

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DANILO ALVES DE SOUZA LIMA**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E RAP NA  
ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO DA FORMAÇÃO  
GUABIROTUBA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**  
**2020**

**DANILO ALVES DE SOUZA LIMA**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E RAP NA  
ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO DA FORMAÇÃO  
GUABIROTUBA**

**Effect of cement Portland and reclaimed asphalt pavement  
addition on the stabilization of clayey soil of the Guabirotuba  
formation**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

**CURITIBA  
2020**



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Lima, Danilo Alves de Souza

Efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso da formação Guabirotuba [recurso eletrônico] / Danilo Alves de Souza Lima. -- 2020.

1 arquivo texto (144 f.): PDF; 4,36 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 20 out. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 134-144.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Cimento Portland - Solos. 3. Pavimentos - Reciclagem - Curitiba (PR). 4. Misturas de emulsão asfáltica - Testes. I. Izzo, Ronaldo Luis dos Santos, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. III. Título.

---

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271  
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 205

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Efeito da adição de cimento e pavimento asfáltico fresado na estabilização de solo argiloso da Formação Guabirotuba**, defendida em sessão pública pelo candidato **Danilo Alves de Souza Lima**, no dia 05 de agosto de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas e Geotecnia, linha de pesquisa: Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Adauto José Miranda de Lima - UTFPR

Prof. Dr. Matheus David Inocente Domingo - UTFPR

Prof. Dr. Mário Sérgio de Souza Almeida - UFRB

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 05 de agosto de 2020.

Dedico este trabalho  
à minha mãe Iris,  
meu filho Pedro  
e minha esposa Nilda.

## **AGRADECIMENTOS**

Durante o período de desenvolvimento e elaboração do presente trabalho pude desfrutar da ajuda e companhia de pessoas que me auxiliaram durante esta etapa. Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade e disponibilidade de suas instalações e corpo técnico.

Agradeço ao PPGEC, por sempre estar pronto para o auxílio em questões relacionadas ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Agradeço ao professor Ronaldo Luis dos Santos Izzo, por ter me recebido no programa e ter me orientado durante todo o percurso.

Agradeço à professora Janine Nicolosi Correa, por ter me ajudado, em um momento que tinha dificuldades em transformar minha pesquisas em dissertação.

Agradeço ao colega Jair de Jesús Baldovino, que, sem sombra de dúvidas, sem seu auxílio, eu não teria finalizado este trabalho.

Agradeço aos colegas do LABGEO, que sempre auxiliaram, em qualquer dificuldade que surgia, Érico, Mirian, Vitor (companheiro de caronas), Aron e Roberto Pan.

E, finalmente, agradeço à minha mãe, Iris, por seu apoio incondicional, ao meu filho Pedro, pelas noites sem dormir e minha esposa Nilda, pelas palavras reconfortantes e o apoio em momentos difíceis.

O bom da ciência é que é verdade,  
acredite ou não. (TYSON, Neil DeGrasse)

## RESUMO

LIMA, Danilo Alves de Souza. **Efeito da Adição de Cimento Portland e RAP na Estabilização de Solo Argiloso da Formação Guabirotuba**: 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil ) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A crescente utilização de materiais alternativos na engenharia permite a utilização de materiais que não tenham destinação adequada e também diminuir os custos. O transporte rodoviário lidera a matriz de transporte brasileira, impactando em grande fluxo de cargas e pessoas pelo meio rodoviário, programas de manutenção rodoviária contam em seu escopo o serviço de fresagem da camada de rolamento, constituído de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), gerando grande quantidade de material fresado. Devido a poucos procedimentos rotineiros e projetos para sua utilização, o material fresado em alguns casos , não é utilizado, ficando depositado ao longo das margens das rodovias. Neste aspecto, o presente trabalho demonstra como alternativa ao problema atual a adição de material fresado em um dado solo sedimentar pertencente à Formação Guabirotuba, da região de Curitiba para sua utilização como camada de pavimento. Foram utilizados na mistura percentuais de 0%, 20%, 40% 50%, 60% e 80% de material fresado, com e sem cimento. Foi utilizado o percentual de 3% de cimento. Após a caracterização dos materiais utilizados na mistura, foram elaboradas as curvas de compactação de cada mistura, utilizando a energia intermediária. Os resultados de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral tiveram ganhos em seus valores até a quantidade de 60% de material fresado, aumentando em torno de 260 kPa com a adição de 60% de material fresado em relação aos valores do solo puro na resistência à compressão simples sem cimento e em torno de 770 kPa com a adição de 60% de material fresado e com adição de 3% de cimento aos 28 dias de cura. Nos ensaios de compressão à tração por compressão diametral sem cimento e com 60% de material fresado houve aumento em torno de 38 kPa e com cimento aos 28 dias de cura houve aumento em torno de 340 kPa, em relação ao solo puro. Os ensaios de ISC demonstraram ganhos com a adição de material fresado, com adição de 80% de material fresado o valor de ISC foi de 18,62% e com o solo puro o valor foi de 3,52%. Adicionando cimento e com adição de 80% de material fresado o valor foi de 113,43 kPa. O material fresado se mostrou benéfico também em relação à expansão das amostras, reduzindo de 1,19% de expansão no solo puro para 0,88% com a adição de 80% de material fresado, e com a adição de cimento o valor encontrado foi de 0,86%. As amostras sem cimento se mostraram aptas à utilização como subleito e reforço de subleito considerando expansão <1% e ISC > 2% e as amostras com cimento, à partir da adição de 40%, se mostram aptas para sua utilização como camada de sub-base, possuindo expansão <1% e ISC > 20%.

**Palavras-chave:** reciclagem. material fresado. pavimentação.

## ABSTRACT



LIMA, Danilo Alves de Souza. **Effect of Cement Portland and Reclaimed Asphalt Pavement Addition on the Stabilization of Clayey Soil of the Guabirotuba Formation**: 2020. 144 f. Thesis (Civil Engineering Master's Degree ) - Post - Graduate Program in Civil Engineering, University Federal of Technological - Paraná. Curitiba, 2020.

The increasing use of alternative materials in engineering allows the use of materials that do not have adequate destination and also reduce costs. Road transport leads the Brazilian transport matrix, impacting on a great flow of loads and people by road. Road maintenance programs have in their scope the service of milling the pavement layer instead of CBUQ, generating large amount of reclaimed asphalt pavement. Due to few routine procedures and projects for its use, the reclaimed asphalt pavement sometimes, is not used, being deposited along the edge of the road. In this aspect, the present work demonstrates as an alternative to the current problem the addition of reclaimed asphalt pavement in a sedimentary soil belonging to the Guabirotuba Formation, from the region of Curitiba for its use as a pavement layer. Percentages of 0%, 20%, 40%, 50%, 60% and 80% of reclaimed asphalt pavement, with and without cement, were used in the mixture. The 3% cement was used. After the characterization of the materials used in the mixture, the compaction curves of each mixture were elaborated, using the intermediate energy. The results of unconfined compressive strength and splitting tensile strength had increases in their values up to the amount of 60% of reclaimed asphalt pavement, increasing around 260 kPa with the addition of 60% of reclaimed asphalt pavement from the values of pure soil in the unconfined tensile strength without cement and around 770 kPa with the addition of 60% milled material and with the addition of 3% cement at 28 days curing. In the trials of splitting tensile strength without cement and with 60% of reclaimed asphalt pavement there was an increase around 38 kPa and with cement at 28 days curing there was an increase around 340 kPa of pure soil. The ISC tests had increases with the addition of reclaimed asphalt pavement, with the addition of 80% of reclaimed asphalt pavement the ISC value was 18.62% and with pure soil the value was 3.52%. Adding cement and with 80% addition of reclaimed asphalt pavement the value was 113.43 kPa. The RAP also proved beneficial with the expansion of the samples, reducing from 1.19% expansion in pure soil to 0.88% with the addition of 80% of RAP, and with the addition of cement the value found was 0.86%. The samples without cement are suitable for use as base and subgrade reinforcement considering expansion 1% and ISC > 2% and the samples with cement, from the addition of 40% are suitable for its use as sub-base layer, with expansion of 1% and ISC > 20%.

**Keywords:** recycling. RAP. paving.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Estradas romanas.....	21
Figura 2	– Participação de modais no mundo no transporte de cargas.....	24
Figura 3	– Seção transversal típica – pavimento flexível.....	29
Figura 4	– Seção transversal típica – pavimento rígido.....	31
Figura 5	– Esquema de produção de asfalto por um estágio.....	33
Figura 6	– Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação.	33
Figura 7	– Resolução 19/2005 – ANP.....	35
Figura 8	– Composição de misturas asfálticas.....	39
Figura 9	– Designação das camadas de solos, nas regiões tropicais.....	42
Figura 10	– Corte, contendo camada laterítica sobrejacente e camada saprolítica de origem.....	43
Figura 11	– Perfil de solo saprolítico.....	44
Figura 12	– Tabela de plasticidade.....	50
Figura 13	– Local de coleta do solo.....	66
Figura 14	– Local de coleta do material fresado.....	68
Figura 15	– Armazenamento material fresado.....	69
Figura 16	– Destorroamento do material fresado.....	71
Figura 17	– Equipamento utilizado no ensaio de teor de betume.....	71
Figura 18	– Ensaio de compactação.....	73
Figura 19	– Composições com cimento em câmara úmida por 72 horas.....	77
Figura 20	– Correção curva pressão x penetração.....	78
Figura 21	– Granulometria do solo.....	80
Figura 22	– Gráfico limite de liquidez.....	81

Figura 23	– Faixa “A” DNIT .....	82
Figura 24	– Faixa “B” DNIT.....	83
Figura 25	– Faixa “C” DNIT.....	83
Figura 26	– Faixa “D” DNIT.....	84
Figura 27	– Faixa “D” DNIT – material fresado sem CAP.....	84
Figura 28	– Curva de compactação do solo.....	85
Figura 29	– Curva de compactação com 80% de solo e 20% de pavimento asfáltico fresado.....	86
Figura 30	– Curva de compactação com 60% de solo e 40% de pavimento asfáltico fresado.....	86
Figura 31	– Curva de compactação com 50% de solo e 50% de pavimento asfáltico fresado.....	87
Figura 32	– Curva de compactação com 60% de solo e 40% de pavimento asfáltico fresado.....	87
Figura 33	– Curva de compactação com 20% de solo e 80% de pavimento asfáltico fresado .....	88
Figura 34	– Curva de compactação com 80% de solo e 20% de pavimento asfáltico fresado e adição de 3% de cimento.....	88
Figura 35	– Curva de compactação com 60% de solo e 40% de pavimento asfáltico fresado e adição de 3% de cimento.....	89
Figura 36	– Curva de compactação com 50% de solo e 50% de pavimento asfáltico fresado e adição de 3% de cimento.....	89
Figura 37	– Curva de compactação com 40% de solo e 60% de pavimento asfáltico fresado e adição de 3% de cimento.....	90
Figura 38	– Curva de compactação com 20% de solo e 80% de pavimento	

	asfáltico fresado e adição de 3% de cimento.....	90
Figura 39	– Comparativo massa específica seca em composições com e Sem cimento.....	91
Figura 40	– Comparativo umidade ótima em composições com e sem cimento.....	92
Figura 41	- Resistência à compressão simples (RCS) nas composições solo/ Fresado sem cimento.....	93
Figura 42	- Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 80% de solo, 20% de material fresado e adição de 3% de cimento..	94
Figura 43	- Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 60% de solo, 40% de material fresado e adição de 3% de cimento..	94
Figura 44	- Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 50% de solo, 50% de material fresado e adição de 3% de cimento..	95
Figura 45	- Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 60% de solo, 40% de material fresado e adição de 3% de cimento..	95
Figura 46	- Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 20% de solo, 80% de material fresado e adição de 3% de cimento..	96
Figura 47	– Corpo de prova após ensaio de RCS.....	97
Figura 48	– Comparativo RCS de acordo com os dias de cura.....	97
Figura 49	– Gráfico de distribuição de frequência.....	102
Figura 50	– Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.....	102
Figura 51	– Correlações parciais.....	103
Figura 52	– Corpo de prova após ensaio de RTCD.....	104
Figura 53	– RTCD nas composições sem cimento.....	105
Figura 54	- Gráfico de RTCD da composição 80% de solo, 20% de material	

	fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura....	105
Figura 55	- Gráfico de RTCD da composição 60% de solo, 40% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura....	106
Figura 56	- Gráfico de RTCD da composição 50% de solo, 50% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura....	106
Figura 57	- Gráfico de RTCD da composição 40% de solo, 60% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura....	107
Figura 58	- Gráfico de RTCD da composição 20% de solo, 80% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura....	107
Figura 59	- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	108
Figura 60	- Gráfico comparativo de valores de RTCD.....	109
Figura 61	- Gráfico distribuição de frequência.....	113
Figura 62	- Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.....	113
Figura 63	- Correlações parciais.....	114
Figura 64	- Pressão aplicada x penetração, composição 20% de solo, 80% de material fresado, com e sem adição de cimento.....	115
Figura 65	- Pressão aplicada x penetração, composição 40% de solo, 60% de material fresado, com e sem adição de cimento.....	116
Figura 66	- Pressão aplicada x penetração, composição 50% de solo, 50% de material fresado, com e sem adição de cimento.....	116
Figura 67	- Pressão aplicada x penetração, composição 60% de solo, 40% de material fresado, com e sem adição de cimento.....	117
Figura 68	- Pressão aplicada x penetração, composição 80% de solo, 20% de material fresado, com e sem adição de cimento.....	117
Figura 69	- Gráfico ISC x composições solo/material fresado sem cimento.....	118

Figura 70	– Gráfico ISC x composições solo/material fresado com cimento.....	118
Figura 71	– Gráfico ISC x composições com e sem cimento.....	119
Figura 72	– Ensaio Índice de Suporte Califórnia.....	120
Figura 73	– Gráfico distribuição de frequência.....	125
Figura 74	– Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.....	125
Figura 75	– Correlações parciais.....	126
Figura 76	– Expansão amostras sem cimento.....	127
Figura 77	– Expansão amostras com cimento.....	128
Figura 78	– Comparativo valores de expansão nas amostras com e sem cimento.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação ANP de emulsões comercializadas no Brasil.....	37
Tabela 2	– Comparativo classificação de acordo com tamanho dos grãos....	40
Tabela 3	– Classificação TRB.....	46
Tabela 4	– Materiais granulares – classificação TRB.....	47
Tabela 5	– Materiais silto-argilosos – classificação TRB.....	47
Tabela 6	– Classificação solos de graduação grossa – SUCS.....	48
Tabela 7	– Classificação solos de graduação fina – SUCS.....	49
Tabela 8	– Classificação agregados – SUCS.....	50
Tabela 9	– Terminologia sistema de classificação SUCS.....	51
Tabela 10	– Símbolos sistema de classificação SUCS.....	51
Tabela 11	– Ensaio mecânicos do cimento utilizado.....	67
Tabela 12	– Ensaio físicos do cimento utilizado.....	67
Tabela 13	– Ensaio químicos do cimento utilizado.....	68
Tabela 14	– Ensaio de caracterização de solo.....	69
Tabela 15	– Caracterização material fresado.....	70
Tabela 16	– Composições ensaio de compactação.....	71
Tabela 17	– Composições resistência à compressão simples (RCS).....	72
Tabela 18	– Limite de plasticidade.....	80
Tabela 19	– Faixa granulométrica DNIT.....	82
Tabela 20	– Resultados massa específica seca e umidade ótimas das misturas.....	91
Tabela 21	– Resultados resistência à compressão simples (KPa).....	98
Tabela 22	– Análise de variância RCS para composições sem cimento.....	100

Tabela 23	– Análise de variância RCS para composições com cimento.....	100
Tabela 24	– Coeficientes modelo estatístico.....	101
Tabela 25	– Resíduos.....	101
Tabela 26	– Resultados resistência à tração por compressão diametral (kPa)	109
Tabela 27	– Análise de variância RTCD para composições sem cimento.....	110
Tabela 28	– Análise de variância RTCD para composições com cimento.....	111
Tabela 29	– Coeficientes modelo estatístico.....	112
Tabela 30	– Resíduos.....	112
Tabela 31	– Resultados ISC com e sem cimento.....	120
Tabela 32	– Parâmetros manual de pavimentação (DNIT, 2006).....	121
Tabela 33	– Análise de variância ISC para composições sem cimento.....	123
Tabela 34	– Análise de variância ISC para composições com cimento.....	123
Tabela 35	– Coeficientes modelo estatístico.....	124
Tabela 36	– Resíduos.....	124
Tabela 37	– Valores de expansão das amostras.....	129



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAN	Cimento Asfáltico Natural
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
IP	Índice de Plasticidade
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
RAP	Pavimento asfáltico fresado
$q_u$	Resistência à compressão simples
$q_t$	Resistência à compressão diametral
RCS	Resistência à compressão simples
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
w <sub>ót</sub>	Umidade ótima
$\gamma_d$ máx	Peso específico seco máximo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	21
1.2	OBJETIVOS.....	25
1.2.1	Objetivo Geral.....	25
1.2.2	Objetivos Específicos.....	25
1.3	JUSTIFICATIVA.....	25
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>28</b>
2.1	PAVIMENTAÇÃO.....	28
2.1.1	Pavimentos Flexíveis.....	29
2.1.2	Pavimentos Rígidos.....	30
2.1.3	Pavimentos Semi-rígidos.....	31
2.2	MATERIAIS BETUMINOSOS.....	31
2.2.1	Processos de Refino.....	32
2.2.2	Ligantes Asfálticos.....	34
2.2.2.1	Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	34
2.2.2.2	Asfalto diluído.....	35
2.2.2.3	Emulsão asfáltica.....	36
2.2.2.4	Asfaltos modificados.....	37
2.3	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	38
2.4	SOLOS.....	39
2.4.1	Solos Tropicais.....	42
2.4.1.1	Solos Lateríticos.....	42

2.4.1.2	Solos Saprolíticos.....	43
2.4.2	Formação Guabirota.....	44
2.5	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	45
2.5.1	Classificação TRB.....	45
2.5.2	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).....	48
2.6	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS.....	53
2.6.1	Estabilização Química.....	55
2.6.2	Estabilização Granulométrica.....	56
2.6.3	Estabilização Mecânica.....	56
2.7	MATERIAL FRESADO.....	57
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	65
3.1.1	Parâmetros.....	65
3.2	MATERIAIS.....	66
3.2.1	Solo.....	66
3.2.2	Cimento.....	67
3.2.3	Material Fresado.....	68
3.3	MÉTODOS DE ENSAIO.....	69
3.3.1	Solo.....	69
3.3.2	Material Fresado.....	70
3.4	COMPACTAÇÃO.....	72
3.5	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	73
3.5.1	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS).....	73
3.5.2	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	76
3.6	ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) E	

	EXPANSÃO.....	76
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	79
3.7.1	Análise Estatística dos Resultados pelo Método ANOVA.....	79
3.7.2	Equação Geral do Modelo.....	79
4	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	80
4.1.1	Classificação do Solo.....	81
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO.....	82
4.2.1	Granulometria.....	82
4.2.2	Teor de Betume.....	85
4.3	COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS.....	85
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	92
4.4.1	Influência da Adição de Material Fresado .....	93
4.4.2	Influência do Tempo de Cura às Amostras com Cimento.....	94
4.4.3	Influência da Adição de Cimento .....	97
4.4.4	Análise Estatística dos Resultados de Resistência à Compressão Simples pelo Método ANOVA.....	99
4.4.5	Estudo de Regressão nos Valores de Resistência à Compressão Simples.....	100
4.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	104
4.5.1	Influência da Adição de Material Fresado nas Propriedades Mecânicas das Amostras.....	104
4.5.2	Influência do Tempo de Cura nas Propriedades Mecânicas das Amostras com Cimento.....	105
4.5.3	Influência da Adição de Cimento nas Propriedades Mecânicas das	109

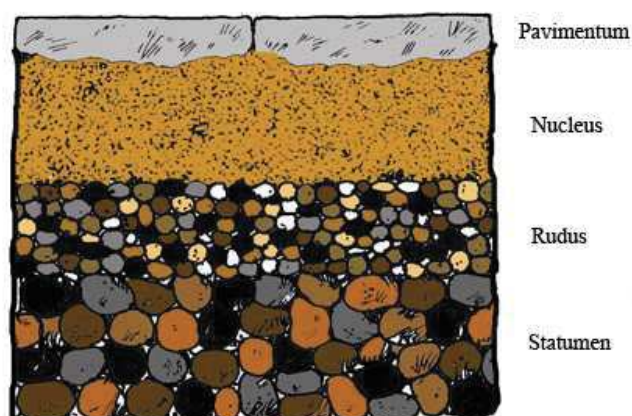
	Amostras.....	108
4.5.4	Análise Estatística dos Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral pelo Método ANOVA.....	110
4.5.5	Estudo de Regressão nos Valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	111
4.6	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	115
4.6.1	Análise Estatística dos Resultados de Índice de Suporte Califórnia pelo Método ANOVA.....	122
4.6.2	Estudo de Regressão nos Valores de Índice de Suporte Califórnia.....	123
4.6.3	Expansão.....	127
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.</b>	<b>132</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	133
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	135
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>136</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A arte de pavimentar caminhos, tão antiga quanto a humanidade, começou no revestimento de vias com pedras, técnica adotada pelos romanos. Nabucodonosor, rei da Babilônia, pavimentava suas estradas e Dario, rei da Pérsia, estabelecia suas ligações interurbanas. A Via Ápia foi construída por Ápius Cláudio no ano 312 a.C.. As camadas usadas nestes primeiros pavimentos eram o *statumen* ou a blocagem atual; o *nucleus*, o *rudus* e o *summum dorsum* correspondem à sub-base, base e revestimento, conforme figura 1.

Figura 1. Estradas romanas



Fonte: Hamey et al (1990)

O transporte terrestre é o meio mais antigo do mundo, o qual possibilitou o homem expandir seus territórios, com a capilaridade que a construção das vias possibilita é possível interligar regiões e direcionar ofertas e demandas, aumentando o comércio entre regiões.

Os desafios atuais ainda são interligar regiões com o menor custo possível e que dentro do horizonte de projeto, resista às solicitações impostas por seus usuários, além de preferencialmente contar com a utilização de material local.

A utilização de materiais que não são considerados nobres, mas que com as técnicas corretas da engenharia possam atender especificações técnicas utilizadas

no âmbito da engenharia rodoviária, se torna uma ferramenta para a diminuição de custos decorrente da implantação e manutenção da via.

De acordo com o anuário da Confederação Nacional do Transporte (CNT 2019), o Brasil, levando-se em conta o ano de 2018, possuía 1,7 milhões de quilômetros de rodovias, sendo 120 mil quilômetros de rodovias federais e 1,6 milhões de rodovias estaduais, transitórias e municipais porém, 157 mil de quilômetros são consideradas como planejadas, ou seja, ainda não estão prontas para a sua utilização.

Do total de 1,7 milhões de quilômetros de rodovias, cerca de 78% delas são não pavimentadas, enquanto apenas 22% são pavimentadas. Quando se considera apenas rodovias federais, cerca de 9% de rodovias são não pavimentadas, desconsiderando os 44 mil quilômetros de rodovias planejadas federais o percentual de rodovias não pavimentadas se torna 14,17% (CNT 2019).

Ainda considerando os dados (CNT 2019), onde faz uma avaliação das rodovias, podendo ser ótimo, bom, regular e ruim, nos quesitos pavimento, sinalização e geometria. Quando considera todos os itens, verifica-se que 9% das rodovias estão em condições ótimas, enquanto 31% são consideradas péssimas, verificando o item pavimento, 40% do pavimento é considerado ótimo, e 3% é considerado péssimo.

Os programas de manutenção sob a tutela do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) são compostos por Conserva (rodovia pavimentada e rodovia não pavimentada), e o Programa CREMA (Contrato de Restauração e Manutenção).

Conforme o Manual de Conservação Rodoviária DNIT (2005), a conserva compreende o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência, realizadas com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário e das instalações fixas, dentro de padrões estabelecidos.

Na Conservação Corretiva Rotineira são serviços que tem o intuito de gerar segurança e conforto na rodovia, são serviços básicos que não necessitam de uma mobilização maior, ou que tenham atividades mais complexas (Manual de Conservação Rodoviária DNIT, 2005).

Na Conservação Preventiva Periódica, pode-se incluir serviços mais complexos, que se propõe a evitar piora nos componentes da rodovia, os quais,

caso não sejam remediados, podem demandar em um futuro próximo, disponibilidade orçamentária maior do que seria necessário caso fosse feito os serviços preventivos (Manual de Conservação Rodoviária DNIT, 2005).

Na Conservação de Emergência, como o próprio nome sugere, são ações abruptas que devem ser tomadas, como resposta a problemas causados por ações não previstas, que causem o fechamento da via (Manual de Conservação Rodoviária DNIT, 2005) .

O CREMA se trata de um programa mais elaborado e conseqüentemente mais oneroso, onde o contrato não é apenas composto pelos serviços, mas também no âmbito do gerenciamento, neste modelo ocorre a união dos serviços de Conservação, juntamente com os serviços de Restauração da Rodovia.

O Brasil tem um grande desafio frente à infraestrutura rodoviária, o que impacta diretamente sua competitividade frente a produtos similares de outras nações. Alternativas para melhorar a condição de seus pavimentos se mostra imprescindível, tendo impacto direto na sua economia, normalmente citado como “custo Brasil”.

O “custo Brasil” engloba uma série de fatores que aumentam as despesas que incidem sobre a produção, desde encargos sociais e tributos até deficiências na infraestrutura para escoamento de seus produtos.

Estudo divulgado em 2019 pela Secretaria Especial de Produtividade, Emprego e Competitividade, do Ministério da Economia, em parceria com o Movimento Brasil Competitivo (MBC) estimou que o tamanho do “custo Brasil” por ano equivale a 22% do Produto Interno Bruto, em torno de R\$ 1,5 trilhão.

A utilização de material fresado misturado ao solo local se mostra de grande valia em uma restauração e/ou manutenção de rodovia, pois o pavimento danificado quando fresado, em alguns casos é utilizado (in natura) somente como acesso a vilarejos localizados às margens da rodovia, ou doados a entes públicos para utilização em vias não pavimentadas, tendo eficácia apenas por algum tempo.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) indica os benefícios que a reciclagem do pavimento pode oferecer, como a conservação dos agregados e a preservação do meio ambiente pois, a reutilização dos agregados propicia uma diminuição na demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte.

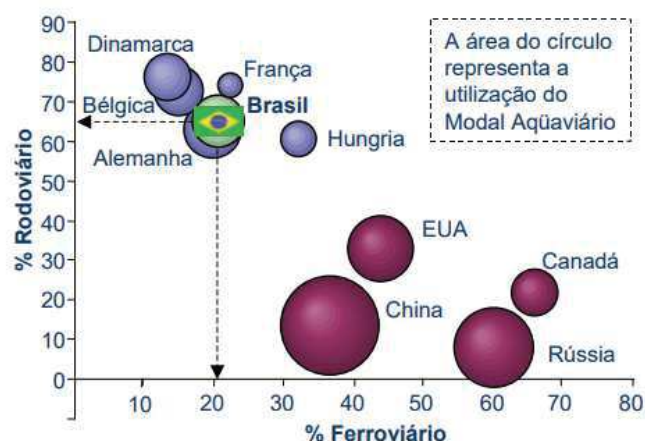


Quando se analisa a matriz de transportes de cargas no Brasil conforme Boletim Estatístico CNT (2019), fica evidente a importância do modal rodoviário, onde 61,1% das cargas são transportadas por este modal, enquanto o modal ferroviário é responsável por 20,7% e o modal aquaviário por 13,6.

Conforme estudo conjunto entre CNT e o Centro de Estudos em Logística (CEL), do Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (COPPEAD – UFRJ), é possível verificar uma peculiaridade da matriz de transportes brasileira, considerando apenas os modais ferroviário, aquaviário e rodoviário.

Países com grandes extensões territoriais como EUA, Canadá, China e Rússia, tem suas matrizes de transporte predominantemente dominadas pelo modal ferroviário, entretanto, o Brasil, que possui grande extensão territorial, se comporta como países de pequena extensão territorial, tendo o modal rodoviário o responsável pela maior quantidade de transporte de cargas, conforme Figura 2.

**Figura 1. Participação de modais no mundo no transporte de cargas**



**Fonte: COPPEAD – CNT. Transporte de cargas no Brasil**

A fresagem da camada de rolamento em rodovias para substituição por nova camada de rolamento é um serviço rotineiro, o qual gera grandes quantidades de resíduo de pavimento, o material fresado.

Neste estudo se propõe verificar os efeitos da adição de material fresado, e em conjunto com cimento, em um solo da formação Guabirotuba.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é quantificar o efeito da adição de cimento e material fresado na resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e no Índice de Suporte Califórnia de um solo argiloso da Formação geológica Guabirota.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Obter os parâmetros do solo com relação a sua caracterização, tais como granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e densidade real dos grãos.
- Comparar e verificar os parâmetros (resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diâmetral, Índice de Suporte Califórnia e expansão) encontrados em diferentes dosagens de material decorrente de fresagem de pavimento de CBUQ.
- Quantificar a melhoria, mantendo as mesmas dosagens de material fresado, com a adição de cimento.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Devido aos custos de transporte e aquisição de materiais necessários às obras rodoviárias terem impacto significativo quando se observa a curva “ABC” de um empreendimento rodoviário, a possibilidade de utilização de materiais alternativos, que consigam atender as especificações técnicas e, concomitantemente, reduza os valores necessários para a aquisição e transporte, torna-se de grande valia.

Com a possibilidade de melhorar a característica de um dado solo, como sua resistência à compressão simples e os valores de índice de Suporte Califórnia, utilizando material fresado, tornando possível sua utilização nas camadas de reforço

de sub-base, sub-base e base de um pavimento, é possível reduzir o custo do empreendimento, e também dar destinação ao material fresado, que algumas vezes acaba sendo sub-utilizado.

Alternativas que podem diminuir o impacto de obras rodoviárias ao meio ambiente são bem-vindas. De acordo com Magalhães *et al* (2011), empreendimentos rodoviários criam barreiras de regeneração natural para a área de entorno do projeto rodoviário.

Diante das inúmeras pesquisas acerca da utilização de material fresado no intuito de melhorar as características do solo local, não foi encontrada pesquisas utilizando solo proveniente da Formação Guabirotuba, deste modo mostra-se uma lacuna no referido assunto a falta de pesquisas com a utilização de material local da região de Curitiba.

Tendo em vista o que foi exposto, e a importância de ações que visam construções de pavimentos asfálticos com o menor impacto possível sobre o meio, se justifica esta pesquisa.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.

Esta dissertação está dividida em capítulos:

O Capítulo 1 mostra uma introdução, sendo constituído pela contextualização, que trata de um panorama geral sobre a situação das rodovias federais e sua manutenção; do Objetivo Geral e dos Objetivos Específicos, que irá auxiliar na elaboração deste trabalho; da Justificativa, o qual demonstra sucintamente a importância do estudo em questão; e da Organização da Dissertação, demonstrando como será a organização do trabalho.

O Capítulo 2 trata da Revisão Bibliográfica, aonde irá abordar estudos acerca de estabilização de solos, o cimento, utilização de material fresado para estabilização de solos e assuntos inerentes ao pesquisado.

O Capítulo 3 são apresentados os Materiais e Métodos, onde é abordado a metodologia utilizada, os materiais e equipamentos utilizados e quais métodos utilizados.

O Capítulo 4 contém a Apresentação e Análise dos Resultados, composta pela exposição dos resultados acerca do solo natural, da combinação solo natural

com pavimento, e da combinação solo natural, material fresado e cimento, com uma breve análise sobre as composições das misturas e seus resultados.

