouca dispersão, com relação aos ganhos percentuais é possível observar uma variação entre 52% e 68% na energia intermediária, menores que a energia normal de compactação que apontou valores entre 65% e 95%.

5. CONCLUSÃO

Desta forma, após os ensaios de classificação de solos e do material fresado, e dos ensaios de ensaios de Proctor nas energias normal e intermediária, foi possível realizar análises físicas e mecânicas dos solos em sua condição pura e das suas respectivas misturas.

O presente estudo, que teve por objetivo avaliar o comportamento e o desempenho da mistura solo tropical e material fresado do revestimento asfáltico, visando sua aplicação em camadas dos pavimentos urbanos, com este estudo foi possível concluir:

1. Com relação à classificação de solos, a metodologia MCT e a classificação tradicional H.R.B. (atual T.R.B.), a MCT mostrou ser mais confiável, pois mesmo para solos classificados como A-6 (1) que caracterizam, segundo a classificação tradicional T.R.B., são solos de mau comportamento como sub-base de pavimentos urbanos, os mesmos solos ao serem classificados através da metodologia MCT, verifica-se são solos que podem ser empregados como camadas de sub-base. Além do mais, essa é uma técnica local deve ser mais difundida, pois descreve melhor o comportamento de solos tropicais.

2. No que se refere à caracterização dos materiais, do material fresado, os ensaios de: granulometria, massa específica e absorção, mostraram que o material fresado possui propriedades semelhantes de uma brita graduada, podendo ser empregado como agregado das camadas inferiores do pavimento em substituição de materiais pétreos. Nas caracterizações dos solos foi possível entender o comportamento, quanto à plasticidade, limite de liquidez, massa específica, para posteriormente classificação dos solos.

3. Quanto à análise de viabilidade técnica, a mistura do material fresado com solo contribuiu na resistência e qualidade dos solos estudados, como pode ser verificado nos resultados encontrados (capítulo 4) e que atenderam aos índices exigidos pela norma na maior parte dos solos em estudo. Baseados nos resultados dos ensaios de ISC realizados neste trabalho, é possível observar que o emprego de material fresado em camadas de reforço de subleito e sub-base de pavimentos, de baixo volume de tráfego ou pavimentos urbanos, pode ser uma alternativa viável tecnicamente por apresentar valores aceitáveis de serem empregados nestas situações de todos os solos analisados e de suas respectivas misturas, para aplicação como camada de base não foram todos os analisados que obtiveram os resultados exigidos por norma, mas os solos que não alcançaram os valores para ser empregado como camada de base, apresentaram melhoras em suas capacidade de suporte.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação de misturas de material fresado com solo para composição de camadas de reforço de subleito e camadas de sub-base, de pavimentos

flexíveis urbanos ou com baixo volume de tráfego, é viável o emprego do material fresado, sendo necessário analisar as características dos materiais e do comportamento das misturas.

Sabendo-se que, de acordo com os materiais estudados nesta pesquisa, as misturas apresentaram comportamento satisfatório e ganho na capacidade de suporte para camadas de reforço de subleito e camadas de sub-base, possibilitando assim o reaproveitamento do fresado, reduzindo custos de obtenção de outros materiais e evitando o descarte inadequado.

Constatou-se, ainda, que o acréscimo de material fresado, desde que atendidos os requisitos exigidos em norma, a técnica pode aumentar a capacidade resistente da estrutura do pavimento, permitindo a redução da quantidade de materiais nas restantes camadas do pavimento. Portanto, a reutilização de materiais fresados permite aproveitar grandes quantidades destes materiais em zonas onde, usualmente, agregados britados são utilizados.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A realização desse estudo não pretende esgotar o tema, pois, os conhecimentos obtidos através do desenvolvimento desta dissertação podem ser consideravelmente ampliados e aprofundados.

Eis as sugestões para trabalhos futuros:

- Aprofundar os estudos complementando com ensaios de permeabilidade, resiliência e cisalhamento;
- Execução do trecho experimental;
- Estudos com outros materiais a serem incorporados como, por exemplo, cimento, cal ou agregados reciclados para melhorar suas características. Uma das possíveis possibilidades para outros estudos é a mistura do material fresado com a fração fina de resíduos de construção civil;
- Acréscimo de baixos teores cimento da ordem de 2%, pois, através desses teores é possível alcançar resultados para os solos que não obtiveram índices para serem empregados como camada de base para baixo volume de tráfego e, para os solos que alcançaram o índice, podem ser empregados os mesmos teores a fim de se conseguir empregar em vias com tráfego pesado.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. L., **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 6458: Solo, Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: Solo, Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7180: **Solo, Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro. 1984^a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7181: **Análise Granulométrica, Solos, Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7207 **Pavimentação: terminologia e classificação**, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: **agregados: terminologia**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 125: *standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. USA, 2005.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, 2007.
- Barros, F. B. (2013). **Utilização do revestimento fresadoda br-104, como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. Trabalho de Conclusão deCurso. Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Pernambuco.
- BERNUCCI, L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP – Universidade de São Paulo, 1995.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro – Associação Brasileira das Empresas Distribuidora de Asfalto, 2008.
- BONFIM, V; **Fresagem de Pavimentos asfálticos**, São Paulo, v. 3, 2007..
- CORRÊA, L. A., BRAGA, M. S., AGUIAR, M. F. P. OLIVEIRA, F. H. L., MONTEIRO, F. F., NETO, J. C. P. (2014). **Melhoramento de Solos para Camadas de Pavimentos Rodoviários com Material Fresado e Estabilização Química**, Reunião Anual de Pavimentação, Maceió – ALAGOAS, 2014.
- COUTO, J. B. (2009) **Estudo de Misturas Solo-Agregado em Bases e Sub-Bases**

Rodoviárias do Rio Grande Sul: Caracterização em Laboratório e Execução de Trecho Experimental. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RIO GRANDE DO SUL, 2009.

DAVID, D. **Mistura asfáltica reciclada a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação (mestrado em Engenharia)- programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DELLABIANCA, L. M. A. (2004) **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília – DISTRITO FEDERAL, 2004

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-ES 301/97: Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-ES 303/97: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 158/2011: **Misturas asfálticas– Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio.** 2011.

DIAS, P. S., PINTO, I. E., COSTA, C. (2015). **Contribuição ao Estudo de Materiais Fresados Incorporados a um Solo Argilo-Siltoso Para o Uso em Camadas de Pavimentos Flexíveis.** Reunião Anual de Pavimentação, Foz do Iguaçu – PARANÁ, 2014.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM . DNER-ME 83/98: **Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER ME – 049/1994 Solos - **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhada,** 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER ME – 256/1994: **Solos compactados por equipamentos em miniatura –determinação de perda de massa por imersão,** 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER ME – 258/1994: **Solos compactados em equipamento miniatura,** 1994.

DNER- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER ME – 194/1998: **determinação da massa específica por meio do frasco de Chapman**, 1998.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES
DNIT 141/2010 - **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**, 2010.

DNIT 031/04 – ES: **pavimentos flexíveis: concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2011.

DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**, 2º Ed. Rio de Janeiro, 2006

FARIAS, R. R. C., BARROS, N. B., MARQUES, J. A. F. **Melhoramento de solo com incorporação de material fresado de CBUQ para uso em pavimentação**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

FERNADES, M. T., SILVA, J. M., JARDIM, H. L., SOARES, A. A. R., MAZZINGHY, A. L., DUTRA, G. L. **Reaproveitamento de Material Fresado em Camada de Base de Pavimentos Asfálticos Flexíveis**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

FONSECA, P. **Engenharia e Pavimento, LTDA**. 2009. Disponível em: <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem>>. Acesso em: 27/01/2018.

FONSECA, P. **Reciclagem de pavimentos rodoviários**. Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. 2002. Disponível em <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>>. Acesso em: 10/11/2017.

GARCÊS, A., RIBEIRO, G. Z., VAZ, E. F., SERENO, M. V. C., OLIVEIRA, V. N. (2014). **Utilização de Material Proveniente de Fresagem na Composição de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis**, Cobramseg, Maceió – ALAGOAS, 2014.

GODOY, V. B., CONSOLI, N. C., SCHEUEMANN FILHO, H. C., ROSEMBACH, C. M. C., CARRARO, A. H., LEON, H. B., CARRETA, M. S. **Desempenho de misturas de fresado de asfalto - cinza volante - cal, submetidas a condições climáticas severas**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

HIGHWAY RESEARCH BOARD. The AASHO Road Test, HRB Special Report 61E, Report 5, Pavement Research. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, National Research Council, Highway Research Board, 1962.

HILÁRIO, R. Q. **Uso De Pavimento Reciclado Adicionado com Cimento para Uso como Reforço de Base Para Rodovias – Estudo De Caso: Br-120**. Dissertação de mestrado. Núcleo de Pesquisa em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

HONORATO, F. C. L., LEOCADIO, A. S., FROTA, C. A. (2015) **Estabilização Solo-Material Fresado para Manaus (AM)**. Reunião Anual de Pavimentação, Foz do Iguaçu – PARANÁ, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos>>. Acesso em 20/09/2018.

MACIEL, F. C. S., ALMEIDA, M. S. S., SANTOS, J. H. T., COSTA, W. G. S., ALMEIDA, V. G., JESUS, J. P. B., PINTO, C. M. T., ARAÚJO NETO, E. G. A. **Dosagem de Misturas de Solo e Material Fresado Melhoradas com Cimento para Uso em Pavimentação a Partir de Ensaios de Compressão não Confinada**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

MALANCONI, M., **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como pavimento urbano**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, São Carlos, 2013.

MOURA, L. N., ALMEIDA, M. S. S., MACIEL, F. C. S., COSTA, W. G. S. C., PINTO, C. M. T., CORREIA, M. C., JESUS, F. F. S. **Dosagem de Mistura de Solo e Material Fresado Melhorada com Cimento para Utilização como Camada de Pavimento Rodoviário**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

NASCIMENTO, M. V. **Estudo do comportamento mecânico de misturas Asfálticas recicladas**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2011.

NOGAMI, J. S. E VILLIBOR, D. F. **Uma classificação de para finalidades rodoviárias**. In: **Simpósio de Solos Tropicais**. Rio de Janeiro/RJ. COPPE/ABMS, 1981.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S.. **Reciclagem de pavimento para restauração da BR 282 em Santa Catarina – estudo de caso**. In: 40ª RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2010

PAPAGIANNAKIS, A.T. E MASSAD, E. A. **Pavement design and materials**. Hoboken: John Wiley& Sons, 2008.

PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2017: **Relatório gerencial**. – Brasília: CNT: SEST : SENAT, 2017.

PINTO, M. M.; CERVO T. C.; PEREIRA, D. S. **Reutilização de material fresado em acostamentos como agente regularizador e nivelador**. Revista Pavimentação. v.6, 2012

PONCIO, T. O., CENTOFANTE, R., KLAMT, R. A., SANTOS, T. A. **Análise da importância da granulometria do material fresado na estabilização do solo**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador- BA. Anais. Bahia, 2018.

SANTOS, A. G. B. **Bases Granulares de Agregados Reciclados**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveio, Coimbra, 2009.

SANTOS, R. A. dos. **Comportamento anisotrópico de um solo lateríticos compactado**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 147 p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, dezembro de 2015.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Vol. 2, 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 2007.

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 (UFAM), Manaus, 2013.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D.. **Utilização de Material Fresado como Camada de Pavimento: Estudo Laboratorial e Aplicação em Campo**. 42ª Reunião anual de pavimentação, Gramado, RS, 2013.

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement: Techniques and their Evolution**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1989.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 1 Ed. São Paulo: Mcgraw – Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S.. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos**. Arte & Ciência, São Paulo, SP, 2009.

WOODS, K.B. **Highway engineering hand book**. New York: McGraw Hill, 1960.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975.

ANEXOS

ANEXO A

A.1 - Solo Natural – Solo 1 (LA) – energia normal

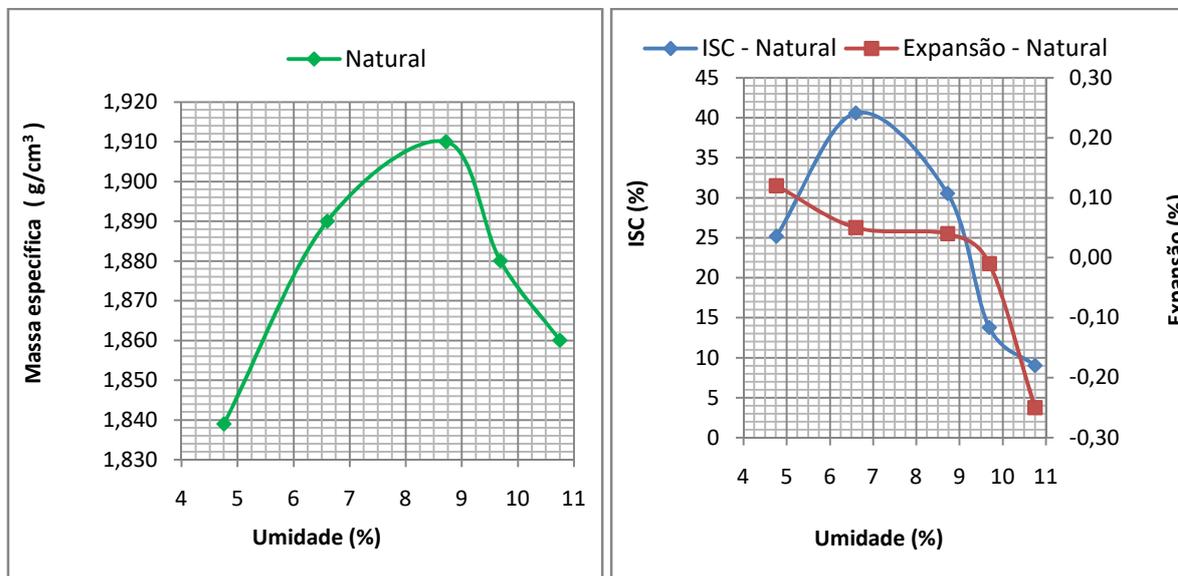


Figura 46. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) Natural energia normal

Tabela30. Resultados do Solo 1 (LA) Natural – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,72	1910	0,03	31

A.2 – 10% de Material Fresado – Solo 1 (LA) – energia normal

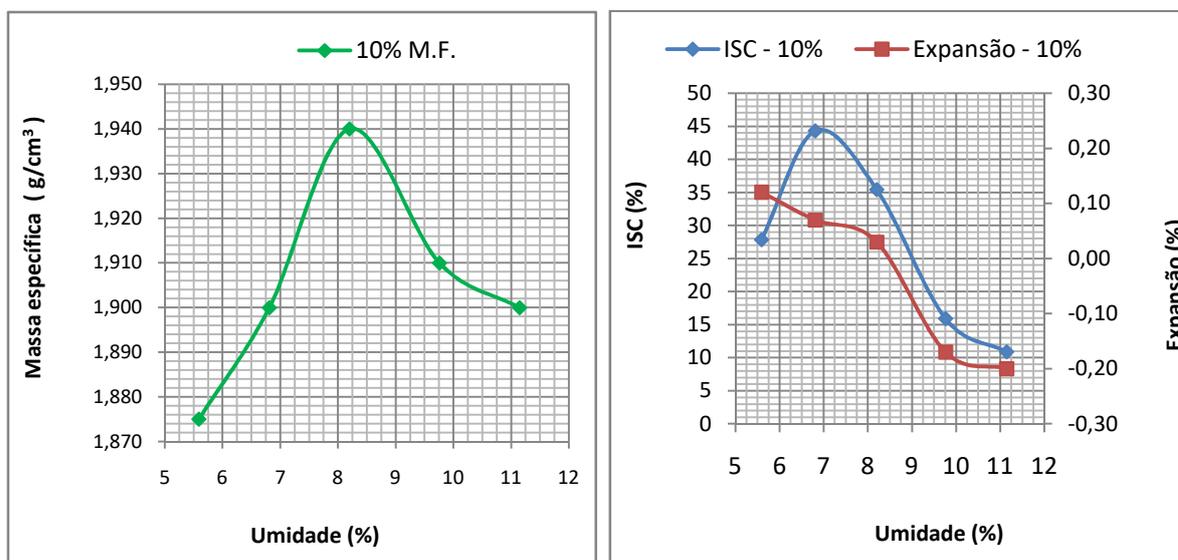


Figura 47. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 10% M.F. energia normal

Tabela31. Resultados do Solo 1 (LA) 10% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,2	1940	0,03	35

