

## **Dissertação de Mestrado**

**USO DE PAVIMENTO RECICLADO  
ADICIONADO COM CIMENTO PARA USO  
COMO REFORÇO DE BASE PARA  
RODOVIAS – ESTUDO DE CASO: BR-120**

**NU GEO**

**AUTOR: RONDERSON QUEIROZ HILÁRIO**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilberto Fernandes (UFOP)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO, MARÇO DE 2016.**

*“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.”*  
*(Nelson Mandela)*

*Aos meus Pais e Irmãos,  
pelo exemplo e por estarem  
sempre ao meu lado quando mais precisei  
e acreditarem em mim quando muitos duvidaram.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre esteve do meu lado me confortando e me dando luz nos momentos em que mais precisei, permitindo que eu chegassem com êxito no fim deste trabalho, sem Ele não somos nada;

Aos meus pais, Nilson e Nádia, pelo apoio, pelos ensinamentos, e por nunca terem deixado de acreditar em mim;

Aos meus irmãos Rárisson e Maicon;

A todos os meus amigos e familiares;

A Evely pelo apoio, carinho e compreensão mesmo quando a distância nos separava;

Ao professor Dr. Gilberto Fernandes pela orientação durante o desenvolvimento do trabalho, além da paciência e das oportunidades ao longo desse tempo;

Aos professores do NUGEO pelo ensino de qualidade que foram importantes para a minha formação;

À UFOP pelo auxílio financeiro; `

À UFOP e o NUGEO por disponibilizar o espaço físico para a realização dessa pesquisa;

Aos Professores Lucas e Eleonardo que sempre estavam disponíveis para uma orientação;

Ao Bruno Couto pela ajuda na realização dos ensaios da pesquisa;

Ao Professor Ricardo Fiorotti por ter disponibilizado o Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto para realização de ensaios e ao técnico Júnio Batista pela realização dos mesmos;

Ao Professor Geraldo Marques do Laboratório de Pavimentos da Universidade Federal de Juiz de Fora por ter disponibilizado o laboratório para ensaios e também por ter me orientado quando precisei;

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP Hebert, Márcio e Miguel pela preciosa ajuda na coleta de material e execução dos ensaios laboratoriais;

Aos Bolsistas João Flávio, Igor Santos e Pedro Coutinho pela ajuda incondicional quando precisei;

A Letícia Mayumi por sempre ter ajudado sempre que precisei;

Ao Engenheiro Márcio Gusmão por ter me ajudado com o trecho a ser estudado;

Aos colegas do NUGEO pelo conhecimento compartilhado e momentos de descontração.

Aos que não estão aqui citados, mas que, de alguma forma, contribuíram para que este projeto de pesquisa se realizasse, pois num trabalho dessa magnitude, todo o tipo de ajuda recebida foi imprescindível.

- Muito obrigado!

*Ronderson Queiroz Hilário*

## **RESUMO**

A reciclagem de materiais oriundos da atividade da engenharia, é um tema que nos últimos anos vem ganhando destaque. Com uma destinação correta para esses materiais com o aproveitamento dos mesmos em obras de engenharia, estamos contribuindo para uma melhor preservação do ambiente. Pensando nisso, a técnica de reciclagem de pavimento para o uso como reforço de base para o mesmo pavimento vem ganhando mais espaço em obras de pavimentação no Brasil. Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo técnico sobre a utilização de pavimento reciclado no reforço de camadas de base em uma rodovia do estado de Minas Gerais. O trabalho consistiu em campanhas de ensaios de laboratório com material colhido em campo pela máquina recicladora, sendo assim ensaiado o material na proporção que está sendo utilizado. Foram analisados o material existente de base, o material reciclado (base + revestimento + cimento) que foi utilizado como reforço, e também uma outra metodologia de reforço que é a reciclagem apenas da base com adição de cimento. O referido estudo foi desenvolvido nas seguintes etapas: análise do potencial técnico dos materiais provenientes das duas estacas que foram analisadas, realizado através de um intenso trabalho laboratorial com a realização dos ensaios de granulometria, comportamento mecânico através dos ensaios do Índice do Suporte Califórnia, expansão, módulo de resiliência, compactação, limites de Atterberg. O estudo tem como finalidade, avaliar a viabilidade técnica de se adicionar este material na composição da estrutura do pavimento com um volume de tráfego com o  $N=7,65 \times 10^6$  entre as estacas 0 a 2430 (sendo o número de repetições do eixo simples de rodas duplas de 8,2 toneladas) na BR-120, que liga os municípios de Alvinópolis e Visconde do Rio Branco. Por conseguinte, com presente trabalho podemos concluir, por meio dos resultados de ensaios de laboratório que o revestimento quando misturado ao solo da base existente adicionado cimento tem é um material que pode ser utilizado como base de um pavimento. Os resultados mostraram uma melhora nos parâmetros de resistência e granulométrica. Nos demais parâmetros analisados, não houve mudança, credenciando a mistura o seu uso como base de um pavimento rodoviário.