O Capítulo 5 aborda as conclusões do estudo e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAVIMENTAÇÃO

A NBR 7207 (ABNT, 1982), que trata de terminologias, define pavimento como sendo uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, economica e simultaneamente, em seu conjunto a:

- 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 nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O pavimento pode ser classificado como sendo flexível ou rígido, de acordo com Medina e Motta (2015) é possível defini-los como:

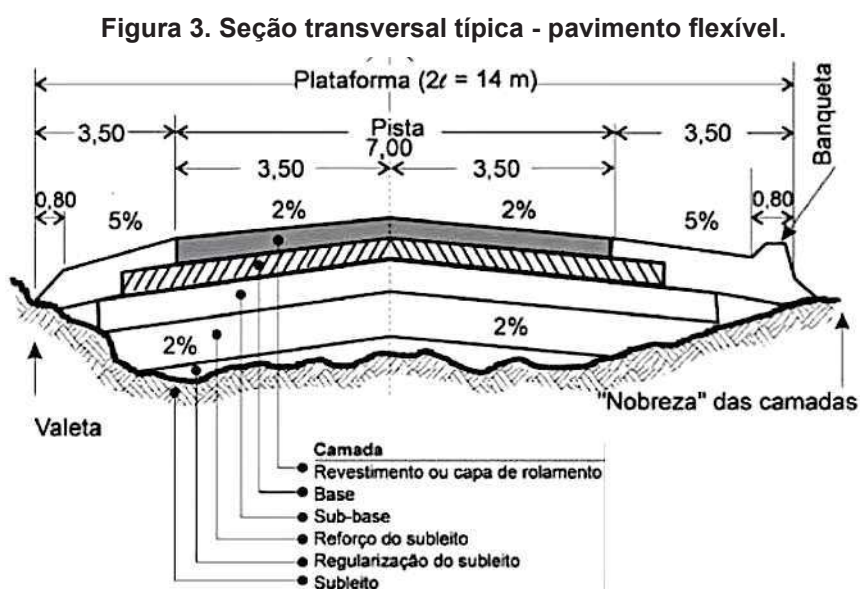
- *Pavimento flexível*: constituído por um revestimento asfáltico sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente;
- *Pavimento rígido*: constituído por placas de concreto de cimento Portland (raramente é armado) assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.
- *Subleito*: é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- *Sub-base*: é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
- *Base*: é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, sobre o qual se constrói um revestimento;
- *Revestimento*: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina, econômica e simultaneamente, a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança e a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

### 2.1.1 Pavimentos Flexíveis

São aqueles constituídos por um revestimento asfáltico sobre uma base granular ou de solo estabilizada granulometricamente. Sua ruptura ocorre essencialmente por afundamento resultante das deformações permanentes (MEDINA e MOTTA, 2015).

As deformações no pavimento flexível, até certo limite, não levam ao rompimento devido à menor condição de distribuir pressões ao subleito, quando se compara ao pavimento rígido, deve-se tomar precauções com materiais que serão utilizados nas camadas de sub-base e reforço do subleito (SENÇO, 2007).

Senço (2007) explica que os pavimentos flexíveis são dimensionados para compressão e à tração por flexão, os quais são provocados pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, causando deformações permanentes e rompimento por fadiga.



Fonte: Senço (2007).

A NBR 7207/82 define as camadas de um pavimento flexível como:

- *Subleito*: é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- *Sub-base*: camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;

- *Base*: camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, sobre a qual se constrói um revestimento;
- *Revestimento*: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina, econômica e simultaneamente a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

### 2.1.2 Pavimentos Rígidos

São pavimentos pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento, rompem por tração na flexão quando sujeitos a deformações.

Possui maior condição de distribuir as pressões ao subleito quando comparado aos pavimentos flexíveis.

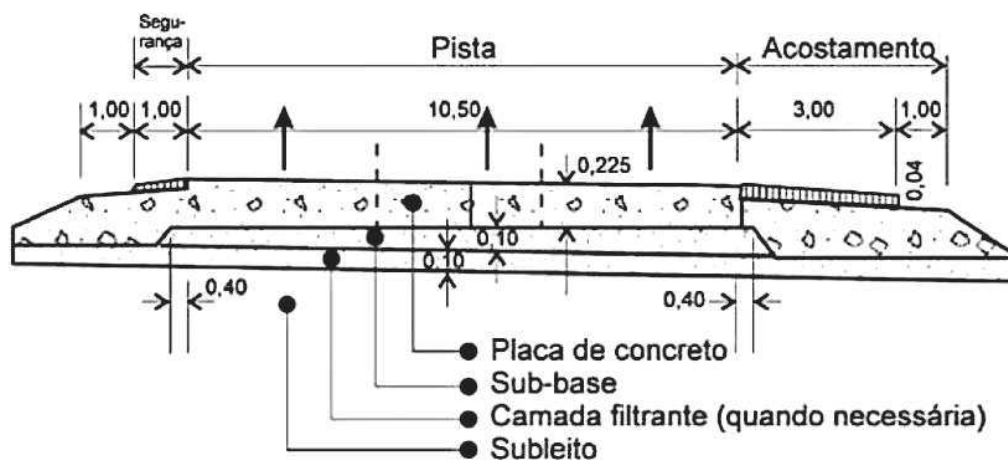
As deformações impostas à camada superficial são pequenas, a não ser na zona de retração, o que permite o uso de materiais pouco deformáveis, mas com boa resistência ao desgaste (SENÇO, 2007).

São constituídos por placas de concreto de cimento Portland, raramente sendo armado. Assentados sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária, o tipo de ruptura mais comum é o trincamento por repetição de deformações elásticas (MEDINA e MOTTA, 2015).

Se caracteriza por ter na resistência à tração o fator preponderante para o dimensionamento. Tem sensível rigidez à flexão não podendo sofrer deformações sem se romper, trabalhando, assim, à tração. Tais pavimentos possuem espessuras menores que os pavimentos flexíveis, para as mesmas cargas aplicadas, estima-se em 50% a redução da espessura de um pavimento rígido (SENÇO, 2007)

Na Figura 2 é possível verificar a estrutura de um pavimento rígido típico, quando comparado a uma seção típica de um pavimento flexível, como o constante na Figura 1, observa-se a menor quantidade de camadas constituintes e uma espessura final do pavimento menor.

Figura 4. Seção transversal típica - pavimento rígido.



Fonte: Senço (2007).

### 2.1.3 Pavimentos Semi-rígidos

É caracterizada por uma base cimentada quimicamente revestida por uma camada asfáltica (PINTO, 2002).

Com a crescente utilização de base de BGTC (brita graduada tratada com cimento) e solo-brita-cimento foram verificados os benefícios de se utilizar uma base de maior rigidez e uma camada de rolamento menos onerosa, quando se compara ao pavimento rígido.

Entretanto, é demandado bastante cuidado nesta solução, por se tratar de material cimentante, o processo de cura da camada solicita cuidado e atenção pois, pode acarretar em trincas de retração, os quais poderão refletir à camada de rolamento, criando vazios onde permitirá a entrada de águas de chuva, dando início a degradação do pavimento.

## 2.2 MATERIAIS BETUMINOSOS

Conforme Pinto *et al* (2015), os materiais betuminosos são, por definição, misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono, com propriedades de aglutinação. Pode-se separar os materiais betuminosos em dois grandes grupos,



os *asfaltos* e os *alcatrões*. Ao analisar os asfaltos, este pode ser encontrado em estado natural ou obtido do refino do petróleo.

- *Asfalto natural*: ocorre quando o asfalto surge na superfície e sofre uma destilação natural pela ação do vento e do sol, o qual retiram os gases e óleos leves, restando um resíduo muito duro, podendo ocorrer também em forma de rocha, que seriam rochas porosas que se tornam naturalmente impregnadas de asfalto como o arenito e o xisto;
- *Asfalto de petróleo*: sendo obtido através de processos de destilação do petróleo. O resíduo obtido é o cimento asfáltico de petróleo (CAP), o qual é utilizado em obras de pavimentação.

Pinto *et al* (2015) define *betume*, *asfalto* e *alcatrão* como:

- *Betume*: seria a mistura de hidrocarbonetos pesados, obtidos em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, possui poder aglutinante e impermeabilizante, sendo completamente solúvel no bissulfeto de carbono, seu poder impermeabilizante o torna útil na construção civil, sendo seu emprego em fundações bastante difundido e corriqueiro.
- *Asfalto*: material com poder aglutinante, mas que possui consistência variável, se liquefaz gradualmente quando aquecido, seu elemento predominante é o betume, conforme já citado, pode ser encontrado naturalmente ou através do refino o petróleo.
- *Alcatrão*: material obtido quando matérias orgânicas naturais, como madeira e bulha, são carbonizadas ou destiladas destrutivamente na ausência do ar.

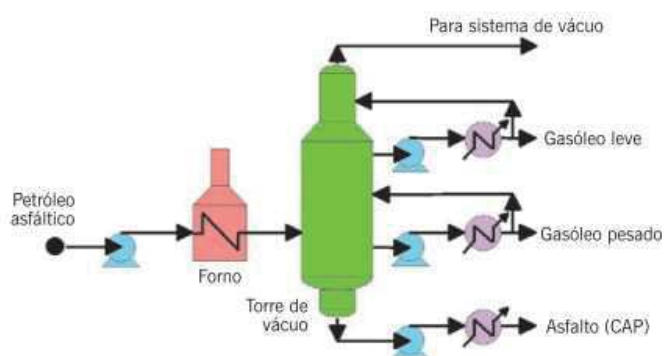
### 2.2.1 Processos de Refino.

Bernucci *et al* (2008) expõe que quase todo o asfalto em uso hoje é obtido através do processamento de petróleo bruto em plantas denominadas refinarias, o refino seria o conjunto de processos de refino de petróleo que produzem os ligantes asfálticos, sendo o mais antigo a destilação direta, que ocorre por um ou dois estágios. Cita também que quando o petróleo é de base asfáltica, designado por petróleo pesado, ou seja, quando tem muito asfalto, em comparação com outros componentes como o petróleo venezuelano, é necessário apenas um estágio de

destilação a vácuo, o qual resulta em um CAP de consistência adequada para a utilização na pavimentação.

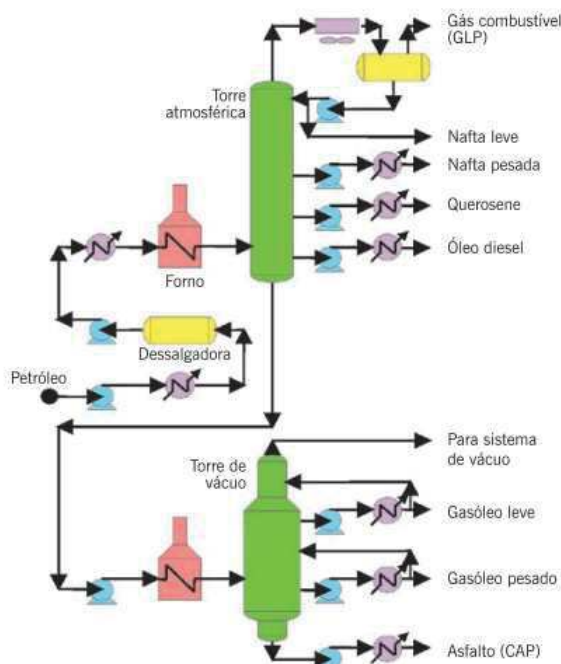
Salienta ainda que, quando o petróleo não é de base asfáltica, conhecidos como leves, tais como os encontrados no Kuwait, são necessários dois estágios de destilação, atmosférica e a vácuo, os petróleos também podem ser intermediários, os quais são processados também em dois estágios, resultando em resíduo de vácuo, cujas condições de pressão e temperatura definem o atendimento às especificações para uso em pavimentação.

**Figura 5. Esquema de produção de asfalto por um estágio**



**Fonte: Tonial e Bastos (1995)**

**Figura 6. Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação**



**Fonte: Tonial e Bastos (1995)**

## 2.2.2 Ligantes Asfálticos

### 2.2.2.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP é o asfalto obtido especialmente com características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser resultado de destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. Quando é derivado do refino recebe a nomenclatura CAP, e quando é obtido naturalmente recebe a nomenclatura CAN (Cimento Asfáltico Natural) (PINTO *et al*, 2015).

Para sua correta classificação, utiliza-se o ensaio de determinação da penetração ME 155 (DNIT, 2010). O ensaio se baseia na profundidade em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico por 5 segundos à temperatura de 25°C.

São feitas três medidas individuais e calculada a média das três medidas, a consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha, hoje os CAP's comercializados no Brasil são o 30/45, 50/70, 85/100 e 150/200, tal nomenclatura se refere a faixa do ensaio de penetração, onde os limites para o ensaio de penetração do CAP 30/45 seriam o limite inferior 30 (0,1 mm) e o limite superior 45 (0,1 mm), sendo que quanto menor o resultado do ensaio, maior é a consistência do CAP.

A Agência Nacional de Petróleo (ANP), conforme Resolução nº 19/2005, especificou as características necessárias para cada tipo de CAP comercializado no Brasil, de acordo com a Figura 7.

Figura 7. Resolução nº 19/2005

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950	E 102
- a 135°C, mín.		192	141	110	80		
- a 150°C, mín.		90	50	43	36		
- a 177°C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60		
OU						NBR 15184	D 4402
Viscosidade Brookfield	cP						
- a 135°C, SP 21... 20 rpm, mín		374	274	214	155		
- a 150°C, SP 21, mín		203	112	97	81		
- a 177°C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 mín.							D 2872
Varição em massa, máx. (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	-	
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Resolução nº 19 (ANP, 2005)

### 2.2.2.2 Asfalto diluído

Conforme Bernucci *et al* (2008), os asfáltos diluídos são produzidos pela adição de diluente volátil, obtido do próprio petróleo, que varia conforme o tempo necessário para a perda desse componente adicionado restando o asfalto residual após a aplicação. A evaporação total do solvente após a aplicação do asfalto diluído deixa como resíduo o CAP, que desenvolve, então, as propriedades necessárias do cimento, a evaporação, no caso, é chamada de cura do asfalto diluído (PINTO *et al*, 2015).

São encontrados três tipos de solventes, e, dependendo do solvente, é determinado o seu uso e o tempo de cura:

- *Gasolina*: cura rápida, normalmente tem sua utilização como matéria prima para produção de determinadas emulsões asfálticas, sua nomenclatura é CR (cura rápida).

- *Querosene*: utilizado para a impermeabilização de camada de base e/ou sub-base, demanda um período maior de cura, sendo necessário a análise de quando aplicar, devido fatores meteorológicos, não deve sofrer ação de chuvas durante seu período de cura, é evitado seu uso em camadas cimentantes, devido às reações do cimento com o querosen, sua nomenclatura é CM (cura média).
- *Óleo diesel*: possui cura lenta, não é comumente empregado no Brasil, sua nomenclatura é CL (cura lenta).

### 2.2.2.3 Emulsão asfáltica.

A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou, de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com a ajuda de um agente emulsificante (PINTO *et al*, 2015).

Sendo definida também como a dispersão de pequenas partículas de um líquido em outro líquido, ou seja, dois líquidos não miscíveis onde geralmente a fase contínua é a água (ABEDA, 2010).

Os agentes emulsificantes utilizados na fabricação das emulsões são divididos em dois grandes grupos (PINTO *et al*, 2015):

- *Emulsificantes Aniônicos*: são sabões nos quais um ânion orgânico está associado a um álcali, como o estearato de sódio, é solúvel no betume, conferindo aos glóbulos de betume na emulsão uma carga elétrica negativa, mantendo-os separados.
- *Emulsificantes Catiônicos*: geralmente sais de amina, conferem aos glóbulos de betume uma carga elétrica positiva, o rompimento (separação material betuminoso – água) ocorrem pela reação química entre o emulsificante e o agrado e por evaporação da água.

Os emulsificantes são estruturas orgânicas que apresentam uma parte polar que possui afinidade com os hidrocarbonetos do CAP e uma parte apolar com afinidade com as moléculas da água. O uso de emulsificante em suspensões asfálticas tem como objetivo dar estabilidade à emulsão, diminuir a tensão superficial e de revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora, mantendo-os dispersos na emulsão (CERATTI *et al*, 2015).

No Brasil, as emulsões asfálticas empregadas para pavimentação são, predominantemente, do tipo catiônicas, devido ao melhor desempenho no que se refere à compatibilidade com a maioria dos agregados minerais (ABEDA, 2010).

A ANP classifica as emulsões comercializadas no Brasil conforme Tabela 2.

**Tabela 1. Classificação ANP de emulsões comercializadas no Brasil**

Sigla	Características
<b>RR</b>	
<b>RM</b>	Indica a velocidade da separação da fase do CAP da fase água, sendo de rompimento rápido, médio, lento ou controlado
<b>RL</b>	
<b>RC</b>	
<b>EAI</b>	Emulsão asfáltica para serviço de imprimação
<b>LA</b>	Emulsão asfáltica de ruptura lenta catiônica e de carga neutra, para serviço de lama asfáltica
<b>LAN</b>	
<b>LARC</b>	Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada para serviço de lama asfáltica
<b>1 ou 2</b>	Relacionado a diferentes teores de resíduo seco da emulsão, seguidos da letra <b>C</b> para indicar que é de origem catiônica

**Fonte: Autor (2020)**

#### 2.2.2.4 Asfaltos modificados

Conforme Ceratti *et al* (2015), para obtenção de melhores propriedades do CAP usualmente são adicionados certos agentes modificadores que possam conferir melhor desempenho, quando se adiciona um aditivo no CAP diz-se que o mesmo é um asfalto modificado.

- *Asfalto modificado por polímero*: geralmente o percentual de polímero adicionado fica entre 3% e 8%, utilizados para minimizar deformações permanentes e trincamento causado por fadiga ou por efeito de baixa temperatura ambiente. Os principais tipos de polímero utilizados são o SBS (estireno – butadieno – estireno), SEBS (estireno - etileno – co – butileno - estireno), EVA (etilenovinilacetato) e Elvaloy (etilenoglicidilacrilato).
- *Asfalto de baixa penetração*: são ligantes asfálticos de baixa penetração, utilizados em camadas asfálticas de módulo elevado, os ligantes indicados para este intuito são os asfaltos duros, com penetração inferior a 30 décimos de milímetros.

- *CAP TLA*: asfalto natural com presença de alguns materiais como cinzas e areia, adequado para concretos asfálticos usados em revestimentos de vias de moderado e alto tráfego. Sua adição ao CAP convencional reduz a suscetibilidade térmica, melhora a resistência à ação de solvente tais como o diesel, e eleva a resistência à deformação permanente quando utilizados em revestimentos até a temperatura de 70°C.

### 2.3 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Os revestimentos asfálticos, que são basicamente uma mistura de agregado com ligante asfáltico, podem, dependendo do tipo de necessidade, e com a correta manipulação de seus componentes, gerar diversos tipos de camadas de rolamento.

Em relação à graduação dos agregados, conforme exemplifica Ceratti *et al* (2015), as que mais se destacam seriam:

- *Mistura asfáltica de graduação densa e bem graduada*: por ter uma composição mais homogênea de tamanhos de partículas de agregados, as partículas menores preenchem os vazios fazendo um travamento da mistura, gerando uma estrutura de elevada resistência ao cisalhamento devido ao preenchimento dos vazios, é necessário um teor de ligante asfáltico mais baixo, normalmente entre 4% e 6%,
- *Misturas asfálticas de graduação descontínua*: possui uma grande quantidade de agregados de dimensão similar, com um alto índice de vazios, normalmente o teor de ligante necessário para a mistura excede 6%,
- *Misturas asfálticas de graduação aberta*: muito parecidas com as misturas asfálticas de graduação descontínua, mas não possuem agregados miúdos suficientes para preencher os vazios entre os agregados graúdos, acabam tendo uma característica de permeabilidade, sendo utilizada quando tal característica é desejada em projeto.

Na Figura 5 são apresentadas imagens microscópicas de misturas asfálticas de granulometria densa, com granulometria descontínua e densa e de granulometria aberta.



**Figura 8. Composição de misturas asfálticas**



Fonte: Ceratti *et al* (2015)

## 2.4 SOLOS

Conforme Pinto (2002), todos os solos se originam da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre, tal decomposição ocorre por causa dos agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas na rocha, com isto há a penetração de água que acaba atacando quimicamente os minerais. Quando ocorre o congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, há a presença de tensões elevadas que acarretam maior fragmentação nos blocos.

O autor ainda destaca que a presença da fauna e da flora promove o ataque químico, através de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, etc.

Ferreira *et al* (2005) explicam que o solo, do ponto de vista da engenharia, pode ser aplicado de várias maneiras, podendo ser como material de construção, caso dos pavimentos; como base de sustentação, podendo citar as fundações, devendo o solo apresentar certas propriedades físicas e mecânicas relacionadas à estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade.

Braja Das (2005) salienta que, em geral, os solos são formados a partir do intemperismo das rochas, que as propriedades físicas do solo são determinadas, em princípio, pelos minerais que constituem suas partículas, ou seja, de quais rochas se originam. Tais grãos minerais são resultados da erosão das rochas, e que as propriedades físicas do solo são determinadas por tamanho, formato e composição química destes grãos.

As rochas que dão origem ao solo podem ser basicamente três tipos: ígneas, sedimentares e metamórficas.



- **Ígneas:** são originárias da solidificação do magma. Quando ocorre a saída do magma através de erupção fissural ou erupção vulcânica, tal material acaba tendo contato com a superfície da Terra, e uma parte deste material acaba resfriando. Quando o magma acaba se resfriando abaixo da superfície, este se dá origem às rochas ígneas intrusivas, conhecidas como rochas plutônicas. São exemplos de rochas ígneas o granito e o basalto.

- **Sedimentar:** quando há depósitos de materiais formados pelo intemperismo e estes depósitos sofrem sobrecargas de pressão e cimentação por agentes como o quartzo e a dolomita, ocorre a formação das rochas sedimentares detríticas, tais como o arenito. Quando são formadas por processos químicos são chamadas de rochas sedimentares químicas, como o calcário, que é formado pelo carbonato de cálcio depositado por organismos e por processos inorgânicos.

- **Metamórficas:** são formadas pela transformação de uma rocha já existente, ocasionadas em razão da temperatura e pressão a qual são submetidas, resultando em novos minerais.

Dependendo do tamanho predominante das partículas, o solo pode receber a denominação de pedregulho, areia, silte ou argila. Os pedregulhos são pedaços de rochas com algumas partículas de quartzo e outros minerais, as partículas de areia são basicamente constituídas de quartzo e feldspato, o silte são frações microscópicas de quartzo bem refinados e enquanto isto, as argilas são formadas por partículas lamelares, constituídas de mica, argilominerais e outros minerais (BRAJA DAS, 2005).

**Tabela 2. Comparativo classificação de acordo com tamanho dos grãos**

Nome da Organização	Tamanho dos grãos (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
NBR 6.502 (ABNT, 1995)	60 a 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
United Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation e American Society for Testing and Materials)	76,2 a 2	4,75 a 0,075	grãos finos (ou seja, siltes e argilas) <0,075	

Fonte: adaptado de Braja Das (2005)

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), pode-se dividir o solo em dois grandes grupos, dependendo da origem de seus constituintes:

- Solos residuais: são aqueles onde os produtos da rocha intemperizada permanecem no local em que ocorreu a transformação, sendo bastante comum no Brasil. Todas as rochas formam solo residual, o basalto, após a decomposição, transforma-se em um solo conhecido como terra-roxa, enquanto um arenito irá dar origem a solos arenosos constituídos por quartzo. Pinto (2002) adverte a dificuldade de caracterização do material por meio de ensaios laboratoriais, devido à sua heterogeneidade, cita ainda que o estado de tensões do solo é de difícil conhecimento pois não se conhece as tensões horizontais derivadas da rocha matriz.

- Solos transportados: ocorre quando o solo transformado é transportado para outro lugar, por um agente qualquer. Devido ao transporte do solo transformado, verifica-se se um solo mais heterogêneo, se comparados aos solos residuais.

Nos solos transportados, dependendo do agente transportador, há a classificação do referido solo como:

- Solos coluviais: quando o agente transportador é a gravidade. Normalmente ocorre em encostas, quando há deslizamentos do material do topo, muitas vezes causada pela instabilidade decorrente de chuvas, e quando não existe drenagem adequada. São de ocorrência localizada, situando-se ao pé de elevações e encostas, são comuns ao longo de rodovias na Serra do Mar e no Vale do Paraíba.

- Solos aluviais: quando o agente transportador é a água corrente. O material é transportado e acaba sendo depositado quando há uma diminuição no volume da corrente transportadora. Exemplo de solos aluvionares são os depósitos de argila cerâmica nos banhados da área de Avanhadava, Rio Tietê em São Paulo.

- Solos eólicos: quando o agente transportador é o vento, sendo possível sua observação em dunas e desertos.

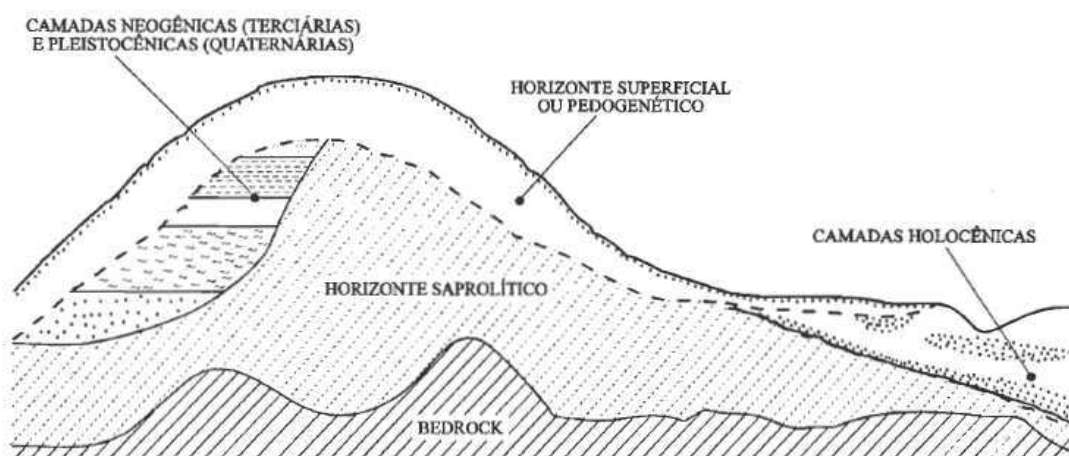
- Solos glaciais: o agente transportador são as geleiras. Quando há o descongelamento, ocorre o transporte do material, pela ação da gravidade.

### 2.4.1 Solos Tropicais

Nogami e Villibor (1995) ressaltam que grande parte das peculiaridades dos solos tropicais é atribuída às condições climáticas vigentes nas áreas em que eles se situam ou na ocasião de sua evolução. Entretanto, alguns solos tropicais já podem ser encontrados em áreas de climas não tropicais, sugerindo que estão em fase de transformação, se adaptando às novas condições climáticas.

São considerados solos tropicais em decorrência da atuação de processo geológico e/ou pedológico típicos das regiões tropicais úmidas aqueles que, dentro da classificação dos solos, apresentam propriedades peculiares e de comportamento (VILLIBOR *et al*, 2009). Na Figura 9 é possível observar as camadas de solos em regiões tropicais.

**Figura 9. Designação das camadas de solos, nas regiões tropicais**



**Fonte: Nogami e Villibor (1995)**

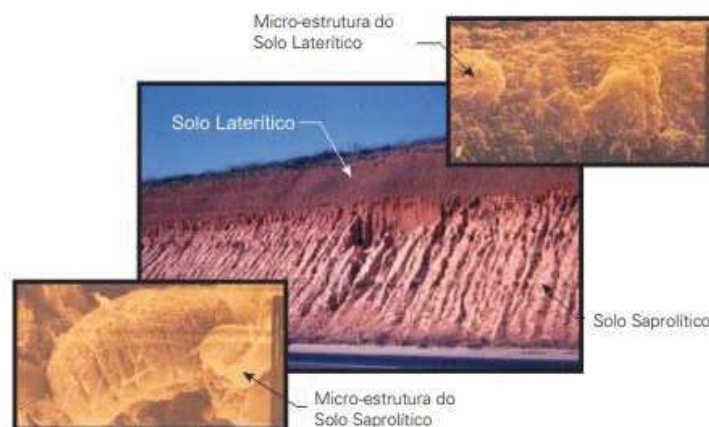
#### 2.4.1.1 Solos lateríticos

Conforme Nogami e Villibor (1995), solo laterítico é uma variedade de solo superficial pedogenético, típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Salienta também que os solos lateríticos apresentam uma mineralogia simples, em que o quartzo é um mineral bastante comum neste tipo de solo.

O processo de laterização envolve o enriquecimento no solo por meio de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argilo-

mineral predominante e quase sempre exclusivo. Tais minerais dão ao solo coloração típica, podendo ser vermelho, amarelo, marrom e alaranjado (VILLIBOR *et al*, 2009). A Figura 10 contém imagens de camadas lateríticas e camadas saprolíticas.

**Figura 10. Corte, contendo camada laterítica sobrejacente e camada saprolítica de origem**



**Fonte: Nogami *et al* (2009)**

Os solos lateríticos, mesmo que sejam argilas ou muito argilosos, possuem pequena expansão quando compactados na umidade ótima. Quando compactados no ramo úmido, pode apresentar expansão relativamente elevada, em relação à contração. Não apresentam peculiaridades, quanto mais argilosos forem, mais contráteis são (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

#### 2.4.1.2 Solos saprolíticos

Estes solos são provenientes da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz entretanto, ainda mantém a estrutura da rocha que lhe deu origem, sendo então um solo residual (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Em constraste aos solos lateríticos, os solos saprolíticos possuem as frações areia e pedregulho constituídas por uma grande variedade de materiais distintos do quartzo.

Constituem a parte subjacente à camada de solo superficial laterítico, o solo saprolítico é mais heterogêneo e constituído por uma mineralogia complexa, contendo minerais ainda em fase de decomposição. Também são conhecidos como

solos residuais jovens, em contraste aos solos lateríticos, que são maduros (VILLIBOR *et al*, 2009). A Figura 11 contém perfil de um solo saprolítico.

**Figura 11. Perfil de solo saprolítico**



**Fonte: Nogami *et al* (2009)**

Quando constituídos de elevada porcentagem de argila, apresentam geralmente características de contração similares aos correspondentes granulométricos dos solos tradicionais. Quando são formados por siltes ou ricos em areias micáceas, de origem saprolítica, podem apresentar baixa contração, mesmo que sejam expansivos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

#### 2.4.2 Formação Guabirota

Conforme Salamuni *et al* (2001), a Bacia de Curitiba é formada por sedimentos do Terciário médio ao superior (Formação Guabirota) e Quaternário (Formação Tinguis) bem como depósitos alúvio-coluvionares recentes, os quais estão sobrepostas a metamorfitos do embasamento.

O planalto de Curitiba é colinoso, possuindo ondulações suaves com altitudes entre 880 e 980m, intermeadas por amplas planícies aluvionares de inundação que se estendem por mais de 800km<sup>2</sup> (SALAMUNI *et al*, 2004).

Conforme Salamuni *et al* (2001), a Formação Guabirota possui uma área de cerca de 3.000 km<sup>2</sup>, sendo composta por bancos pouco consolidados de argilas, arcósios, depósitos rudáceos e de finos depósitos carbonáticos, bem como areias arcósianas e cascalhos. As camadas argílicas e siltíticas geralmente são maciças

de coloração cinza a cinza esverdeada. Os depósitos rudáceos normalmente são oligomíticos com predominância de seixos de quartzo, a espessura média dos sedimentos é em torno de 40 m.

O solo pertencente à Formação Guabirota, quando escavado, pode se tornar potencialmente instável, podendo ocorrer acidentes em escavações. Os solos argilosos desta formação possuem como característica marcante uma consistência elevada (rija a dura), possuem superfícies polidas que seguem um padrão de difícil identificação (KORMANN, 2002).

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), o solo, para ser utilizado como fundação ou material de construção, necessita ser classificado de modo que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada grupo.

O sistema do Highway Research Board (HRB), se considera a granulometria, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o índice de grupo, muito utilizado ao método de pavimentos pelo índice de grupo.

O Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) foi um aperfeiçoamento e ampliação do sistema elaborado por Casagrande para aeroportos em 1943, se baseia na identificação dos solos através da textura e plasticidade.

### 2.5.1 Classificação TRB

No caso desta classificação, os solos são divididos em grupos e sub-grupos, considerando sua granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de grupo, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Classificação TRB

Classificação	Granulares ≤35% passando na peneira nº 200							Silto-Argilosos			
Classificação em Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<b>Granul. % passando na peneira</b>											
<b>Nº 10</b>	≤ 50										
<b>Nº 40</b>	≤ 30	≤ 30	≥ 51								
<b>Nº 200</b>	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
<b>Características da fração passando na peneira Nº 40</b>											
<b>LL</b>				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
<b>IP</b>	≤ 6	≤ 6	NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
<b>IG</b>	0	0	0	0	0	≤ 4	≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20
<b>Materiais</b>	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
<b>Comportamento como Subleito</b>	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

A classificação TRB inicialmente divide o solo em:

- Materiais Granulares;
- Materiais Silto – Argilosos.

Esta diferenciação reflete em seu comportamento como sub-leito, caso o solo se enquadre como materiais granulares, seu comportamento é excelente e bom, entretanto, caso o solo tenha em sua composição mais que 35% passando na peneira normatizada ABNT nº 200, é classificado como material silto-argiloso, tendo comportamento como sub-leito sofrível a mau.

Os materiais granulares são, em sua maioria, constituídos de fragmentos de pedras, pedregulho fino, areia, areia siltosa e areia argilosa, tendo índice de grupo de 0 a 4. São divididos em três grupos conforme Tabela 4.