A.3 – 20% de Material Fresado – Solo 1 (LA) – energia normal

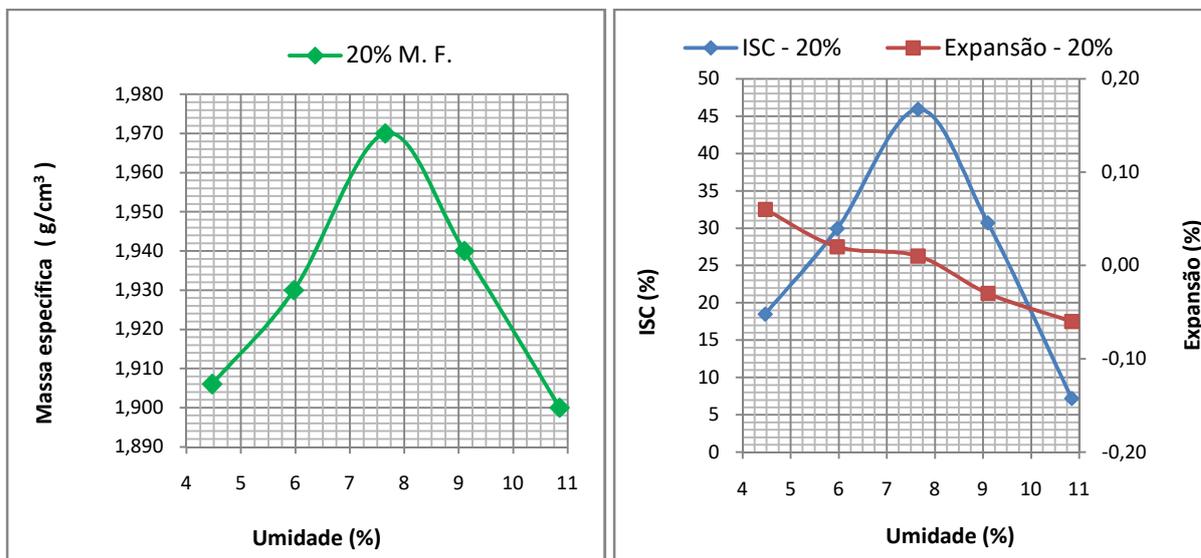


Figura 48. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 20% M.F. energia normal

Tabela32. Resultados do Solo 1 (LA) 20% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,65	1970	0,01	46

A.4 – 30% de Material Fresado – Solo 1 (LA) – energia normal

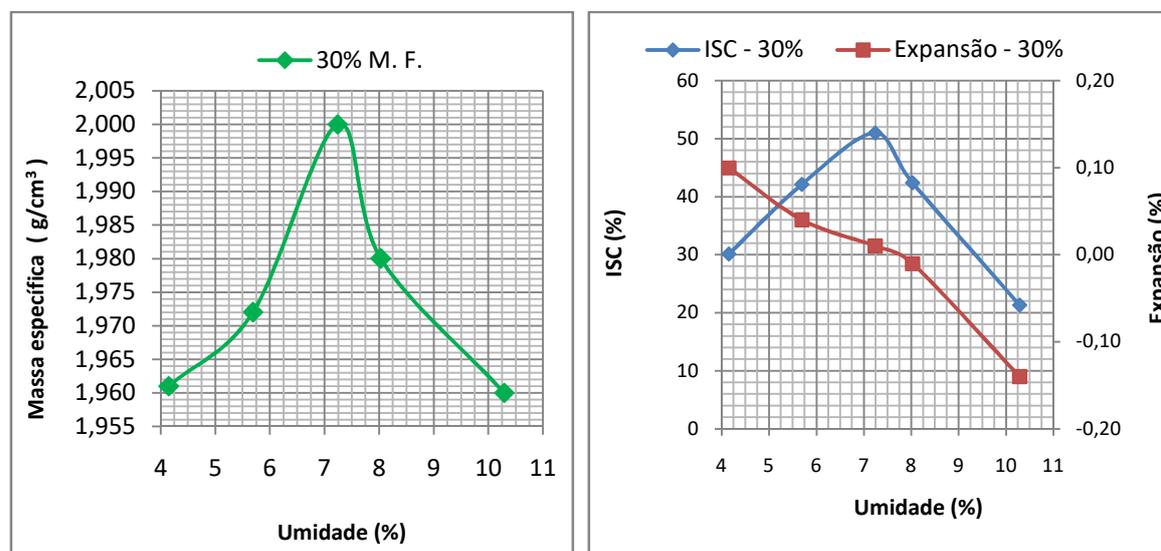


Figura 49. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 30% M.F. energia normal

Tabela33. Resultados do Solo 1 (LA) 30% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,24	2000	0,01	51

A.5 – 40% de Material Fresado – Solo 1 (LA) – energia normal

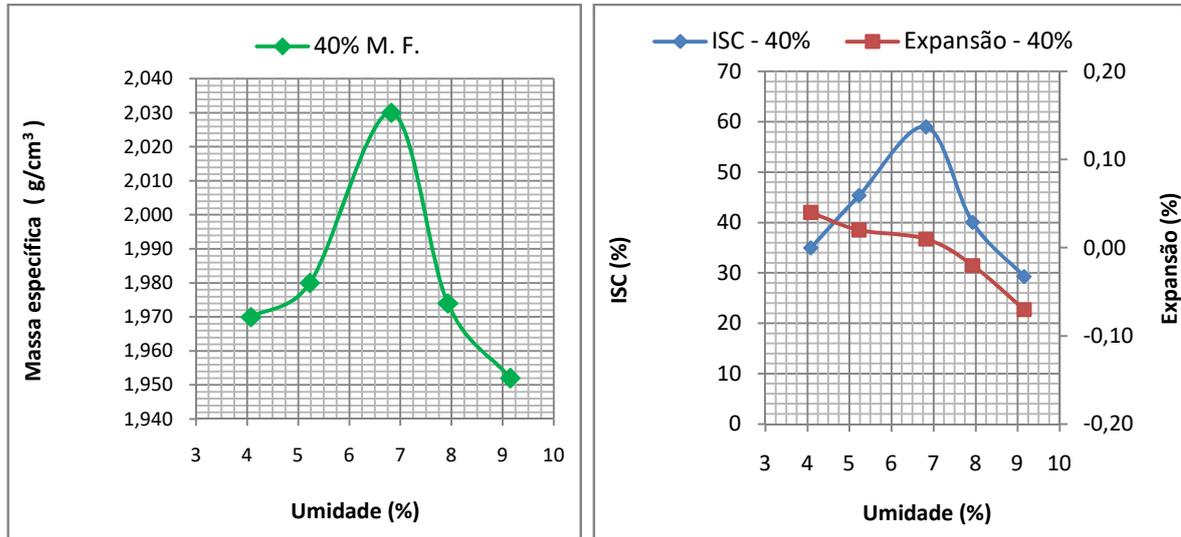


Figura 50. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 40% M.F. energia normal

Tabela34. Resultados do Solo 1 (LA) 40% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,82	2030	0,01	59

A.6 – 50% de Material Fresado – Solo 1 (LA) – energia normal

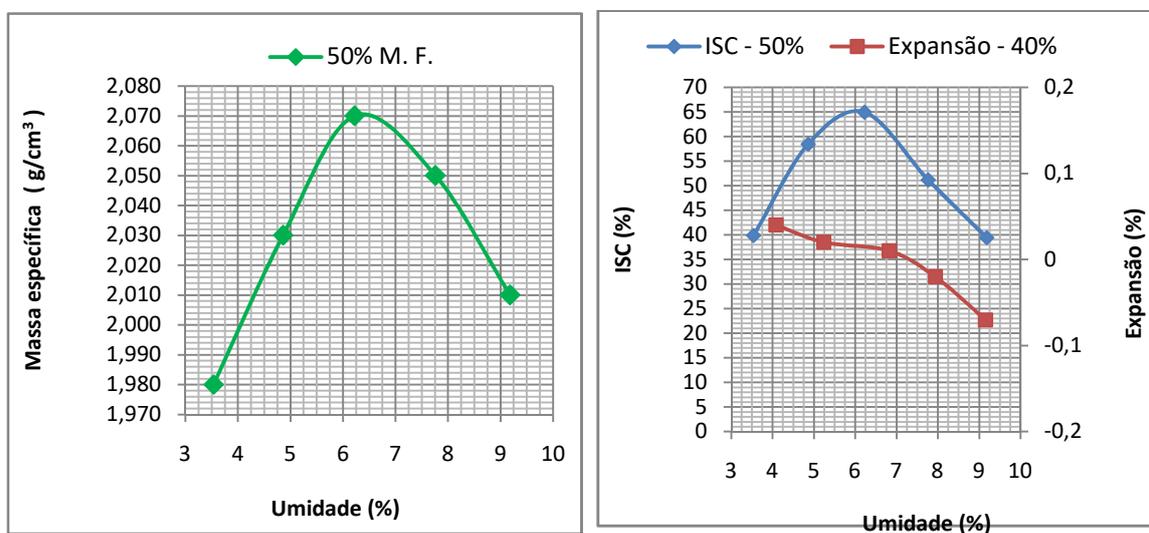


Figura 51. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 50% M.F. energia normal

Tabela35. Resultados do Solo 1 (LA) 50% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,22	2070	0	65

ANEXO B

B.1 - Solo Natural – Solo 2 (NA') – energia normal

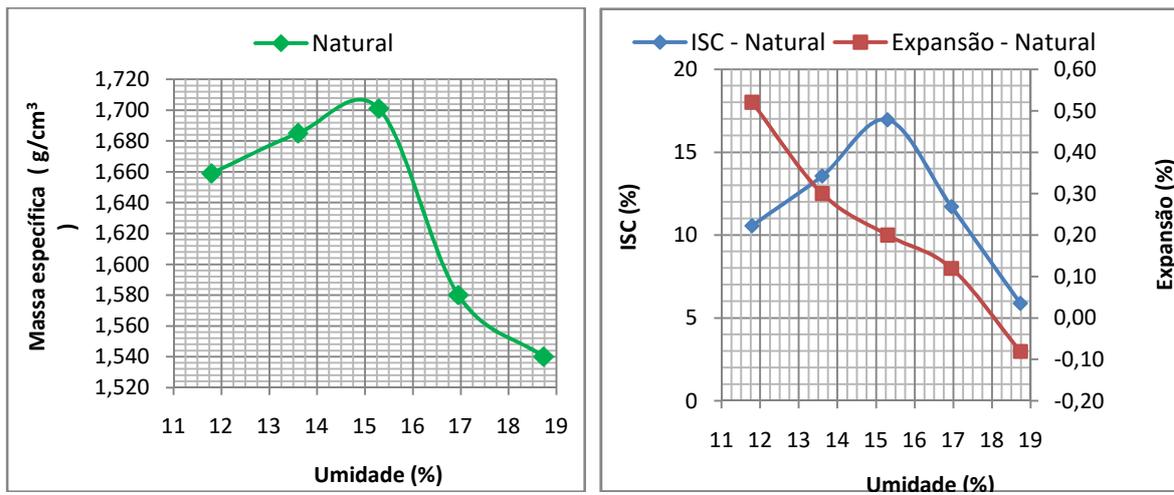


Figura 52. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') Natural energia normal

Tabela36. Resultados do Solo 2 (NA') Natural – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
15,30	1720	0,32	17

B.2 – 10% de Material Fresado – Solo 2 (NA') – energia normal

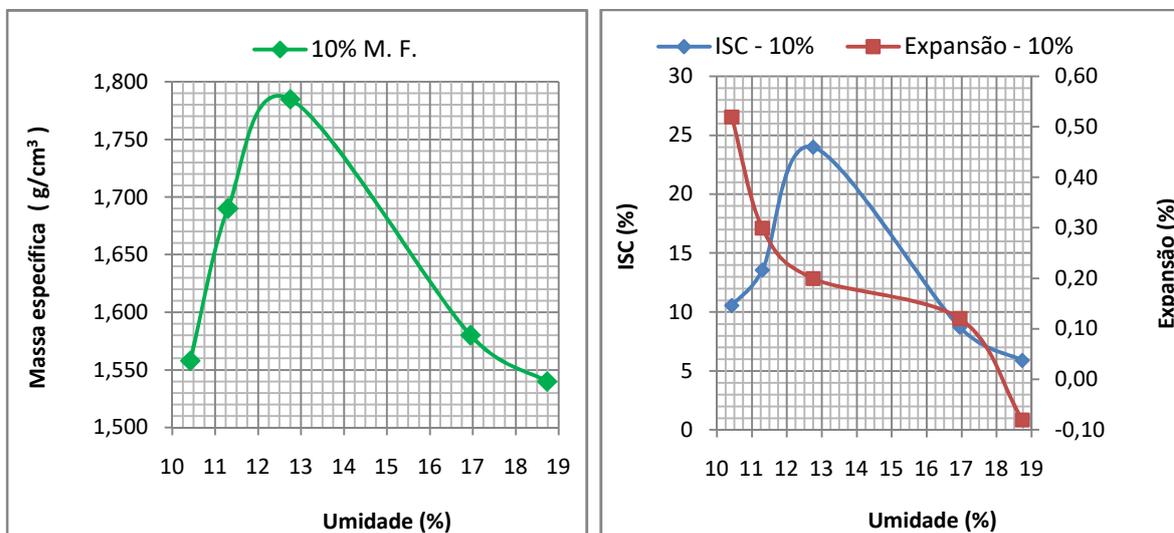


Figura 53. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 10% M.F. energia normal

Tabela37. Resultados do Solo 2 (NA') 10% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
12,50	1785	0,20	24

B.3 – 20% de Material Fresado – Solo 2 (NA') – energia normal

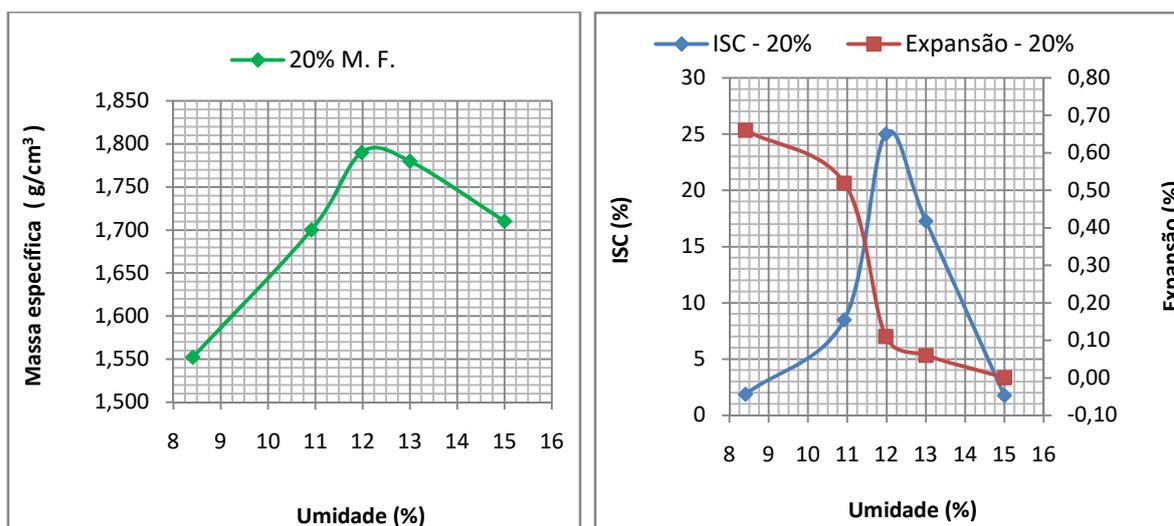


Figura 54. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 20% M.F. energia normal

Tabela38. Resultados do Solo 2 (NA') 20% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
12,25	1800	0,07	24