**PALAVRAS-CHAVE:** reforço, material reciclado, rodovia.

## **ABSTRACT**

The recycling of materials from the engineering activity is a topic that in recent years has been gaining attention. With a correct destination for these materials with the use of these engineering works, we are contributing to better preservation of the environment. Thinking about it, pavement recycling technique for use as base reinforcement for the same pavement is gaining more space in paving works in Brazil. This study aimed to carry out a technical study on the use of recycled pavement strengthening of base layers on a highway in the state of Minas Gerais. The work consisted of laboratory testing campaigns with material collected in the field by the recycler machine, thus tested the material in the ratio being used. We analyzed the existing base material, the recycled material (base + cement + coating) which was used as reinforcement, and also another enhancement method which is the only recycle base with the addition of cement. The study was developed in the following steps: analysis of the technical potential of materials from the two stakes that were analyzed, accomplished through an intense laboratory work to the achievement of grading tests, mechanical behavior through the trials of California Support Index, expansion, resilient modulus, compression, Atterberg limits. The study aims to assess the technical feasibility of adding this material in the pavement structure of the composition with a volume of traffic with  $N = 7,65 \times 10^6$  between cuttings 0-2430 (being the number of repetitions of the single wheel axis double 8.2 tons) in BR-120, which connects the cities of Alvinopolis and Visconde do Rio Branco. Therefore, in this study we can conclude by the results of laboratory tests that the coating when mixed with the existing soil cement base is added is a material that can be used as a base floor. The results showed an improvement in strength and particle size parameters. Other analyzed parameters, there was no change, accredit the mixture its use as the basis of a road surface.

**KEYWORDS:** reinforcement, recycled material, highway.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1: Seção típica de um pavimento rodoviário flexível (SILVA, 2015).....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.2: Seção típica de um pavimento rígido (Marques, 2006). .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2.3: Gráfico de Plasticidade (Notas de Aula, Davilla, C.).....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2.4: Faixa do limite de liquidez e índice de plasticidade (BRAJA, 2013). ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.5: Classificação Resilitente de Solos Granulares (DNIT, 2006) .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2.6: Classificação Resilitente de Solos Finos (DNIT, 2006). .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 2.7: Tipos de solo-agregado (Yoder e Witczak, 1975).....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.8: Dispositivo de reciclagem a frio (DNIT, 2006). .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 2.10: Pré compactação do material (Arquivo pessoal).....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 3.1: Mapa de Situação (Projeto – Memória Justificativa).....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 3.2: Material de base – estaca 241 (Arquivo pessoal).....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 3.3: Material de base – estaca 420 (Arquivo pessoal).....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.4: Máquina recicladora (Arquivo pessoal).....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.5: Máquina recicladora (Arquivo pessoal).....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.6: Material reciclado (Arquivo pessoal). .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.7: Cimento utilizado no trabalho (Arquivo pessoal).....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3.8: Fluxograma das etapas de trabalho. .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.9: Reciclagem e compactação da camada de base (Arquivo pessoal).....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 3.10: Escalas granulométricas (SANTOS, 2013).. .....</b>	<b>59</b>