**Tabela 4. Materiais granulares – classificação TRB**

Grupos	Composição	Subgrupos	Características
Grupo A-1	Composto de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulho, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico, inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa e materiais que não possuem aglutinantes de solo	Subgrupo A-1-a	Possuem fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante
		Subgrupo A-1-b	Materiais constituídos principalmente por areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado
Grupo A-2	Inclui todos os solos com $\leq 35\%$ passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados no Grupo A - 1 ou A - 3, devido ao teor de finos ou a plasticidade, excedendo os limites para cada grupo	Subgrupo A-2-4 e A-2-5	Solos que contém $\leq 35\%$ passando na peneira nº 200, abrangem pedregulhos e areias grossas, onde o teor de silte e/ou índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1 e para o Grupo A-3
		Subgrupo A-2-6 e A-2-7	Semelhantes aos subgrupos A-2-4 e A-2-5, diferenciando apenas na porção de finos, com índice de plasticidade maior que 10 percentual que passam na peneira nº 200 $\geq 15\%$ , tendo índice de grupo de 0 a 4
Grupo A-3	Material típico é a areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou contendo pequena quantidade de silte não plástico		

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

Os materiais silto-argilosos são caracterizados por terem índice de grupo  $\geq 5$ , tendo comportamento muito ruim como material de subleito. Sua porção de material passante na peneira nº 200 corresponde a  $\geq 35\%$  de sua composição, sendo dividido em quatro grupos conforme exposto na Tabela 5.

**Tabela 5. Materiais silto-argilosos – classificação TRB**

Grupos	Características	
A-4	Típico solo siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo geralmente $\geq 5\%$ passando na peneira nº 200, os valores dos índices de grupo vão de 1 a 8	
A-5	Semelhante ao Grupo A - 4, sendo geralmente de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, seu limite de liquidez é alto, sendo $\geq 41$ , o índice de grupo pode chegar a 12	
A-6	O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo $\geq 75\%$ de material passando na peneira nº 200, seu índice de grupo pode chegar a 16	
A-7	Se diferencia pelo alto limite de liquidez, podendo ainda ser elástico e possuir elevada mudança de volume, o índice de grupo pode chegar a 20	
	Subgrupo A-7-5	Com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume
	Subgrupo A-7-6	Com elevados índices de plasticidade em relação ao limite de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)



## 2.5.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Conforme Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), esta classificação se baseia nas qualidades de textura e plasticidade. O agrupamento ocorre de acordo com o comportamento do solo quando usado em rodovias, aeroportos e aterros.

Neste sistema de classificação, são consideradas três características do solo:

- Percentual de pedregulhos, areias e finos passantes na peneira nº 200;
- Forma da curva granulométrica;
- Plasticidade e compressibilidade;

Inicialmente é possível dividir o solo em solo de graduação grossa, o qual  $p \geq 50\%$  do material é retido na peneira nº 200, e em solo de graduação fina, onde  $\geq 50\%$  do material passa na peneira nº 200 conforme Tabela 6.

**Tabela 6. Classificação solos de graduação grossa – SUCS**

Material	Grupos	Subgrupos	Código	Características
Solos de Graduação Grossa: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: $\geq 50\%$ da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulhos sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped. com pouco ou nenhum fino
		Pedregulhos com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e argila
			GC	Pedregulhos argilosos ou misturas de ped. areia e argila
	Areias: $\geq 50\%$ da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - misturas de areia e silte
			SC	Areias argilosas - misturas de areia e argila

Fonte: Autor – adaptada do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

O solo que contém  $\geq 50\%$  passando na peneira nº 200, conforme a classificação SUCS, se enquadra como Solos de graduação fina, como consta na Tabela 7.

**Tabela 7. Classificação solos de graduação fina – SUCS**

Material	Subgrupos	Código	Características
Solos de Graduação Fina: $\geq 50\%$ passando pela peneira nº 200		ML	Siltes inorgânicos - areias muito finas - areias finas siltosas e argilosas
	Siltes e argilas com LL $\leq 50$	CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas
		OL	Siltes orgânicos - argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade
	Siltes e argilas com LL $> 50$	MH	Siltes - areias finas ou siltes micáceos - siltes elásticos
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade
	Solos altamente orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos

Fonte: Autor – adaptada do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)

A terminologia utilizada no sistema SUCS considera:

- Pedras, cascalhos ou pedregulho = *gravel (G)*;
- Areia = *sand (S)*;
- Finos = *silt* ou *clay (C)*;
- Bem graduado = *well graded (W)*;
- Mal graduado = *poor graded (P)*;
- Finos: *finer (F)*;
- Limo ou areia fina = *mo (M)*;
- Matéria orgânica = *organic (O)*;
- LL baixo = *low liquid limit (L)*;
- LL alto = *high liquid limit (H)*;
- Turfa = *peat (Pt)*.

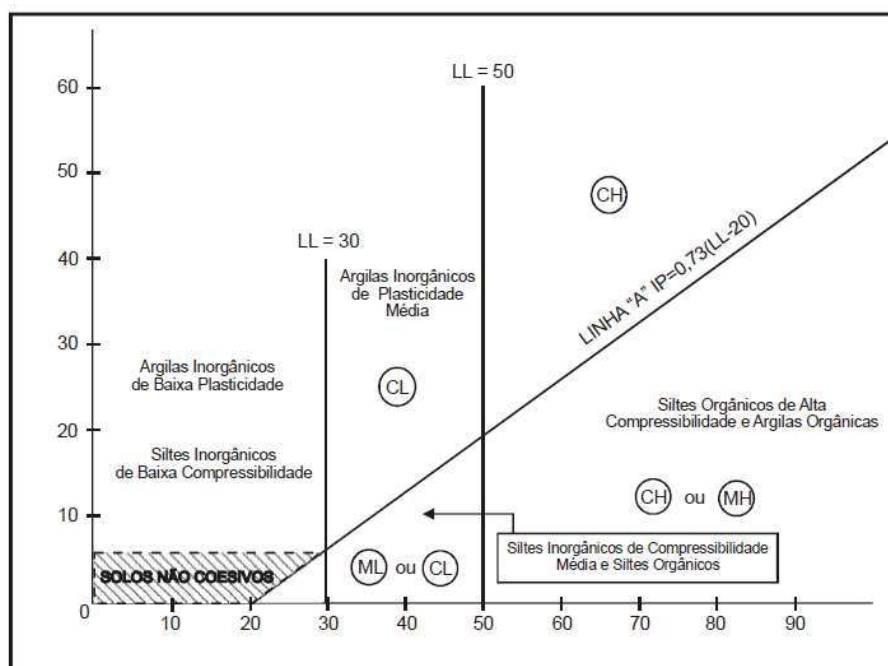
Tais termos são utilizados para definir a escala de granulometria no tamanho das partículas do solo, os quais os limites de tamanho foram adotados arbitrariamente. A Tabela 8 contém a escala granulométrica utilizada pelo SUCS

**Tabela 9. Classificação agregados – SUCS**

Classificação	Tamanho
Pedras	acima de 3 polegadas (76 mm)
Cascalho grosso	entre 3" e 3/4" (76mm e 19mm)
Cascalho fino	entre 3/4" e a peneira nº 4 (19mm e 4,76mm)
Areia grossa	entre as peneiras nº 4 e nº 10 (4,76mm e 2mm)
Areia média	entre as peneiras nº 10 e nº 40 (2mm e 0,43mm)
Areia fina	entre as peneiras nº 40 e nº 200 (0,43mm e 0,075mm)
Finos (silte e argila)	passando na peneira nº 200 (< que 0,075mm)

**Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)**

O que diferencia o silte e a argila, conforme o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) é a baixa plasticidade do silte e a alta plasticidade da argila, com o auxílio da Tabela 9.

**Figura 9. Tabela de plasticidade**

**Fonte: Manual da Pavimentação (DNIT, 2006)**

Quando um ponto, tendo como coordenadas os valores de limite de liquidez e o índice de plasticidade do material fino ficar abaixo da reta "A" ele será classificado como silte, caso contrário, será classificado como argila.

A terminologia utilizada no sistema SUCS para distinguir os tipos individuais do solo, constantes na Tabela 9.

**Tabela 9. Terminologia sistema de classificação SUCS**

Símbolos	Original	Português
G	gravel	cascalho (pedregulho)
S	sand	Areia
C	clay	Argila
W	well graded	bem graduado
P	poor graded	mal graduado
F	finer	finos (passando na peneira nº 200)
M	mo	mó ou limo (areia fina)
O	organic	matéria orgânica
L	low liquid limit	LL baixo
H	high liquid limit	LL alto
Pt	peat	Turfa

**Fonte: Autor – adaptado Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)**

As classificações de cada grupo ocorrem com a junção da letra relativa ao tipo de material, juntamente com a letra relativo à característica do mesmo, conforme Tabela 10.

**Tabela 10. Símbolos sistema de classificação SUCS**

Símbolos	Significados dos símbolos dos grupos de solos
GW	Cascalho bem graduado, cascalho e areia sem muitos finos
GP	Cascalho mal graduado, cascalho e areia sem muitos finos
GM	Cascalho siltooso com areia
GC	Cascalho argiloso com areia
SW	Areia bem graduada, com cascalho e sem muitos finos
SP	Areia mal graduada, com cascalho e sem muitos finos
SM	Areia siltoosa, mistura de areia e silte ou limo
SC	Areia argilosa, mistura de areia e argila
ML	Material siltooso e areias muito finas, pó de pedra, areias finas siltoosas ou argilosas, ou siltes argilosos com baixa plasticidade
CL	Argilas magras, de plasticidade baixa ou média, argilas com cascalho, areia ou silte
OL	Siltes orgânicos, argilosos ou não, com baixa plasticidade
MH	Siltes, limos, areias finas micáceas ou diatomáceas, solos siltoosos, siltes elásticos
CH	Argilas gordas, de plasticidade média ou alta
OH	Argilas orgânicas de plasticidade média ou alta, siltes orgânicos
Pt	Turfa e outros solos altamente orgânicos

**Fonte: Autor – adaptado Manual de Pavimentação (DNIT, 2006)**

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) demonstra que os solos são divididos em três grandes grupos: solos de granulometria grossa, solos de granulometria fina e solos altamente orgânicos.

Solos de granulometria grossa são os que possuem ao menos 50% de material retido na peneira nº 200, são solos que contém cascalhos, areias e solos arenosos.

- **Grupos GW e SW:** compreendem solos bem graduados, com cascalhos e sem muitos finos (< 5% passando na peneira nº 200), a presença do material fino acaba não interferindo nas características da fração grossa do solo e não interfere também nas características de drenagem.
- **Grupos GP e SP:** solos mal graduados que contém cascalho e areia, sem muitos finos (< 5% passando na peneira nº 200), podem ser classificados também como macadames, sendo caracterizado por material de graduação grossa e areias muito finas, faltando em sua composição partícula de tamanho intermediário.
- **Grupos GM e SM:** constituem de cascalhos ou areias com maior quantidade de finos (mais de 12% passando na peneira nº 200), podem conter cimento natural de boa liga, sendo insignificantes as propriedades de expansão e de contração do material, a resistência dos materiais secos ocorre devido à pequena quantidade de solo aglutinante, de cimento de material calcário ou de óxido de ferro.
- **Grupos GC e SC:** solos com cascalho, ou arenosos, com finos (passando na peneira nº mais de 12%), o índice de plasticidade e o limite de liquidez devem identificar pontos acima da linha "A" no gráfico XX, os finos são argilosos e a plasticidade da fração aglomerante influi mais no comportamento do solo do que sua composição granulométrica

Solos de granulometria fina possuem > 50% de seu material passando na peneira nº 200, se dividem de acordo com o limite de liquidez, quando for  $\leq 50$ , é classificado como baixo (símbolo L, de Low em inglês), caso o limite de liquidez seja > 50, se enquadra como alto (símbolo H, de High em inglês).

- **Grupos ML e MH:** solos com predominância de silte, solos micáceos e solos diatomáceos, são siltes arenosos ou argilosos, sem matéria orgânica, com plasticidade relativamente baixa.
- **Grupos CL e CH:** são argilas sem matéria orgânica, as que possuem baixa plasticidade são em geral magras, arenosas ou siltosas, já as que possuem plasticidade média ou alta, incluem argilas gordas, massapês, algumas argilas vulcânicas e a betonita.
- **Grupos OL e OH:** caracterizados pela presença de matéria orgânica.

Os solos altamente orgânicos possuem apenas um grupo:

- **Grupo Pt (peat, turfa):** em geral, muito compressíveis e com características inadequadas para construção, possuem textura altamente orgânica, comumente possuem pedaços de folhas, capim, e outras substâncias fibrosas.

## 2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solo corresponde a qualquer processo, natural ou artificial no qual um dado solo através de cargas aplicadas se torna mais resistente a deformação e ao deslocamento quando comparado ao solo original. Estes processos consistem em modificar as características do sistema solo, água e ar, com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (HOUBEN, 1994).

Senço (2001) comenta que a estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições de resistir a deformações e ruptura durante o período em que este exerce funções que exigem tais características.

Conforme Azêvedo *et al* (2010), quando são encontrados materiais que podem ser usados nas camadas do pavimento, e estes não apresentam as características geotécnicas exigidas, três alternativas podem ser avaliadas:

- A substituição do solo existente por outro, cujo comportamento seja satisfatório. Esta opção pode acarretar grandes quantidades de transporte de material, sendo oneroso do ponto de vista do custo do transporte e também da aquisição do material.

- A estabilização química ou mecânica pois, com o uso de materiais alternativos é possível melhorar o solo local evitando assim custos de transporte e aquisição de material e um menor impacto ambiental.
- A modificação do dimensionamento do projeto.

Campos (2016) destaca o problema que se tem quando a utilização do solo natural não atende às exigências determinadas pelos projetos de execução de obras geotécnicas. Com a utilização de diversas técnicas, é possível a modificação e o melhoramento das propriedades do solo, o que resulta em um novo material, capaz de atender tais exigências. Foi possível verificar que, com a estabilização do solo, utilizando a cal, foi possível melhorar as características de um solo argiloso.

Vizcarra (2010) estudou a estabilização em um solo argiloso não laterítico classificação TRB A-7-6, através da inserção de cinzas de resíduos sólidos. Verificou-se a diminuição da expansão do solo quando adicionado 40% de cinza volante em torno de 92%. Ocorreu aumento no valor da pressão necessária para a penetração do pistão no ensaio Califórnia Bearing Ratio (CBR) com a adição de 40% de cinza volante, passando de 2% no solo puro para 33% na mistura, indicando ganho na resistência à penetração. Foi analisado também o módulo de resiliência do solo, quando houve a inserção da cinza e a cura prévia da mistura, o valor do módulo resiliente dobrou, em relação ao valor encontrado no solo, sem a estabilização.

Nóbrega (1995) analisou em seu trabalho a PR-518, em um trecho que continha solos tropicais argilosos, tais como o latossolo roxo, a terra roxa estruturada e o latossolo vermelho-escuro. Para a estabilização foram utilizados vários materiais, como a cal, cimento e cascalho de basalto.

A autora notou que quando utilizada a cal cálcica os resultados eram melhores que os trechos que era utilizada a cal dolomítica, o trecho que utilizou a cal cálcica as reações com os constituintes do solo foram mais intensas, apresentando um plasma poroso rico em produtos de hidratação e de reação pozolânica, resistente e estável, enquanto que no trecho onde se utilizou cal dolomítica as reações foram menos intensas e mais localizadas. Evidenciou também que as técnicas de construção são as responsáveis pelas condições de mistura do solo com os aditivos, da homogeneização da umidade e grau de

compactação. Caso não haja uma boa execução, o ambiente físico e químico, onde ocorrem as reações que promovem a estabilização, podem ser prejudicados.

### 2.6.1 Estabilização Química

A estabilização química ocorre quando, para melhora da resistência ao cisalhamento, se utiliza agentes cimentantes na mistura. Há uma grande variedade de ligantes sendo utilizados como o cimento, a cal, cinzas volantes, grits (resíduo gerado durante o processo de produção de celulose) (LIMA, 2010), betume, resinas e enzimas.

A adição de cal ao solo para sua estabilização, se tornou algo rotineiro, sendo uma técnica comumente empregada em países das zonas temperadas (NÓBREGA, 1988). Os benefícios com a adição deste material se refletem em um aumento de ISC, redução na expansão e na contração do solo, com intensidades variáveis, que dependem das características e composição do solo envolvido.

Outros materiais têm recebido atenção acerca de sua utilização como estabilizante químico. Machado *et al* (2006) estudaram a utilização de “grits”, resíduo obtido na indústria de papel e celulose, na ordem de 24% em relação ao peso do solo. Verificou-se que para emprego como material de construção rodoviária, seriam necessários também o melhoramento com cal ou cimento.

Santos *et al* (2018) utilizaram um solo argiloso e o estabilizaram com uma solução enzimática conhecida como ESS-X, composta por enzimas produzidas a partir de produtos açucarados como a cana-de-açúcar, constatou-se que a estabilização proporcionou ganhos na resistência mecânica. Em relação ao solo estudado houve um aumento de cerca de 3,6 vezes no ensaio de resistência à compressão não-confinada. Entretanto, quando se verificou a absorção de água não se constatou ganhos. Verificou-se maior estabilidade do solo com a maior proporção do aditivo em relação ao ensaio de ISC, na etapa de submersão das amostras houve diluição do aditivo anulando seu efeito sobre o solo.



### 2.6.2 Estabilização Granulométrica

A estabilização de um solo pode ser conseguida simplesmente pela adequada distribuição das diversas porções de diâmetro dos grãos, a estabilização granulométrica em linhas gerais, é a distribuição das porções de tamanhos diferentes de tal modo que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses pelos miúdos (SENÇO, 2001).

No intuito de estabilizar granulometricamente quatro tipos de solos tropicais da região noroeste do estado de Goiás, classificados conforme TRB sendo A-6, A-7-6, A-7-6 e A-2-6, Batalione (2007) adicionou rejeitos finos de uma pedreira de granito.

Ao fim do estudo verificou-se a redução do peso específico dos grãos de todas as amostras analisadas em torno de 4%, o índice de plasticidade reduziu em média 54% e o teor de umidade ótimo das amostras em torno de 20%.

Senço (2001) explica que a estabilização granulométrica consiste na utilização de solos naturais, rochas alteradas, naturais ou misturas artificiais de solos e rochas alteradas, ou também a combinação destes, com a correta dosagem de água, conforme umidade ótima e após a compactação, oferece boas condições de estabilidade.

### 2.6.3 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica é considerada o método mais antigo na construção de estradas, sendo possível através da compactação, que alteram o arranjo das partículas (MEDINA e MOTTA, 2005)

Soliz (2007) considera que a estabilização mecânica é a simples compactação dos solos até a estabilização granulométrica dos mesmos.

São utilizadas três energias de compactação, sendo normal, intermediária e modificada, considerando o mesmo solo e variando apenas a energia de compactação utilizada, os valores de ISC serão mais altos utilizando a energia de compactação modificada e os valores mais baixos utilizando a energia de compactação normal.

## 2.7 MATERIAL FRESADO

O material fresado é uma mistura de CAP envelhecido e agregado, o qual é obtido através do processo de fresagem do pavimento. As propriedades do material fresado dependem do tipo da via, do agregado utilizado na mistura, do tipo de fresadora utilizada, do tempo de exposição do pavimento às condições climáticas e do teor de CAP utilizado (ULLAH e TANYU, 2019).

Pires *et al* (2016) reitera a crescente conscientização do emprego correto dos recursos naturais, da necessidade da preservação ambiental e redução das emissões de poluentes e como isto gerou a busca de alternativas ambientalmente favoráveis, dentro da mesma linha.

Hasan *et al* (2017) reitera que, devido a conscientização do meio ambiente, o uso de material fresado tornou-se popular em indústrias de pavimentos asfálticos, também informa que, para base, é possível utilizar até 50% de material fresado e 35% para misturas asfálticas, entretanto, para sub-base, ainda não há parâmetros, também devido ao desconhecimento de parâmetros do material fresado, tal como o módulo de resiliência, e que isto acarreta grande perda de material fresado, que acaba não tendo destinação.

Silva (2013) estudou a reutilização de material fresado retirado de vias urbanas, estudou seis combinações com solo puro, material fresado e teores de 2% e 4% de cimento, utilizando energia intermediária, o solo utilizado foi classificado como A-7-5 (solo argiloso, com mais de 35% do material passando na peneira nº 200), na classificação TRB, e como CH (argila muito plástica) pela classificação SUCS.

Ainda de acordo com Silva (2013) a adição de material fresado diminuiu o teor de umidade ótima, o qual para o solo puro seria de 29,20%, reduzindo para 12,80%, com a adição de 60% de material fresado, os valores de massa específica aparente seca aumentaram com a adição de material fresado, para o solo puro os valores encontrados foram de 1,59 g/cm<sup>3</sup>, e com adição de 60% de material fresado os valores foram de 1,85 g /cm<sup>3</sup>.

Dias *et al* (2015) trabalhou com quatro percentuais de adição de material fresado, o solo utilizado foi considerado como argila silto arenosa, trabalhou com a energia modificada e constatou, assim como Silva (2013), a diminuição da umidade

ótima, o qual no solo puro o valor foi de 23,50%, e com a adição de 90% de material fresado, os valores foram de 4%, e o aumento da massa específica aparente seca, no solo puro os valores foram de 1,71 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que com a adição de 90% de material fresado os valores foram de 1,99 g/cm<sup>3</sup>.

, Passos *et al* (2018) utilizou uma combinação de solo argiloso, classificado como A-6 (TRB), areia e material fresado, empregando energia intermediária, com a utilização de 20% de material fresado e 20% de areia, houve também a diminuição da umidade ótima, passando de 13,80% no solo puro, para 9,70% na composição citada, os valores de ISC obtiveram ganhos, chegando à 30% com a adição da areia e do material fresado, em relação ao valor obtido no solo puro, que foi de 17,50%.

Júnior (2019) selecionou cinco solos diferentes em seu trabalho, sendo areno-argilosos e areno-siltosos, sendo classificados de acordo com o TRB em A-1-b, A-6, A-2-6, A-1-b e A-7-6, foram utilizadas cinco percentuais de adição de material fresado e utilizado a energia normal para os ensaios.

Os resultados obtidos no solo mais próximo ao presente trabalho, A-7-6, demonstraram ganhos na massa específica com a adição de material fresado, o solo puro obteve valores de 1,57 g/cm<sup>3</sup>, e com a adição de 50% de material fresado os valores foram de 1,83 g/cm<sup>3</sup>, a umidade ótima no solo puro foi de 24%, e com a adição de 50% de material fresado, reduziu para 14,25%.

O aumento da densidade seca da mistura, devido à adição de RAP também foi constatado nos estudos de Ochepe (2014), o qual analisou a estabilização de um solo laterítico, classificado como A-7-6, com adição de RAP e cinzas de bagaço de cana de açúcar, a densidade encontrada do solo laterítico foi de 1,77 mg/m<sup>3</sup>, com a adição de 40% de RAP os valores foram de 1,79 mg/m<sup>3</sup>.

Alhaji e Alhassan (2018) também utilizaram em suas pesquisas solo classificado como A-7-6 (TRB), utilizando diversos percentuais de adição de RAP, em relação aos valores de ISC, o solo puro obteve valores em torno de 11%, a adição de material fresado se mostrou benéfica quanto ao aumento de valores de ISC, obtendo o maior valor na adição de 30% de RAP, com valores em torno de 35% de ISC.

A utilização do material fresado juntamente com outros agregados também se mostrou benéfica, conforme Molz e Cervo (2019), que utilizou o material fresado, estabilizado granulometricamente com pó de pedra em camadas subjacentes do

pavimento, com uma mistura composta de 70% de material fresado e 30% de pó de pedra.

Ceolin *et al* (2019) estudou três composições, sendo 30% de solo com 70% de material fresado, só variando a quantidade de cimento, sendo sem cimento, com 3% de cimento e com 6%, em relação ao solo natural, a adição de material fresado também diminuiu a umidade ótima, passando 22,70% para 12,30%, com adição de 30% de material fresado, utilizando a energia de compactação normal.

Hilario (2016), concluiu que o revestimento misturado com solo da base existente e cimento, se torna uma mistura adequada para a utilização como camada de base, onde se mostrou uma melhora tanto nos parâmetros de resistência quanto nos parâmetros de granulometria, os valores de ICS para o material de base foi de 65,78%, e com a adição de material fresado e cimento os valores chegaram a 201,79%, foi utilizada a energia de compactação intermediária.

Corrêa *et al* (2014) utilizou solo de jazida classificação TRB A-2-4 com material fresado, e também adicionando cimento, a adição de material fresado diminuiu a umidade ótima encontrada, no solo puro foi de 9,4%, com a adição de 40% de material fresado a umidade ótima ficou em 7,9%, houve melhora também nos valores de ISC, onde a adição de 40% de material fresado se mostrou a mais benéfica, alcançando os maiores valores de ISC, 48%, enquanto que o solo puro obteve valores de 38%., utilizando a energia de compactação intermediária.

Entretanto, nos resultados obtidos por Ghanizadeh *et al* (2018), os valores de ISC diminuíram em decorrência da adição de RAP à mistura, foram utilizados dois tipos de solos.

No primeiro solo analisado, o qual foi classificado como A-1-b, os valores de ISC para o solo ficou em torno de 30%, ao se adicionar 60% de RAP o valor ficou em torno de 18%, mesmo comportamento verificado no outro solo ensaiado, classificado como A-1-a, que o ISC do solo puro ficou em torno de 83%, e com adição de 60% de RAP o valor ficou em torno de 45%.

Ghanizadeh *et al* (2019) utilizou os mesmos dois solos contidos em seu estudo de 2018, para analisar um modelo acerca de resistência à compressão simples, com adição de cimento, os valores de  $q_u$ , para adições de 3% de cimento, para o solo puro A-1-b, foi de 3.210 kPa, aos 28 dias de cura, tendo diminuído os

valores com a adição de RAP, tendo seu menor valor com adição de 60% de RAP, com valor de 2.548 kPa.

Pires *et al* (2013), analisou, através de ensaios laboratoriais, se era viável a utilização de material fresado puro e estabilizado (mecanicamente, granulometricamente e quimicamente) em camadas de pavimentos flexíveis, foi utilizada a composição de 70% de material fresado e 30% de agregado natural. Foi utilizado material fresado de duas rodovias, e em ambas, a composição 70/30 melhorou os valores de ISC, na primeira amostra, o valor de ISC do material fresado foi de 56%, com a adição de 30% de agregado, os valores foram de 95%, no outro tipo de material fresado, os valores foram de 21% no fresado puro, e de 68% com a adição de 30% de agregado.

Dias *et al* (2015), o qual utilizou um solo que não se encaixava em nenhuma das faixas granulométricas especificadas para camada de base de pavimentos, também ultrapassava os limites de liquidez e plasticidade estabelecidos nas especificações do DNIT, sendo classificado como altamente plástico e muito ruim para utilização, foi utilizado quatro percentuais de adição de material fresado, 90%, 70%, 50% e 30%, todos obtiveram ganho nos valores de ISC, que no solo puro foi de 33%, e com a adição de material fresado obteve os valores de 62%, 52%, 47% e 38% respectivamente., utilizando a energia de compactação modificada.

A utilização de 70% de material fresado nas misturas também se confirmou benéfica com Garcês *et al* (2014), utilizando em seu estudo a mistura solo local classificado como A-4 e material fresado, os valores de ISC do solo puro foi de 9,5%, e com a adição de 30% de material fresado os valores obtidos foram de 23,70%, com a utilização da energia de compactação normal.

Tal composição foi utilizada em um trecho experimental de 60 m em uma via urbana, onde o restante do trecho foi utilizado materiais provenientes de jazidas, os quais serão mantidos controles semestrais no intuito de verificar o comportamento dos dois trechos, para efeitos de comparação.

Hasan *et al* (2017) fez a análise com diferentes quantidades de material fresado em mistura, juntamente com um solo coletado na sub-base, classificado conforme TRB como A-2-6, verificou que o módulo resiliente aumenta com a adição de material fresado, no solo puro o módulo resiliente ficou em torno de 180 MPa, o

qual houve acréscimo em todas as adições de material fresado, ficando em torno de 300 MPa na adição de 75% de material fresado.

Lima (2003) pesquisou misturas asfálticas recicladas à quente, utilizando misturas asfálticas sem material fresado, com 10%, 30% e 50% de material fresado, os ensaios demonstraram aumento na resistência à tração com a adição de material fresado, sem a adição de material fresado os valores foram de 1,2 MPa, e na maior adição de material fresado, 50%, os valores foram de 1,6 MPa, os valores de módulo resiliente também aumentaram com a adição de material fresado, passando de 3.200 MPa, sem a adição, para 8.901, com 50% de adição.

O aumento da rigidez ocasionado pela adição de material fresado também foi constatado por Valdez *et al* (2011), em seu estudo experimental de misturas asfálticas com altas porcentagens de material fresado, onde verifica a possibilidade de utilizar até 60% de material fresado em uma mistura asfáltica, entretanto, adverte quanto o manuseio e estoque adequado do material fresado, para evitar a heterogeneidade excessiva do material.

O controle quanto a qualidade do material fresado também foi indicado por Nascimento *et al* (2013), indica que o pavimento reciclado só terá bom desempenho se for produto de um projeto bem concebido, executado e controlado, sua pesquisa foi acerca da adição de material fresado, em substituição aos agregados novos, em misturas asfálticas recicladas, considerando o ensaio Marshall, a resistência à tração das misturas tiveram crescimento até a adição de 15% de material fresado, quando obteve valores de 1,05 MPa, havendo decréscimo nos valores de resistência à tração com adições superiores a 15% de material fresado.

Mousa *et al* (2017) pesquisou cinco adições de teores de material fresado na mistura com agregado (dolomita), sendo 20%, 40%, 60%, 80% e 100% de material fresado, concluindo que, com a adição de material fresado, o valor de ISC diminui, com o agregado puro, o valor de ISC foi de 84%, e apenas com material fresado o valor de ISC foi de 6%.

Ullah e Tanyu (2019) analisaram em sua pesquisa três fatores que influenciam as propriedades da mistura para camada de pavimento, com utilização de material fresado: a quantidade de CAP utilizado na mistura; o tipo de agregado utilizado na mistura e o percentual de material fresado utilizado.

Quando analisado a deformação permanente da mistura os ensaios mostraram que quanto maior o teor de ligante do material fresado, menor era a porcentagem de deformação acumulada, considerando uma mistura com adição de 50% de material fresado, quando utilizado o do utilizado o RAP com menor teor de ligante o valor da deformação ficou em 0,42%, enquanto que com o RAP com maior teor de ligante os valores foram de 0,29%.

Saha e Mandal (2017) estudaram a utilização de cimento na mistura com agregado e material fresado, para utilização como camada de base e de sub-base, nos resultados de ISC, utilizando 50% de material fresado, quando se adiciona 3% de cimento, o valor de ISC quase dobra, passando de 18% para 30%. Gong *et al* (2018) informam em seu trabalho que a adição de material fresado reduz o potencial de deformações permanentes no pavimento.

Thakur e Han (2015) analisaram diversas pesquisas sobre a utilização de material fresado e cimento misturados a agregados virgens, como base em aplicações rodoviárias. Salientaram que, quando se estabilizava quimicamente a mistura com cimento, diminuía a deformação permanente ensaiada, a utilização de cimento também se mostrou benéfica, com um aumento linear do valor do ISC, em comparação ao percentual de cimento adicionado.

Com a adição de 1% de cimento e 75% de RAP, Thakur e Han (2015) citam o valor de ISC em torno de 40%, quando o percentual de cimento utilizado passa para 2%, os valores ficaram em torno de 80%.

Suddepong *et al* (2018) pesquisou a utilização de cimento e RAP na estabilização de pedra britada, os valores de ISC utilizando apenas a pedra britada possui valores maiores quando comparado aos valores do RAP, sendo 90,40% contra 56,40%, a adição de RAP à pedra britada diminui os valores de ISC, a mistura obteve o valor de ISC mais alto com a composição de 80% de pedra britada e 20% de RAP, com valores de 85,10%.

Miao *et al* (2018) em sua pesquisa, analisou misturas com e sem material fresado, em diversas temperaturas (40°, 22° e 5°), quanto à tensão permanente e a resiliência, constatou que a utilização de material fresado de graduação fina, reduz o potencial de afundamento do pavimento, isto ocorre devido à presença de asfalto nas partículas finas, o que aumenta a coesão da mistura.



Miao *et al* (2016) também constatou a influência da temperatura quanto ao módulo de resiliência nas misturas contendo material fresado, concluindo que a adição de material fresado melhorava a resistência quanto aos ciclos de congelamento e descongelamento que ele propôs em laboratório.

Islam *et al* (2014) estudou o material fresado em misturas quentes asfálticas, os ensaios mostraram que as amostras que continuam material fresado produziram 15% a menos de deformação permanente e que foram menos suscetíveis ao surgimento de sulcos no pavimento.

Suebsuk *et al* (2014) estudou a adição de RAP e cimento em um solo laterítico, que possuía em sua composição 53% de areia, 25% de silte, 20% de argila e 2% de cascalho, quando se verificou a compactação das misturas solo+RAP, a mistura com adição de 50% de RAP foi a que obteve maior peso específico, com valores de 21,90 kN/m<sup>3</sup> e a menor umidade ótima, com valores de 6,40%.