B.4 – 30% de Material Fresado – Solo 2 (NA') – energia normal

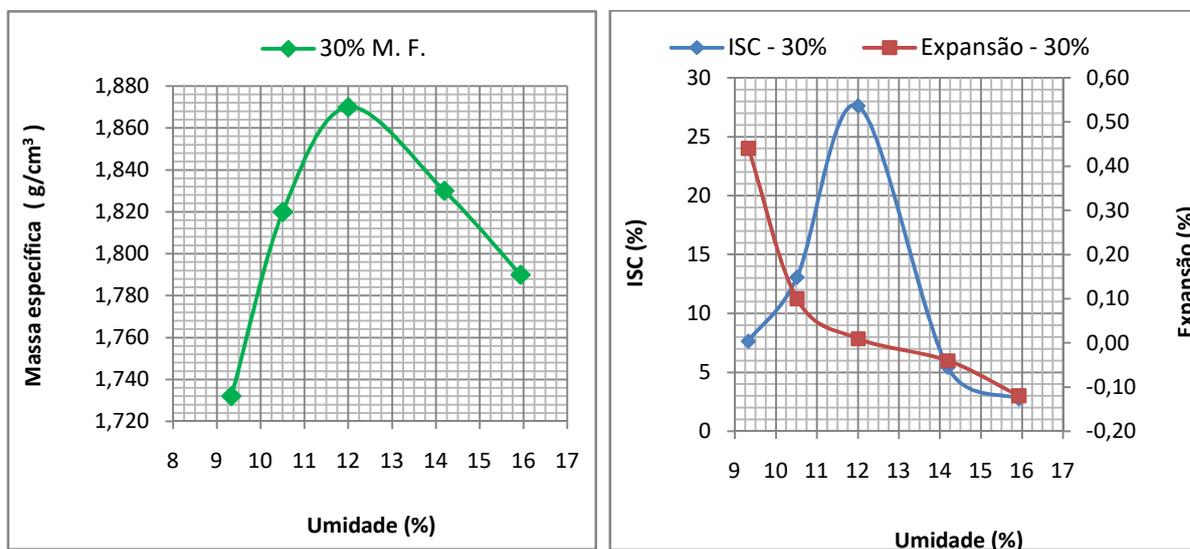


Figura 55. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 30% M.F. energia normal

Tabela39. Resultados do Solo 2 (NA') 30% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
12	1850	0,07	28

B.5 – 40% de Material Fresado – Solo 2 (NA') – energia normal

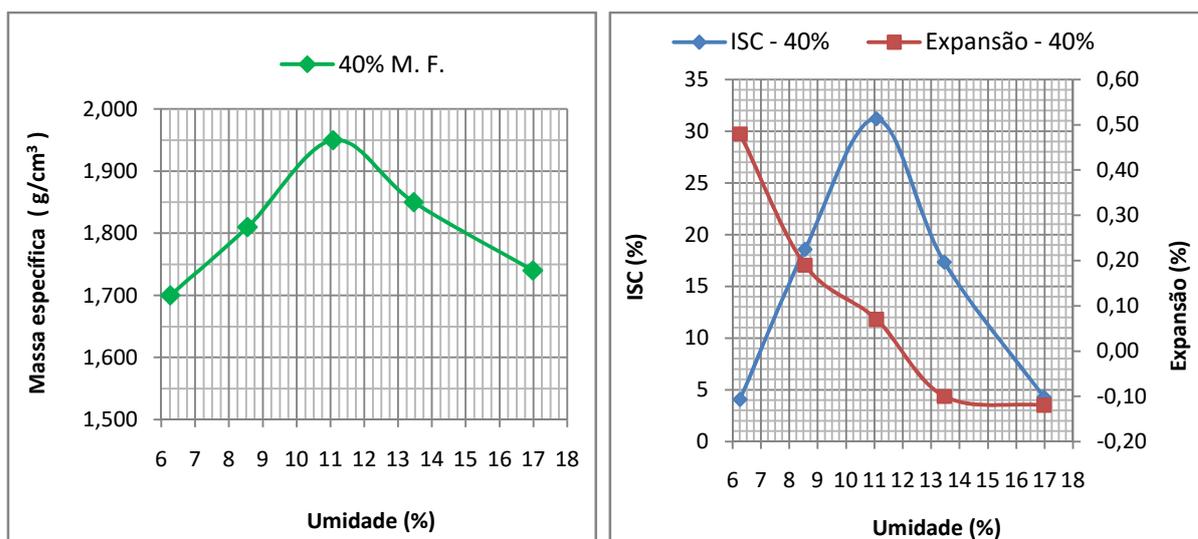


Figura 56. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 40% M.F. energia normal

Tabela40. Resultados do Solo 2 (NA') 40% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
11,07	19,50	0,07	31

B.6 – 50% de Material Fresado – Solo 2 (NA') – energia normal

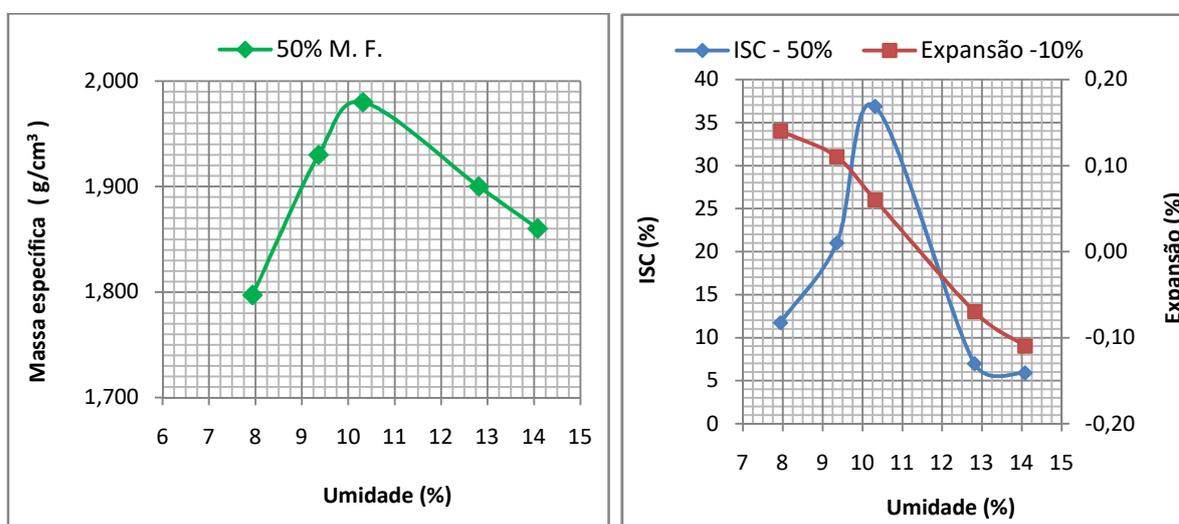


Figura 57. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 50% M.F. energia normal

Tabela41. Resultados do Solo 2 (NA') 50% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
10,32	1980	0,06	37

ANEXO C

C.1 - Solo Natural – Solo 3 (LA') – energia normal

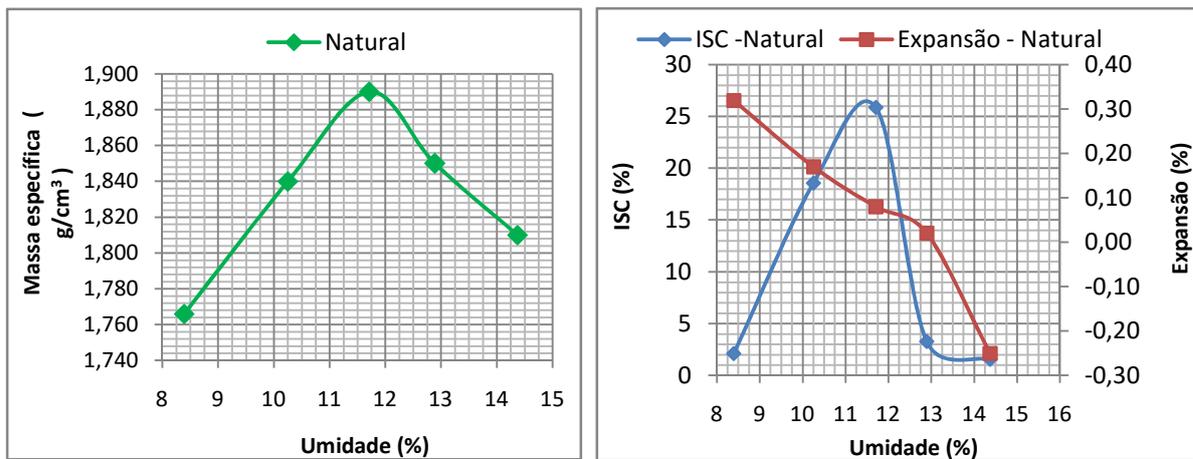


Figura 58. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') Natural energia normal

Tabela42. Resultados do Solo 3 (LA') Natural – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
11,75	1893	0,08	25

C.2 – 10% de Material Fresado – Solo 3 (LA') – energia normal

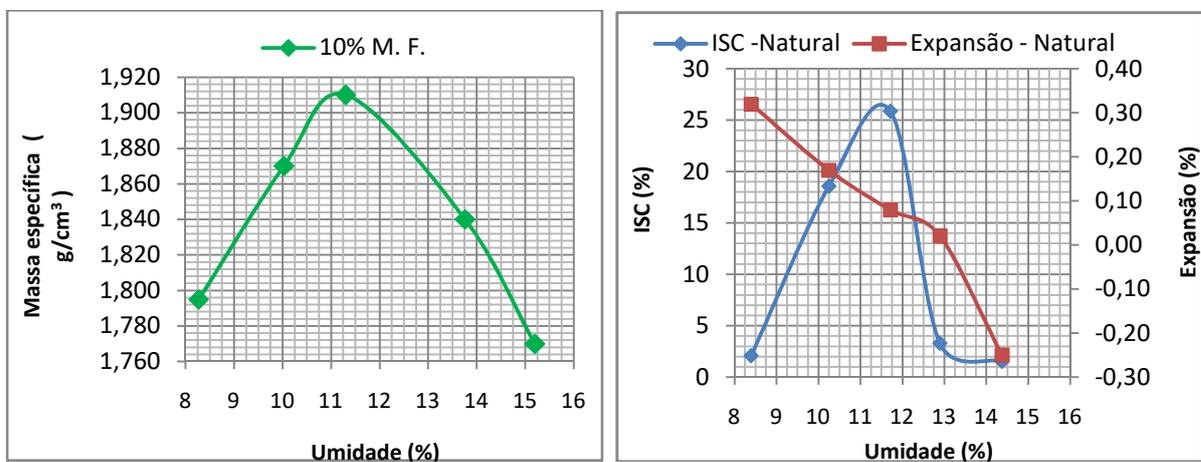


Figura 59. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 10% M.F. energia normal

Tabela43. Resultados do Solo 3 (LA') 10% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
11,25	1905	0,04	30

C.3 – 20% de Material Fresado – Solo 3 (LA') – energia normal

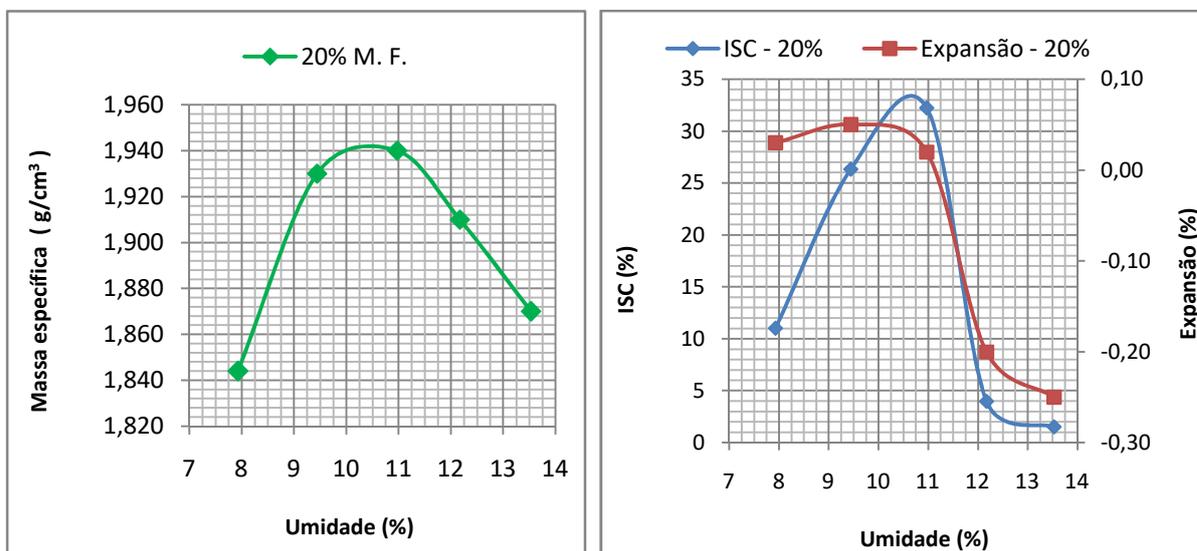


Figura 60. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 20% M.F. energia normal

Tabela44. Resultados do Solo 3 (LA') 20% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
10,50	1944	0,02	32

C.4 – 30% de Material Fresado – Solo 3 (LA') – energia normal

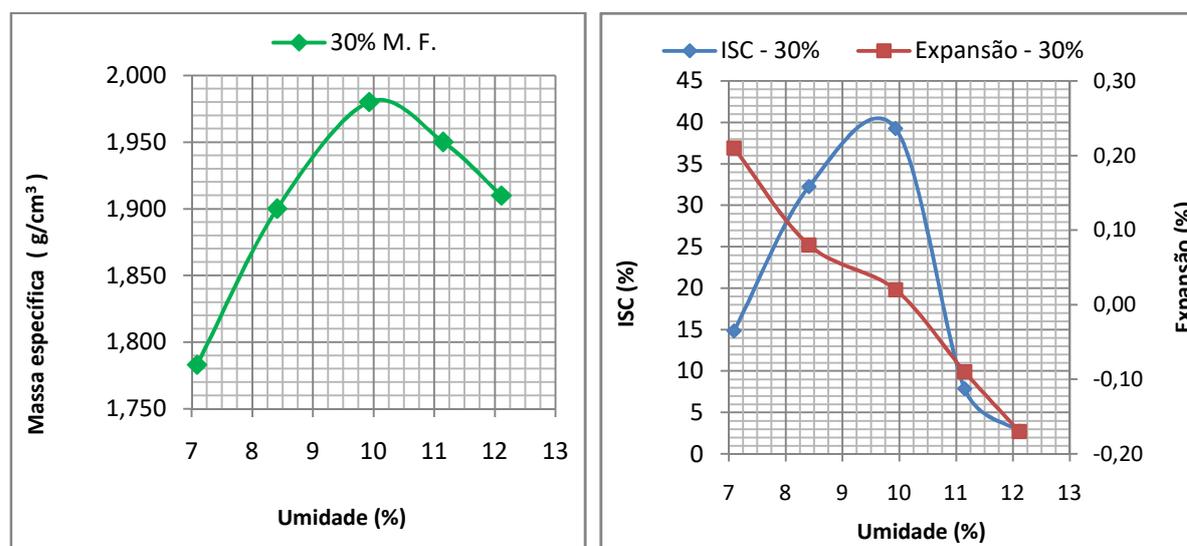


Figura 61. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 30% M.F. energia normal

Tabela45. Resultados do Solo 3 (LA') 30% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,93	1980	0,02	39

C.5 – 40% de Material Fresado – Solo 3 (LA') – energia normal

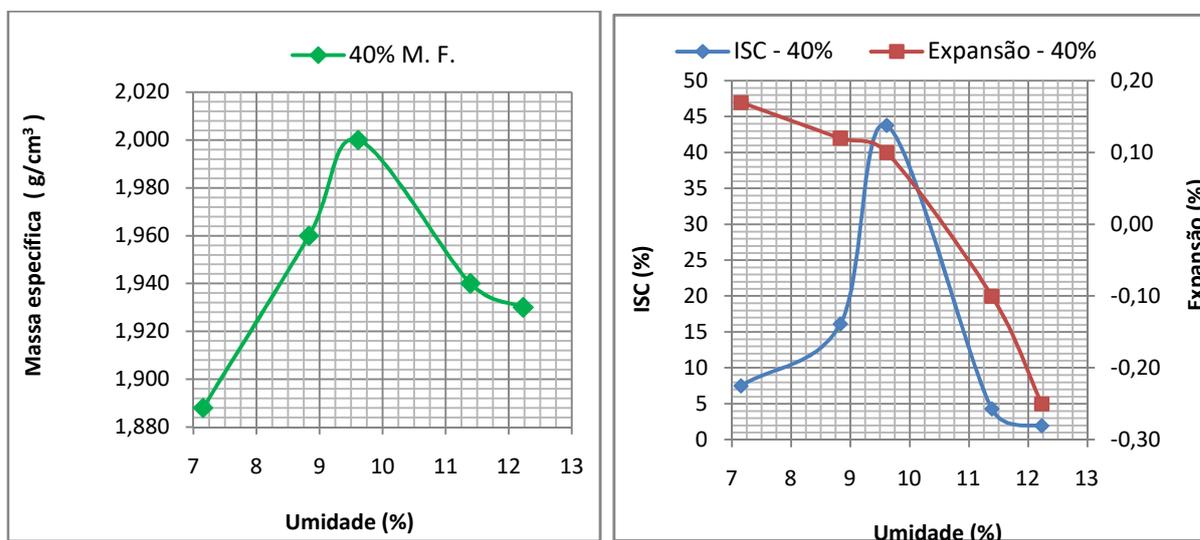


Figura 62. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 40% M.F. energia normal