<b>Figura 3.11: Jogo de peneiras utilizado – Padrão ABNT (Arquivo Pessoal).</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 3.12: Ensaio de sedimentação (Arquivo Pessoal).....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 3.13: Representação do ensaio de sedimentação..</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 3.14: Dimensão das partículas (DNIT 2006)..</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 3.15: Aparelho de Casagrande (Arquivo Pessoal).....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 3.16: Gráfico do Limite do Liquidez.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 3.17: Ensaio de Limite de Plasticidade (Arquivo Pessoal).....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 3.18: Realização do Ensaio de Compactação (Arquivo Pessoal).....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.19: Corpos de prova imersos e extensômetros para medição da expansão (Arquivo pessoal).</b> .....	<b>75</b>
<b>Figura 3.20: Desenho esquemático da prensa de CBR (BALDO, 2007).....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 3.21: Curva penetração (DNIT 2006). .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3.22: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.23: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.24: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.25: Ensaio de compressão simples finalizado (Arquivo pessoal).</b> .....	<b>79</b>
<b>Figura 3.26: Desenho esquemático do equipamento de Ensaios triaxiais de carga repetida (MEDINA E MOTTA, 2005).</b> .....	<b>83</b>
<b>Figura 3.27: Compactação da amostra.</b> .....	<b>84</b>
<b>Figura 3.28: Colocação da membrana no corpo de prova.</b> .....	<b>84</b>
<b>Figura 3.29: Corpo de prova sobre a base do equipamento de triaxial.</b> .....	<b>85</b>

<b>Figura 3.30: Colocação de elástico (detalhe em preto na parte de cima e na base do corpo de prova) para melhor fixação da membrana.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.31: No detalhe LVDT's instalados.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.32: No detalhe cilindro de acrílico da célula do equipamento de triaxial.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.33: Detalhe da tampa metálica do equipamento do ensaio triaxial de carga repetida.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 3.34: Instalação do mangote para a aplicação de ar comprimido. ....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.1: Curva granulométrica da base da estaca 241.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 4.2: Curva granulométrica da base-cimento da estaca 241.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 4.3: Curva granulométrica da mistura base + cimento – estaca 241.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.4: Curva granulométrica da base da estaca 420.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 4.5: Curva granulométrica da base-cimento da estaca 420.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 4.6: Curva granulométrica da mistura material reciclado + cimento – estaca 420.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 4.7: Ensaio de compactação (Arquivo pessoal).....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.8: Ensaio de penetração do corpo de prova de CBR (Arquivo pessoal)..</b>	<b>107</b>
<b>Figura 4.9: Corpos de prova de CBR imersos em água (Arquivo pessoal).....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 4.10: Material reciclado da estaca 241 (Arquivo pessoal).....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 4.11: Material reciclado da estaca 420 (Arquivo pessoal).....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 4.12: Amostra a ser ensaiada (Arquivo pessoal).....</b>	<b>115</b>