Fedriago *et al* (2015) em seu estudo, analisou o efeito da energia de compactação e do teor de RAP, com adição de cimento, no comportamento mecânico de uma brita graduada simples (BGS), foi utilizada a energia intermediária e a energia modificada.

Com os resultados obtidos, foi possível concluir que a adição de material fresado diminui os valores de resistência à compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral, em ambas as energias de compactação utilizadas.

Os valores de RCS, com a menor adição de RAP, que foi de 20%, e adição de 4% de cimento, utilizando a energia intermediária, os valores ficaram em torno de 2 MPa, e com a maior adição de RAP, que foi de 70%, os valores ficaram em torno de 1,3 MPa.

Nos ensaios de RTCD também se manteve o mesmo comportamento, com a adição de 20% de RAP, utilizando a energia intermediária, os valores ficaram em torno de 0,3 MPa, e com adição de 70% de RAP, os valores ficaram em torno de 0,2 MPa.

Adhikari *et al* (2018), analisou a utilização de RAP, geopolímero e solo para camada de base e sub-base de pavimento, foram estudados dois solos, classificados TRB como A-7-5 e A-7-6, no solo A-7-5, nos ensaios de resistência à



compressão simples, sem adição de RAP, os valores encontrados foram de 2,57 MPa, com a adição de 15% de RAP, os valores aumentaram para 4,68 MPa, no solo A-7-6 foi possível constatar o mesmo comportamento, sem a adição de RAP os valores foram de 0,68 MPa, e com a adição de 15% de RAP os valores passaram para 1,62 MPa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental da presente pesquisa foi dividido em quatro etapas, iniciando pelos ensaios de caracterização e classificação do solo sedimentar vermelho, da Formação Guabirotuba.

A segunda etapa consiste em realizar os ensaios de compactação das diferentes misturas de solo, cimento e material fresado.

Na terceira, avaliar os resultados da resistência à compressão simples, tração por compressão diametral, expansão e ISC das misturas de solo, cimento e material fresado.

A última etapa consistiu no desenvolvimento uma equação geral, que seja possível prever a resistência mecânica de uma mistura, considerando os materiais utilizados e suas quantidades.

##### 3.1.1 Parâmetros

Conforme descrito por Baldovino (2018), os variáveis serão separadas em três grupos principais: parâmetros independentes ou investigados, parâmetros fixos e parâmetros pesquisados.

Os parâmetros independentes são aqueles manipulados em um experimento, o qual tenta mostrar sua influência em um dado estudo.

Para o estudo em questão foram consideradas os seguintes parâmetros independentes:

- *Relação solo/ material fresado*: proporção, de solo e material fresado,
- *Cimento*: serão analisadas as misturas com adição de 3% de cimento e sem adição de cimento.

Os parâmetros fixos são aqueles que não serão manipulados, tendo valor e características conhecidas.

Para o estudo em questão foram considerados os parâmetros fixos:

- *Teor de cimento*: quando presente na mistura, utilizado 3% de cimento em adição ao peso total da mistura;

- *Tipo de solo*: solo vermelho pertencente a Formação Guabirotuba;
- *Material fresado*: material resultante de fresagem de pavimento asfáltico;
- *Velocidade de deformação nos ensaios de compressão simples*;
- *Velocidade de deformação nos ensaios de tração por compressão diametral*:

Os parâmetros pesquisados são aqueles que dependem dos valores dos parâmetros independentes, para o estudo em questão foram consideradas os parâmetros pesquisados:

- *Índice de Suporte Califórnia (%)*;
- *Resistência a compressão simples ( $q_u$ )*;
- *Resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ )*.

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Solo

Para o presente estudo foi utilizado solo da Formação Guabirotuba, a amostra foi coletada em área vizinha ao Campus da UTFPR, localizado no bairro Campo Comprido, com coordenadas geográficas 25°26'42.10"S e 49°21'17,26"W, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13. Local de coleta do solo



Fonte: Google Earth (2019)

A amostra de solo foi coletada manualmente. O local se encontra na rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, no canteiro de obras de um conjunto residencial que estava em construção, em março de 2019. A extração da amostra foi feita em estado deformado, com o auxílio de pás e picaretas.

O transporte foi feito com o auxílio de carrinhos de mão, até o laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Seu armazenamento foi feito em bombonas plásticas, devidamente vedadas, no intuito de evitar perdas de umidade e contaminação.

### 3.2.2 Cimento

Foi utilizado cimento CP II-F 32, a escolha do cimento foi devido à facilidade de obtenção no comércio, foi adquirido em material de construção local, em sacos de 20 kg, os valores dos ensaios mecânicos constam na Tabela 11, no caso dos ensaios físicos do cimento os dados constam na Tabela 12 e os ensaios químicos na Tabela 13.

**Tabela 11. Ensaios mecânicos do cimento utilizado.**

Idade (dias)	Unidade	Resistência à Compressão	
		Ensaio	NBR 16.697 (ABNT, 2018)
1	MPa	15	-
3	MPa	26	≥10
7	MPa	30	≥20
28	MPa	35	≥32

**Fonte: Fabricante.**

**Tabela 12. Ensaios físicos do cimento utilizado.**

Característica	Unidade	Ensaio	NBR 16.697 (ABNT, 2018)
massa específica	g/cm <sup>3</sup>	3,03	
resíduo de peneiração (nº 200)	%	0,73	≤12,0
superfície específica de Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3.699	≥2.600
início tempo de pega	Min	255	≥60
final tempo de pega	Min	324	≤600

**Fonte: Fabricante.**

**Tabela 13. Ensaio químicos do cimento utilizado.**

Característica	Unidade	Ensaio	NBR 16.697 (ABNT, 2018)
perda ao fogo		10,4	≤12,7
resíduo insolúvel	%	4,3	≤7,5
sulfatos (SO <sub>2</sub> )		2,4	≤4,5
anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )		8,9	≤11,5

**Fonte: Fabricante.**

### 3.2.3 Material Fresado

Foi utilizado material fresado oriundo da BR-277/PR, no trecho entre São José dos Pinhais e Paranaguá, foram coletados em julho de 2019, sem a presença de chuva no dia da coleta, conforme Figura 14, o material foi gerado devido processo de fresagem a frio, para substituição da camada de rolamento do pavimento, conforme rotinas de manutenção implantadas na via.

**Figura 14. Local de coleta do material fresado.**



**Fonte: Autor (2020).**

O material fresado foi coletado em depósitos temporários localizados da BR-277/PR, gerados através de fresagem a frio, transportado em tambores e acondicionado em tambor metálico, no laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, conforme Figura 15.

**Figura 15. Armazenamento material fresado.**



**Fonte: Autor (2020).**

### 3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Na Tabela 14 são apresentadas as quantidades de corpos de prova totais que foram moldados em cada ensaio, em relação à composição utilizada, dias de cura e metodologia serão descritos em seus respectivos tópicos.

**Tabela 14. Quantidades de corpos de prova.**

Ensaio	Corpos de Prova	Norma
Compactação	55	NBR 7.182 (ABNT, 2016)
RCS	63	NBR 7.181 (ABNT, 2018)
RTCD	63	NBR 5.739 (ABNT, 2011)
ISC	11	ME 172 (DNIT, 2016)

**Fonte: Autor (2020).**

#### 3.3.1 Solo

Na Tabela 15 são apresentados os ensaios e as normas utilizadas para a caracterização do solo utilizado no estudo.

**Tabela 15. Ensaios de caracterização do solo.**

Ensaio	Norma Utilizada	Ano
Granulometria	NBR 7.181 (ABNT)	2017
Limite de liquidez	NBR 6.459 (ABNT)	2017
Limite de plasticidade	NBR 7.180 (ABNT)	2016
Determinação da densidade real	DNER ME 93	1994

**Fonte: Autor (2020).**

O preparo do material seguiu a norma NBR 6457 (ABNT, 2016). O solo foi seco em estufa a 110° C, até a constância do peso, sendo posteriormente destorroado e peneirado com a utilização da peneira normatizada ABNT nº 4 de 4,8 mm.

Para a correta identificação do solo a partir das partículas que o constituem foram empregados dois tipos de ensaio, a análise granulométrica e os índices de consistência.

### 3.3.2 Material fresado

Para a caracterização do material fresado foram efetuados ensaios de granulometria, teor de betume e granulometria somente dos agregados, após a extração do betume.

Inicialmente foi feito o destorroamento do material, para isto foi utilizado o equipamento que consta na Figura 13, o material ficou em ciclos por 20 minutos, foram adicionadas onze esferas de metal, no intuito de otimizar o destorroamento, após isto, o material foi peneirado em peneira normatizada ABNT nº 3/8" de 9,5 mm.



**Figura 16. Destorroamento do material fresado.**



**Fonte: Autor (2020).**

Para os ensaios de caracterização do material fresado foram utilizados os normativos, conforme Tabela 16

**Tabela 16. Caracterização material fresado.**

Ensaio	Norma Utilizada	Ano
Teor de betume	ME 53	(DNER, 1994)
Granulometria	ME 83	(DNER, 1998)

**Fonte: Autor (2020).**

Para a extração do betume contido no material fresado foi utilizado um extrator de betume manual tipo Rotarex conforme figura 17.

**Figura 17. Equipamento utilizado no ensaio de teor de betume.**



**Fonte: Autor (2020).**



### 3.4 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação é um procedimento que visa à densificação do material, a obtenção do peso específico seco máximo ( $\gamma_d$  máx) e da umidade ótima ( $W_{ót}$ ) (BORDIGNON, 2015).

A escolha para os percentuais de material fresado utilizado nas misturas foi baseado na revisão bibliográfica estudada, tentando utilizar o maior número de misturas diferentes.

Na Tabela 17 são apresentadas as composições utilizadas para os ensaios de compactação.

**Tabela 17. Composições ensaio de compactação.**

Solo (%)	Material Fresado (%)	Cimento (%)	Norma
100	0	0	
80	20	0	
80	20	3	
60	40	0	
60	40	3	
50	50	0	NBR 7.182 (ABNT, 2016)
50	50	3	
40	60	0	
40	60	3	
20	80	0	
20	80	3	

**Fonte: Autor (2020).**

Foi utilizada para os ensaios a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), devido o fresado conter material retido em peneiras superiores, fez necessária a utilização do molde com dimensões (cm) 15,20 x 17,77, como pode ser visto na Figura 18, devido ao tamanho do agregado da mistura.

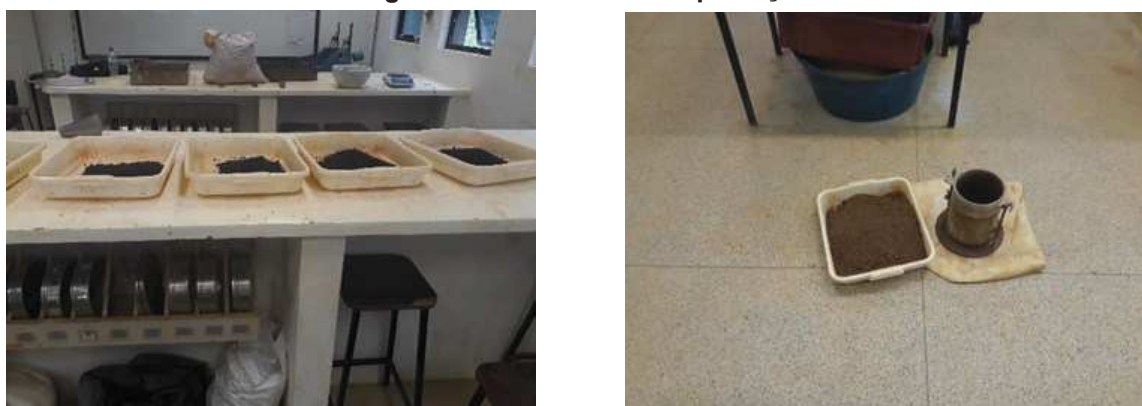
A energia utilizada para o Proctor foi a energia intermediária, a escolha da energia de compactação utilizada foi baseado nas diretrizes utilizadas pelo DNIT, que exige para camadas de sub-base no mínimo energia intermediária.

O soquete utilizado possui peso de 5,70 kg, o cilindro utilizado possui 15,20 cm de diâmetro e 17,77 cm de altura, foram executados 5 camadas com 26 golpes

em cada camada, após o término, foi retirado o colarinho e retirado o material excedente ao molde com a utilização de uma régua metálica.

Após isto, foi pesado o conjunto molde, base, mistura e desformado o material, retirando três amostras, sendo uma de cada extremidade e uma do meio do corpo de prova, os quais foram levados à estufa, com temperatura sempre inferior a 60°C, para preservar as características do material betuminoso.

**Figura 18. Ensaios de compactação**



**Fonte: Autor (2020)**

Após a secagem do material contido na estufa, foi calculado a umidade da amostra com a média da umidade das três coletas, duas coletas das extremidades do corpo de prova e uma coleta do meio do corpo de prova.

Os dados foram utilizados em planilha própria, traçando a curva com as densidades versus umidade, finalizando por encontrar a umidade ótima de cada mistura.

### 3.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

#### 3.5.1 Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Foi utilizada a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), para a execução dos ensaios. Por não haver norma específica para solos, é utilizada a norma referente a corpos de prova cilíndricos de concreto.

O ensaio se caracteriza pela determinação da resistência a compressão simples ou não confinada, através da aplicação de carga axial com controle da

deformação, a resistência a compressão simples é o valor da carga máxima de ruptura do material, ou o valor correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do cilindro de 20%, quando a curva tensão-deformação axial não apresenta um pico máximo.

Foram moldados três corpos de prova para cada mistura, utilizando a umidade ótima obtida nos ensaios de compactação para as misturas sem cimento.

Nas misturas que contém cimento foram moldados nove corpos de prova, sendo três para serem rompidos com 7 dias, três para serem rompidos com 14 dias e três para serem rompidos com 28 dias.

Os corpos de prova têm dimensões de  $50\pm 0,5$  mm de diâmetro por  $100\pm 0,5$  mm de altura.

Para o cálculo de resistência à compressão simples não confinada ( $q_u$ ) foi utilizada a equação (1):

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

$q_u$  = Resistência a compressão (MPa);

P = Carga de ruptura máxima na curva tensão – deformação (N);

A = Área transversal do corpo de prova (mm<sup>2</sup>).

Cada corpo de prova foi dividido em três camadas, para melhor compactação, e utilizada a prensa hidráulica manual Bovenau 15T.

Os corpos de prova moldados foram envoltos em papel filme e ficaram armazenados em reservatório que reproduzia as características de uma câmara úmida, no intuito de evitar problemas com a cura do cimento contido na mistura. As misturas que não possuíram cimento foram rompidos após a moldagem.

Para garantir o teor de umidade mais próximo à umidade ótima encontrada, as amostras utilizadas na moldagem foram deixadas na estufa por três dias e verificada sua umidade. Após este procedimento cada amostra foi armazenada em embalagens vedadas, para a mistura e moldagem no dia posterior.

Os ensaios foram realizados com três corpos de prova para mistura, sem cimento, e nove corpos de prova para misturas com cimento, sendo divididos três corpos de prova para cada tempo de rompimento, conforme Tabela 17.

O ensaio ocorreu com deformação controlada, tendo a prensa configuração de velocidade de 1,27 mm/m. Foi utilizada a prensa universal Emic modelo DL 3000, com célula de carga TRD-29.

Para aceitação dos corpos de prova foi utilizado o Teste da Tabela de Thompson Modificada (Thompson Tau), em decorrência da moldagem de três corpos de prova por composição, foi utilizado o valor de tau = 1,1511.

O teste de Thompson Tau utiliza como valor limite o valor de tau (1,1511) multiplicado pelo desvio padrão de cada conjunto de três corpos de prova moldado para cada mistura, o delta de cada corpo de prova, obtido através do delta de valor absoluto do resultado encontrado e de média dos resultados do conjunto de corpos de prova, quando o delta excedeu o valor limite, foi descartado.

**Tabela 18. Composições resistência à compressão simples (RCD).**

Solo (%)	Material Fresado (%)	Cimento (%)	Corpos de Prova	Dias de Cura	Norma
100	0	0	3	0	
80	20	0	3	0	
80	20	3	3	7	
80	20	3	3	14	
80	20	3	3	28	
60	40	0	3	0	
60	40	3	3	7	
60	40	3	3	14	
60	40	3	3	28	
50	50	0	3	0	
50	50	3	3	7	NBR 5.739 ( ABNT, 2018)
50	50	3	3	14	
50	50	3	3	28	
40	60	0	3	0	
40	60	3	3	7	
40	60	3	3	14	
40	60	3	3	28	
20	80	0	3	0	
20	80	3	3	7	
20	80	3	3	14	
20	80	3	3	28	

Fonte: Autor (2020).

### 3.5.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguiram a mesma sistemática dos ensaios de resistência à compressão simples, tanto na prensa utilizada quanto no preparo do material, a mesma quantidade de corpos de prova e seu armazenamento, para a determinação da resistência à compressão diametral foi utilizada a norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) foi utilizada a equação (2):

$$q_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2)$$

Onde:

$q_t$  = Resistência à tração (MPa);

F = Carga de ruptura máxima na curva tensão-deformação (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm).

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi utilizado os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios de resistência a compressão simples, a diferença foi no posicionamento do corpo de prova, enquanto nos ensaios de compressão simples o corpo de prova foi posicionado na vertical, no ensaio de compressão diametral, ele foi posicionado na horizontal, para aceitação dos corpos de prova foi utilizado o Teste da Tabela de Thompson Modificada, do mesmo modo que foi utilizado nos ensaios de resistência à compressão simples.

### 3.6 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) E EXPANSÃO

Foram realizados conforme método de ensaio ME 172 (DNIT, 2016). O ensaio de ISC consiste em medir a resistência à penetração de um pistão, com dimensões especificadas, ou seja, verifica-se a pressão necessária para penetrar

um pistão padronizado em um corpo de prova em relação à pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada padrão.

Foi moldado um corpo de prova para cada mistura, com os pesos específicos aparentes máximos e suas respectivas umidades ótimas encontradas nos ensaios de compactação. Após a moldagem, foram submersos em água durante 96 horas e medida a expansão de cada corpo de prova durante o período.

Após o período de submersão, o molde foi colocado em repouso por 15 minutos, para escoamento de água em excesso. Após o período de repouso, as amostras foram submetidas ao ensaio de rompimento.

Para as composições com cimento, estes ficaram 72 horas em câmara úmida, conforme Figura 19. Após este período de cura, foram submersos em água durante 96 horas para medição da expansão de cada corpo de prova durante o período.

**Figura 19. Composições com cimento em câmara úmida por 72 horas.**



**Fonte: Autor (2020).**

Para o ensaio de rompimento foi utilizada a mesma prensa EmiC dos demais ensaios de resistência à compressão.

Para o cálculo da expansão foi utilizada conforme ME 172 (DNIT, 2016) a equação (3):

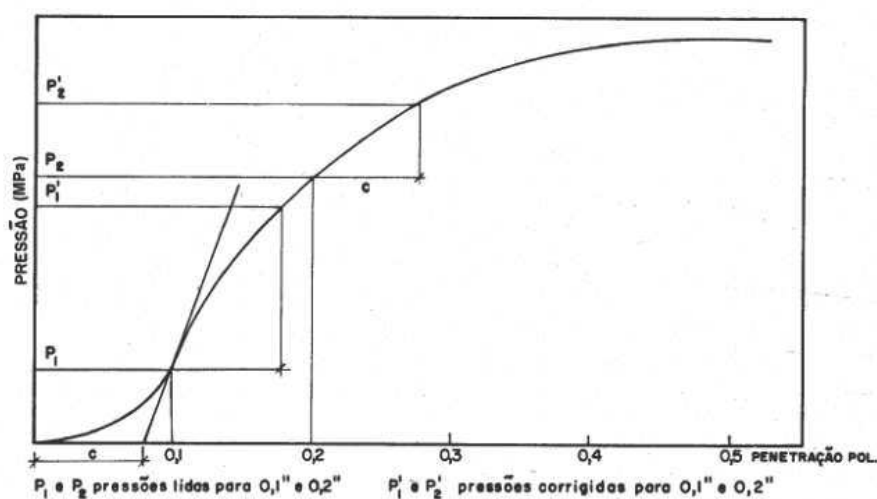
$$\text{expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (3)$$

No momento da instalação dos extensômetros foi efetuada a leitura de cada corpo de prova, sendo a leitura inicial de cada um, duas vezes por dia foram efetuadas leituras dos extensômetros no intuito de diagnosticar algum problema na leitura dos extensômetros.

Com os resultados obtidos no ensaio de penetração, foi possível traçar a curva penetração pela pressão aplicada no pistão.

Caso a curva pressão x penetração demonstre um ponto de inflexão, este deve ser corrigido, para a correção efetua-se uma tangente à curva nesse ponto até que a reta intercepte o eixo das abcissas, sendo a nova curva a junção da tangente mais a porção convexa da curva original, na Figura 20.

**Figura 20. Correção curva pressão x penetração.**



Fonte: ME 172 (DNIT, 2016).

Para o cálculo de ISC foi utilizada a equação (4), adotando o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas:

$$\text{ISC} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (4)$$

A pressão padrão é aquela que corresponde à pedra britada específica de ISC igual a 100%.

### 3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

#### 3.7.1 Análise Estatística dos Resultados pelo Método ANOVA

Para analisar a influência da adição de RAP ao solo, em relação aos resultados de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral e Índice de Suporte Califórnia, foi utilizado o software Excel 2016 do pacote Office do mesmo ano.

A análise estatística dos resultados pelo método ANOVA foi utilizado para verificar o quanto a variável resposta é explicada pelo modelo, ou seja, se a adição de material fresado é significativa para a obtenção dos valores de RCS, RTCD e ISC, com um nível de significância  $p < 0,05$ .

#### 3.7.2 Equação Geral do Modelo

Para o desenvolvimento de equação por inferência estatística por regressões múltiplas acerca de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral e Índice de Suporte Califórnia, foi utilizado o software TS SYSREG, produzido pela TECSYS Engenharia.

O software TECSYS utiliza regressão linear e redes neurais, foi utilizado para a obtenção de equações gerais do modelo, em relação à resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e Índice de Suporte Califórnia.

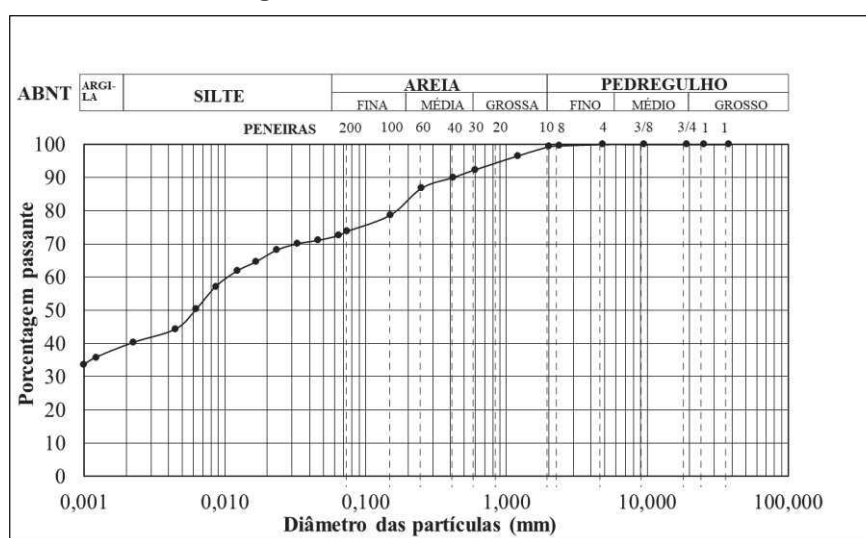


## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A granulometria do solo, conforme mostrado na Figura 21, possui 39% de argila, com 33% de silte e material granular na fração de areia em 28%, característica do Formação Guabirotuba, o qual é composto por materiais finos.

Figura 17. Granulometria do solo.



Fonte. Cardoso (2019).

A densidade real do solo foi calculado conforme protocolos do Método de Ensaio ME 093 (DNER, 1994), o qual resultou em 2,332.

O Limite de Plasticidade do solo encontrado foi de 41,99%, conforme Tabela 18.

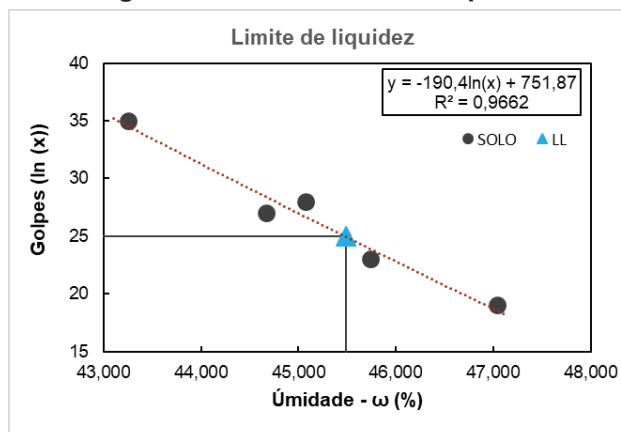
Tabela 18. Limite de plasticidade.

Cápsula		Cápsula + Solo		Umidade (ω)
Nome	Peso (g)	Úmido	Seco	
A033	7,69	9,23	8,77	42,59
A020	7,89	9,59	9,09	41,67
A076	6,82	8,17	7,77	42,11
A025	7,67	9,95	9,28	41,61
				41,99

Fonte: Cardoso (2019).

Nos ensaios referente ao Limite de Liquidez do solo foi obtido o valor de 45,49%, conforme gráfico de limite de liquidez contido na Figura 22.

**Figura 22. Gráfico limite de liquidez.**



Fonte: Cardoso (2019).

Para o cálculo do Índice de Consistência foi utilizada a equação (5):

$$IP = LL - LP \quad (5) \quad \text{onde}$$

LL = Limite de Liquidez;

LP = Limite de Plasticidade;

$$IC = 45,49 - 41,99 = \underline{\underline{3,50}}$$

#### 4..1.1 Classificação do Solo

Com os resultados obtidos através da granulometria do solo, foi possível classificá-lo conforme critérios pelo Sistema Rodoviário de Classificação (TRB) e pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Pelo sistema TRB o solo foi classificado A-7-6, sendo um material silto-argiloso. Para a sua classificação como sub-leito, é considerado de regular a mau, na classificação SUCS foi classificado como argila siltosa com areia ML ou OL (CARDOSO, 2019).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO

### 4.2.1 Granulometria

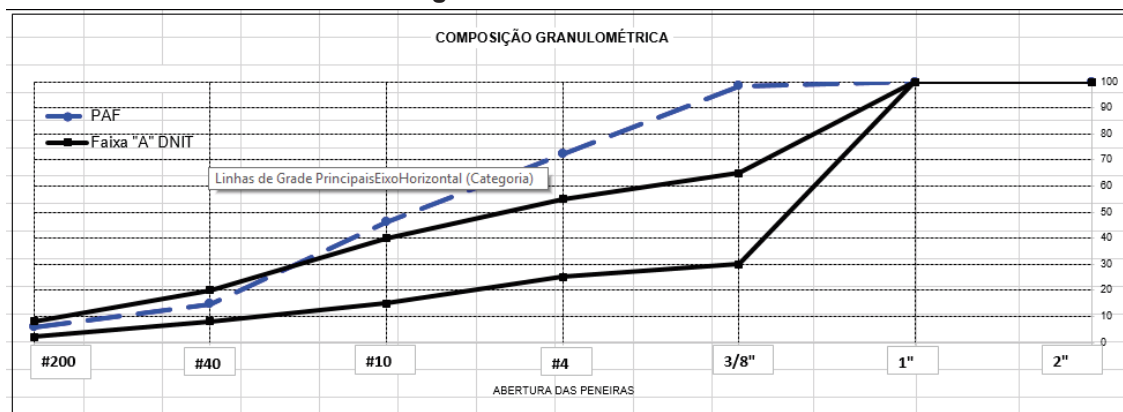
Nas Figuras 23 à 26 são apresentadas as distribuições granulométricas do material fresado com CAP, em relação às quatro faixas granulométricas constantes no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), contidos na Tabela 19.

**Tabela 19. Faixa granulométrica DNIT.**

PENEIRA	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Faixa D
	em % passando			
2"	100	100	-	-
1"	-	75-90	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85
nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70
nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45
nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25

Fonte: Autor – adaptado Manual de Pavimentação DNIT (2006).

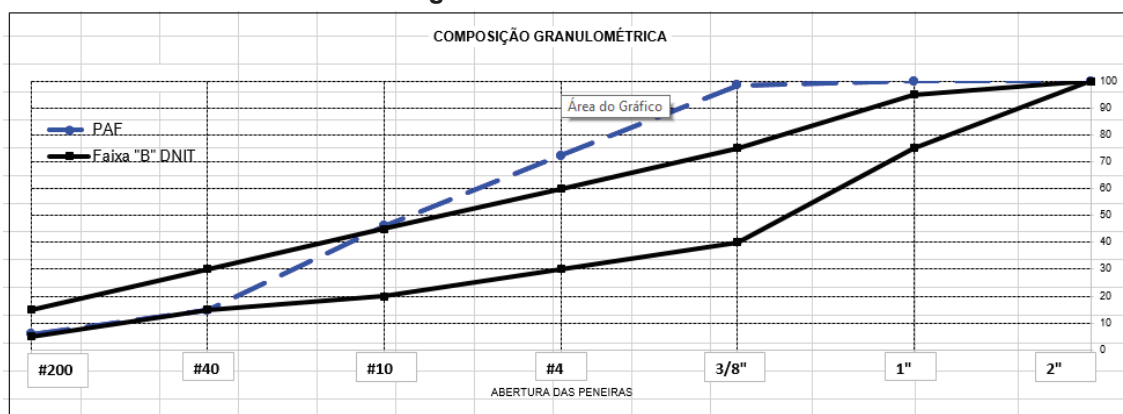
**Figura 23. Faixa "A" DNIT.**



Fonte: Autor (2020).

Como pode ser visto na Figura 23, ocorre insuficiência de material graúdo no material fresado para seu enquadramento na faixa "A" DNIT, nas peneiras 3/8", nº 4 e nº 10, na peneira nº 40 e na peneira nº 200 o material se enquadra nos limites estabelecidos para a referida faixa granulométrica.

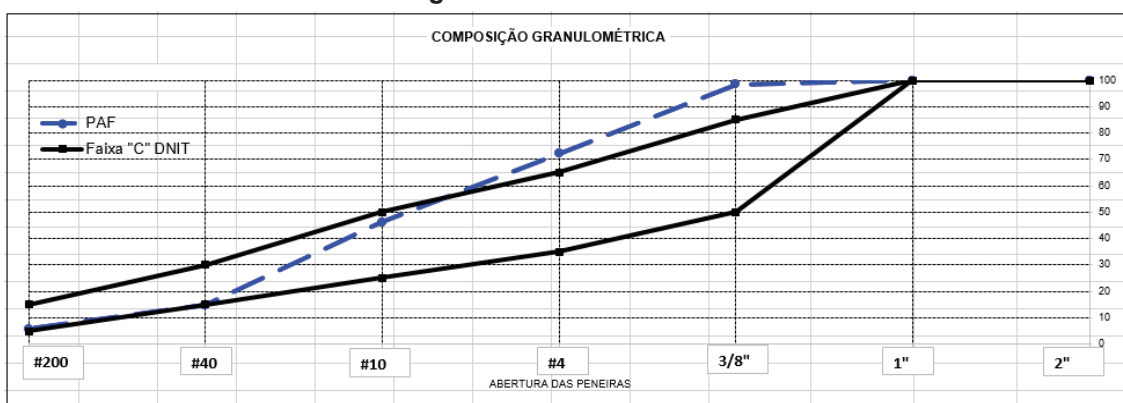
Figura 24. Faixa "B" DNIT.



Fonte: Autor (2020).

A insuficiência de material graúdo pode ser visto na Figura 24, o material fresado não se enquadra na faixa "B" DNIT, nas peneiras 1", 3/8" e nº 4.

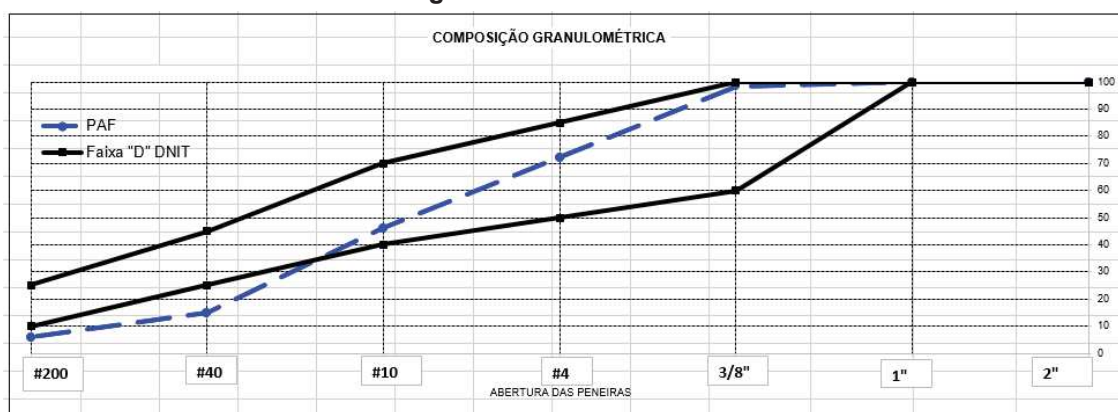
Figura 25. Faixa "C" DNIT.