Tabela46. Resultados do Solo 3 (LA') 40% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,50	2000	0,01	44

C.6 – 50% de Material Fresado – Solo 3 (LA') – energia normal

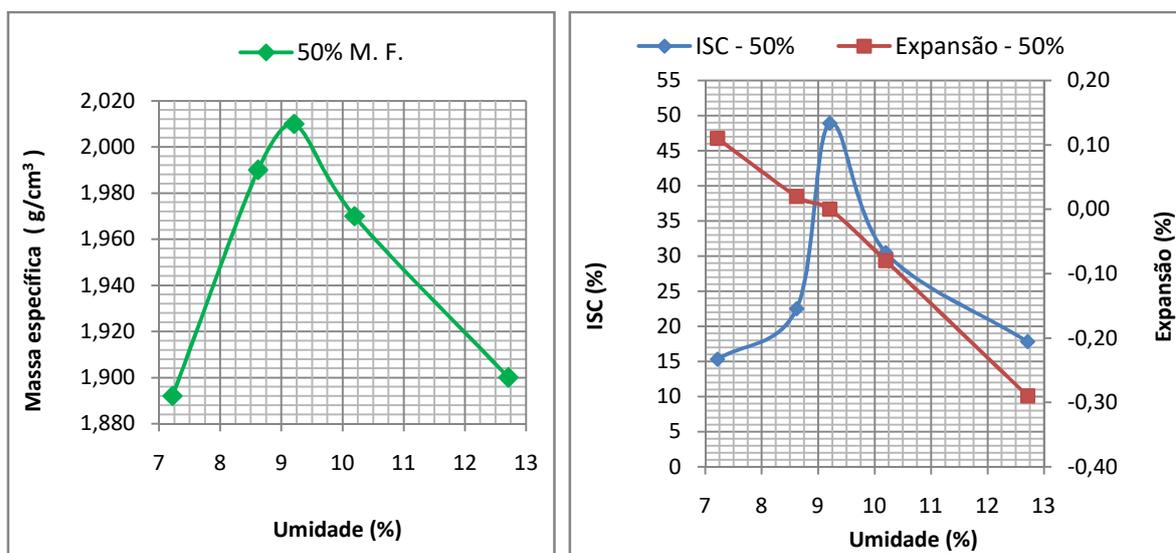


Figura 63. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 50% M.F. energia normal

Tabela47. Resultados do Solo 3 (LA') 50% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,21	2010	0	49

ANEXO D

D.1 - Solo Natural – Solo 4 (LA) – energia normal

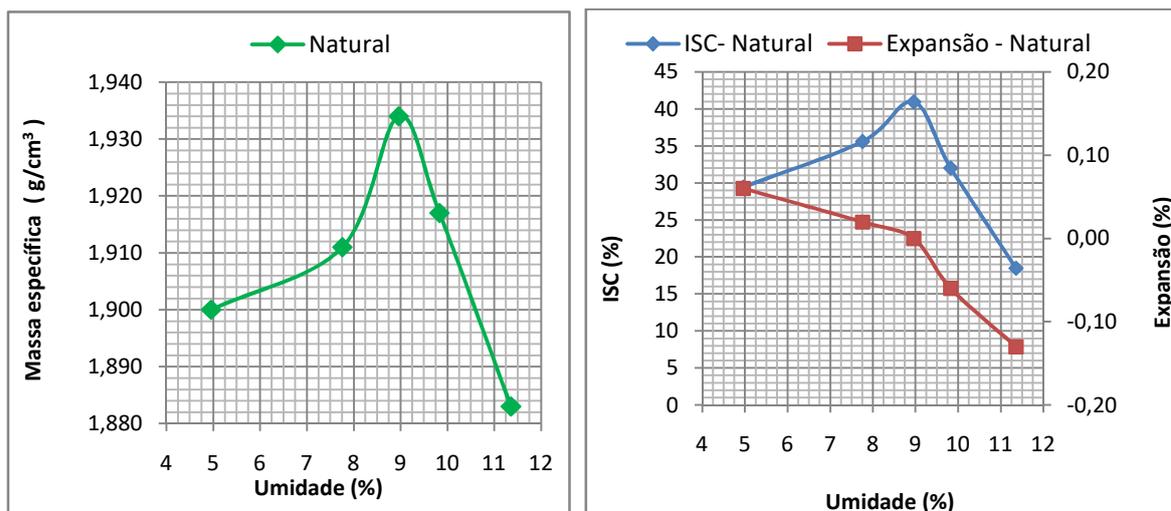


Figura 64. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) Natural energia normal

Tabela48. Resultados do Solo 4 (LA) Natural – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,96	1934	0,01	41

D.2 – 10% de Material Fresado – Solo 4 (LA) – energia normal

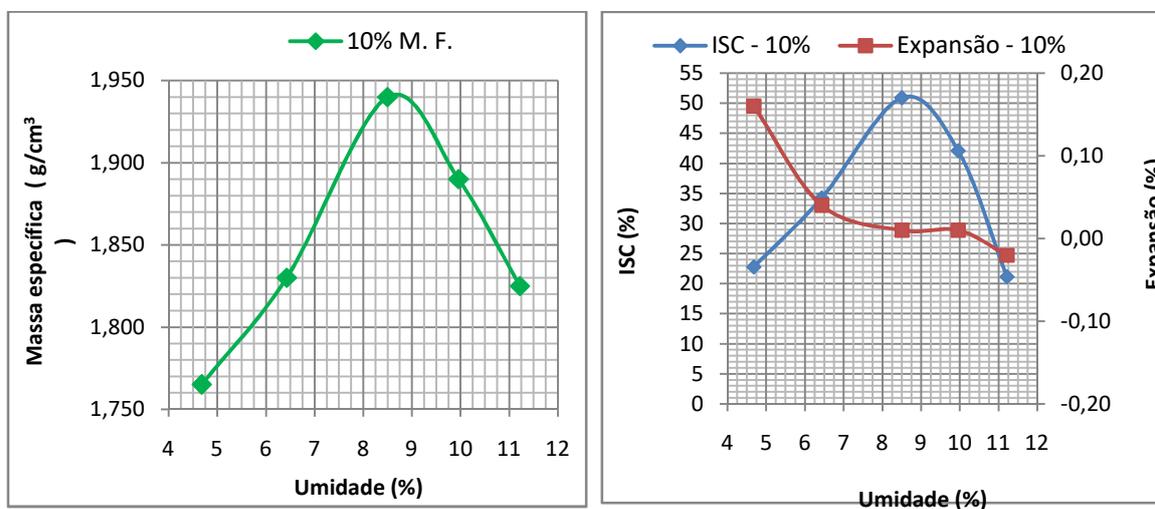


Figura 65. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 10% M.F. energia normal

Tabela49. Resultados do Solo 4 (LA) 10% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,50	1940	0,01	51

D.3 – 20% de Material Fresado – Solo 4 (LA) – energia normal

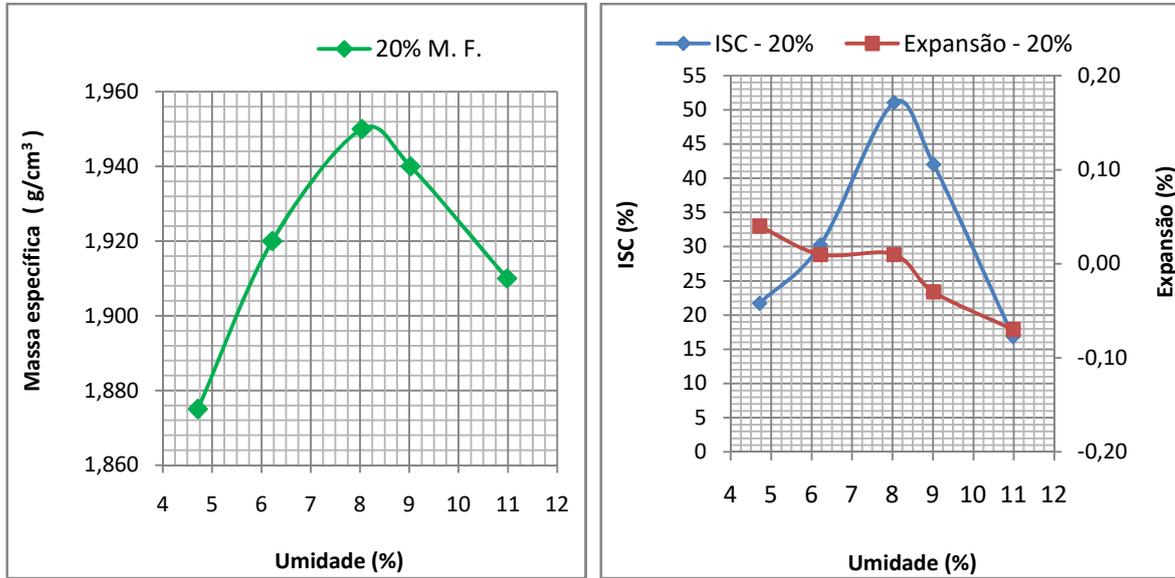


Figura 66. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 20% M.F. energia normal

Tabela50. Resultados do Solo 4 (LA) 20% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,20	1950	0,01	56

D.4 – 30% de Material Fresado – Solo 4 (LA) – energia normal

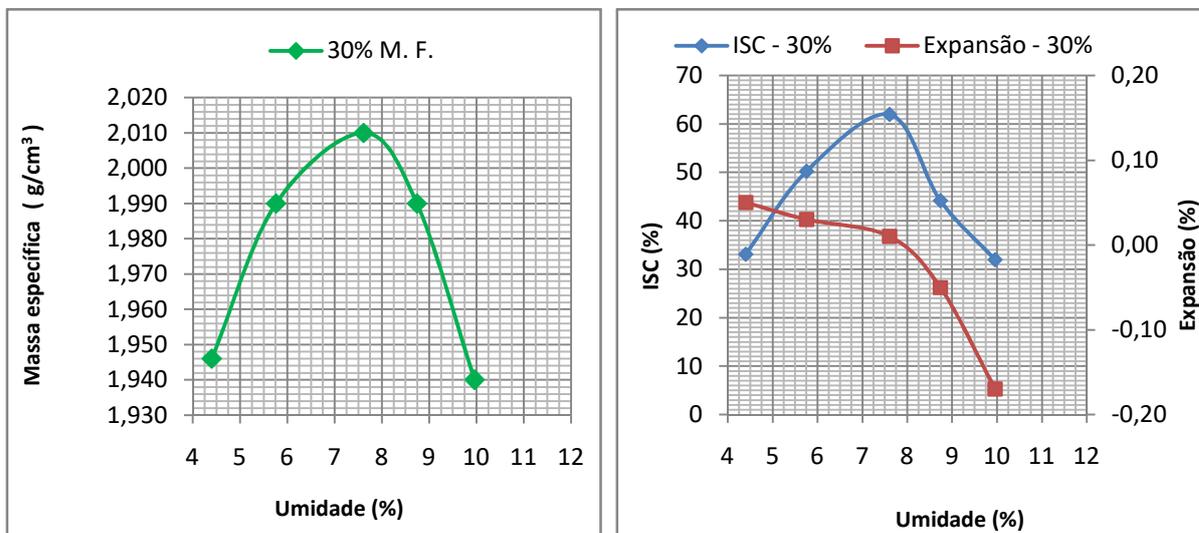


Figura 67. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 30% M.F. energia normal

Tabela51. Resultados do Solo 4 (LA) 30% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,61	2010	0,01	61

D.5 – 40% de Material Fresado – Solo 4 (LA) – energia normal

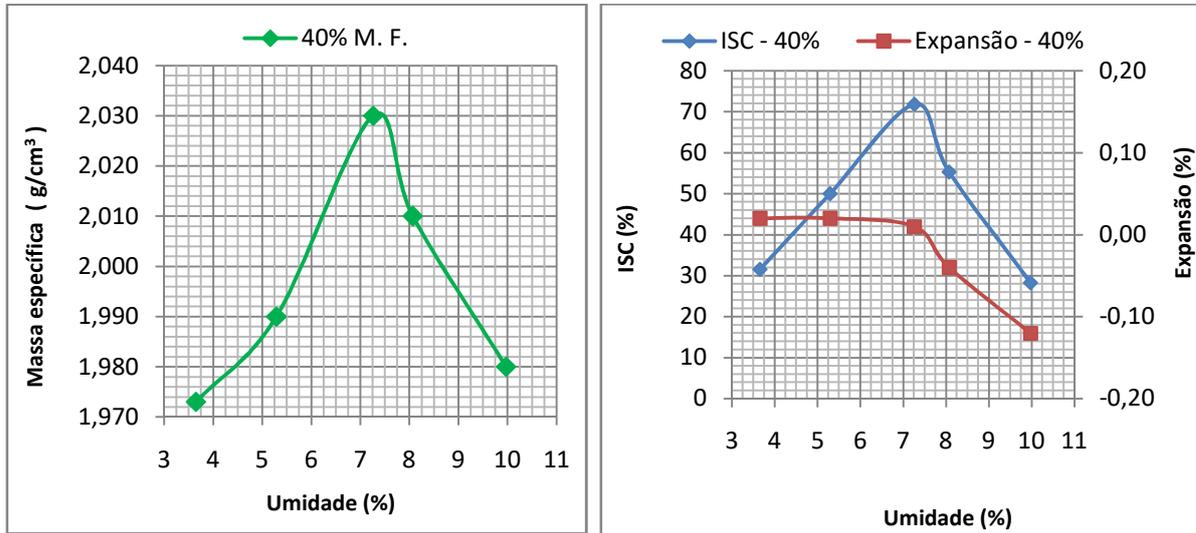


Figura 68. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 40% M.F. energia normal

Tabela52. Resultados do Solo 4 (LA) 40% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,26	2030	0,01	72

D.6 – 50% de Material Fresado – Solo 4 (LA) – energia normal

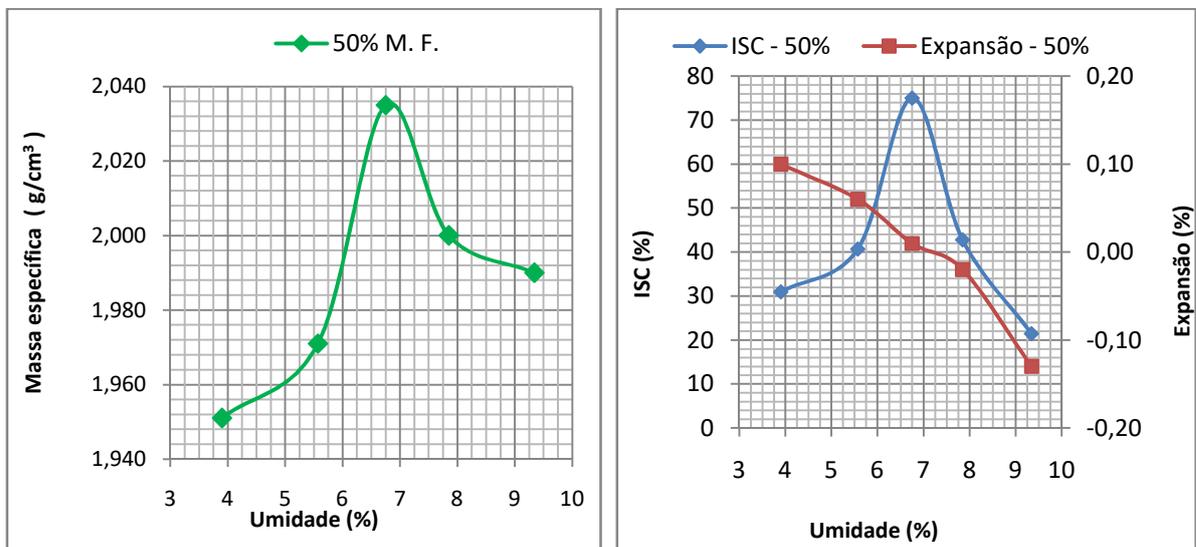


Figura 69. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 50% M.F. energia normal

Tabela53. Resultados do Solo 4 (LA) 50% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,75	2035	0	75