<b>Figura 4.13: Detalhe da amostra antes do ensaio (Arquivo pessoal).</b>	<b>115</b>
<b>Figura 4.14: Amostra ao final do ensaio (Arquivo pessoal).</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4.15: Amostra ao final do ensaio (Arquivo pessoal).</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4.16: MR x tensão de confinamento – base – estaca 241.</b>	<b>118</b>
<b>Figura 4.17: MR x Tensão de confinamento – base – estaca 241.</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.18: MR x desvio – material reciclado – estaca 241.</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.19: MR x Tensão de confinamento – material reciclado – estaca 241.</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.20: MR x Tensão desvio – solo cimento – estaca 241..</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.21: MR x Tensão de confinamento – solo cimento – estaca 241.</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.22: MR x Tensão desvio – base – estaca 420..</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.23: MR x Tensão de confinamento – base – estaca 420.</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.24: MR x Tensão desvio – material reciclado – estaca 420.</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4.25: MR x Tensão de confinamento – material reciclado – estaca 420....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4.26: MR x Tensão desvio – solo cimento – estaca 420..</b>	<b>125</b>
<b>Figura 4.27: MR x Tensão de confinamento – solo cimento – estaca 420.....</b>	<b>125</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.1: Estado da Malha Rodoviária Brasileira (Fonte: adaptado CNT 2015).....</b>	<b>2</b>
<b>Tabela 2.1: Sistema Unificado de Classificação de Solos. ....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 2.2: Escala granulométrica – SUCS.....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 2.3: Classificação de solos – TRB.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabela 2.4: Classificação de solos finos – método indireto (DNIT 2006).....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 2.5: Resultados do CBR e compressão simples com e sem aquecimento da amostra compactada dinamicamente (Oliveira et al., 1997).....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 2.6: Resultados do CBR e compressão simples com e sem aquecimento da amostra compactada compactada estaticamente (Oliveira et al., 1997). ....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 3.1: Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação solo-cimento (ABNT NBR 12253/92). ....</b>	<b>59</b>
<b>Tabela 3.2: Classificação do índice de plasticidade (Burmister, 1949). ....</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 3.3: Correlação entre as classificações TRB (AASHTO) e SUCS (DNIT 2006).....</b>	<b>72</b>
<b>Tabela 3.4: Energia de compactação (NBR7182/1986). ....</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 3.5: Energia de compactação e seus parâmetros (SANTOS 2009). ....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 3.6: Tensão de confinamento (Adaptado – DNIT 134/2010). ....</b>	<b>82</b>
<b>Tabela 3.7: Sequencias de Tensões para determinação do módulo de resiliencia (Adaptado – DNIT 134/2010).....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 4.1: Proporções dos materiais de acordo com a granulometria (base 241).. .....</b>	<b>89</b>

<b>Tabela 4.2: Índices característicos da curva granulométrica (base 241).....</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 4.3: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (solo-cimento – 241).....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 4.4: Índices característicos da curva granulométrica (solos-cimento – 241). .....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 4.5: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (material reciclado + cimento – 241).....</b>	<b>91</b>
<b>Tabela 4.6: Índices característicos da curva granulométrica (material reciclado + cimento – 241).....</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 4.7: Granulometria para base granular (DNIT 2006).....</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 4.8: Enquadramento das amostras na faixa do DNIT.....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 4.9: Proporções dos materiais de acordo com a granulometria (base 420).. .....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 4.10: Índices característicos da curva granulométrica (base 420).....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 4.11: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (solo-cimento – 420).....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 4.12: Índices característicos da curva granulométrica (solos-cimento – 420).....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 4.13: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (material reciclado+cimento-420).....</b>	<b>97</b>
<b>Tabela 4.14: Índices característicos da curva granulométrica (material reciclado + cimento – 420).....</b>	<b>113</b>
<b>Tabela 4.15: Enquadramento das amostras na faixa do DNIT.....</b>	<b>98</b>

<b>Tabela 4.16: Resultado dos limites de consistência (estaca 241).....</b>	<b>99</b>
<b>Tabela 4.17: Resultado dos limites de consistência (estaca 420).....</b>	<b>118</b>
<b>Tabela 4.18: Resultado do IG (estaca 241). ..</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.19: Resultado do IG (estaca 420).. ..</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.20: Massa específica dos grãos (estaca 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.21: Massa específica dos grãos (estaca 420).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.22: Classificação dos solos.....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.23: Classificação dos solos.....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.24: Resultados de umidade ótima e densidade máxima (estaca 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.25: Resultados do ensaio de CBR (estaca 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.26: Resultados dos ensaios de expansão (estaca 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.27: Resultados de umidade ótima de densidade máxima (estaca 420).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.28: Resultados do ensaio de CBR (estaca 420). ..</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.29: Resultados dos ensaios de expansão (estaca 420).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.30: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.31: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 241).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.32: Valores mínimos de resistência (Batista – modificado – 1976).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.33: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 420).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.34: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 420).....</b>	<b>121</b>

<b>Tabela 4.35: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.36: Valores médios de módulos de resiliência para diversos tipos de solos (Adaptado Franzoi <i>apud</i> Baldo).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.37: Valores de MR para solos granulares (Adaptado – Valle e Valdo, 1997).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.38: Equações do modelo composto.. ..</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.39: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.40: Valores médios de módulos de resiliência para diversos tipos de solos (Adaptado Franzoi <i>apud</i> Baldo).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.41: Valores de MR para solos granulares (Adaptado – Valle e Valdo, 1997).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabela 4.42: Equações do modelo composto.. ..</b>	<b>121</b>