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 25, onde é exibida a composição granulométrica do material fresado e os limites granulométricos da Faixa "C" DNIT, também ocorre a insuficiência de material graúdo não sendo possível seu enquadramento nas peneiras 3/8" e nº 4.

Figura 26. Faixa “D” DNIT.



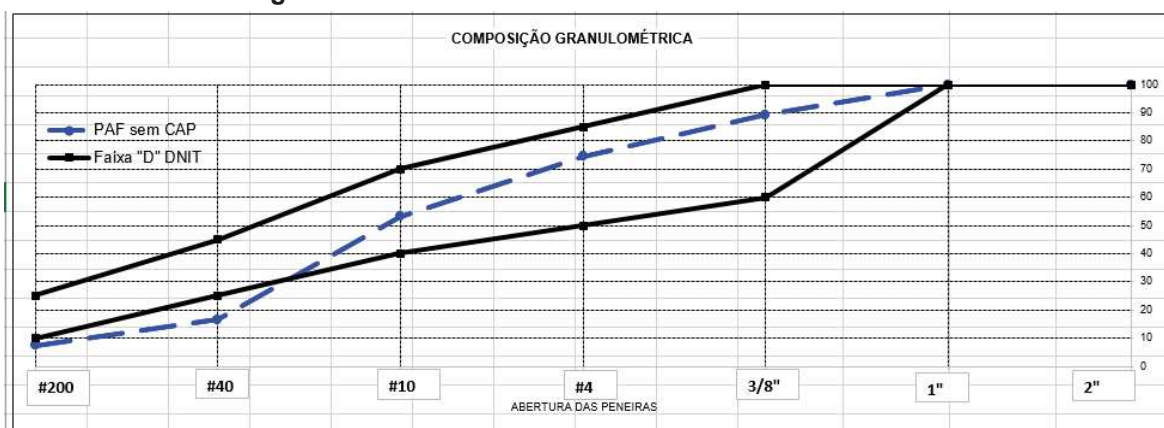
Fonte: Autor (2020).

Na análise da faixa “D”, de acordo com a Figura 26, já não há insuficiência de material graúdo, entretanto, há deficiência da quantidade de materiais de granulometria fina na composição, não ocorrendo enquadramento nas peneiras nº 40 e nº 200.

O material fresado não se enquadrou em nenhuma das faixas especificadas pelo DNIT, possivelmente devido ao processo de fresagem à frio, que altera o tamanho dos grãos originalmente utilizados e/ou a granulometria original da mistura não ter sido baseada nas faixas granulométricas normatizadas pelo DNIT.

Na granulometria do material fresado após a extração de CAP, constante na Figura 27, analisando apenas a faixa “D” constante no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), também ocorreu insuficiência de materiais finos nas peneiras nº 40 e nº 200.

Figura 27. Faixa “D” DNIT – material fresado sem CAP.



Fonte: Autor (2020).

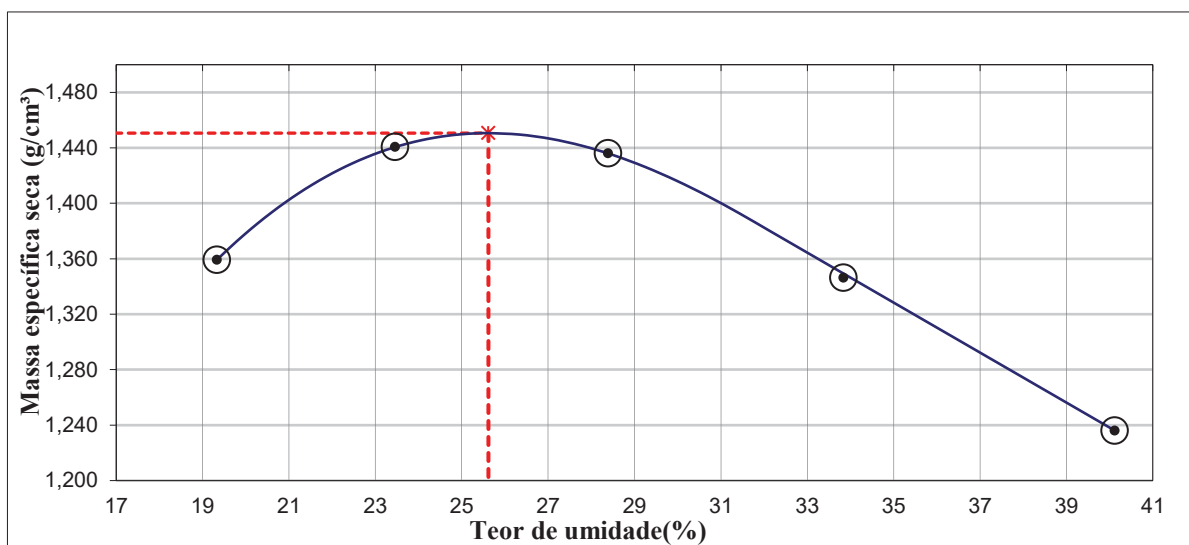
#### 4.2.2 Teor de Betume

No ensaio referente ao teor de betume constante no material fresado, conforme ME 053 (DNER,1994), foi encontrado o teor de 4,64% de CAP no material.

#### 4.3 COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS

Foram realizados ensaios de compactação para cada composição solo com adição de material fresado e solo com adição de material fresado e cimento, conforme apresentado nas figuras 28 a 38.

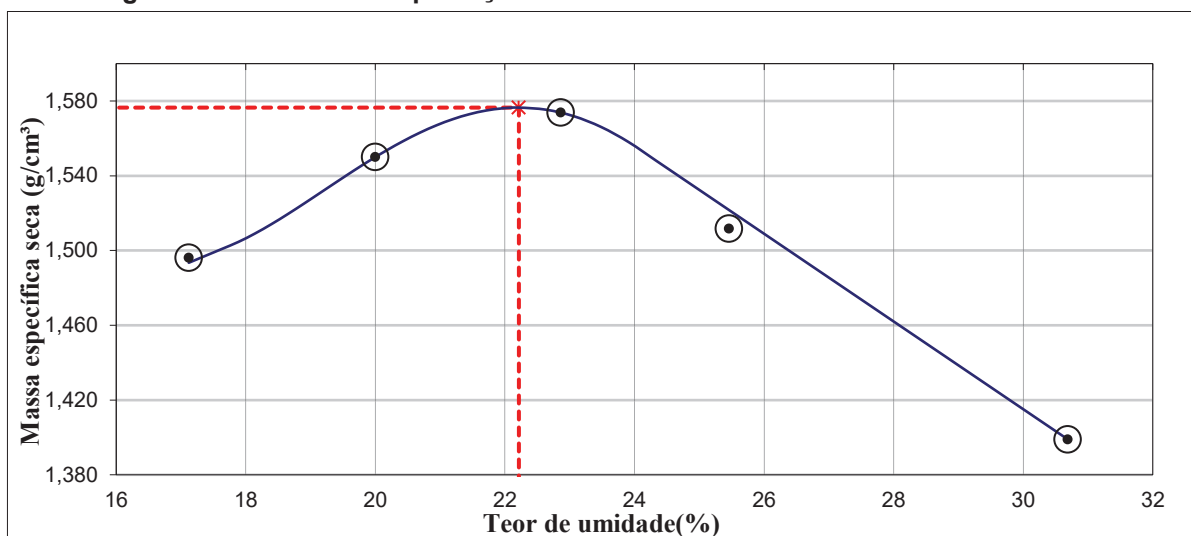
**Figura 28. Curva de compactação do solo.**



**Fonte: Autor (2020).**

Para o solo puro, com o auxílio da curva de compactação, constante na Figura 28, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,45 g/cm³ e a umidade ótima sendo 25,70%.

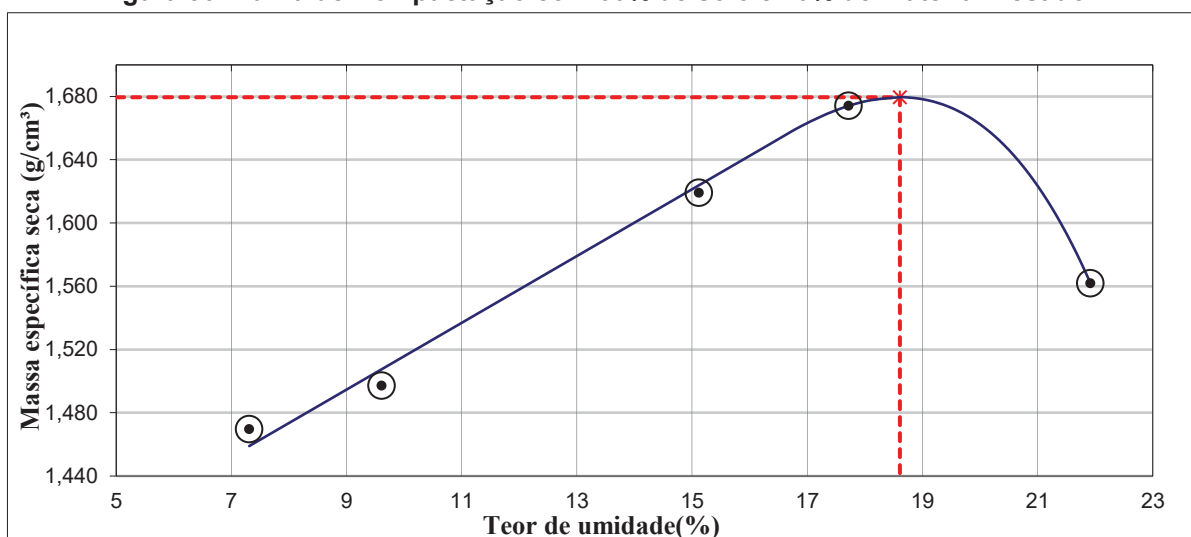
**Figura 29. Curva de Compactação com 80% de solo e 20% de material fresado.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 80% de solo e adição de 20% de material fresado, sem cimento, com o auxílio da curva de compactação, constante na Figura 29, o peso específico seco máximo foi determinado como  $1,58 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima sendo 22,20%.

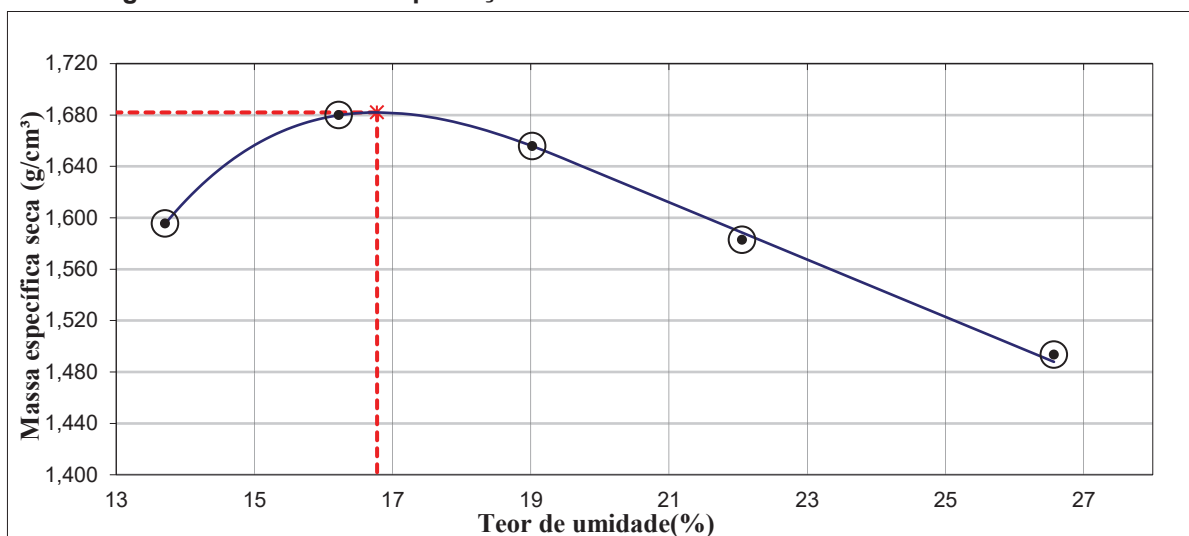
**Figura 30. Curva de Compactação com 60% de solo e 40% de material fresado.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 60% de solo e adição de 40% de material fresado, sem cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 30, o peso específico seco máximo foi determinado como  $1,68 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima sendo 18,70%.

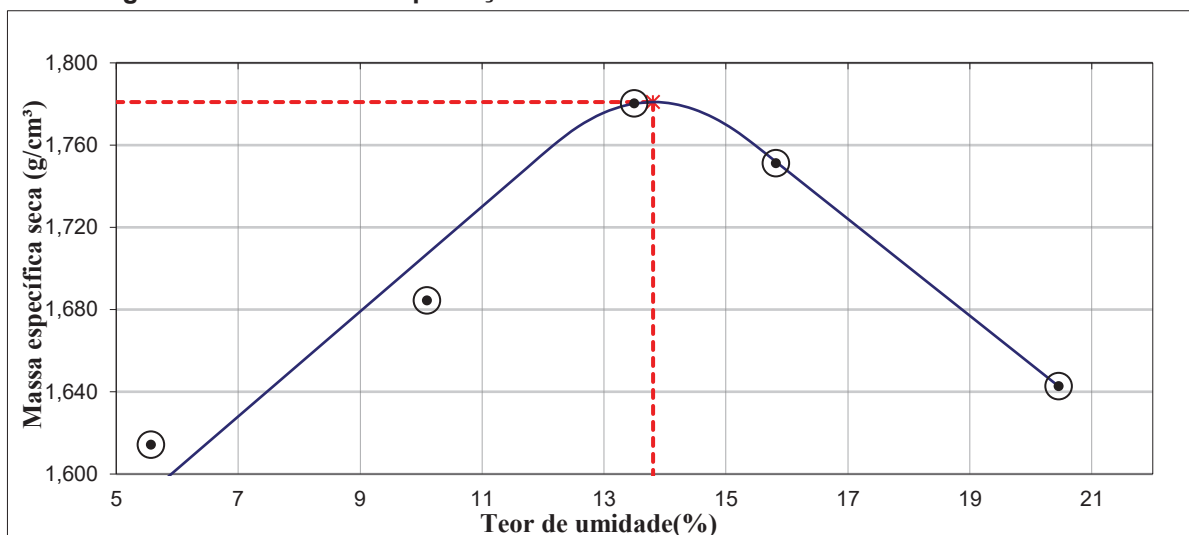
**Figura 31. Curva de Compactação com 50% de solo e 50% de material fresado.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 50% de solo e adição de 50% de material fresado, sem cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 31, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,68 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 16,80%.

**Figura 32. Curva de Compactação com 40% de solo e 60% de material fresado.**

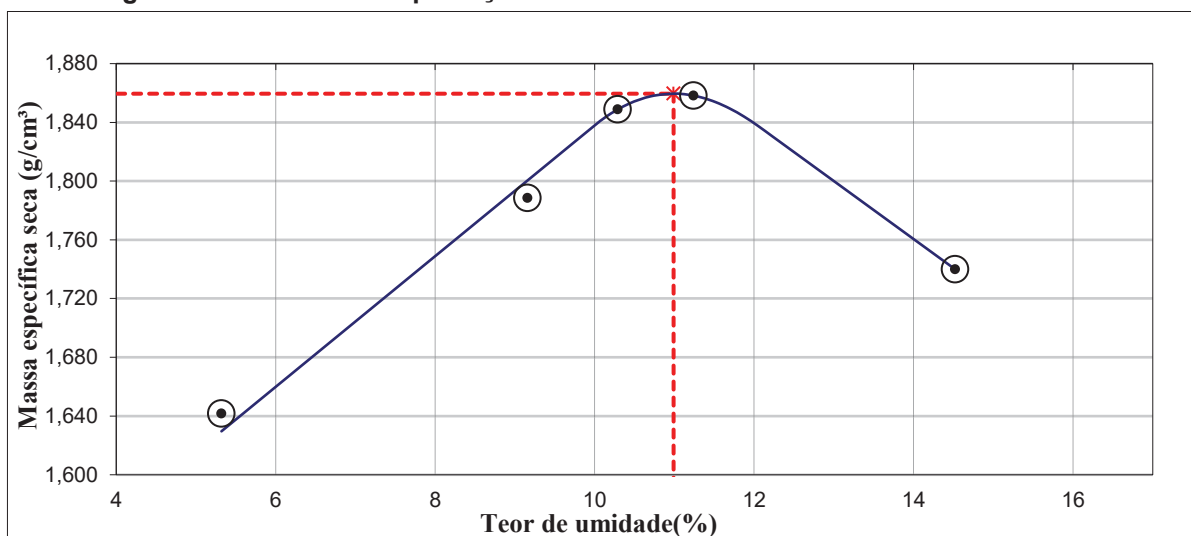


Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 40% de solo e adição de 60% de material fresado, sem cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 32, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,78 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 13,80%.



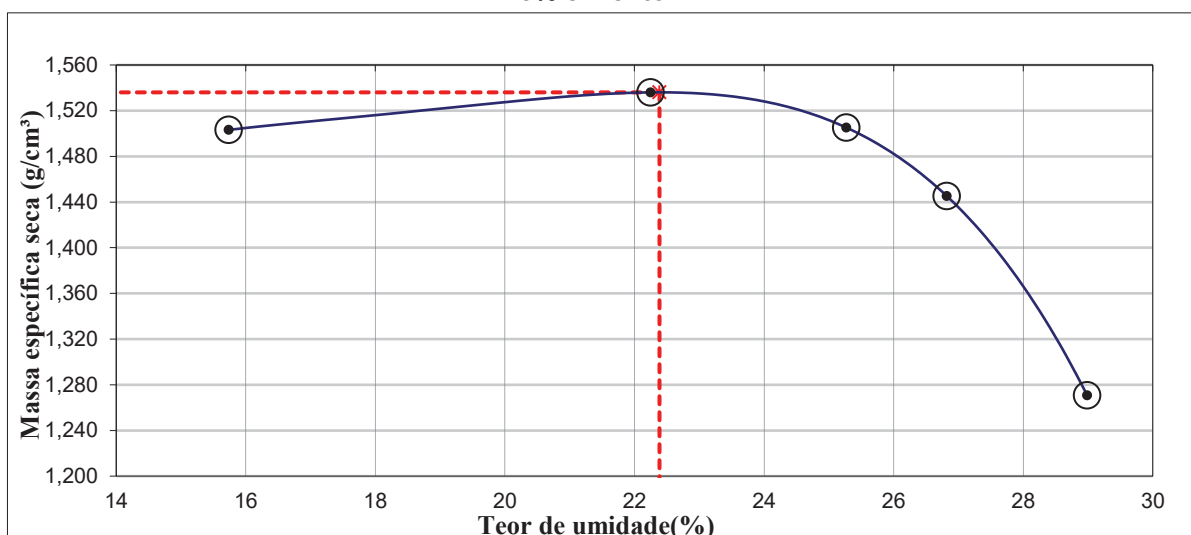
**Figura 33. Curva de Compactação com 20% de solo e 80% de material fresado.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 20% de solo e adição de 80% de material fresado, sem cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 33, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,86 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 11,00%.

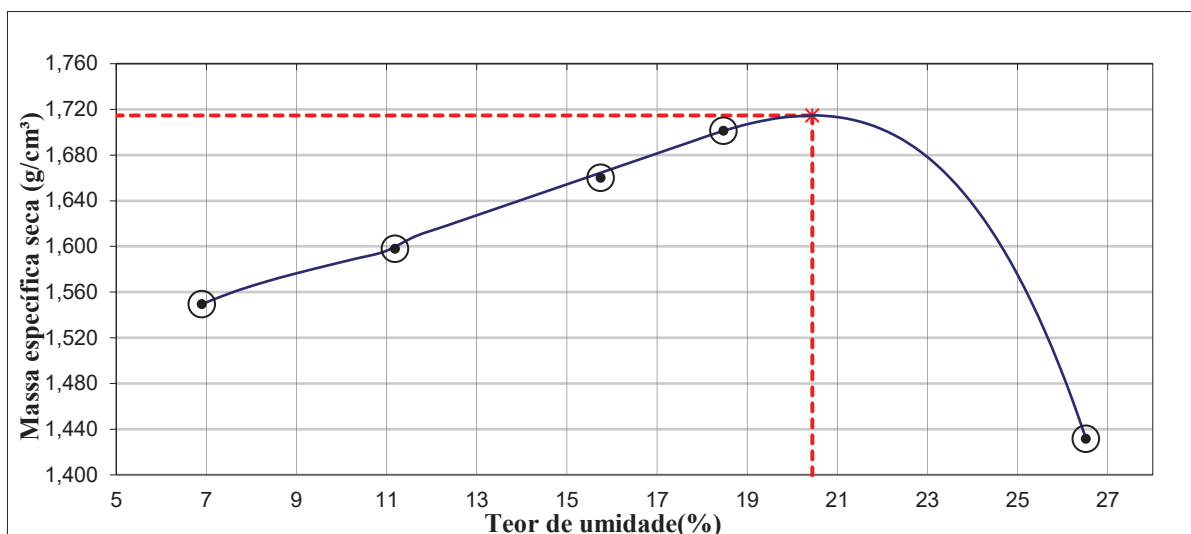
**Figura 34. Curva de Compactação com 80% de solo e 20% de material fresado e adição de 3% cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 80% de solo com adição de 20% de material fresado e adição de 3% de cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 34, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,53 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 22,30%.

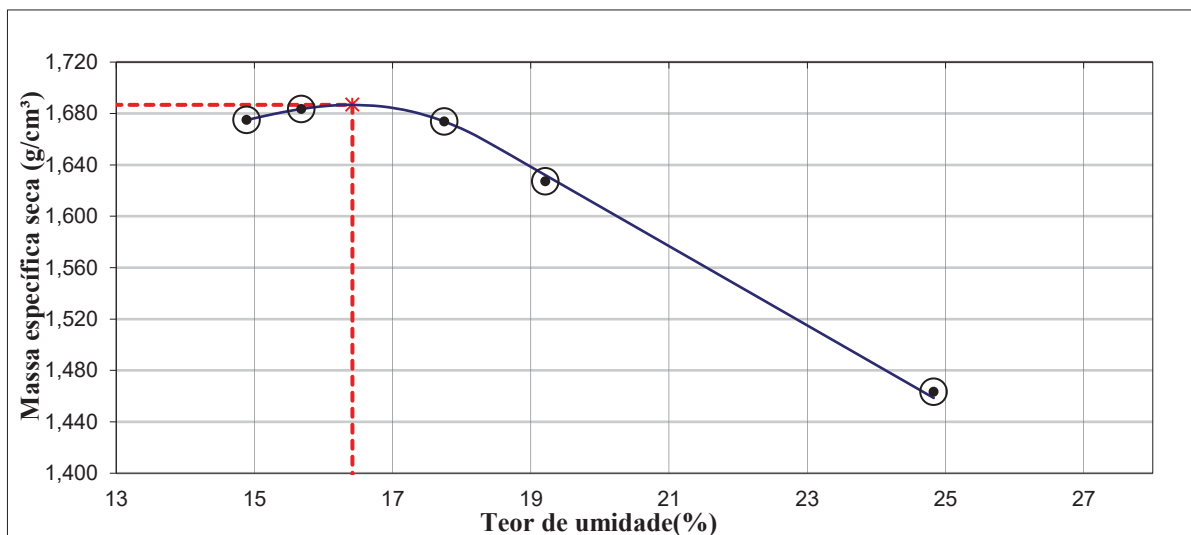
**Figura 35. Curva de Compactação com 60% de solo e 40% de material fresado com adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 60% de solo e adição de 40% de material fresado, e adição de 3% de cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 35, o peso específico seco máximo foi determinado como  $1,71 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima sendo 20,80%.

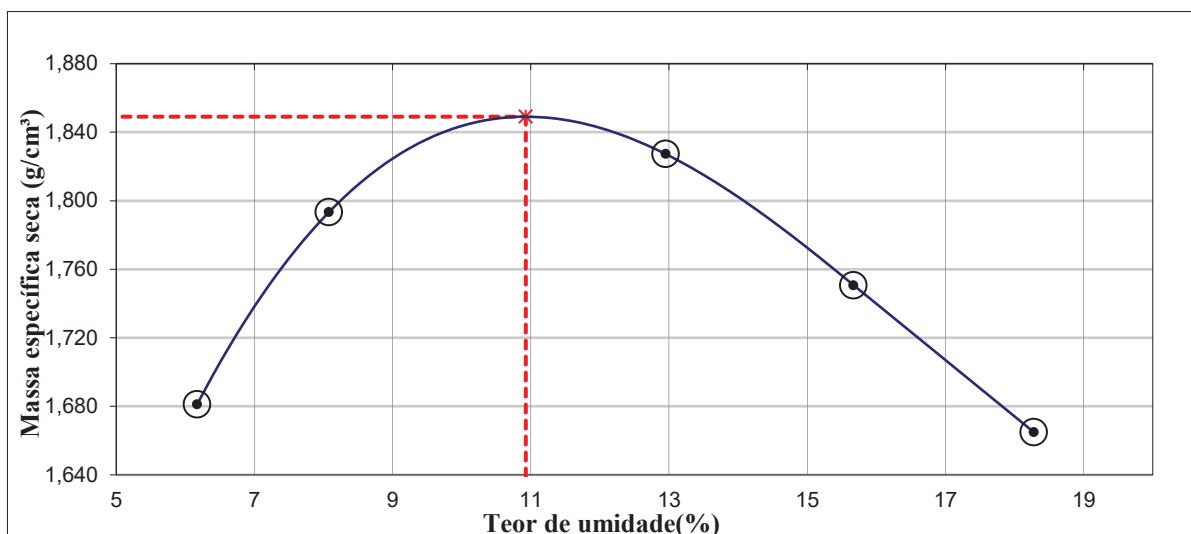
**Figura 36. Curva de Compactação com 50% de solo e 50% de material fresado com adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 50% de solo e adição de 50% de material fresado e com 3% de cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 36, a massa específica seca máxima foi determinado como  $1,69 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima sendo 16,40%.

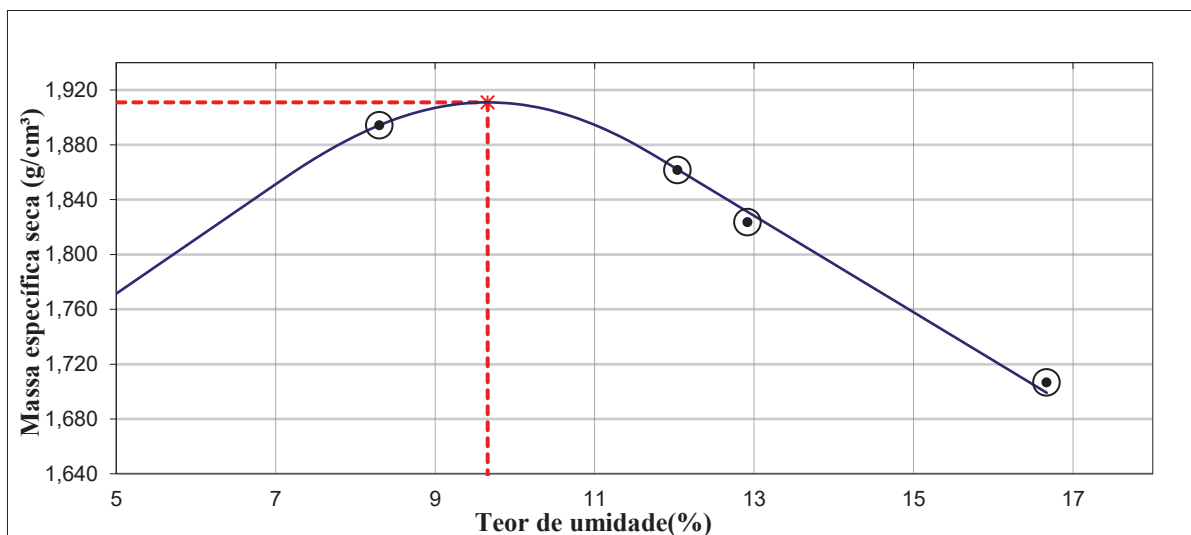
**Figura 37. Curva de Compactação com 40% de solo e 60% de material fresado com adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Com 40% de solo, adição de 60% de material fresado e com 3% de cimento, com o auxílio da curva de compactação apresentada na Figura 37, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,85 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 10,90%.

**Figura 38. Curva de Compactação com 20% de solo e 80% de material fresado com adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Para a composição com 20% de solo, adição de 80% de material fresado e com 3% de cimento, com o auxílio da curva de compactação, apresentada na Figura 38, o peso específico seco máximo foi determinado como 1,91 g/cm<sup>3</sup> e a umidade ótima sendo 9,70%.

Com os resultados dos ensaios constantes na Tabela 20, conclui-se que, quanto maior a proporção de material fresado na mistura, maior é a massa específica seca encontrada.

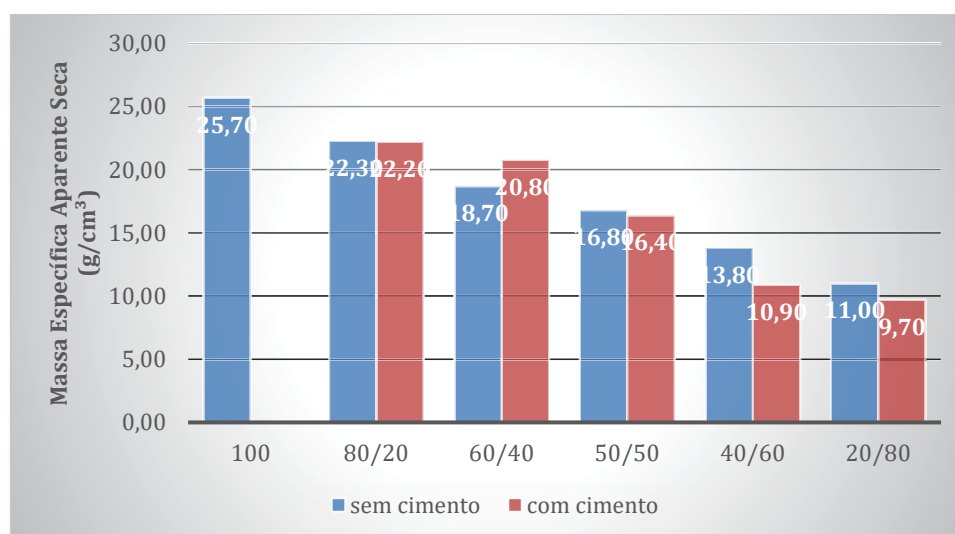
**Tabela 20. Resultados massa específica seca e umidade ótimas das misturas.**

Mistura	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W ót (%)
100% Solo	1,45	25,70
80% solo + 20% material fresado	1,58	22,30
60% solo + 40% material fresado	1,68	18,70
50% solo + 50% material fresado	1,68	16,80
40% solo + 60% material fresado	1,78	13,80
20% solo + 80% material fresado	1,86	11,00
80% solo + 20% material fresado + 3% cimento	1,53	22,20
60% solo + 40% material fresado + 3% cimento	1,71	20,80
50% solo + 50% material fresado + 3% cimento	1,69	16,40
40% solo + 60% material fresado + 3% cimento	1,85	10,90
20% solo + 80% material fresado + 3% cimento	1,91	9,70

Fonte: Autor (2020).

Na Figura 39 é demonstrado comparativo entre as massas específicas secas da mistura, com e sem adição de cimento, ocorrendo pouca variação nos valores com a adição de 3% de cimento.