ANEXO E

E.1 - Solo Natural – Solo 5 (NG') – energia normal

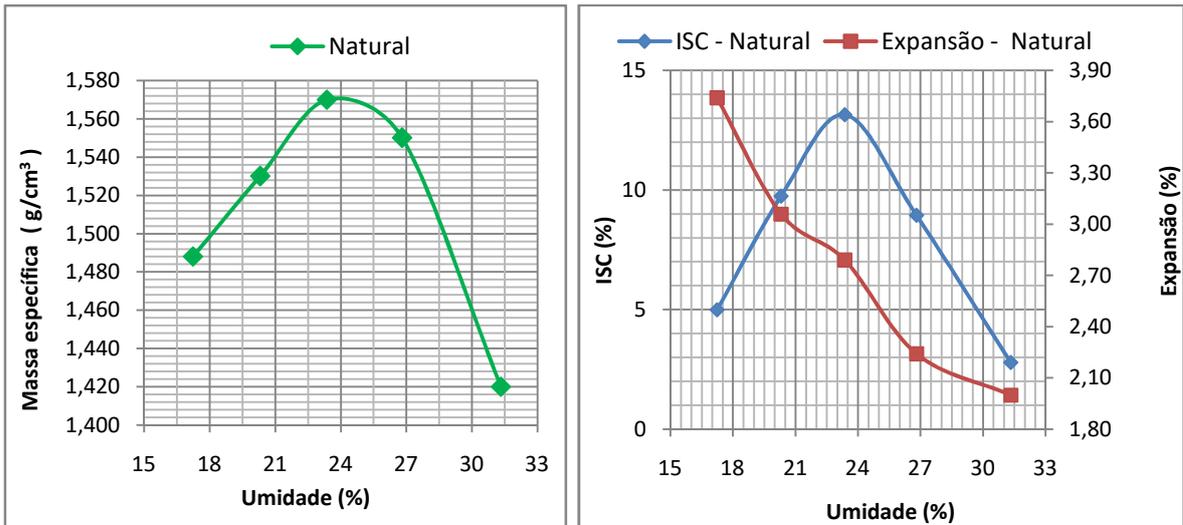


Figura 70. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') Natural energia normal

Tabela54. Resultados do Solo 5 (NG') Natural – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
24	1570	2,79	13

E.2 – 10% de Material Fresado – Solo 5 (NG') – energia normal

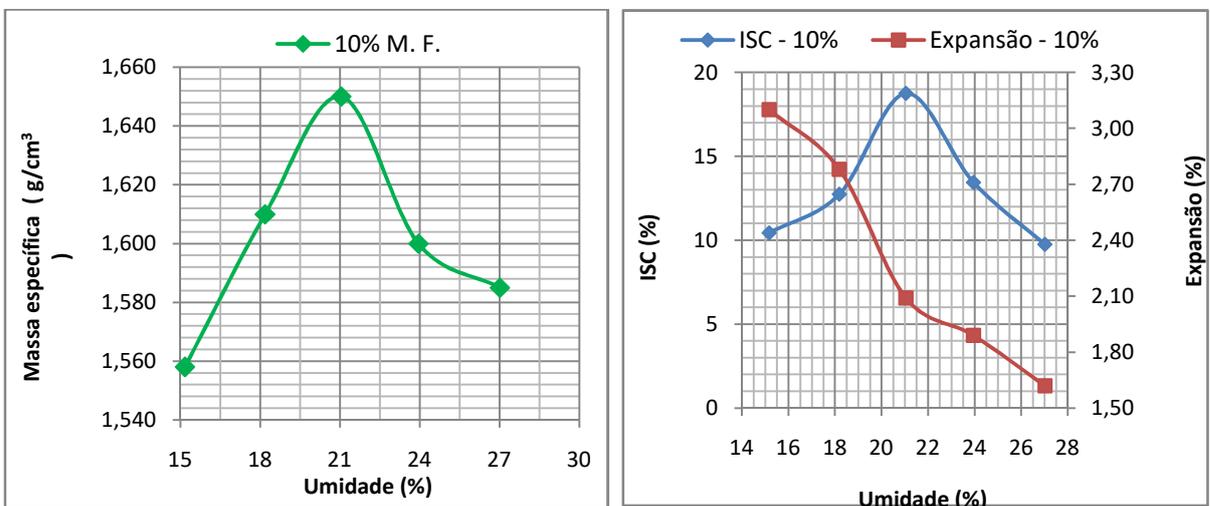


Figura 71. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 10% M.F. energia normal

Tabela55. Resultados do Solo 5 (NG')10% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
21,05	1650	2,09	19

E.3 – 20% de Material Fresado – Solo 5 (NG') – energia normal

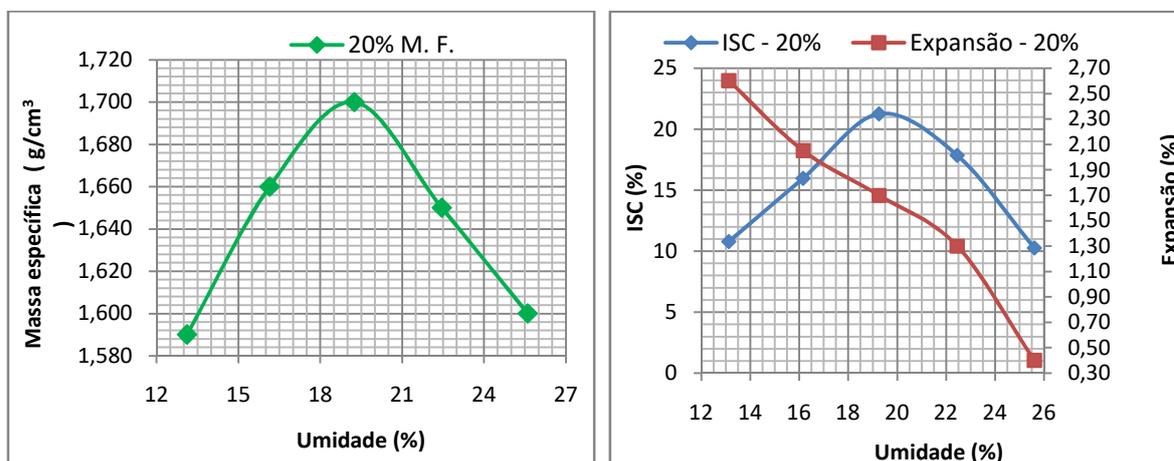


Figura 72. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 20% M.F. energia normal

Tabela56. Resultados do Solo 5 (NG') 20% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
19,25	1700	1,70	21

E.4 – 30% de Material Fresado – Solo 5 (NG') – energia normal

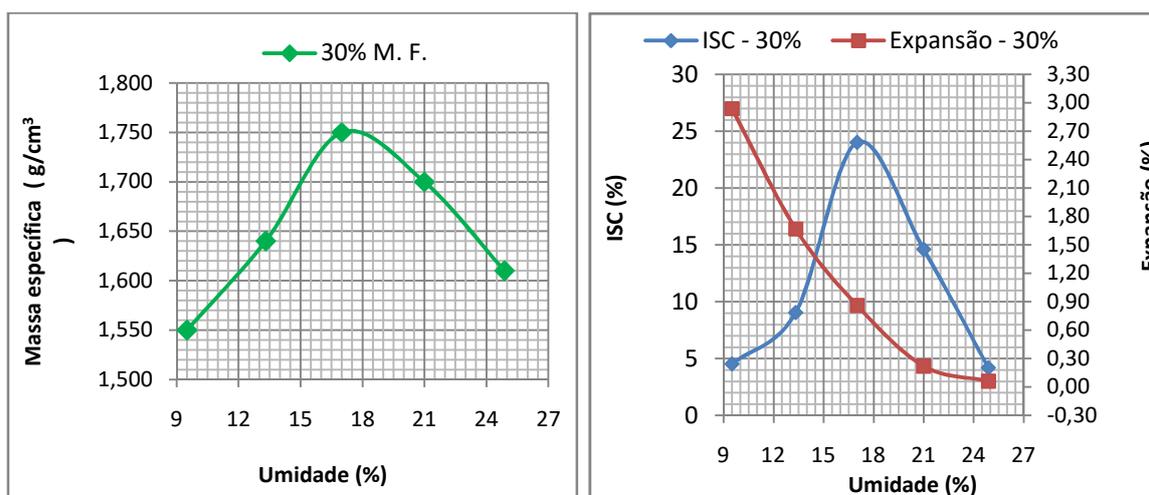


Figura 73. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 30% M.F. energia normal

Tabela57. Resultados do Solo 5 (NG') 30% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
17	1750	1,15	24

E.5 – 40% de Material Fresado – Solo 5 (NG') – energia normal

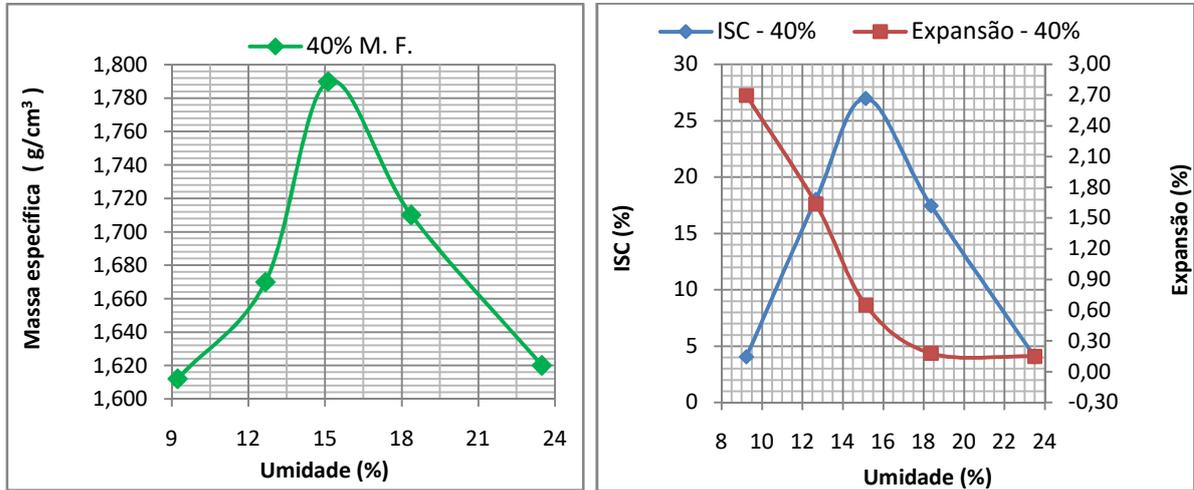


Figura 74. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 40% M.F. energia normal

Tabela58. Resultados do Solo 5 (NG') 40% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
15,13	1790	0,65	27

E.6 – 50% de Material Fresado – Solo 5 (NG') – energia normal

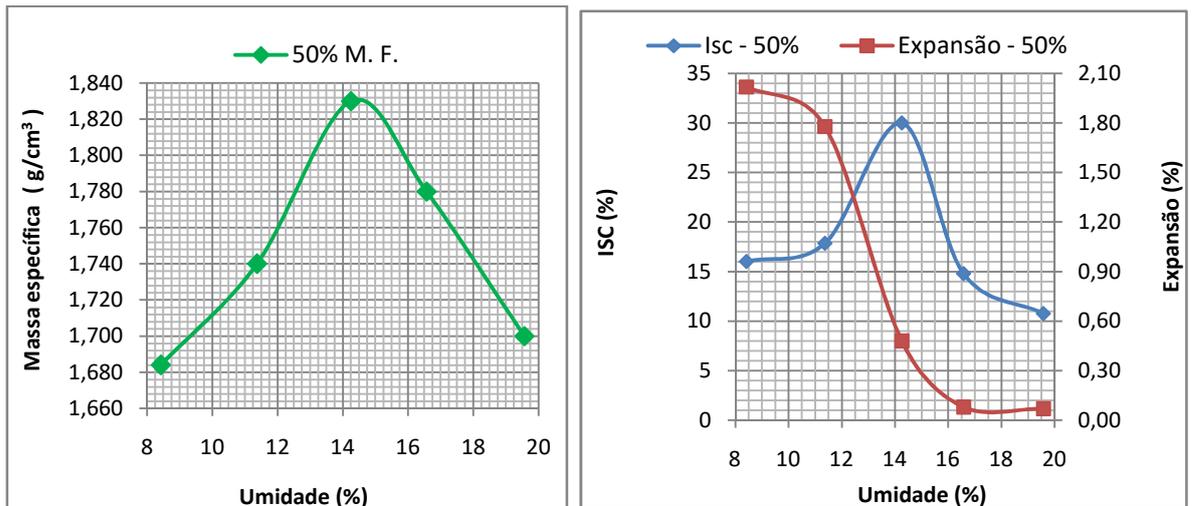


Figura 75. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 5 (NG') 50% M.F. energia normal

Tabela59. Resultados do Solo 5 (NG') 50% M. F. – energia normal

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
14,25	1830	0,48	30

ANEXO F

F.1 - Solo Natural – Solo 1 (LA) – energia intermediária

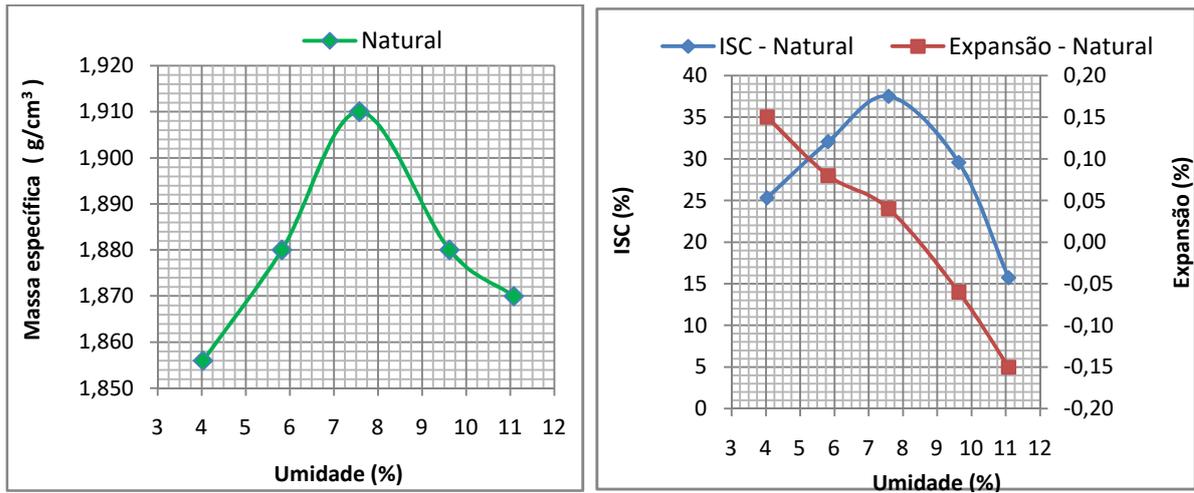


Figura 76. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) Natural energia intermediária

Tabela60. Resultados do Solo 1 (LA) Natural – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,58	1910	0,04	37

F.2 – 10% – Solo 1 (LA) – energia intermediária

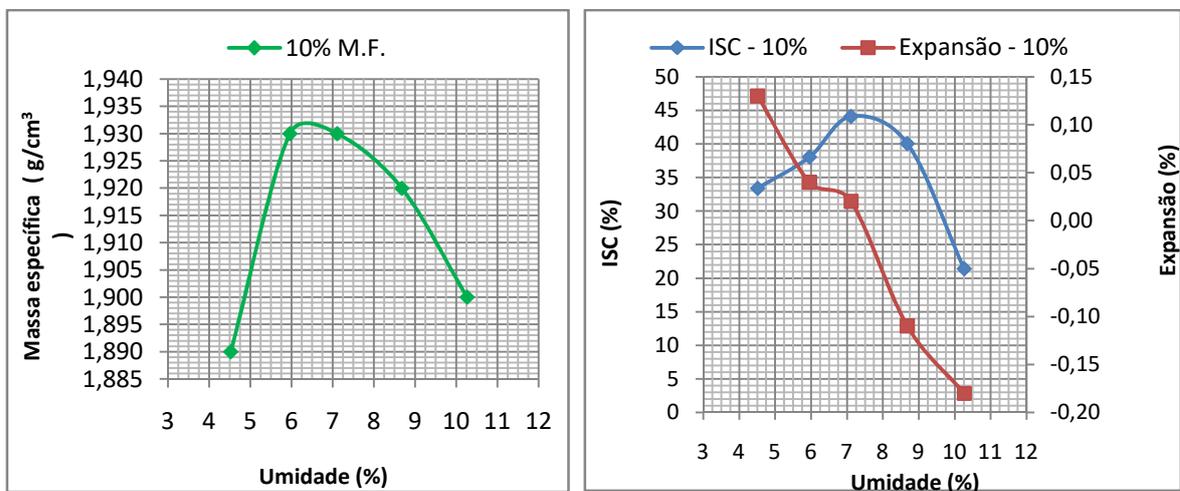


Figura 77. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 10% M.F. energia intermediária