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES**

$\eta$  = coeficiente de viscosidade do meio dispersor ( $10^{-4}$  Pa . s)

$\sigma_3$ : tensão confinante

$\sigma_d$ : tensão desvio

$\gamma_s$ : massa específica das partículas (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_w$ : massa específica da água, variável com a temperatura (g/cm<sup>3</sup>)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

AR's: Agentes Rejuvenescedores

ARRA: Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

CBR: California Bearing Ratio

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

$C_c$ : Coeficiente de curvatura

CP: Cimento Portland

$C_u$ : Coeficiente de não uniformidade

CNT: Confederação Nacional de Transportes

CTGA: Centro Tecnológico de Geotecnica Aplicada

D: diâmetro equivalente da partícula (mm)

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo para o qual passa 10% do material

$D_{30}$ : Diâmetro efetivo para o qual passa 30% do material

$D_{60}$ : Diâmetro efetivo para o qual passa 60% do material

DF: Distrito Federal

DMT: Distância Média de Transporte

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EB: Especificação Brasileira

ES: especificação de serviço

*et al*: expressão latina para citação de referência com mais de um autor:("e outros")

EUA: Estados Unidos da América

FCM: Federation of Canadian Municipalities

FWD: Aparelho de defectômetro de impacto  
FWHA: Federal Highway Administration  
IG: Índice de grupo  
IP: Índice de plasticidade  
 $g$  = aceleração da gravidade, cte = 9,81 m/s<sup>2</sup>;  
g/cm<sup>3</sup>: grama por centímetro cúbico  
K1: parâmetros de resiliência  
K2: parâmetros de resiliência  
K3: parâmetros de resiliência  
Km: quilômetro  
kPa: quilo-Pascal  
LL: limite de liquidez  
LP: limite de plasticidade  
ME: Método de Ensaio  
MG: Minas Gerais  
MPa: Mega Pascal  
MR: Módulo de Resiliência  
NBR: Norma Brasileira Registrada  
NMSHTD: Departamento de Estrada do Estado do Novo México  
NUGEO: Núcleo de Geotecnia  
 $P_{200}$ : Porcentagens em pesos passantes na peneira #200  
 $P_4$ : Porcentagens em pesos passantes na peneira #4  
RAP: Pavimento Asfáltico Recuperado  
RS: Resistência ao Sulfeto  
RSC: Resistência a compressão simples  
SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos  
UFJF: Universidade Federal de Juiz de Fora  
UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto  
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro  
TRB: Transportation Research Board  
 $t$  = tempo de sedimentação (s)  
 $z$  = altura de queda das partículas, para as leituras do densímetro (cm)

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1    INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>8</b>
<b>2    REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 PAVIMENTOS.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 CAMADAS DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).....	15
2.3.2 Classificação TRB .....	20
2.3.3 Classificação Resiliente de Solos (DNIT, 2006).....	24
<b>2.4 ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS .....</b>	<b>28</b>
2.4.1 Estabilização Mecânica .....	30
2.4.2 Estabilização Granulométrica.....	31
2.4.3 Estabilização Química.....	32
2.4.3.1 Solo-Cimento .....	33

2.4.3.2 Cimento sendo utilizado para estabilização de camada de pavimento rodoviário.....	34
2.4.3.3 Cal utilizada na estabilização de camadas de pavimento rodoviário.....	36
2.4.4 Estabilização Elétrica .....	37
2.4.5 Estabilização Térmica .....	37
<b>2.5 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>38</b>
2.5.1 Reciclagem in-situ.....	47
<b>2.6 RESILIENCIA DE SOLOS.....</b>	<b>49</b>
<b>2.7 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO ÀS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>52</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 MATERIAIS .....</b>	<b>54</b>
3.1.1 Material de Base .....	54
3.1.2 Material Reciclado .....	55
3.1.3 Cimento .....	57
<b>3.2 PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO .....</b>	<b>57</b>
3.2.1 Definição das Misturas .....	58
3.2.1.1 Mistura Material de base com cimento.....	58
3.2.1.2 Mistura material reciclado com cimento.....	59