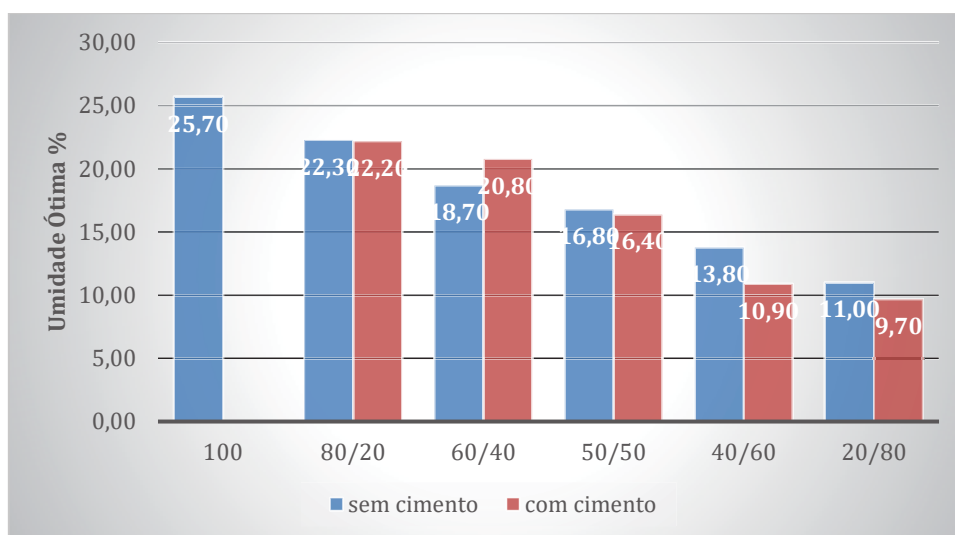
**Figura 39: Comparativo massa específica seca em composições com e sem cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Quando se compara o efeito da adição de cimento, apresentado na Figura 40, se observa pequena diminuição na umidade ótima após a composição com adição de 60% de material fresado, em relação à mistura sem cimento, tendo sua maior diminuição na mistura 40/60 (solo/material fresado), que foi de 2,90%.

**Figura 40: Comparativo umidade ótima em composições com e sem cimento.**



Fonte: Autor (2020).

O aumento da massa específica seca e a diminuição da umidade ótima, ambos ocasionados pelo aumento da quantidade de adição de material fresado também foi encontrado por Silva (2013) em sua pesquisa concluiu que a adição de material fresado ao solo provoca uma estabilização granulométrica na mistura, aumentando o peso específico da mesma, e também devido ao material fresado estar recoberto por ligante asfáltico, acarreta menor absorção de água pelo material.

#### 4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras, demonstrando a influência da adição de material fresado, a influência da adição de cimento e a influência do tempo de cura.

#### 4.4.1 Influência da Adição de Material Fresado.

Para cada composição foram moldados três corpos de prova, com materiais, quantidades, umidade e peso específico iguais. De acordo com a Figura 41, é possível analisar o comportamento da mistura com a adição de material fresado, foram utilizadas as misturas com solo puro, 80% de solo com adição de 20% de material fresado, 60% de solo com adição de 40% de material fresado, 50% de solo com adição de 50% de material fresado, 40% de solo com adição de 60% de material fresado e 80% de solo com adição de 20% de material fresado.

**Figura 41: Resistência à compressão simples (RCS) nas composições solo/fresado sem cimento.**



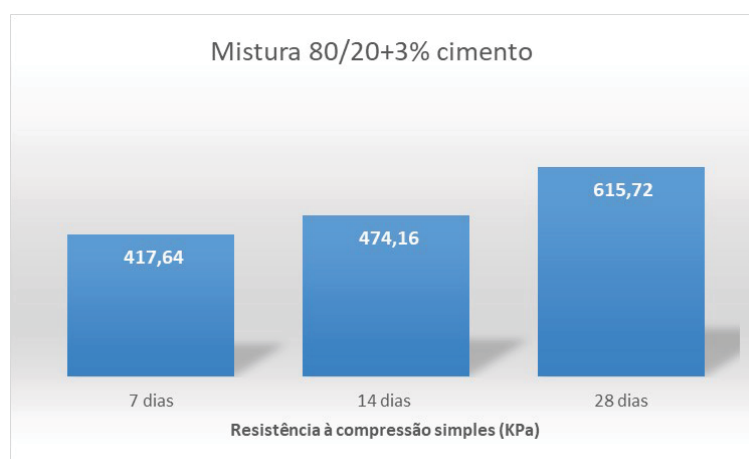
**Fonte: Autor (2020).**

Os valores de resistência à compressão simples aumentam com a adição de material fresado à mistura, com o solo puro. O valor para o solo puro foi de 112,57 KPa, obtendo o máximo valor com a adição de 60% de material fresado, que foi de 371,82 KPa, um aumento em torno de 259 KPa no valor de resistência à compressão simples, com a adição de 80% de material fresado ocorreu a diminuição da resistência, o valor de RCS foi de 194,44 KPa.

#### 4.4.2 Influência do Tempo de Cura nas Amostras com Cimento.

São apresentados os resultados dos ensaios com misturas que possuem cimento em sua composição, foi utilizado como tempo de cura, 7, 14 e 28 dias, demonstradas nas Figuras 42 a 46.

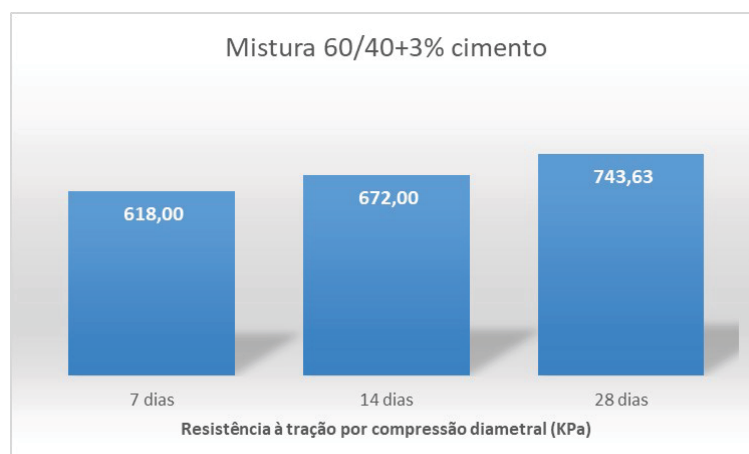
**Figura 42: Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 80% de solo, 20% de material fresado e adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 42 estão os valores de RCS, na composição 80% solo, com 20% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 198 KPa nos valores de RCS, devido aos dias de cura.

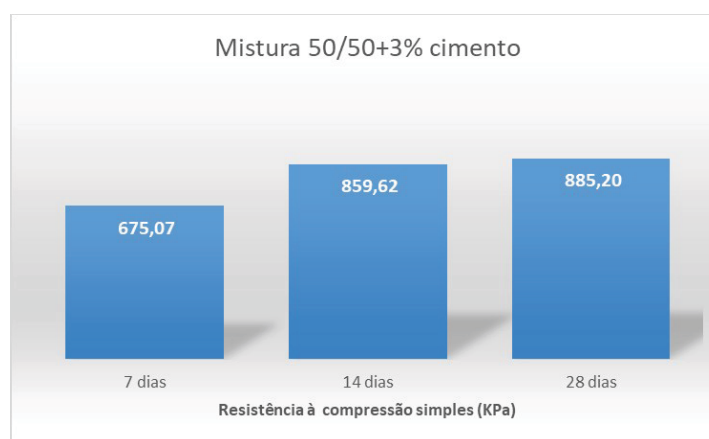
**Figura 43: Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 60% de solo, 40% de material fresado e adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 43 estão os valores de RCS, na composição 60% solo, com 40% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 143 KPa nos valores de RCS, devido aos dias de cura.

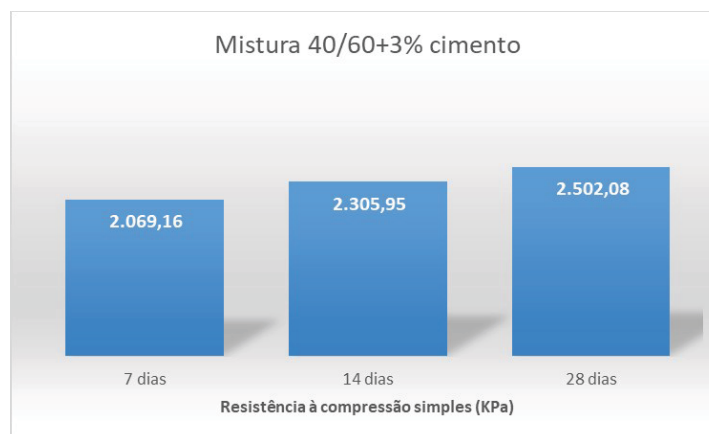
**Figura 44: Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 50% de solo, 50% de material fresado e adição de 3% de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 44 estão os valores de RCS, na composição 50% solo, com 50% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 210 KPa nos valores de RCS, devido aos dias de cura.

**Figura 45: Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 40% de solo, 60% de material fresado e adição de 3% de cimento.**

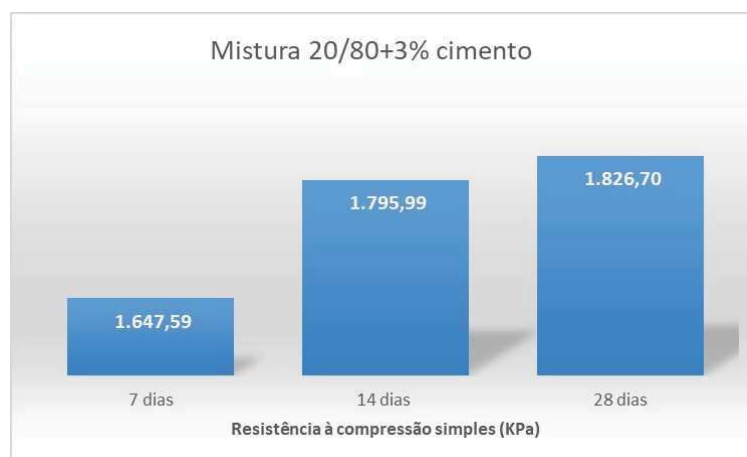


Fonte: Autor (2020).



Na Figura 45 estão os valores de RCS, na composição 40% solo, com 60% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 433 KPa nos valores de RCS, devido os dias de cura.

**Figura 46: Evolução dos valores de RCS, considerando o tempo de cura, 20% de solo, 80% de material fresado e adição de 3% de cimento.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 46 estão os valores de RCS, na composição 20% solo, com 80% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 179 KPa nos valores de RCS, devido os dias de cura.

Em todas as composições ocorreram o aumento da resistência à compressão simples com o aumento dos dias de cura.

A composição que obteve maior valor em relação à resistência à compressão simples, em todos os tempos de cura, foi a composição 40% de solo com adição de 60% de material fresado e com a adição de 3% de cimento, que obteve 2.502,08 KPa aos 28 dias.

Resultado semelhante foi encontrado por Silva (2013), que em sua pesquisa, as misturas que apresentaram melhores resultados nos ensaios de compressão simples possuía 40% de solo com adição de 60% de material fresado, com adição de 2% e 4% de cimento, onde alcançaram valores de 2.297,00 KPa e 2.440,00 KPa respectivamente.

Quando são analisados os dados de resistência à compressão simples nas amostras, sem adição de cimento, o comportamento se mostrou o mesmo, a adição

de 60% de material fresado como a que obteve a maior resistência à compressão simples.

É apresentado na Figura 47 corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão simples.

**Figura 47: Corpo de prova após ensaio de RCS.**

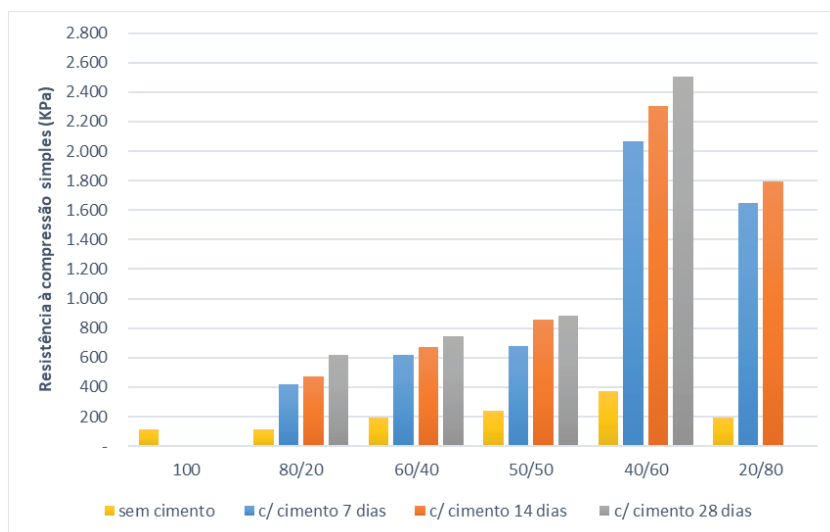


Fonte: Autor (2020).

#### 4.4.3 Influência da Adição de Cimento.

Na Figura 48 é demonstrado o gráfico de ganho de resistência à compressão simples com a adição de cimento, considerando os dias de cura.

**Figura 48: Comparativo RCS de acordo com os dias de cura.**



Fonte: Autor (2020).

O ganho de resistência em misturas com cimento é algo esperado, Diefenderfer *et al* (2016) estudaram o comportamento estrutural de trechos de pavimentos com reciclagem a frio, onde havia base estabilizada com cimento foi verificado que a resistência da camada estava aumentando ao longo do tempo, provavelmente devido à cura contínua da camada.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples.

**Tabela 21: Resultados resistência à compressão simples (kpa).**

Solo (%)	Fresado (%)	Cim. (%)	qu 0 dias	qu 7 dias	qu 14 dias	qu 28 dias
100	-		112,57			
80	20		127,92			
60	40		194,44			
50	50		237,08			
40	60		371,82			
20	80		194,44			
80	20	3		417,64	474,16	615,72
60	40	3		618,00	672,00	743,63
50	50	3		675,07	859,62	885,20
40	60	3		2.069,16	2.305,95	2.502,08
20	80	3		1.647,59	1.795,99	1.826,70

**Fonte: Autor (2020).**

Ao analisar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples e considerando Baptista (1976), o qual afirma que os valores mínimos utilizados pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Texas, para o ensaio de compressão simples são:

- Sub-base: 0,35 MPa;
- Base: 0,70 MPa;

Nas misturas sem cimento, apenas a proporção 40% de solo e 60% de material fresado, que alcançou valores de 0,37 MPa, poderia ser utilizado como sub-base, no caso das misturas com cimento, todas as proporções estudadas poderiam ser utilizadas como camada de sub-base e, a partir de 60% de material fresado, já poderia ser utilizado como camada de base.

Conforme ES 143 (DNIT, 2010), que trata de misturas solo-cimento, a amostra deve apresentar aos 7 dias de cura resistência mínima de 2,1 MPa para sua utilização como camada de base, nenhuma das amostras alcançou aos 7 dias 2,1 MPa, a amostra com adição de 60% de material fresado e 3% de cimento foi a que chegou mais próxima, com 2,07 MPa.

A ES-P 11 (DER/PR, 2018) estabelece para solo tratado com cimento a energia de compactação intermediária e resistência à compressão simples aos 7 dias:

- Sub-base: 1,2 a 2,1 MPa;
- Base: 1,5 a 2,1 MPa.

As amostras com adições de 60% e 80% de material fresado e 3% de cimento atendem as especificações requeridas, podendo ser utilizados como base e sub-base.

#### 4.4.4 Análise Estatística dos Resultados de Resistência à Compressão Simples pelo Método ANOVA

Para os resultados de resistência à compressão simples, foi utilizado como fator controlável a quantidade de material fresado para um nível de significância de 95%.

Na Tabela 22 é mostrada a análise de variância da variável quantidade de material fresado dos resultados de resistência de compressão simples, nas amostras sem cimento, utilizando energia intermediária, a coluna SQ é a soma dos quadrados correspondentes a variabilidade causada pela variável quantidade de material fresado e o erro residual. A coluna MQ é o quadrado médio, F é o valor da coordenada correspondente da distribuição F, o qual é obtida da relação MQ (material fresado)/MQ (resíduos), o valor  $p$ , ou probabilidade de significância de que os resultados obtidos pertençam a uma mesma distribuição ao se modificar o nível do fator controlável (TEIXEIRA, 2019).

Valores de  $p$  inferiores a 0,05 indicam que a variável quantidade de material fresado é significativa, a coluna F crítico traz o valor mínimo para o F calculado, para que a hipótese nula seja rejeitada.

**Tabela 22: Análise de variância RCS para composições sem cimento.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Qtde Material Fresado	81.389,80	1	81.389,80	17,08	0,002033	4,96
Resíduos	47.637,63	10	4.763,76			
Total	129.027,40	11				

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 23 é exibida a análise de variância das misturas com adição de cimento, tendo como variável quantidade de material fresado, foi utilizado para a análise os resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura.

**Tabela 23: Análise de variância RCS para composições com cimento.**

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Qtde. Material Fresado	4.327.523	1	4.327.523	14,56	0,004112	5,31
Resíduos	2.673.929	8	297.103,30			
Total	7.001.452	9				

Fonte: Autor (2020).

A análise de variância da variável quantidade de material fresado nas misturas sem cimento e nas misturas com cimento obtiveram  $p < 0,05$  e F calculado acima do F crítico, indica que a variável quantidade de material fresado é uma variável significativa nos resultados de resistência à compressão simples.

#### 4.4.5 Estudo de Regressão nos Valores de Resistência à Compressão Simples

Para o desenvolvimento de uma equação que seja possível estimar os valores de resistência à compressão simples, utilizando os mesmos materiais pesquisados neste trabalho, foram utilizadas três variáveis, sendo o valor de resistência à compressão simples como variável dependente, ou seja, seus valores são influenciados pela quantidade de material fresado utilizado na mistura e se há ou não a utilização de cimento.

- Proporção de material fresado: variável quantitativa, variando de 0 a 60 (proporção onde se obteve maior resistência à compressão simples);
- Resistência à compressão simples (RCS): variável dependente;

- Cimento: variável dicotômica sendo 0, para misturas sem adição de cimento; e 1 para misturas com adição de cimento;

O modelo escolhido apresentou os coeficientes conforme Tabela 24

**Tabela 24: Coeficientes modelo estatístico.**

	Correlação	0,95893
<b>COEFICIENTES</b>	Determinação	0,91954
	Ajustado	0,89943
<b>F-SNEDECOR</b>	Significância	< 0,01
<b>Desvio Padrão</b>		0,33230
<b>D-Watson</b>	Teste	Não autorregressão 90%

**Fonte: Autor (2020).**

O coeficiente de correlação do modelo foi calculado em 0,91954, conforme Tabela 24 quanto mais o valor se aproxima de 1, o modelo se mostra mais adequado, valores acima de 0,90 indicam correlação muito forte no modelo apresentado.

Conforme o coeficiente de determinação ajustado, o qual corrige a inclusão de variáveis pouco explicativas, de acordo com a Tabela 24, o modelo explica 89,94% da variância da variável dependente.

Na análise de resíduos, ou seja, se há aleatoriedade na distribuição dos resíduos em torno da média, importante para verificar se não houve tendenciosidade nos dados, o modelo apresentou os resultados conforme Tabela 25.

**Tabela 25: Resíduos.**

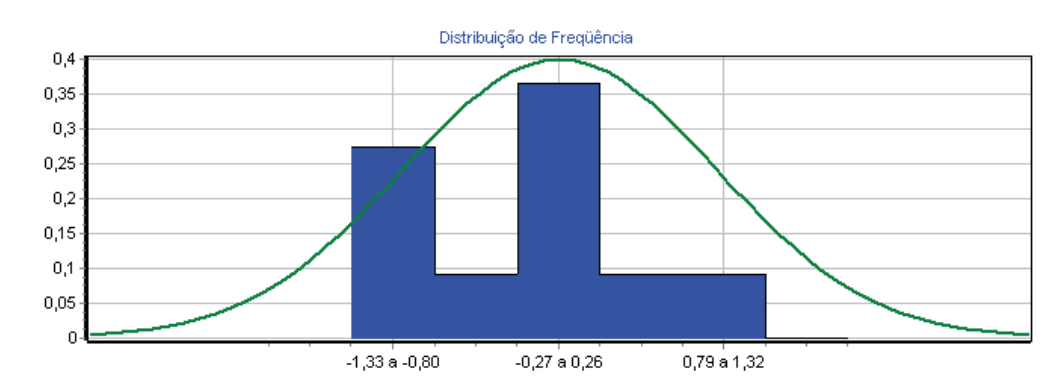
<b>NORMALIDADE</b>		
<b>Intervalo de Classe</b>	<b>% Padrão</b>	<b>% Modelo</b>
<b>-1 a 1</b>	68	72
<b>-1,64 a +1,64</b>	90	90
<b>-1,96 a +1,96</b>	95	100

**Fonte: Autor (2020).**

O modelo se mostrou adequado, quanto aos resíduos, que apresenta indícios de normalidade, foram utilizados parâmetros relativos à distribuição normal para os intervalos de classe, conforme Tabela 25, onde consta o valor padrão para cada intervalo de classe, e o valor obtido no modelo estudado.

Na Figura 49 é apresentado o histograma de resíduos padronizados x curva normal padrão, conclui-se que o modelo escolhido é adequado, quando se analisa seu comportamento quanto aos resíduos.

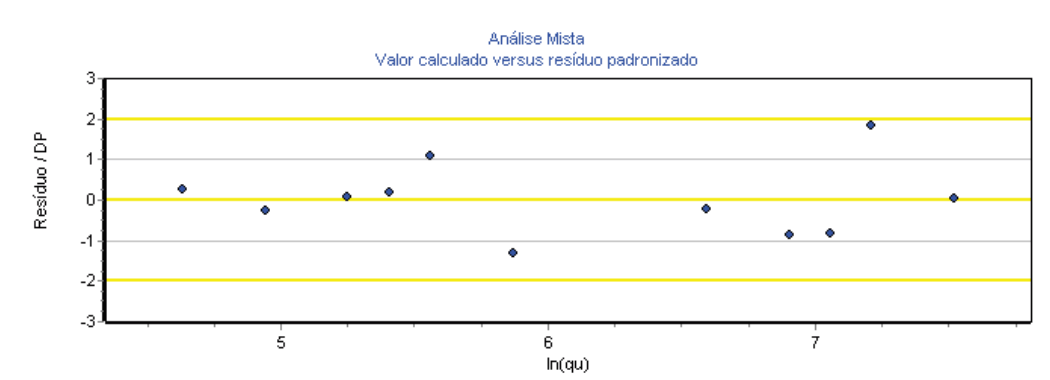
**Figura 49: Gráfico de distribuição de frequência.**



Fonte: Autor (2020).

O teste de Durbin-Watson, que pode indicar dispersão tendenciosa resultou em não autorregressão em 90%, constante na Tabela 24. Na Figura 50 é possível observar que não há heterocedasticidade, ou seja, variância heterogênea, e sim, sua dispersão homogênea (homocedasticidade).

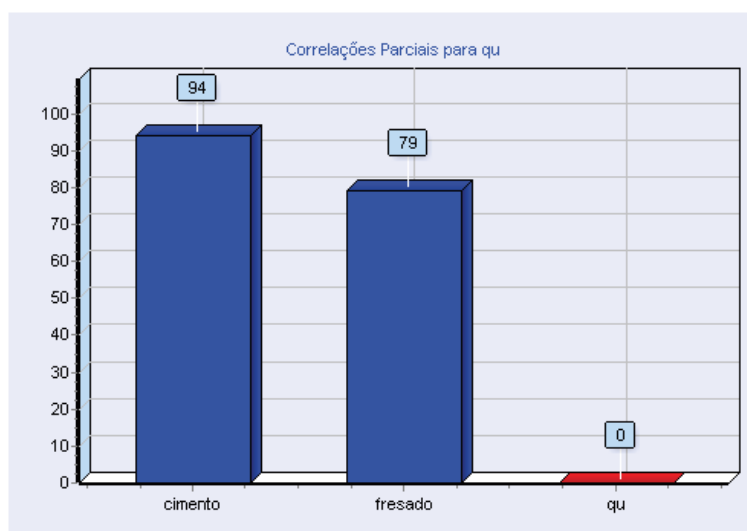
**Figura 50: Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 51 é apresentado os valores de correlações parciais das variáveis, em relação à variável dependente (resistência à compressão simples).

**Figura 51: Correlações parciais.**



Fonte: Autor (2020).

No gráfico contido na Figura 51 é possível observar as correlações parciais, ou seja, a correlação entre a variável dependente e as demais variáveis, quanto mais alto o valor obtido, melhor a correlação, o software utilizado sugere para análise das correlações parciais os valores limites:

- Até 40%: *correlação fraca*;
- Até 60%: *correlação média*;
- Até 75%: *correlação forte*;
- Até 85%: *correlação muito forte*;
- Acima de 85%: *correlação fortíssima*;

De acordo com os valores propostos, a variável cimento possui correlação fortíssima e a variável quantidade de material fresado possui correlação muito forte com o modelo.

Para a estimativa da Resistência à Compressão Simples, sem e com a utilização de cimento, o modelo utilizado para estimativa de valor é, conforme a equação (6):

$$Y = 92,026634 * e^{(1,651297 * X_1)} * e^{(0,015460 * X_2)} \quad (6)$$

Onde:

Y = Resistência à Compressão Simples (RCS);

X<sub>1</sub> = Cimento, se não possui em sua composição (0), se possui (1);



$X_2$  = Quantidade (%), de material fresado da mistura, na relação solo/material fresado;

#### 4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

As amostras foram moldadas na energia intermediária, com três corpos de prova para cada composição. As misturas que possuíam cimento na dosagem foram moldados três corpos de prova para cada tempo de cura, no caso 7, 14 e 28 dias. A Figura 52 mostra um corpo de prova após ensaio de RTCD.

**Figura 52: Corpo de prova após ensaio de RTCD.**



**Fonte: Autor (2020).**

Do mesmo modo que foi utilizado nos resultados de resistência à compressão simples, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras, observa-se a influência da adição de material fresado, a influência da adição de cimento e a influência do tempo de cura.

##### 4.5.1 Influência da Adição de Material Fresado nas Propriedades Mecânicas das Amostras.

Na Figura 53 é apresentado os resultados da resistência à tração por compressão diametral, no qual é possível constatar o aumento dos valores juntamente com o aumento do percentual de material fresado na mistura, o maior valor encontrado ocorreu na composição com adição de 60% de material fresado e

40% de solo, com valores de 48,18 KPa, quando aumenta a adição de material fresado para 80%, os valores diminuem para 20,47 KPa, indicando que a composição ideal ocorre com 60% de material fresado.

**Figura 54: RTCD nas composições sem cimento.**

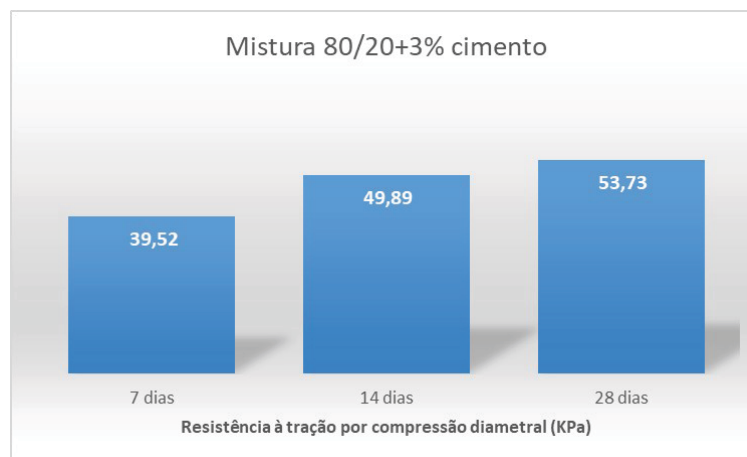


**Fonte: Autor (2020).**

#### 4.5.2 Influência do Tempo de Cura nas Propriedades Mecânicas das Amostras com Cimento.

São apresentados os resultados dos ensaios com misturas que possuem cimento em sua composição nas Figuras 54 à 58, foi utilizado como tempo de cura, 7, 14 e 28 dias.

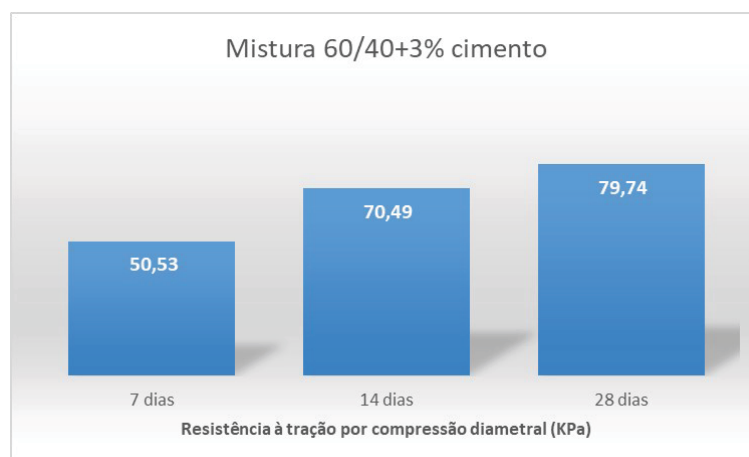
**Figura 54: Gráfico de RTCD da composição 80% de solo, 20% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 54 estão os valores de RTCD, na composição 80% solo, com 20% de material fresado e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 14 KPa.

**Figura 55: Gráfico de RTCD da composição 60% de solo, 40% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 55 estão os valores de RTCD, na composição 60% solo, com 40% de material fresado e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 30 KPa.

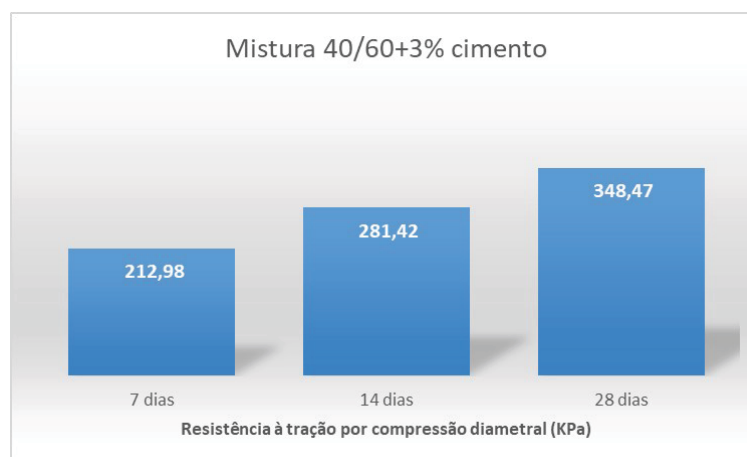
**Figura 56: Gráfico de RTCD da composição 50% de solo, 50% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 56 estão os valores de RTCD, na composição 50% solo, com 50% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 41 KPa nos valores de RTCD, devido os dias de cura.

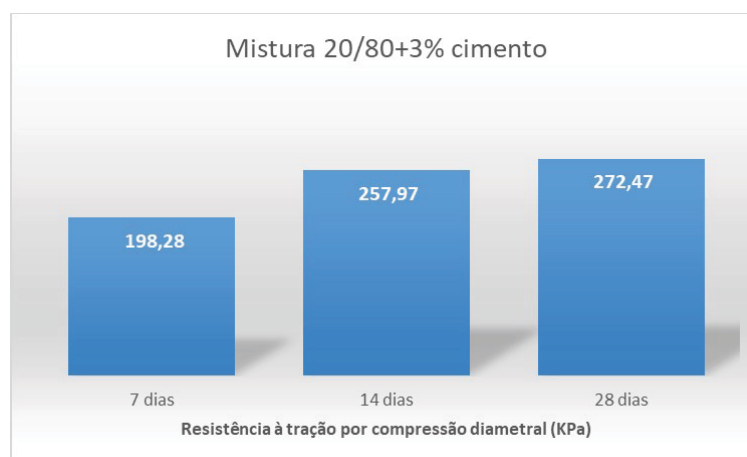
**Figura 57: Gráfico de RTCD da composição 40% de solo, 60% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 57 estão os valores de RTCD, na composição 40% solo, com 60% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 136 KPa.

**Figura 58: Gráfico de RTCD da composição 20% de solo, 80% de material fresado e adição de 3% de cimento, com 7, 14 e 28 dias de cura.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 58 estão os valores de RTCD, na composição 20% solo, com 80% de material fresado, e adição de 3% de cimento, aos 7, 14 e 28 dias de cura do cimento, comparando os valores aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, observa-se um aumento em torno de 174 KPa.

Na Figura 59 observa-se o posicionamento do corpo de prova para a correta execução do ensaio, sendo diferente do posicionamento utilizado para os ensaios de RCS.

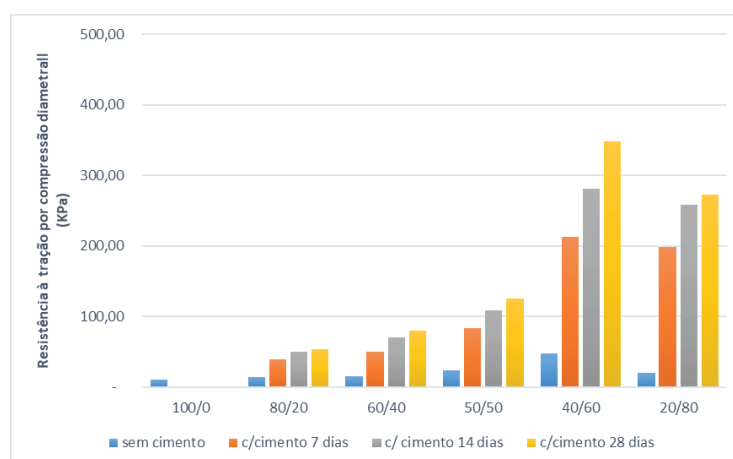
**Figura 59: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.**



**Fonte: Autor (2020).**

#### 4.5.3 Influência da Adição de Cimento nas Propriedades Mecânicas das Amostras

Conforme gráfico constante na Figura 62, ocorre o ganho de resistência à tração por compressão diametral com a adição de cimento, considerando os dias de cura, todas as composições obtiveram maior resultado de RTCD aos 28 dias de cura.