Tabela61. Resultados do Solo 1 (LA) 10% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,11	1930	0,02	44

F.3 – 20% – Solo 1 (LA) – energia intermediária

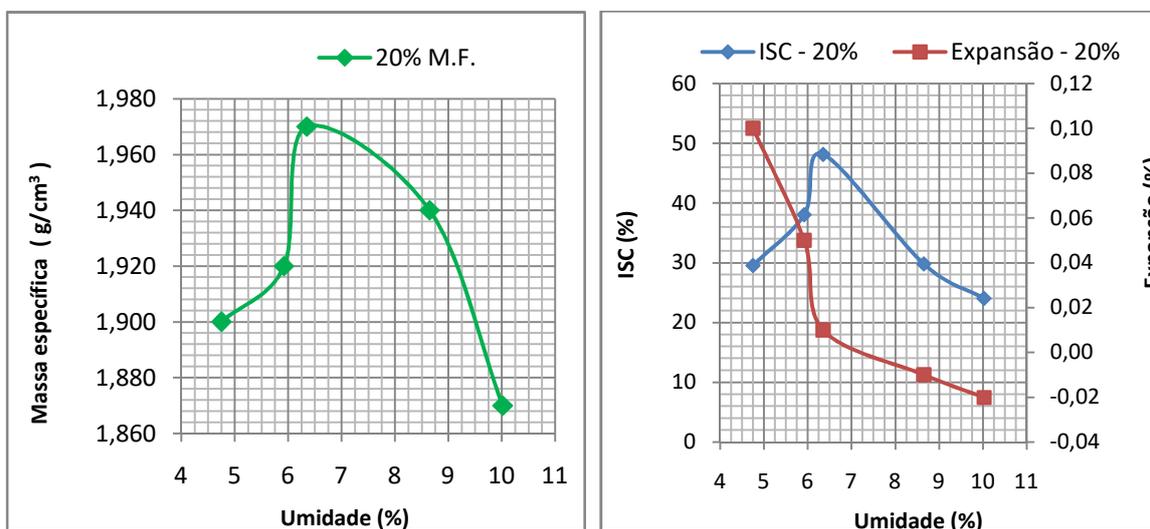


Figura 78. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 20% M.F. energia intermediária

Tabela62. Resultados do Solo 1 (LA) 20% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,35	1970	0,01	49

F.4 – 30% – Solo 1 (LA) – energia intermediária

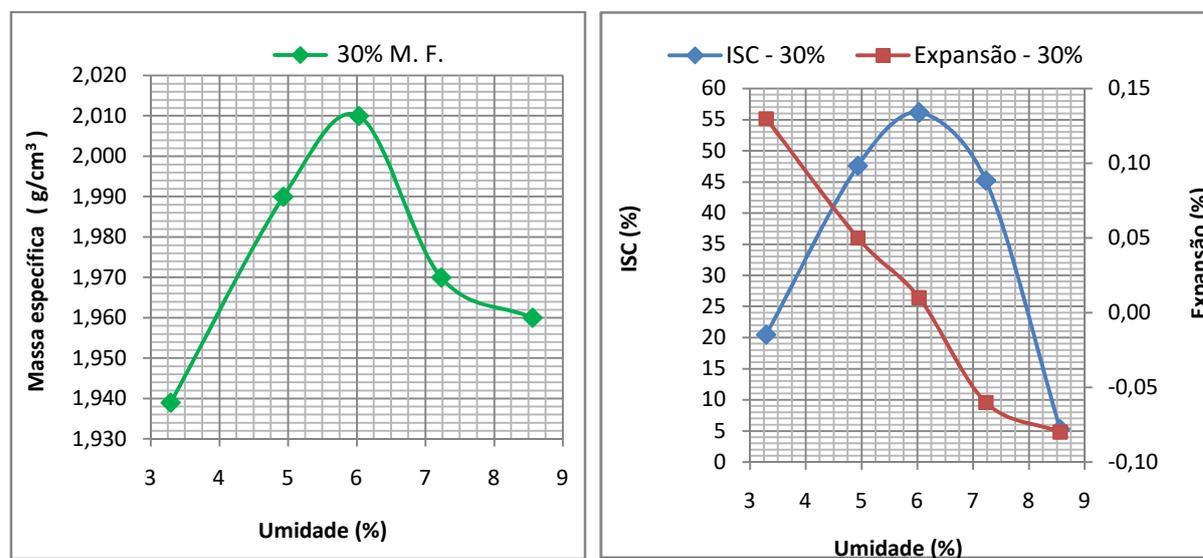


Figura 79. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 30% M.F. energia intermediária

Tabela63. Resultados do Solo 1 (LA) 30% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,03	2010	0,01	56

F.5 – 40% – Solo 1 (LA) – energia intermediária

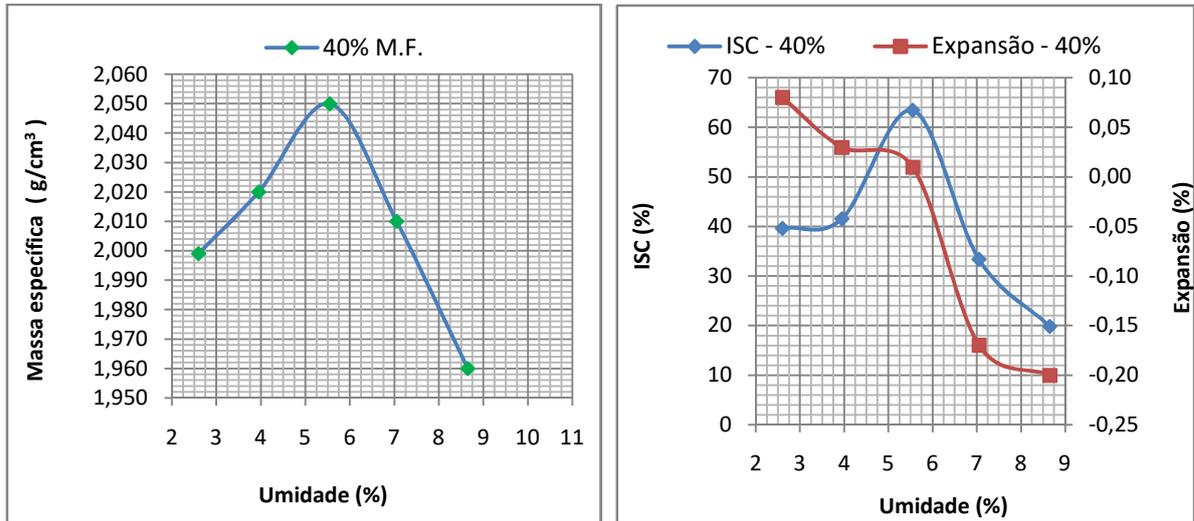


Figura 80. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 40% M.F. energia intermediária

Tabela64. Resultados do Solo 1 (LA) 40% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
5,55	2050	0,01	63

F.6 – 50% – Solo 1 (LA) – energia intermediária

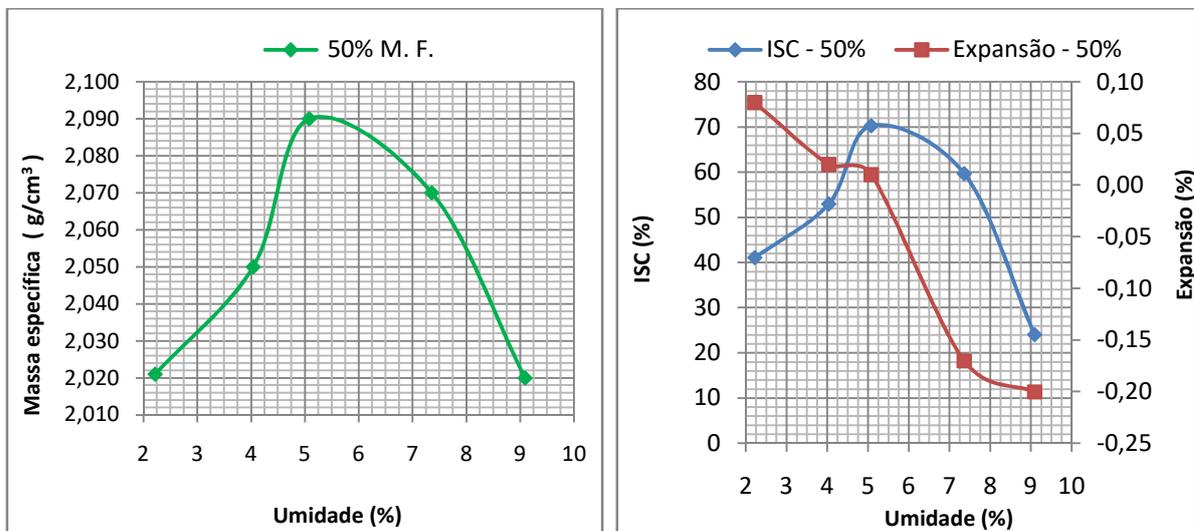


Figura 81. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 1 (LA) 50% M.F. energia intermediária

Tabela65. Resultados do Solo 1 (LA) 50% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
5,08	2090	0,01	70

ANEXO G

G.1 - Solo Natural – Solo 2 (NA') – energia intermediária

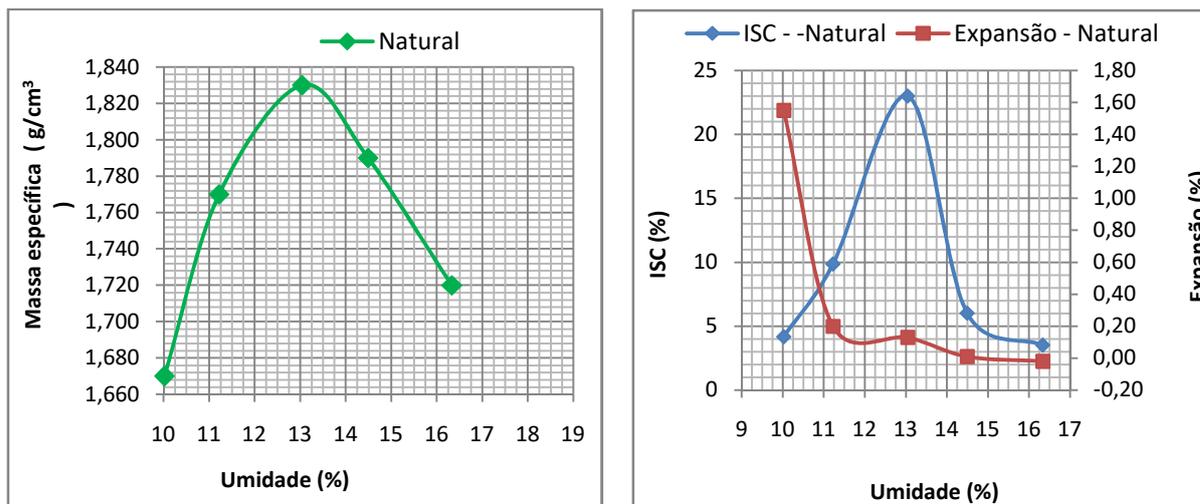


Figura 82. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') Natural energia intermediária

Tabela66. Resultados do Solo 2 (NA') Natural – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
13,04	1830	0,13	23

G.2 – 10% – Solo 2 (NA') – energia intermediária

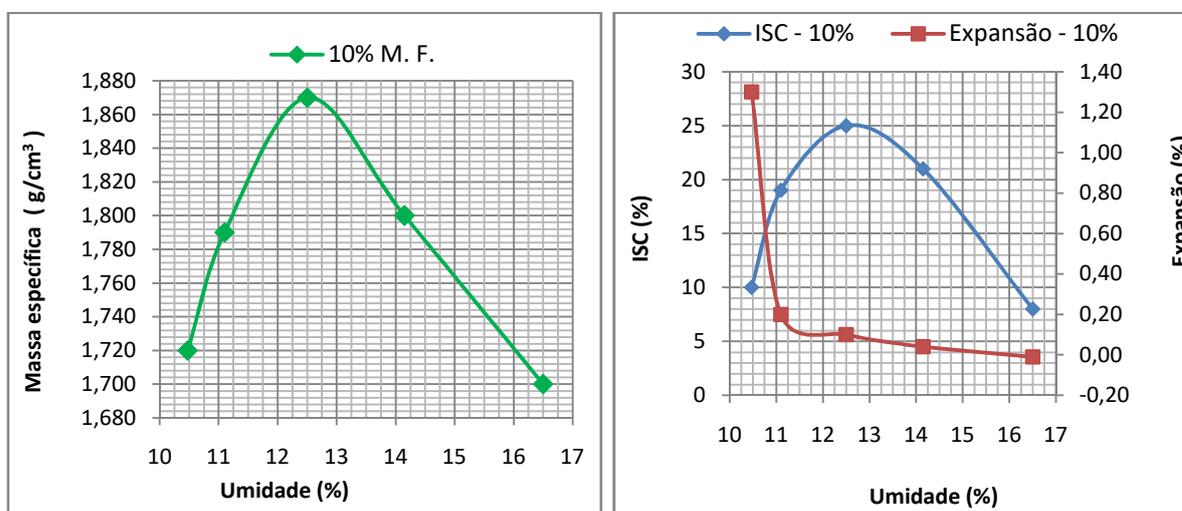


Figura 83. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 10% M.F. energia intermediária

Tabela67. Resultados do Solo 2 (NA') 10% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m^3	(%)	(%)
12,50	1870	0,10	25

G.3 – 20% – Solo 2 (NA') – energia intermediária

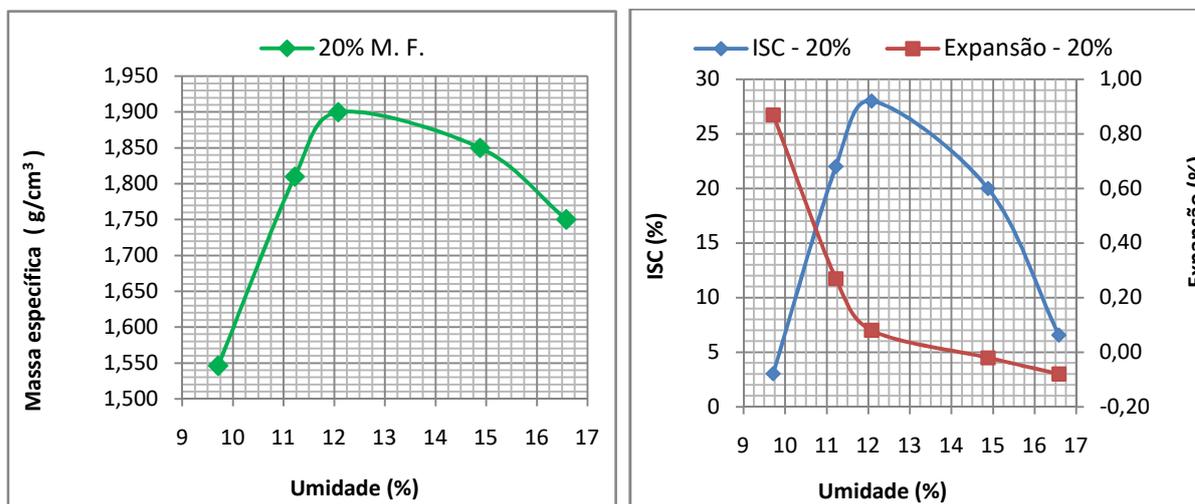


Figura 84. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 20% M.F. energia intermediária

Tabela68. Resultados do Solo 2 (NA') 20% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m^3	(%)	(%)
12,08	1900	0,08	28