**Figura 60: Gráfico comparativo de valores de RTCD.**

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 26 é exibido resumo dos resultados referente aos ensaios de RTCD.

**Tabela 26: Resultados resistência à tração por compressão diametral (kPa).**

solo (%)	fresado (%)	cim. (%)	qt 0 dias	qt 7 dias	qt 14 dias	qt 28 dias
100	-		10,23			
80	20		14,50			
60	40		15,35			
50	50		23,88			
40	60		48,18			
20	80		20,47			
80	20	3		39,52	49,89	53,73
60	40	3		50,53	70,49	79,74
50	50	3		83,27	108,30	124,93
40	60	3		212,98	281,42	348,37
20	80	3		198,28	257,97	272,47

Fonte: Autor (2020).

Os resultados de RTCD aumentaram com a adição de material fresado, tendo seu valor mínimo no solo puro, de 10,23 KPa, chegando ao valor máximo de 48,18 KPa com adição de 60% de material fresado sem cimento, com maior adição de material fresado, ocorreu a diminuição dos valores de RTCD, com a adição de 80% de material fresado os valores obtidos foram de 20,47 KPa, nas misturas com cimento, o comportamento se manteve, alcançando as maiores resistências com a adição de 60% de material fresado, com valores de 348,37 KPa aos 28 dias de cura,

e ocorrendo a diminuição dos valores com maior adição de material fresado, com a adição de 80% de material fresado, os valores obtidos foram de 272,47 KPa, aos 28 dias de cura.

#### 4.5.4 Análise Estatística dos Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral pelo Método ANOVA

Na Tabela 27 é apresentada a análise de variância da variável quantidade de material fresado dos resultados de resistência à tração por compressão diametral, nas amostras sem cimento, utilizando energia intermediária, a coluna SQ é a soma dos quadrados correspondentes a variabilidade causada pela variável quantidade de material fresado e o erro residual. A coluna MQ é o quadrado médio, F é o valor da coordenada correspondente da distribuição F, o qual é obtida da relação MQ (material fresado)/MQ (resíduos), o valor  $p$ , ou probabilidade de significância de que os resultados obtidos pertençam a uma mesma distribuição ao se modificar o nível do fator controlável (TEIXEIRA, 2019).

Valores de  $p$  inferiores a 0,05 indicam que a variável quantidade de material fresado é significativa, a coluna F crítico traz o valor mínimo para o F calculado, para que a hipótese nula seja rejeitada.

**Tabela 27: Análise de variância RTCD para composições sem cimento.**

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Qtde. Material Fresado	1.410,70	1	1.410,70	15,15	0,00299	4,9646
Resíduos	930,73	10	93,07			
Total	2.341,44	11				

**Fonte: Autor (2020).**

Na Tabela 28 é exibido os parâmetros acerca da análise de variância das misturas com adição de cimento, tendo como variável quantidade de material fresado, foi utilizado para a análise os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura.

**Tabela 28: Análise de variância RTCD para composições com cimento.**

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Qtde de Material fresado	84.707,60	1	84.707,60	10,768	0,01679	5,98738
Resíduos	47.199,70	6	7.866,61			
Total	131.907,00	7				

**Fonte: Autor (2020).**

A análise de variância da variável quantidade de material fresado nas misturas sem cimento e nas misturas com cimento obtiveram  $p < 0,05$  e F calculado acima do F crítico, indica que a variável quantidade de material fresado é uma variável significativa nos resultados de resistência à tração por compressão diametral.

#### 4.5.5 Estudo de Regressão nos Valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para o desenvolvimento de uma equação que seja possível estimar os valores de resistência à tração por compressão diametral, utilizando os mesmos materiais pesquisados neste trabalho, foram utilizadas três variáveis, sendo o valor de resistência à tração por compressão diametral como variável dependente, ou seja, seus valores são influenciados pela quantidade de material fresado utilizado na mistura e se há ou não a utilização de cimento. Proporção de material fresado: variável quantitativa, variando de 0 a 60 (proporção onde se obteve maior resistência à tração por compressão diametral) ;

- Proporção de material fresado: variável quantitativa, variando de 0 a 60 (proporção onde se obteve maior resistência à tração por compressão diametral) ;
- Resistência à tração por compressão diametral (RTCD): variável dependente;
- Cimento: variável dicotômica, sendo 0, para misturas sem adição de cimento; e 1, para misturas com adição de cimento;

O modelo escolhido apresentou os coeficientes conforme Tabela 29.



**Tabela 29: Coeficientes modelo estatístico.**

<b>COEFICIENTES</b>	Correlação	0,92331
	Determinação	0,85249
	Ajustado	0,81562
<b>F-SNEDECOR</b>	Significância	< 0,01
<b>Desvio Padrão</b>		0,03771
<b>D-Watson</b>	Teste	Não autorregressão 90%

**Fonte: Autor (2020).**

O coeficiente de correlação do modelo foi calculado em 0,92331, contido na Tabela 29, quanto mais o valor se aproxima de 1, o modelo se mostra mais adequado, valores acima de 0,90 indicam correlação muito forte no modelo apresentado.

Conforme o coeficiente de determinação ajustado, o qual corrige a inclusão de variáveis pouco explicativas, de acordo com a Tabela 35, o modelo explica 81,52% da variância da variável dependente.

Na análise de resíduos, ou seja, se há aleatoriedade na distribuição dos resíduos em torno da média, importante para verificar se não houve tendenciosidade nos dados, o modelo apresentou os resultados conforme Tabela 30.

**Tabela 30: Resíduos.**

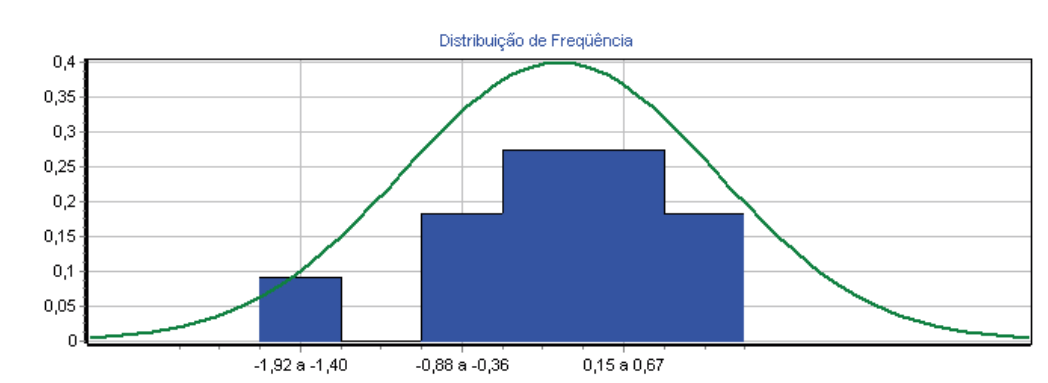
<b>NORMALIDADE</b>		
<b>Intervalo de Classe</b>	<b>% Padrão</b>	<b>% Modelo</b>
<b>-1 a 1</b>	68	72
<b>-1,64 a +1,64</b>	90	90
<b>-1,96 a +1,96</b>	95	100

**Fonte: Autor (2020).**

O modelo se mostra adequado, quanto aos resíduos, quando este apresenta indícios de normalidade, para isto se utiliza parâmetros relativos à distribuição normal para os intervalos de classe, contido na Tabela 30, onde consta o valor padrão para cada intervalo de classe, e o valor obtido no modelo estudado.

Na Figura 61, histograma de resíduos padronizados x curva normal padrão, se observa que o modelo escolhido é adequado, quando se analisa seu comportamento quanto aos resíduos.

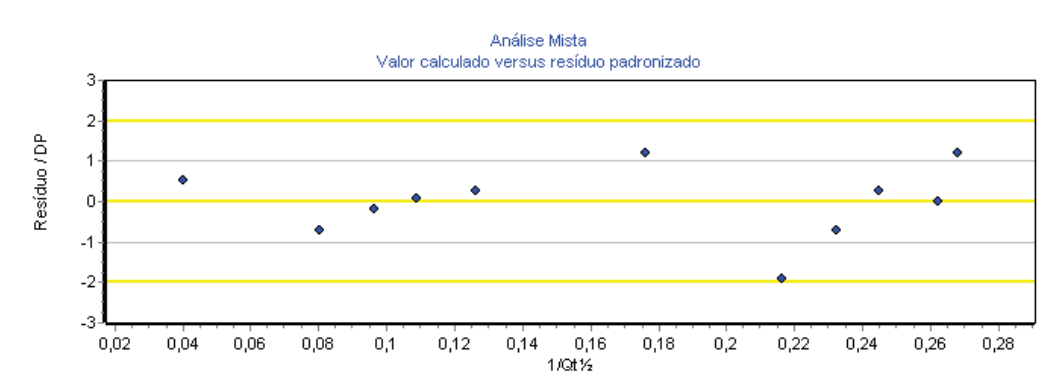
**Figura 61: Gráfico distribuição de frequência.**



Fonte: Autor (2020).

O teste de Durbin-Watson, que pode indicar dispersão tendenciosa resultou em não autorregressão em 90%, constante na Tabela 29, no gráfico contido na Figura 62, há agrupamentos, algo esperado devido os corpos de prova terem sido moldados em grupos de três para cada composição com o mesmo peso específico e a mesma umidade. É possível verificar que não há heterocedasticidade, ou seja, variância heterogênea, e sim, sua dispersão homogênea (homocedasticidade).

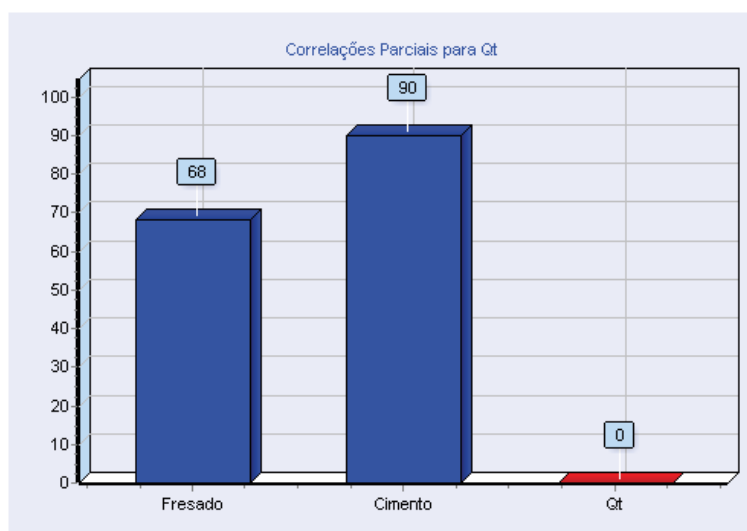
**Figura 62: Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 63 são apresentados os valores de correlações parciais das variáveis.

**Figura 63: Correlações parciais.**



Fonte: Autor (2020).

No gráfico contido na Figura 63 constam os valores das correlações parciais, ou seja, a correlação entre a variável dependente e as demais variáveis, quanto mais alto o valor obtido, melhor a correlação, o software utilizado sugere para análise das correlações parciais os valores limites:

- Até 40%: *correlação fraca*;
- Até 60%: *correlação média*;
- Até 75%: *correlação forte*;
- Até 85%: *correlação muito forte*;
- Acima de 85%: *correlação fortíssima*;

De acordo com os valores propostos, a variável cimento possui correlação fortíssima e a variável quantidade de material fresado possui correlação forte com o modelo.

Para a estimativa da resistência à tração por compressão diametral, com a utilização de cimento, para quantidade de material fresado até o limite de 60%, onde foi encontrada a maior resistência à tração por tração diametral, o modelo utilizado para estimativa de valor é, conforme a equação (7):

$$Y = \frac{1}{(0,268046 + -0,000014 * X_1^2 + -0,136030 * X_2)^2} \quad (7)$$

Onde:

Y = Resistência à Tração por Compressão Diametral;

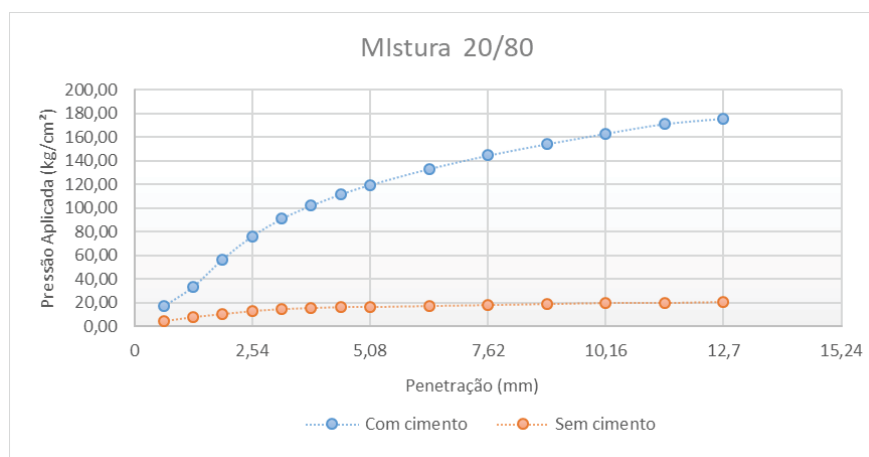
$X_1$  = Quantidade (%), de material fresado da mistura, na relação solo/material fresado;

$X_2$  = cimento (0 se não possui em sua composição, 1 se possui).

#### 4.6 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Nos gráficos contidos nas figuras 64 à 68 são apresentados as curvas referentes ao ISC, contendo em cada gráfico as curvas das misturas com e sem a adição de cimento.

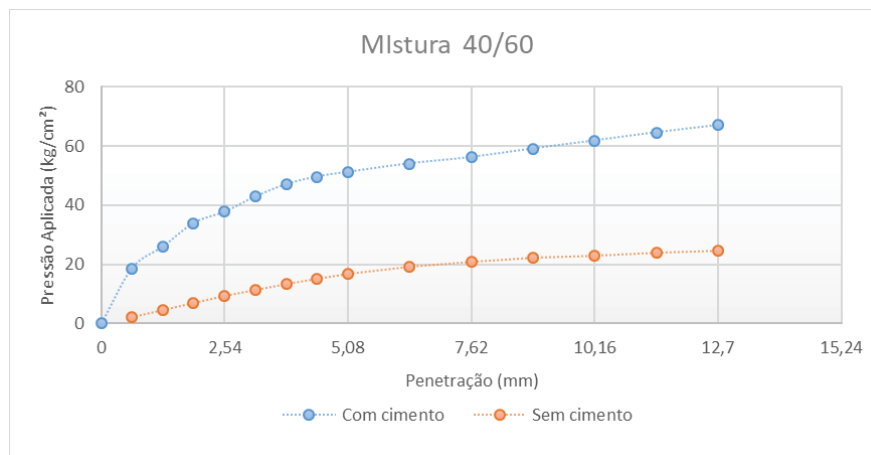
**Figura 64: Pressão aplicada x penetração, composição 20% de solo, 80% de material fresado, com e sem adição de cimento.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 64 é apresentado gráfico comparativo dos valores de penetração (mm) x pressão aplicada (kg/cm<sup>2</sup>) em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para a mistura com 20% de solo e 80% de material fresado, com e sem adição de cimento.

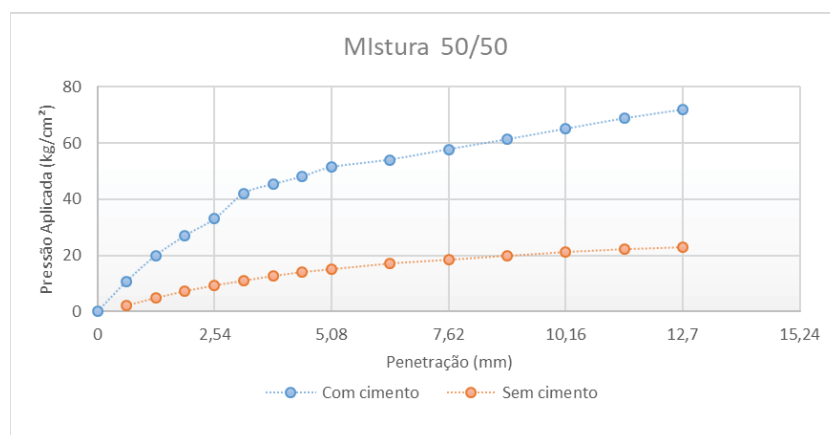
**Figura 65: Pressão aplicada x penetração, composição 40% de solo, 60% de material fresado, com e sem adição de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 65 é exibido gráfico comparativo dos valores de penetração (mm) x pressão aplicada (kg/cm<sup>2</sup>) em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para a mistura com 40% de solo e 60% de material fresado, com e sem adição de cimento.

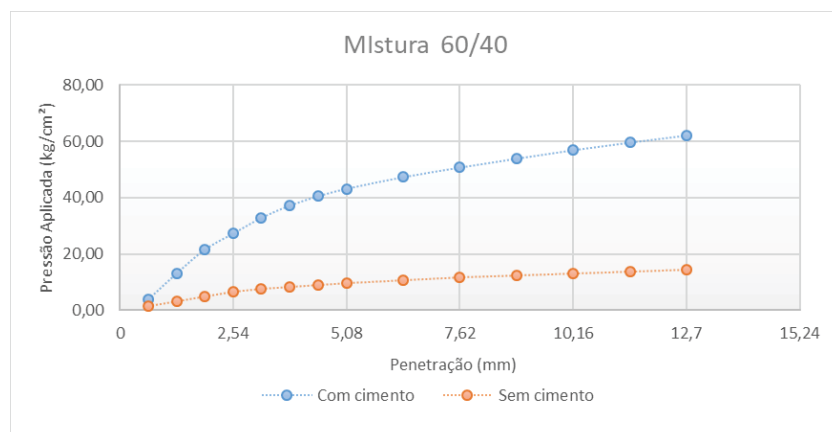
**Figura 66: Pressão aplicada x penetração, composição 50% de solo, 50% de material fresado, com e sem adição de cimento.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 66 é exibido gráfico comparativo dos valores de penetração (mm) x pressão aplicada (kg/cm<sup>2</sup>) em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para a mistura com 50% de solo e 50% de material fresado, com e sem adição de cimento.

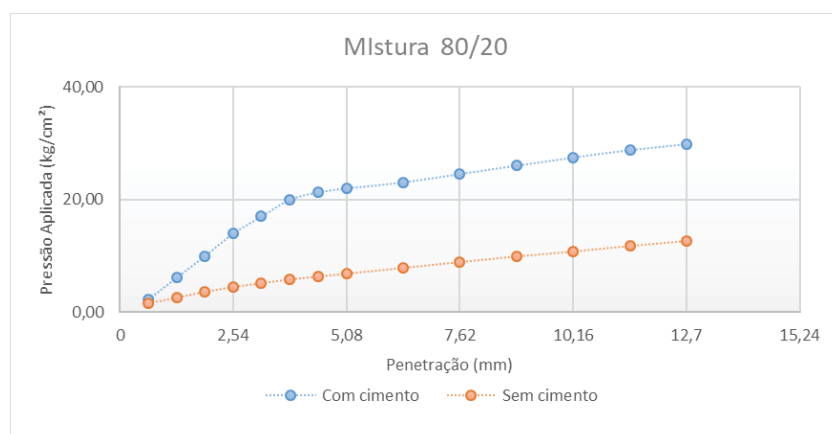
**Figura 67: Pressão aplicada x penetração, composição 60% de solo, 40% de material fresado, com e sem adição de cimento.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 67 é exibido gráfico comparativo dos valores de penetração (mm) x pressão aplicada (kg/cm<sup>2</sup>) em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para a mistura com 60% de solo e 40% de material fresado, com e sem adição de cimento.

**Figura 68: Pressão aplicada x penetração, composição 80% de solo, 20% de material fresado, com e sem adição de cimento.**

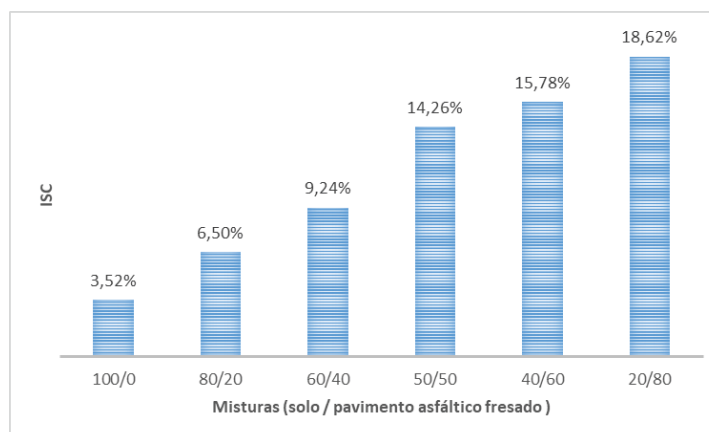


**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 68 é exibido gráfico comparativo dos valores de penetração (mm) x pressão aplicada (kg/cm<sup>2</sup>) em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para a mistura com 80% de solo e 20% de material fresado, com e sem adição de cimento.

Os valores referentes ao Índice de Suporte Califórnia, para as composições sem cimento, moldadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo na energia intermediária, são apresentados na Figura 69.

**Figura 69: Gráfico ISC x composições solo/material fresado sem cimento.**



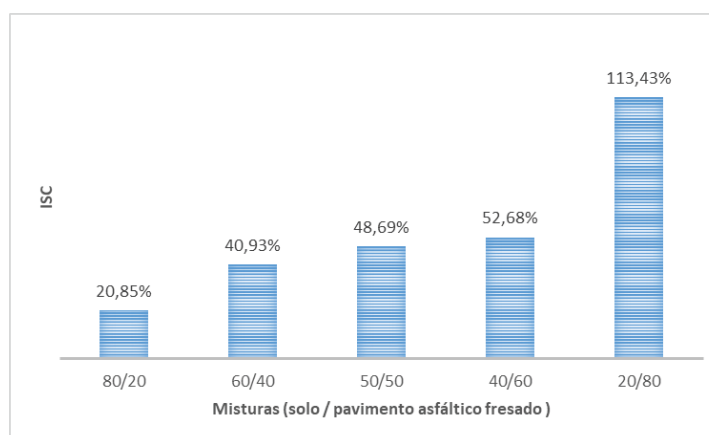
**Fonte: Autor (2020).**

Conforme resultados obtidos, os valores de ISC aumentaram à medida que a quantidade de material fresado aumenta na mistura. De acordo com a Figura 69, observa-se um crescimento mais robusto entre os percentuais de 40% e 50% de material fresado, em torno de 5% nos valores de ISC.

Para o solo puro o valor de ISC foi de 3,52% e valor máximo obtido ocorreu com a adição de 80% de material fresado, com ISC de 18,62%.

Os valores referentes ao Índice de Suporte Califórnia, para as composições com cimento, moldadas na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo na energia intermediária, são apresentados na Figura 70.

**Figura 70: Gráfico ISC x composições solo/material fresado com cimento.**



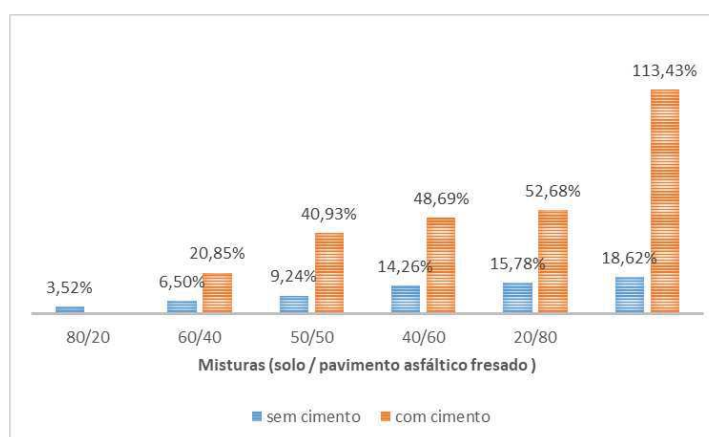
**Fonte: Autor (2020).**

Com os valores obtidos nos ensaios de ISC para as misturas com cimento, verificou-se o mesmo comportamento das misturas sem cimento.

O aumento dos valores ocorreram de forma concomitante ao aumento da quantidade de material fresado, tendo seu menor valor quando se adiciona 20% de material fresado, com valores de ISC de 20,85%, e obtendo o valor de ISC com adição de 80% de material fresado, com valor de 113,43%. Entretanto, na maior quantidade de material fresado utilizado nas misturas, o aumento no valor de ISC foi desproporcional ao que foi observado no comportamento em outras misturas, ocorrido provavelmente pela maior rigidez alcançada, ocasionado pela utilização do cimento e também pela maior proporção de material fresado, que foi de 80%.

Na Figura 71 é apresentado a variação de valores de ISC para as composições com e sem cimento.

**Figura 71: Gráfico ISC x Composições com e sem cimento.**



**Fonte: Autor (2020).**

Constata-se que onde ocorreu maior variação em relação aos ensaios de ISC foi na composição com 20% de solo e adição de 80% de material fresado, ou seja, na composição com maior quantidade de material fresado, onde os valores de ISC nas misturas sem cimento foram de 18,62%, e nas misturas com cimento os valores de ISC foram de 113,43%, em torno de seis vezes maiores, quando comparado aos valores da mesma composição, mas sem a utilização de cimento, as outras composições tiveram variações mais lineares, entre três e quatro vezes o valor de ISC, quando comparado à mistura sem cimento, este aumento devido ao cimento também foi constatado por Corrêa *et al* (2014).



Na Figura 72 é exibida a execução do ensaio de Índice de Suporte Califórnia, onde é observa-se o equipamento utilizado, a posição do molde e a localização da prensa.

**Figura 72: Ensaio Índice de Suporte Califórnia.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Tabela 31 são apresentados os resultados obtidos quanto ao ISC, com diferentes dosagens de materiais, verificando os resultados se conclui o benefício da utilização do cimento, em relação aos valores de ISC, os quais sofreram aumento entre três à quatro vezes, quando se compara os valores com e sem cimento da mesma composição.

**Tabela 31: Resultados ISC com e sem cimento.**

Solo/Fresado	Índice Suporte Califórnia	
	sem cimento (%)	com cimento (%)
100/0	3,52	
80/20	6,50	20,85
60/40	9,24	40,93
50/50	14,26	48,69
40/60	15,78	52,68
20/80	18,62	113,43

**Fonte: Autor (2020).**

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) contém as especificações para um dado material ser utilizado nas diferentes camadas de pavimento, considerando os valores de ISC, expansão, índice de grupo, limite de liquidez e índice de plasticidade conforme Tabela 32.

**Tabela 32: Parâmetros Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).**

<p><b>SUBLEITO:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansão <math>\leq</math> 2%</li> <li>- ISC <math>\geq</math> 2%</li> </ul>	<p><b>REFORÇO DO SUBLEITO:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ISC &gt; subleito</li> <li>- Expansão <math>\leq</math> 1%</li> </ul>
<p><b>SUB-BASE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ISC <math>\geq</math> 20%</li> <li>- I.G. = 0</li> <li>- Expansão <math>\leq</math> 1%</li> </ul>	<p><b>BASE:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ISC <math>\geq</math> 80%</li> <li>- Expansão <math>\leq</math> 0,5%</li> <li>- Limite de Liquidez <math>\leq</math> 25%</li> <li>- Índice de Plasticidade <math>\leq</math> 6%</li> </ul>

**Fonte: Autor (2020).**

Considerando inicialmente apenas o ISC das misturas utilizadas, todas as composições que não utilizaram cimento ficaram enquadradas para uso em subleito. Quando são consideradas as misturas com adição de cimento, é possível sua utilização com sub-base. Quando analisado o ISC, a mistura 20/80, alcançou ISC de 113,43%, podendo ser utilizada como material de base, desde que atenda os outros pré-requisitos estabelecidos.

De acordo com a ES 139 (DNIT, 2010), os critérios para utilização das misturas como camada de sub-base, conforme também contido na Tabela 39, a energia utilizada para os ensaios de compactação deve ser no mínimo a energia intermediária, tal característica foi atendida nos ensaios realizados.

A ES 141/2010 (DNIT), que trata de especificações para base estabilizada granulometricamente, a exigência para o ISC depende do número N calculado para o trecho, caso o número N seja superior a  $5 \times 10^6$ , o ISC deve ser igual ou maior que 80%, caso seja igual ou menor ao número N citado, o ISC deve ser igual ou maior que 60%, para ambos os casos a expansão deve ser igual ou menor a 0,5%.

Para as misturas com cimento, a ES 140 (DNIT, 2010) informa as características mínimas exigidas para a utilização como sub-base:

- ISC igual ou maior a 30%;
- Expansão máxima de 1%;
- Energia de compactação no mínimo energia intermediária;

Com os resultados obtidos, em relação ao ISC, conclui-se que, a partir da adição de 40% de material fresado, já é possível a sua utilização como camada de sub-base.

Quando se verifica quanto a sua utilização como base, conforme ES 142 (DNIT, 2010), são solicitadas as seguintes características:

- ISC igual ou maior a 80%;
- Expansão máxima de 0,5%;
- Energia de compactação modificada;

Os valores de ISC são alcançados na mistura com maior quantidade de material fresado (80%), entretanto, a energia utilizada foi a energia intermediária e não a energia modificada.

#### 4.6.1 Análise Estatística dos Resultados de Índice de Suporte Califórnia pelo Método ANOVA

Na Tabela 33 é exibido a análise de variância da variável quantidade de material fresado dos resultados de Índice Suporte Califórnia, nas amostras sem cimento, utilizando energia intermediária, a coluna SQ é a soma dos quadrados correspondentes a variabilidade causada pela variável quantidade de material fresado e o erro residual. A coluna MQ é o quadrado médio, F é o valor da coordenada correspondente da distribuição F, o qual é obtida da relação MQ (material fresado)/MQ (resíduos), o valor  $p$ , ou probabilidade de significância de que os resultados obtidos pertençam a uma mesma distribuição ao se modificar o nível do fator controlável (TEIXEIRA, 2019).

Valores de  $p$  inferiores a 0,05 indicam que a variável quantidade de material fresado é significativa, a coluna F crítico traz o valor mínimo para o F calculado, para que a hipótese nula seja rejeitada.

**Tabela 33: Análise de variância ISC para composições sem cimento.**

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Qtde. Material Fresado	2.762,761	1	2.762,761	6,49	0,0289	4,96
Resíduos	4.253,557	10	425,355			
Total	7.016,318	11				

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 34 são apresentados os dados de análise de variância das misturas com adição de cimento, tendo como variável quantidade de material fresado, foi utilizado para a análise os resultados de Índice de Suporte Califórnia.

**Tabela 34: Análise de variância ISC para composições com cimento.**

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Qtde. Material Fresado	70,649	1	70,649	0,0828	0,780	5,317
Resíduos	6.822,952	8	852,86			
Total	6893,601	9				

Fonte: Autor (2020).

Neste caso o F calculado ficou menor que o F crítico, e o valor de  $p$  foi superior a 0,05, indicando neste caso que a quantidade de material fresado não teve grande influência no aumento dos resultados de ISC, analisando os resultados, nota-se que na composição com maior proporção de material fresado (20/80), o valor obtido no ensaio teve grande aumento em relação à proporção mais próxima em relação à quantidade de material fresado (40/60), com aumento acima de 100% nos valores de ISC, este resultado distorceu a análise de variância das composições com cimento.

#### 4.6.2 Estudo de Regressão nos Valores de Índice Suporte Califórnia

Para o desenvolvimento de uma equação que permita a estimativa dos valores de Índice de Suporte Califórnia, utilizando os mesmos materiais pesquisados neste trabalho, foram utilizadas três variáveis, sendo o valor de Índice de Suporte Califórnia como variável dependente.

- Proporção de material fresado: variável quantitativa;
- Índice Suporte Califórnia (ISC): variável dependente;

- Cimento: variável dicotômica, sendo 0 para misturas sem adição de cimento; e 1 para misturas com adição de cimento;

O modelo escolhido apresentou os coeficientes contidos na Tabela 35.

**Tabela 35: Coeficientes modelo estatístico.**

<b>COEFICIENTES</b>	Correlação	0,99152
	Determinação	0,98310
	Ajustado	0,97388
<b>F-SNEDECOR</b>	Significância	< 0,01
<b>Desvio Padrão</b>		0,14782
<b>D-Watson</b>	Teste	Não autorregressão 90%

**Fonte: Autor (2020).**

O coeficiente de correlação do modelo foi calculado em 0,99152, conforme Tabela 35, quanto mais o valor se aproxima de 1, o modelo se mostra mais adequado, valores acima de 0,90 indicam correlação muito forte no modelo apresentado.

Conforme o coeficiente de determinação ajustado, o qual corrige a inclusão de variáveis pouco explicativas, o modelo explica 97,39% da variância da variável dependente.

Na análise de resíduos, ou seja, se há aleatoriedade na distribuição dos resíduos em torno da média, importante para verificar se não houve tendenciosidade nos dados, o modelo apresentou os resultados conforme Tabela 36.

**Tabela 36: Resíduos.**

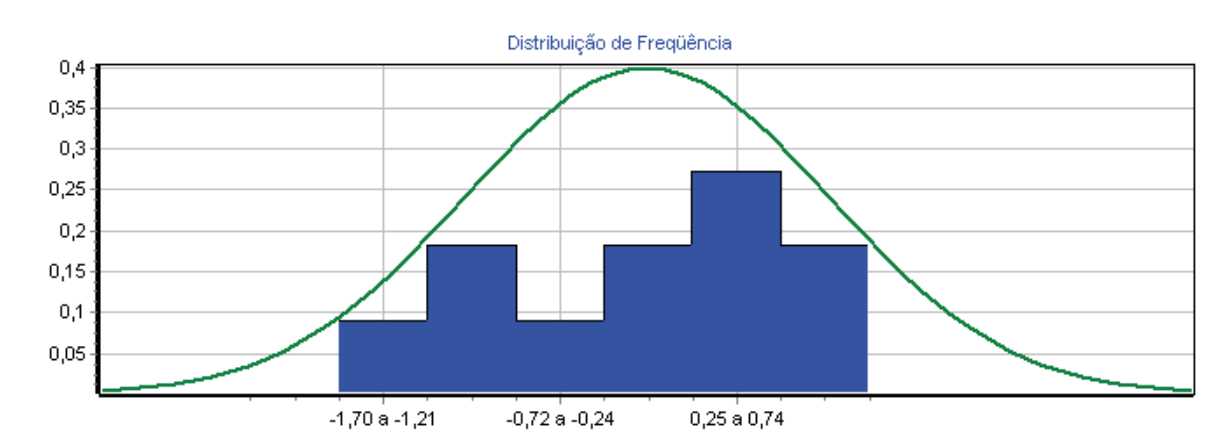
<b>NORMALIDADE</b>		
<b>Intervalo de Classe</b>	<b>% Padrão</b>	<b>% Modelo</b>
<b>-1 a 1</b>	68	72
<b>-1,64 a +1,64</b>	90	90
<b>-1,96 a +1,96</b>	95	100

**Fonte: Autor (2020).**

O modelo se mostra adequado, quanto aos resíduos, quando este apresenta indícios de normalidade, para isto se utiliza parâmetros relativos à distribuição normal para os intervalos de classe conforme Tabela 36, onde consta o valor padrão para cada intervalo de classe, e o valor obtido no modelo estudado.

Com a Figura 73, Histograma de Resíduos Padronizados x Curva Normal Padrão, conclui-se que o modelo escolhido é adequado quando se analisa seu comportamento quanto aos resíduos.

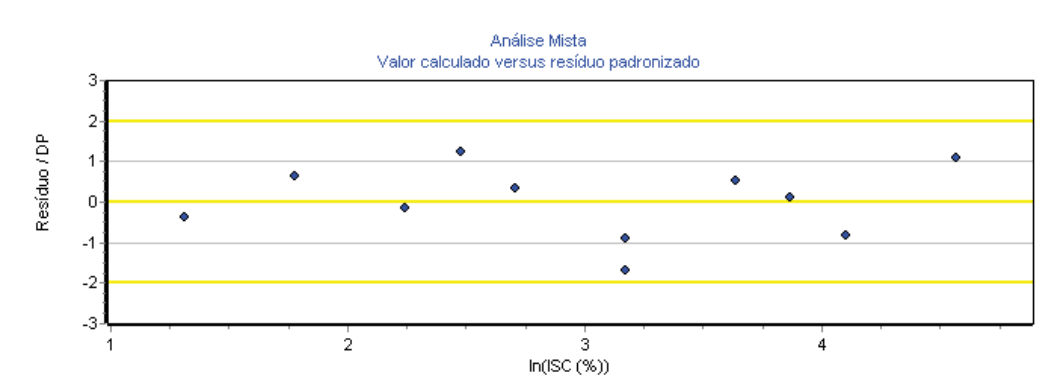
**Figura 73: Gráfico distribuição de frequência.**



Fonte: Autor (2020).

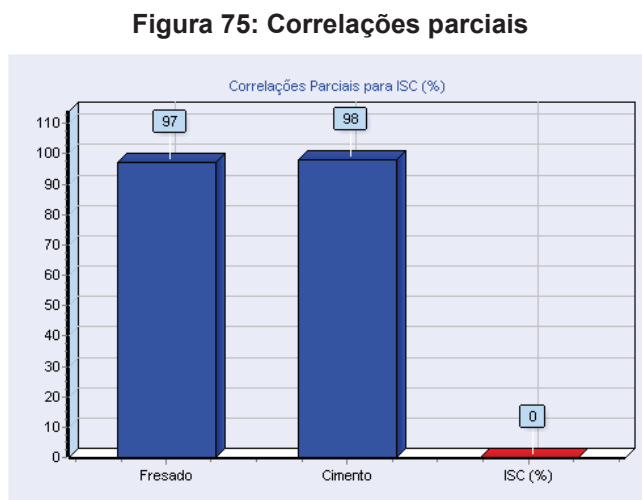
O teste de Durbin-Watson, que pode indicar dispersão tendenciosa resultou em não autorregressão em 90%, constante na Tabela 35. Na Figura 77 verifica-se que não há heterocedasticidade, ou seja, variância heterogênea, e sim sua dispersão homogênea (homocedasticidade).

**Figura 74: Gráfico valor calculado x resíduo padronizado.**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 75 é apresentado os valores de correlações parciais do modelo



Fonte: Autor (2020)

No gráfico contido na Figura 75 é possível observar as correlações parciais, ou seja, a correlação entre a variável dependente e as demais variáveis, quanto mais alto o valor obtido, melhor a correlação. O software utilizado sugere para análise das correlações parciais os valores limites:

- Até 40%: *correlação fraca*;
- Até 60%: *correlação média*;
- Até 75%: *correlação forte*;
- Até 85%: *correlação muito forte*;
- Acima de 85%: *correlação fortíssima*;

De acordo com os valores propostos a variável cimento possui correlação fortíssima e a variável quantidade de material fresado também possui correlação fortíssima com o modelo.

Para a estimativa de Índice Suporte Califórnia, o modelo utilizado para estimativa de valor é, conforme a equação (8):

$$Y = 3,634005 * e^{(0,023285 * X1)} * e^{(1,393372 * X2)} \quad (8)$$

Onde:

Y = Índice de Suporte Califórnia (ICS);

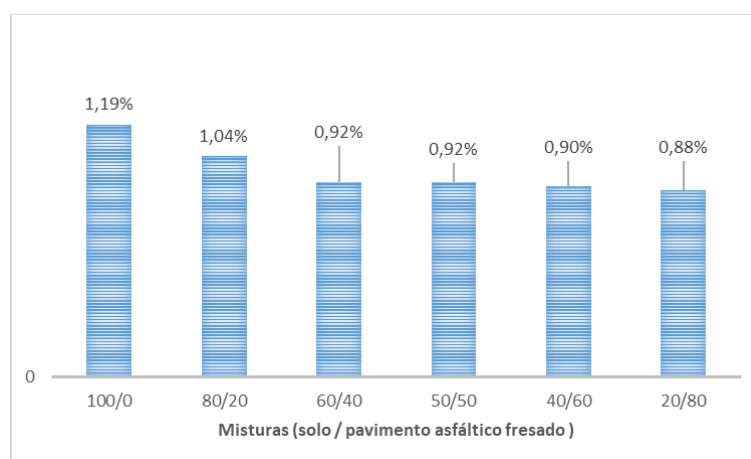
$X_1$  = Quantidade (%), de material fresado da mistura, na relação solo/material fresado;

$X_2$  = Cimento (1, se possui cimento em sua composição; 0, se não);

#### 4.6.3 Expansão

Na Figura 76 observam-se os dados de expansão das misturas sem cimento, sendo expansão x proporção solo/ material fresado.

**Figura 76: Expansão amostras sem cimento.**

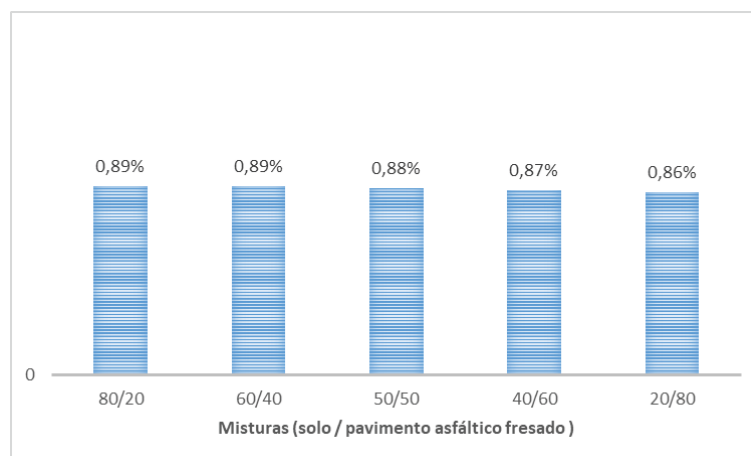


**Fonte: Autor (2020).**

A adição de material fresado diminuiu os valores de expansão do solo puro, quando se compara a composição com 100% de solo e a composição que possui a maior proporção de material fresado, que é de 80%, houve uma diminuição de 26% na expansão da mistura, os valores de expansão para o solo puro foi de 1,19%, enquanto os valores de expansão para a composição com adição de 80% de material fresado foram de 0,88%.

No gráfico apresentado na Figura 77 observam-se as expansões encontradas nas misturas que possuem cimento.

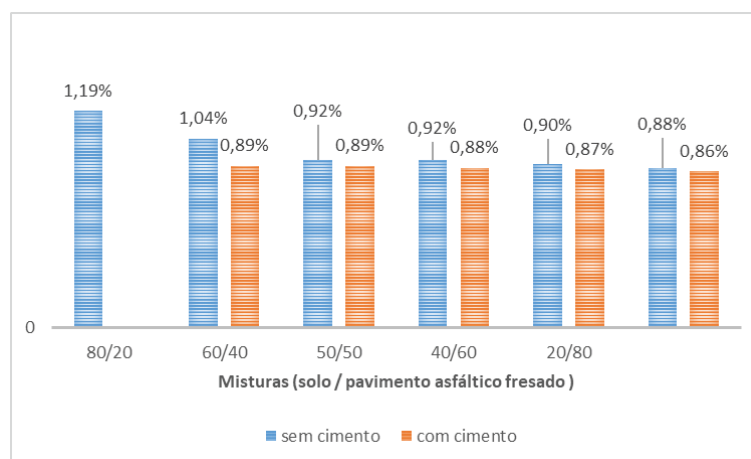


**Figura 77: Expansão amostras com cimento.**

Fonte: Autor (2020).

A redução dos valores encontrados em relação à expansão foram menores, na composição com adição de 20% de material fresado o valor da expansão foi de 0,89%, e na composição com adição de 80% de material fresado o valor da expansão foi de 0,86%, quando se comparados às misturas sem cimento, que obtiveram redução em torno de 26%, ao analisar a redução dos valores de expansão entre a composição com menor proporção de material fresado e a com maior proporção, houve redução em torno de 3% dos valores, sugere-se que a adição do cimento, neste caso, tenha maior influência quanto aos valores de expansão das misturas, tornando-as praticamente iguais quanto à expansão.

Na Figura 78 verifica-se a diminuição da expansão de acordo com a adição de material fresado, e também quando há a adição de cimento à mistura.

**Figura 78: Comparativo valores de expansão nas amostras com e sem cimento.**

Fonte: Autor (2020).

A utilização do material fresado, em relação aos valores de expansão, se mostrou benéfica, reduzindo os valores encontrados, conforme Figura 85. O solo puro obteve 1,19% nos ensaios de expansão, com a utilização de material fresado, sem a utilização de cimento, foi possível reduzir a expansão para 0,88%, e com a utilização de cimento foi possível reduzir a expansão para 0,86%, como se observa na Tabela 37.

**Tabela 37: Valores de expansão das amostras.**

Solo/RAP (%)	sem cimento (%)	com cimento (%)
100/0	1,19	-
80/20	1,04	0,89
60/40	0,92	0,89
50/50	0,92	0,88
40/60	0,90	0,87
20/80	0,88	0,86

**Fonte: Autor (2020).**

Quanto à utilização de material para reforço de subleito, é exigido expansão  $\leq 1\%$ , o solo em questão não atende os requisitos mas, com a adição de 40% de material fresado, a expansão alcança 0,92%, sendo possível sua utilização para reforço de subleito, desde que seu ISC seja superior ao ISC da camada de subleito em questão, os resultados foram parecidos com o que encontrou Gomes (2015) em seu trabalho. Onde que com a adição de material fresado apenas não foi possível alcançar valores mínimos para a utilização em camadas de sub-base do pavimento.

Para as misturas com a adição de cimento, a partir da adição de 40% de material fresado foi possível atender os requisitos referente ao ISC e à expansão, para sua utilização como camada de sub-base.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa consistiu na análise da influência da adição de material fresado em um solo tropical da Formação Guabirotuba, além da adição do material fresado e cimento neste mesmo solo, para verificar sua utilização nas diferentes camadas de um pavimento.

De acordo com o programa experimental e com a análise dos resultados foi possível as seguintes conclusões:

- A adição de material fresado ao solo acarretou aumento do Peso Específico Seco da mistura ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) nas composições sem cimento em torno de 28%, quando comparado o solo puro e a composição com adição de 80% de material fresado.
- A adição de material fresado ao solo acarretou aumento do Peso Específico Seco da mistura ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) nas composições com cimento em torno de 29,50%, quando comparado o solo puro e a composição com adição de 80% de material fresado e 3% de cimento.
- A adição de material fresado ao solo acarretou diminuição do teor de umidade ótima ( $w_{\acute{o}t}$ ) nas composições sem cimento em torno de 12%, quando comparado o solo puro e a composição com adição de 80% de material fresado.
- A adição de material fresado ao solo acarretou diminuição do teor de umidade ótima ( $w_{\acute{o}t}$ ) nas composições com cimento em torno de 13%, quando comparado o solo puro e a composição com adição de 80% de material fresado e 3% de cimento.
- Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) demonstraram que a adição de material fresado ocasionou o aumento da resistência em torno de 230%, até o percentual de adição de 60% de material fresado, onde a RCS encontrada foi de 371,82 KPa, quando se comparado à composição com 100% de solo, em quantidades maiores que 60%, houve diminuição da

resistência à compressão simples (RCS), o qual o valor obtido nos ensaios foi de 227,70 KPa, nas composições sem cimento, nas composições com cimento, o comportamento foi o mesmo, tendo a maior resistência à compressão simples na quantidade de adição de 60% de material fresado, de 2.502,08 KPa aos 28 dias de cura, e com a adição de 80% de material fresado, ocorreu a diminuição dos valores de RCS, sendo obtidos os valores de 1.879,58 KPa aos 28 dias de cura.

- Todas as composições com cimento tiveram ganho de resistência à compressão simples com o aumento dos dias de cura, a composição com adição de 20% de material fresado teve um ganho em torno de 263 KPa, a composição com adição de 40% de material fresado teve um ganho em torno de 125 KPa, a composição com adição de 50% de material fresado teve um ganho em torno de 210 KPa, a composição com adição de 60% de material fresado teve um ganho em torno de 433 KPa e a composição com adição de 80% de material fresado teve um ganho em torno de 233 KPa, estes ganhos de RCS se referem ao comparativo entre os valores aos 7 dias de cura e os valores aos 28 dias de cura.
- Com os ensaios de resistência à tração por compressão diametral conclui-se que a adição de material fresado ocasionou o aumento da resistência em torno de 370% até o percentual de adição de 60% de material fresado, quando se comparado à composição com 100% de solo, onde se obteve 48,18 KPa nos valores de RTCD, nas composições sem cimento, na composição com adição de 80% de material fresado ocorreu diminuição no valor de RTCD, com valores de 20,47 KPa, nas composições com cimento, o comportamento foi o mesmo, tendo a maior resistência à tração por compressão diametral na quantidade de 60% de material fresado aos 28 dias de cura, nos valores de 348,37 KPa, e com a adição de 80% de material fresado ocorrendo a diminuição de RTCD, com valores de 272,47 KPa, aos 28 dias de cura, tal comportamento provavelmente se deve a uma piora na distribuição granulométrica da mistura, onde, com os resultados obtidos, a composição com 60% de material fresado e 40% de solo se mostrou a composição com maiores valores de RTCD, possivelmente devido a uma melhor distribuição granulométrica com os materiais graúdos oriundos do

material fresado, com o material de granulometria fina, pertencente ao solo estudado.

- Todas as composições com cimento tiveram ganho de resistência tração por compressão diametral com o aumento dos dias de cura, a composição com adição de 20% de material fresado teve um ganho em torno de 14 KPa, a composição com adição de 40% de material fresado teve um ganho em torno de 29 KPa, a composição com adição de 50% de material fresado teve um ganho em torno de 41 KPa, a composição com adição de 60% de material fresado teve um ganho em torno de 135 KPa e a composição com adição de 80% de material fresado teve um ganho em torno de 74 KPa, estes ganhos de RTCD se referem ao comparativo entre os valores aos 7 dias de cura e os valores aos 28 dias de cura.
- A adição de material fresado no solo resultou no aumento dos valores de ISC encontrados em torno de 15%, quanto maior a adição de material fresado, maiores os valores encontrados, o solo sem adição obteve valor de 3,52% de ISC, enquanto a composição com 80% de material fresado obteve o valor de 18,62% de ISC.
- Nas composições com cimento, também houve aumento nos valores de ISC em todas as composições com material fresado, a composição com adição de 20% de material fresado obteve valores 20,85% de ISC, enquanto a composição com adição de 80% de material fresado obteve valores de 113,43% de ISC.
- O uso de RAP se mostrou adequado para adição em solo da Formação Guabirota, melhorando suas propriedades mecânicas.
- O percentual de 60% de adição de material fresado se mostrou o mais indicado, alcançando os valores mais altos para RCS e RTCD.
- O uso do cimento é indicado para a sua utilização como camada de sub-base.
- As equações obtidas para estimativa de RCS, RTCD e ICS têm sua aplicabilidade em experimentos laboratoriais.
- A utilização da energia de compactação intermediária foi um fator limitante para a análise das misturas como camada de base.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de módulo de resiliência para poder obter parâmetros e ser possível verificar o comportamento da composição material fresado e solo sob carregamentos repetidos;
- Analisar as mesmas composições com diferentes tipos de material fresado, com diferentes ligantes asfálticos utilizados e diferentes granulometrias;
- Avaliar se a temperatura, em camadas inferiores, pode influenciar no comportamento do ligante presente no material fresado;
- Executar pista-teste para verificar o comportamento de material fresado como camada de pavimento em campo;
- Realizar ensaio de microscopia eletrônica para verificar as mudanças ocorridas no solo pela adição de material fresado e cimento;
- Realizar um maior número de ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e de resistência à tração por compressão diametral, com diferentes teores estudados, possibilitando maior calibração para equação de estimativa do modelo.

## REFERÊNCIAS

ABEDA. - **Manual básico de emulsões asfálticas**: 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova , Rio de Janeiro, RJ. 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização, Rio de Janeiro, RJ. 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez, Rio de Janeiro, RJ. 2017

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade, Rio de Janeiro, RJ. 2016

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, RJ. 2017

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação, Rio de Janeiro, RJ. 2016

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação, Rio de Janeiro, RJ. 1982

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ. 2011

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada, Rio de Janeiro, RJ. 1992

ADHIKARI, S., KHATTAK, M. J., ADHIKARI, B., Mechanical characteristics os soil-RAP-geopolymer mixtures for road base and subbase layers. **International journal of pavement engineering**, v. 21, n. 4 p,483-496, jul. 2018. doi: <https://doi.org/10.1090/10298436.2018.1492131>

ALHAJI, M. M., ALHASSAN, M., Effect of reclaimed asphalt pavement stabilization on the microstructure and strength of black cotton soil. **International journal of technology**, v.9, n. 4, p. 727-736. jul. 2018. doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i4.43>

AZÊVEDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** 2010. 178f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BALDOVINO, J. J. A. **Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica Guabirota tratado com cal em diferentes tempos de cura.** 2018. 174f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

BAPTISTA, C. N., **Pavimentação: compactação dos solos no campo, camadas de base e estabilização dos solos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1976.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica.** 2007. 190f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 1. ed. Rio de Janeiro: 2008.

BORDIGNON V. R. **Efeito da adição da cal hidratada na estabilização de solo laterítico para pavimentação urbana na região de Curitiba.** 2015. 126f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

CAMPOS, D. J. F., NOGUEIRA, J. F., SOUZA, A. T. Análise experimental de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. XVIII., BELO HORIZONTE., 2016. P. 19-22.



CARDOSO, A. 2019. **Comportamento mecânico de um solo da Formação Guabirotuba com adição de resíduo de rochas ornamentais**. 2019. 126f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

CEOLIN, D. P., BERTUOL, M., CRUZ, M. A., CENTOFANTE, R., Estudo da estabilização do solo com material fresado e cimento para aplicação em camadas de sub-base de pavimentos. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, X., **Anais...**, Santa Maria: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – Núcleo do Rio Grande do Sul, 2019.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B., **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

CORRÊA, A. L., BRAGA, S. M., AGUIAR, M. F. P., OLIVEIRA, F. H. L., MONTEIRO, F. F., NETO, J. C. P., Melhoramento de solos para camadas de pavimentos rodoviários com material fresado e estabilização química. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 43., **Anais...**, Maceió: 17º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2014.

DAS, B. M.; **Fundamentos de engenharia geotécnica**: 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DER/PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. **ES-P 11: Pavimentação – solo-cimento e solo tratado com cimento**, Curitiba, PR. 2018

DIAS, P. S., PINTO, I. E., COSTA, C., Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argilo siltoso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 44., **Anais...**, Foz do Iguaçu: 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2015.

DIEFENDERFER, B. K. SANCHEZ, M. D., TIMM, D. H., BOWERS, B.F., Structural study of cold central plant recycling sections at the national center for asphalt technology (NCAT) test track: **Virginia transportation research council**, 2016.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 93:** Solos - determinação da densidade real, Rio de Janeiro, RJ. 1994

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação.** 3 ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** 2 ed. Publ. IPR-720. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ME 155.** Material asfáltico – determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ME 172.** Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ. 2016.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ES 139.** Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ES 140.** Pavimentação – sub-base de solo melhorado com cimento. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ES 141.** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, RJ. 2010

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ES 142.** Pavimentação – base de solo melhorado com cimento. Rio de Janeiro, RJ. 2010

FEDRIGO, W., NUNEZ, W. P., CERATTI, J. A. P., ELY, V., SOUZA, E. C., GONÇALVES, G. S., MAGALHÃES, A. M., FILHO, P. R. M., MELO, D. G. V., GONÇALVES, B. J. F. Efeito da energia de compactação e do teor de fresado no

comportamento mecânico de misturas típicas da reciclagem de pavimentos com adição de cimento. *Revista Estradas*. V.14. n.20, p. 22-27, 2015.

FERREIRA, R. C., FALEIRO, H. T., FREIRE, W. J., Desempenho físico-mecânico de solo argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando à aplicação em construções rurais, **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia (GO), v. 35, n. 3, p. 191-198. dez. 2005.

GARCÊS, A., RIBEIRO, G. Z., VAZ, E. F., SERENO, M. V. C., OLIVEIRA, V. N., Utilização de material proveniente de fresagem na composição de base e sub-base de pavimentos flexíveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. XVII., **Anais...**, Goiânia: Associação Brasileira de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, 2014.

GHANIZADEH, A. R., RAHROVAN, M., Modeling of unconfined compressive strength of soil-RAP blend stabilized with Portland cement using multivariate adaptive regression spline. **Frontiers of structural and civil engineering**: v. 13, n. 4, p. 787-799, mai. 2019. doi. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0516-8>.

GHANIZADEH, A. R., RAHROVAN, M., BAFGHI, K. B., The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation. **Construction and building materials**: v. 161, p. 165-174, fev. 2018. doi. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124>

GOMES, L. F. T. 2015. 75f. **Estudo da viabilidade do uso de material fresado com adição de cimento como opção de base e sub-base em pavimentos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pampa, Alegrete.

GONG, H., HUANG, B., SHU, X., Field performance evaluation of asphalt mixtures containing high percentage of RAP using LTPP data, **Construction and Building Materials**, v. 176. P. 118-128. 2018

HASAN, M.M., ISLAM, M.R., TAREFDER, R.A., Characterization of subgrade soil mixed with recycled asphalt pavement, **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)** v. 5. N. 3. Jun.2018, doi. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.03.007>.

HILÁRIO, R. Q. 2016. 139f. **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – estudo de caso BR-120.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

HOUBEN, H., GUILLAUD, H., **Earth construction:** a comprehensive guide, Intermediate Technology Publications, London: 1994. 362 p.

JUNIOR, L. P. V. A. 2019. 122f. **Estudo sobre estabilização de solo com material fresado de pavimentação asfáltica.** Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

KORMANN, A. C. M. 2002. 429p. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba.** Tese (Programa de Doutorado em Engenharia de Solos), Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIMA, A. T. 2003. 99f. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente.** Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LIMA, E. S. 2010. 86f. **Utilização de resíduo grits da fabricação de celulose pelo processo Kraft como agregado graúdo para concreto.** Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia Industrial), Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano.

ISLAM, M. R., MANNAN. U. A., Effects of reclaimed asphalt pavement on hot-mix asphalt, **ASTM journal of advances in civil engineering materials** vol. 3, núm. 1, p. 291-307, fev. 2014.

MACHADO, C. C., SANT'ANNA, G. L., LIMA, D. C., CARVALHO, C. A. B., ALMEIDA, A., OLIVEIRA, T., Durabilidade de solos estabilizados quimicamente com vistas à aplicação em estradas florestais, **Revista Árvore**, Viçosa (MG), vol. 30, núm. 6, p. 981-988, 2006.

MAGALHÃES, I. A. L., MARTINS, R. F., SANTOS, A. R., Identificação dos impactos ambientais relacionados à pavimentação da rodovia MG 307 no município de Grão Mogol- MG, **Revista Verde**, Mossoró (RN), vol. 6, núm. 5, p. 10-16, 2011.

MEDINA, J., M. G.; MOTTA, L. G.; **Mêcanica dos pavimentos**: 2. ed. Rio de Janeiro: editora COPPE, 2005.

MEDINA, J., M. G.; MOTTA, L. G.; **Mêcanica dos pavimentos**: 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MIAO, Y., WANG, S., GUO, L., ZHENG, X., HUANG, Y., WANG, L., Effect of temperature on resilient modulus and shear strength of unbound granular materials containing fine RAP. **Construction and building materials**, v. 124. . p. 1132-1141 out. 2016. doi. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.137>

MIAO, Y., WANG, S., GUO, L., ZHENG, X., HUANG, Y., WANG, L., Effect of temperature on deformation properties of unbound granular materials containing fine RAP. **Construction and building materials**, v. 169. P. 443-451. Abr. 2018. doi. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.154>.

MOLZ, C., CERVO, T. C., Uso do material fresado estabilizado granulometricamente em camadas granulares na pavimentação In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, X., **Anais...**, Santa Maria: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – Núcleo do Rio Grande do Sul, 2019.

MOUSA, E.; AZAM, A.; EL-SHABRAWY, M.; EL-BADAWY, S.M.; Laboratory characterization of reclaimed asphalt pavement for road construction in Egypt **Canadian Journal of Civil Engineering**: v. 44. n. 6. p.417-425. jan. 2018. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0435>.

NASCIMENTO, M. V.; SILVA, J. A. A.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; COSTA, S. C. F. E., Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento **Science & Engineering Journal**: v. 22. n. 2. p. 115-120. dez.. 2013. doi. <https://doi.org/10.14393/19834071.2013.24194>.

NÓBREGA, M. T. 1995. 247f. **Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica), Universidade de São Paulo, São Paulo.

NÓBREGA, M. T. 1988. 189f. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários: aspectos mineralógicos e morfológicos de alguns solos das regiões sul e sudeste do Brasil**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica), Universidade de São Paulo, São Paulo.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 1995.

OCHEPO, J., Stabilization of laterite soil using reclaimed asphalt pavement and sugarcane bagasse ash for pavement construction. **Journal of Engineering Research**: v. 2. n. 4. p. 1-13. dez. 2014. doi. <https://doi.org/10.7603/40632-014-0021-0>

PASSOS, B. C., MARQUES, A. F., ANDRADE, C. R. B., YULITA, E. G., BAÍA, J. F. B., Análise do CBR de sub-base argilosa estabilizada granulometricamente com material granular e resíduos de pavimentos. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC. **Anais...**, Maceió: Conselho Federal de Engenharia e Agronomia, 2018.

PINTO, C. S.; **Curso básico de mecânica dos solos**: 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PINTO, S.; PINTO, I. E., **Pavimentação asfáltica**: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos: 1. ed. Rio de Janeiro: LTC. Livros Técnicos e Científicos, 2015.

PIRES, G. M., SPECHT, L. P., PINHEIRO, R. J. B., PEREIRA, D. S., RENZ, E. M., Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moída, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro (RJ), v. 21. n. 2. jun. 2016. doi. 10.1590/S1517-707620160002.0035.

PIRES, G. M., SPECHT, L. P., PINHEIRO, R. J. B., PEREIRA, D. S., CONCEIÇÃO, B. M., Estudo do material fresado estabilizado química e granulometricamente para aplicação em bases de pavimentos. In: CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DE ASFALTO. XVII., **Anais...**, Guatemala., 2013.

SAHA, D. C., MANDAL, J. N., Laboratory investigations on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for using it as base course of flexible pavement, **Procedia Engineering**, São Petersburgo, v.189, p. 434-439. dez. 2017. doi. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.069>.

SALAMUNI, E., STELLFELD, M. C., Banco de dados geológicos geo-referenciados da bacia sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG), **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba (PR), n. 49, p. 21-31, 2001. doi. <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v49i0.4122>.

SALAMUNI, E., EBERT, H. D., HASUI, Y., Morfotectônica da bacia sedimentar de Curitiba, **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, 2004. doi. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v14i4.428>.

SANTOS, L. R., CRISPIM, F. A., DEL PAULO, P. R., Soil stabilization with an enzymatic additive for pavings, **E&S – Engineering and Science**, Viçosa (MG), v. 3. n. 7. set. 2018. doi. <https://doi.org/10.18607/ES201876930>

SENÇO, W.; **Manual de técnicas de pavimentação: volume II**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SENÇO, W.; **Manual de técnicas de pavimentação: volume I**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, E. S. 2013. 219f. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Amazonas, Manaus.

SOLIZ, V. V. P. 2007. 166f. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SUDDEEPPONG, A., INTRA, A., HORPIBULSUK, S., SUKSIRIPATTANAPONG, C., ARULRAJAH, A., SHEN, J. S., Durability against wetting-drying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock, **Soils and foundations**, v. 58, n. 2, p. 333-343, abr. 2018. doi. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.017>.

SUEBSUK, J., SUKSAN, A., HORPIBULSUK, S., Strength assessment of cement treated soil-reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture, **International journal of GEOMATE**, v. 6, n. 2, 878-884, jun. 2014. doi. <https://doi.org/10.21660/2014.12.3262>.

THAKUR, J. K., HAN, J., Recent development of recycled asphalt pavement (RAP) bases treated for roadway applications, **Transportation infrastructure geotechnology**, v. 2. b. 2. p. 68-86, jun. 2015. doi. <https://doi.org/10.1007/s40515-015-0018-7>

TEIXEIRA, W. 2019. 99f. **Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

TONIAL, I. A., BASTOS, A. C. R., Rotas de produção de asfalto. Relatório Interno Petrobras, 1995.

ULLAH, S., TANYU, B. F., Methodology to develop design guidelines to construct unbound base course with reclaimed asphalt pavement (RAP), **Construction and building materials**, v. 223. p. 463-476, out. 2019. doi. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.196>.

VALDÉS, G., PÉREZ-JIMENEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., BOTELLA, R., Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), **Construction and building materials**, v. 25. n. 3. p. 1289-1297, mar. 2011. doi. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016>.



VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R., SERRA, P. R. M., NETO, A. Z., **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. Bases Alternativas com Solos Lateríticos, Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. Ed. Arte & Ciência, 2 ed. – Ampliada. São Paulo, SP, 2009.

VIZCARRA, G. O. C. 2010. 120f. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.