G.4 – 30% – Solo 2 (NA') – energia intermediária

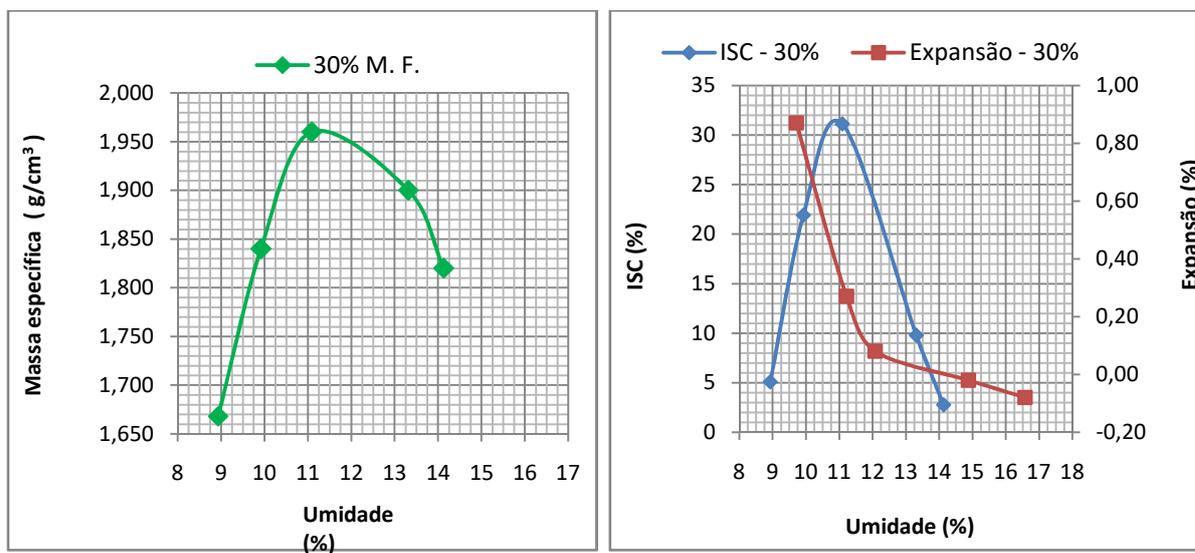


Figura 85. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 30% M.F. energia intermediária

Tabela69. Resultados do Solo 2 (NA') 30% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
11,09	1960	0,08	31

G.5 – 40% – Solo 2 (NA') – energia intermediária

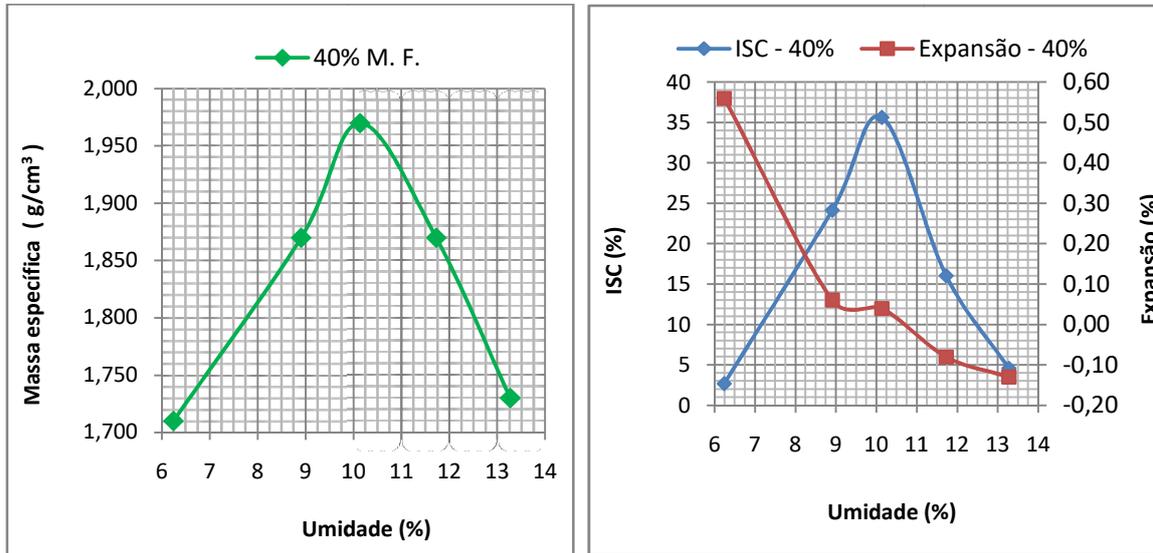


Figura 86. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 40% M.F. energia intermediária

Tabela70. Resultados do Solo 2 (NA') 40% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
12,08	1970	0,04	36

G.5 – 50% – Solo 2 (NA') – energia intermediária

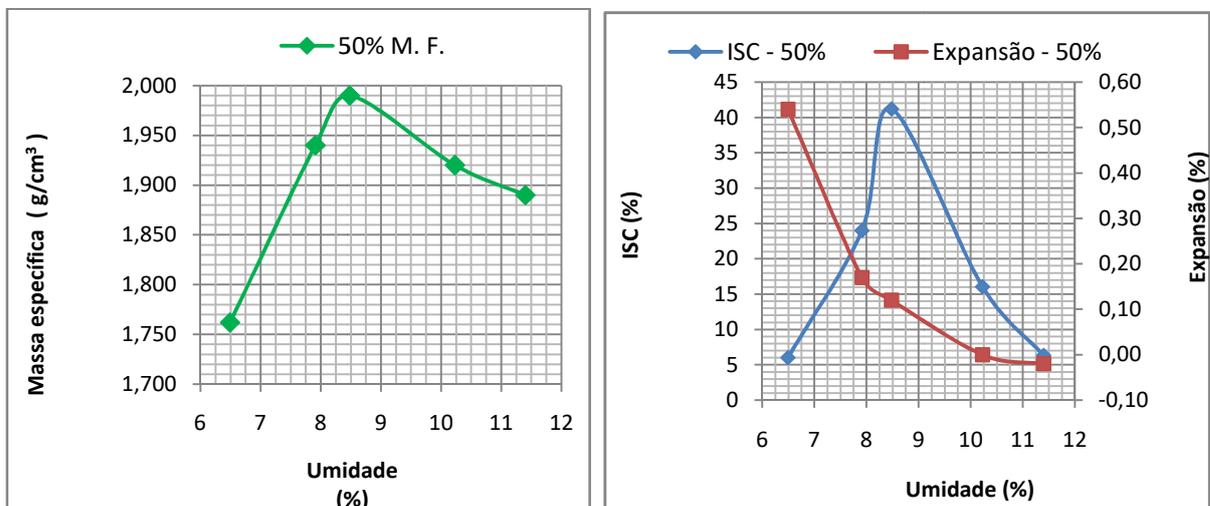


Figura 87. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 2 (NA') 50% M.F. energia intermediária

Tabela71. Resultados do Solo 2 (NA') 50% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
8,48	1990	0,04	41

ANEXO H

H.1 - Solo Natural – Solo 3 (LA') – energia intermediária

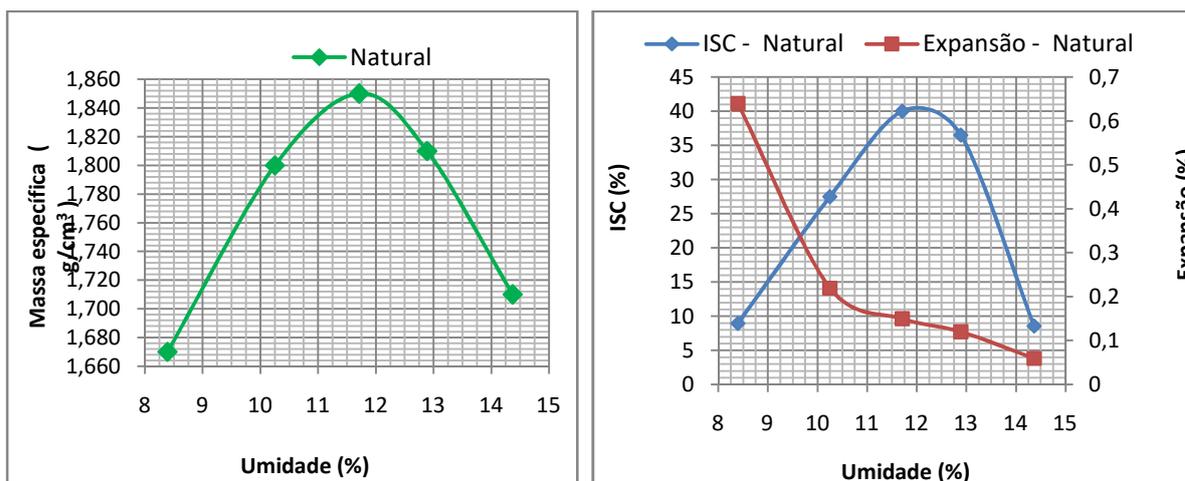


Figura 88. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') Natural energia intermediária

Tabela72. Resultados do Solo 3 (LA') Natural – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
11,71	1850	0,15	41

H.2 – 10% - Solo 3 (LA') – energia intermediária

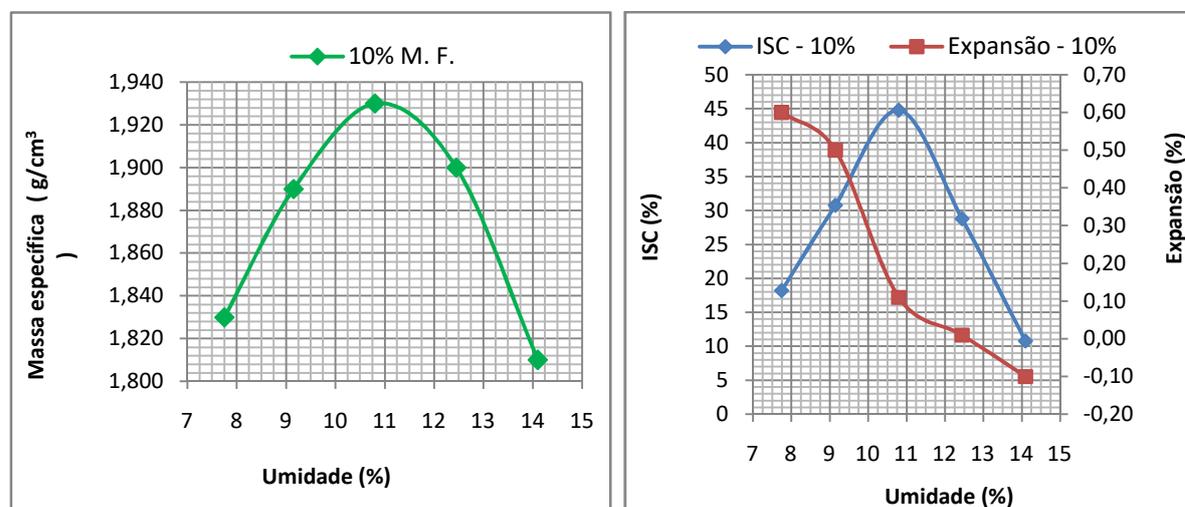


Figura 89. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 10% M.F. energia intermediária

Tabela73. Resultados do Solo 3 (LA') 10% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
10,80	1930	0,11	45

H.3 – 20% - Solo 3 (LA') – energia intermediária

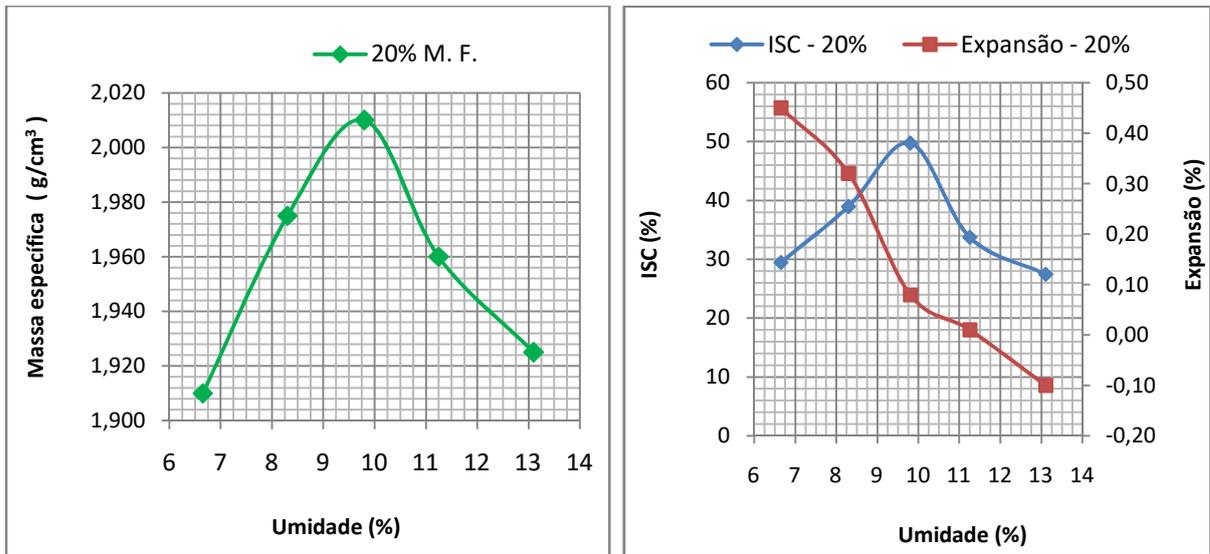


Figura 90. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 20% M.F. energia intermediária

Tabela74. Resultados do Solo 3 (LA') 20% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,80	2010	0,08	50

H.4 – 30% - Solo 3 (LA') – energia intermediária

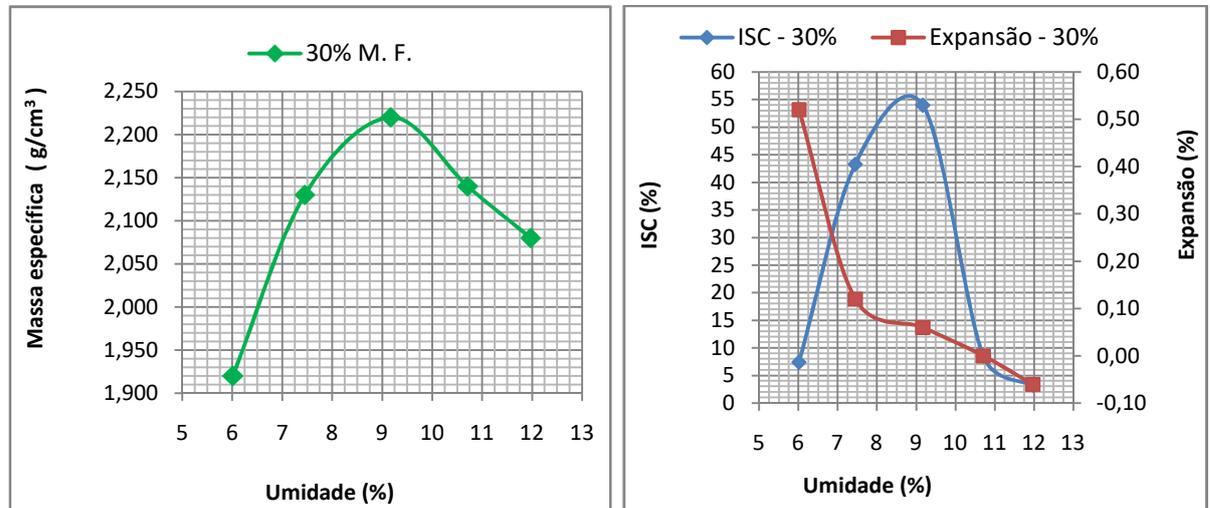


Figura 91. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 30% M.F. energia intermediária

Tabela75. Resultados do Solo 3 (LA') 30% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,17	2220	0,06	54

H.5 – 40% - Solo 3 (LA') – energia intermediária

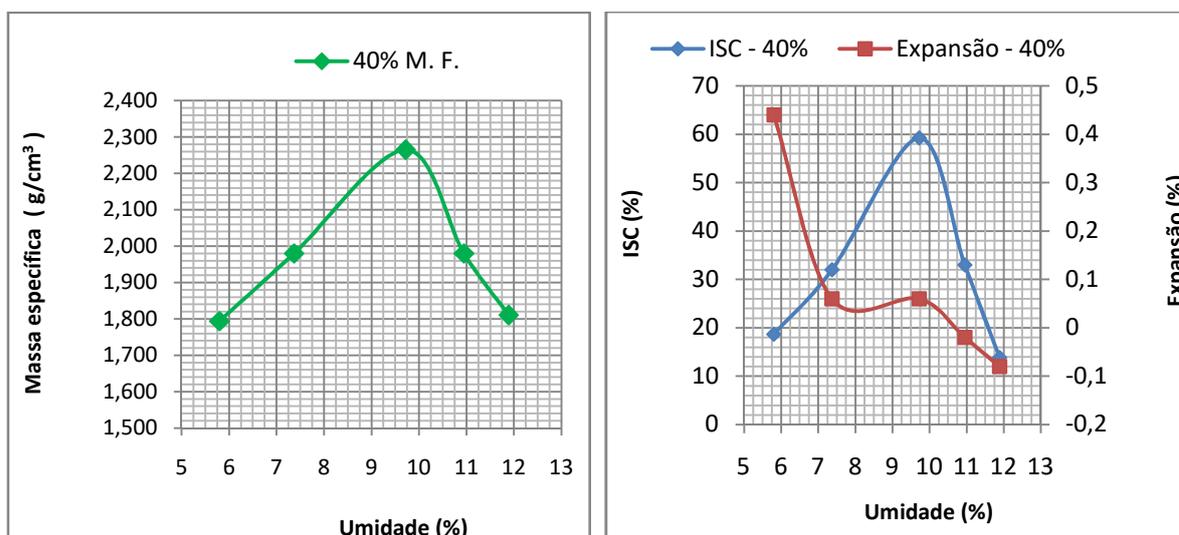


Figura 92. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 40% M.F. energia intermediária

Tabela76. Resultados do Solo 3 (LA') 40% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
9,72	2265	0,06	59

H.6 – 50% - Solo 3 (LA') – energia intermediária

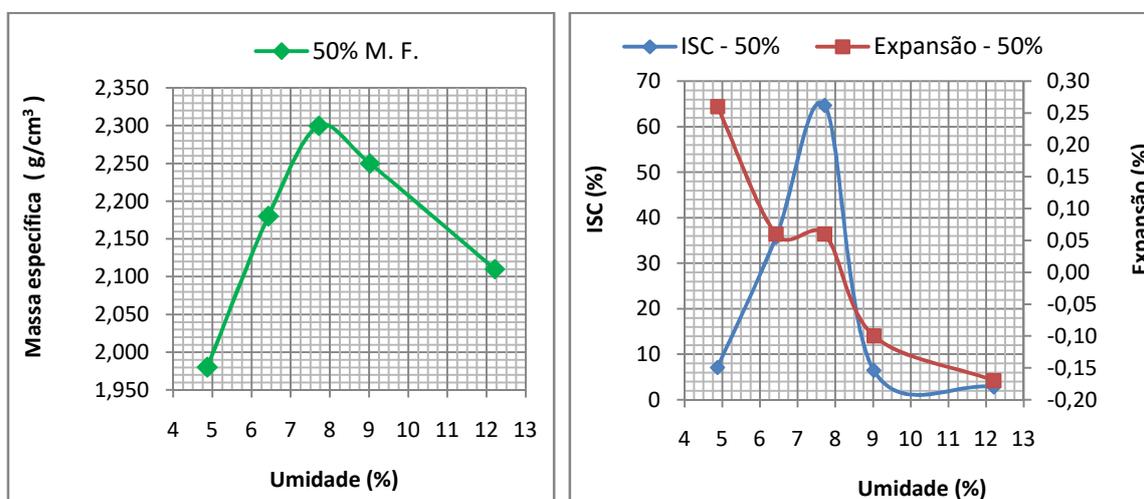


Figura 93. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 3 (LA') 50% M.F. energia intermediária

Tabela77. Resultados do Solo 3 (LA') 50% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,72	2300	0,06	65

ANEXO I

I.1 - Solo Natural – Solo 4 (LA) – energia intermediária

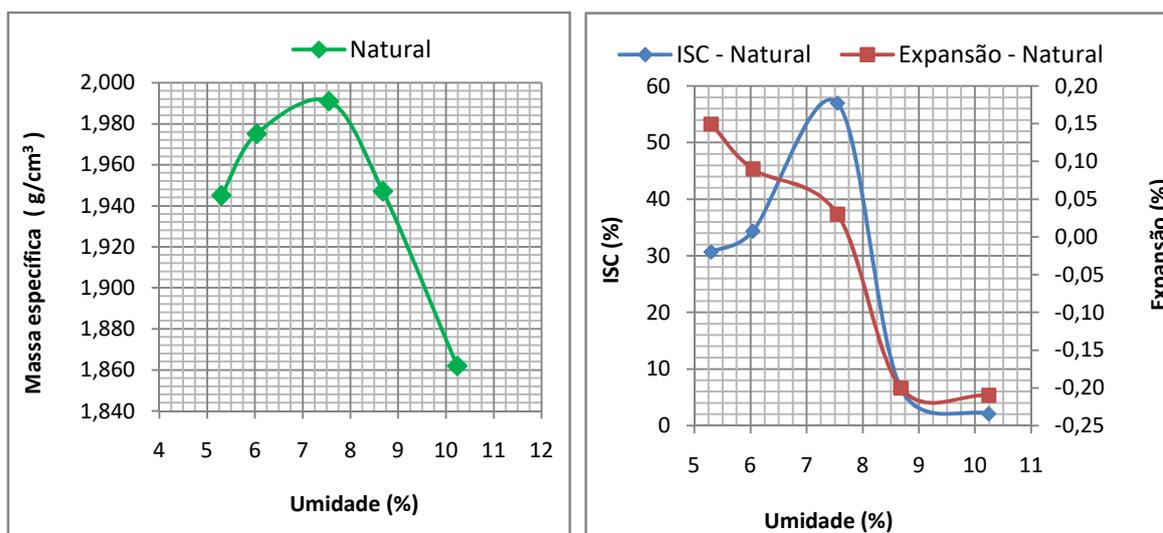


Figura 94. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) Natural energia intermediária

Tabela78. Resultados do Solo 4 (LA) Natural – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,55	1991	0,03	58

I.2 - 10% – Solo 4 (LA) – energia intermediária

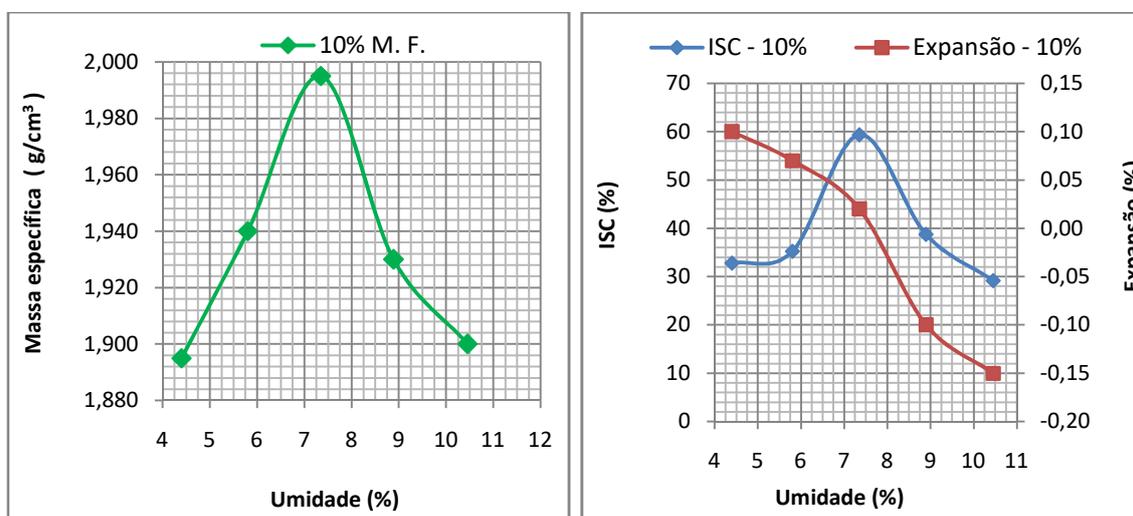


Figura 95. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 10% M.F. energia intermediária

Tabela79. Resultados do Solo 4 (LA) 10% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m^3	(%)	(%)
7,35	1995	0,02	59

I.3 - 20% – Solo 4 (LA) – energia intermediária

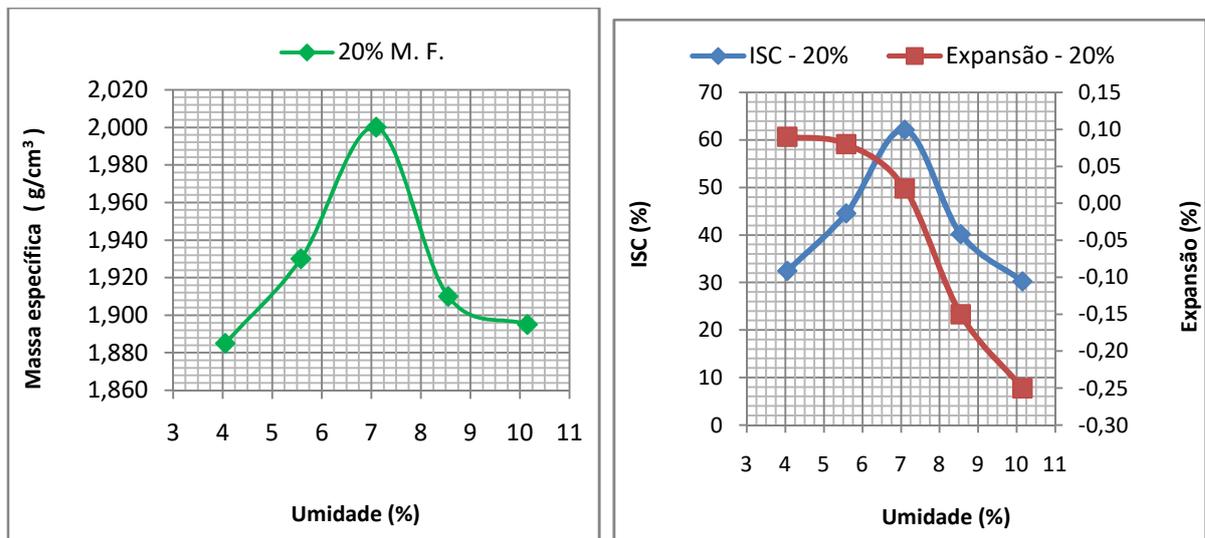


Figura 96. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 20% M.F. energia intermediária

Tabela80. Resultados do Solo 4 (LA) 20% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m^3	(%)	(%)
7,10	2000	0,02	62

I.4 - 30% – Solo 4 (LA) – energia intermediária

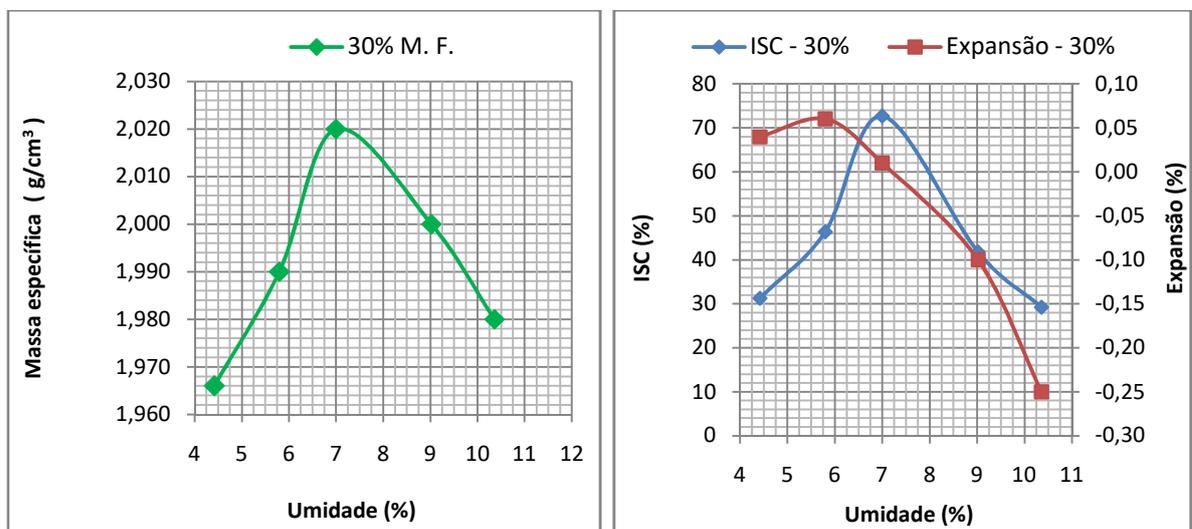


Figura 97. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 30% M.F. energia intermediária

Tabela81. Resultados do Solo 4 (LA) 30% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
7,00	2020	0,01	73

I.5 - 40% – Solo 4 (LA) – energia intermediária

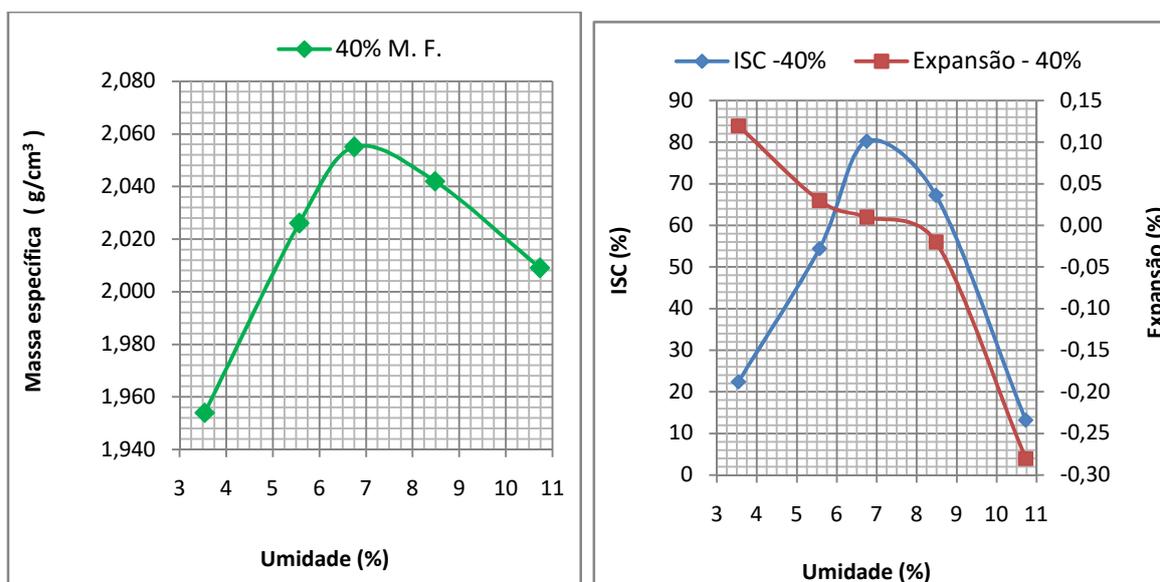


Figura 98. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 40% M.F. energia intermediária

Tabela82. Resultados do Solo 4 (LA) 40% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,75	2055	0,01	80

I.6 - 50% – Solo 4 (LA) – energia intermediária

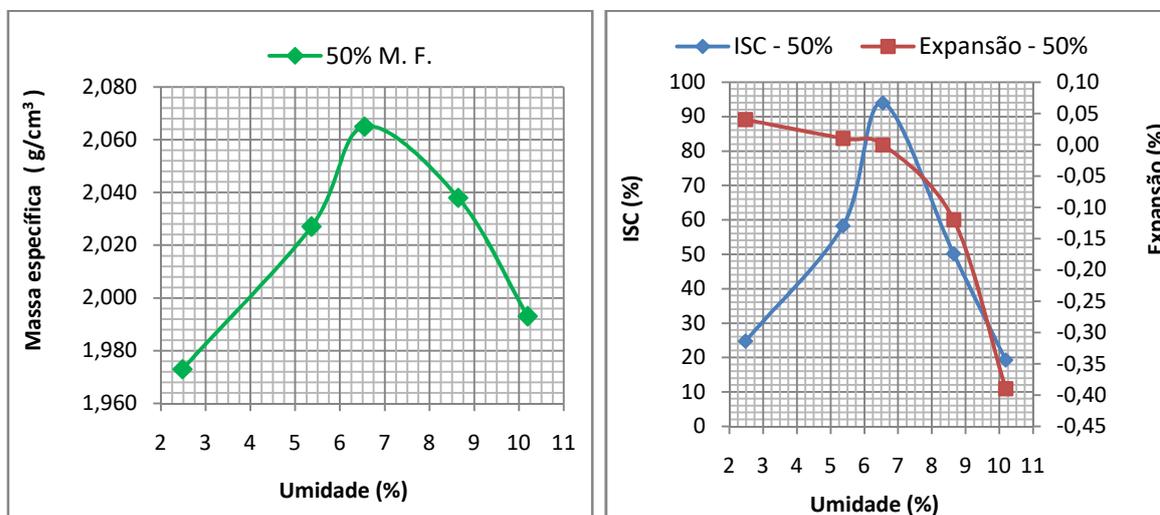


Figura 99. Curvas de massa específica, ISC e expansão – Solo 4 (LA) 50% M.F. energia intermediária

Tabela83. Resultados do Solo 4 (LA) 50% M. F. – energia intermediária

Umidade ótima	Massa específica	Expansão	ISC
(%)	Kg/m ³	(%)	(%)
6,55	2065	0	94