3.2.2 Ensaios realizados.....	60
3.2.2.1 Análise Granulométrica.....	60
3.2.2.2 Limites de Atterberg.....	67
3.2.2.3 Classificação de Solos.....	71
3.2.2.4 Ensaio CBR.....	72
3.2.2.5 Compressão Simples.....	72
3.2.2.6 Ensaio de Triaxial Dinâmico.....	80
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>88</b>
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>88</b>
<b>    4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....</b>	<b>88</b>
4.1.1 Estaca 241.....	88
4.1.2 Estaca 420.....	94
<b>    4.2 LIMITES DE ATTERBERG .....</b>	<b>99</b>
4.2.1 Estaca 241.....	99
4.2.2 Estaca 420.....	100
<b>    4.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRUPO.....</b>	<b>101</b>
4.3.1 Estaca 241.....	101
4.3.2 Estaca 420.....	101
<b>    4.4 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS .....</b>	<b>102</b>
4.4.1 Estaca 241.....	102

4.4.2 Estaca 420.....	102
<b>4.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....</b>	<b>103</b>
4.5.1 Estaca 241.....	103
4.5.2 Estaca 420.....	104
4.5.3 Escolha do teor de cimento a ser misturado com o material de base .....	104
<b>4.6 ENSAIO DE CBR.....</b>	<b>105</b>
4.6.1 Estaca 241.....	105
4.6.1.1 Compactação .....	105
4.6.1.2 Resultado do CBR .....	106
4.6.1.3 Expansão .....	108
4.6.2 Estaca 420.....	109
4.6.2.1 Compactação .....	109
4.6.2.2 Resultado do CBR .....	109
4.6.2.3 Expansão .....	110
4.6.3 Valores de CBR para os materiais reciclados .....	110
<b>4.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES .....</b>	<b>112</b>
4.7.1 Estaca 241.....	112
4.7.2 Estaca 420.....	113
4.7.3 Plano de ruptura dos corpos de prova .....	114
<b>4.8 ENSAIO DE TRIAXIAL DINÂMICO.....</b>	<b>116</b>

4.8.1	Estaca 241.....	116
4.8.2	Estaca 420.....	122
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>128</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>		<b>128</b>
<b>5.1 CONSIDERAÇÕES .....</b>		<b>128</b>
<b>5.2 CONCLUSÕES.....</b>		<b>129</b>
<b>5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>		<b>132</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>133</b>

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O desenvolvimento sustentável considera a utilização de tecnologias que estejam em conformidade com as necessidades do presente sem incapacitar as possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades (BOURDEAU, 2000). Assim os impactos ambientais são os responsáveis pela degradação dos recursos naturais e devem ser minimizados ao máximo pelas indústrias (ARAÚJO, 1997).

Referente ao sistema de transporte brasileiro, observar-se uma extensa matriz rodoviária, com uma malha de 213.299 km de rodovias pavimentadas. Há anos o modal rodoviário é referência na movimentação de produtos e pessoas no Brasil. Na matriz de transporte de produtos, o transporte rodoviário atende por 61%, seguido pelo ferroviário com 20,7%, aquaviário por 13,6%, dutoviário por 4,2% e por fim o aéreo, que atende por 0,4% do transporte de cargas no país. Em relação ao transporte de passageiros, a diferença é ainda maior, ficando com o modal rodoviário responsável por aproximadamente 95% do transporte de pessoas.

De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) publicada em 2015 a malha rodoviária brasileira foi avaliada com 48,6% das estradas com algum tipo de deficiência no pavimento, 34,5% foram classificadas com regular, 10,1% como ruim e 3,1% como péssimo. O estado de conservação do pavimento é um elemento de fácil percepção pelos que utilizam a rodovia e um dos fatores determinantes para o desempenho durante as viagens. Defeitos e/ou irregularidades do pavimento influenciam fundamentalmente tanto o conforto quanto a segurança, assim como diminuem a durabilidade e componentes dos veículos, aumentando os gastos com manutenção.

Outra consequência da má conservação das rodovias, é o aumento do risco de acidentes. A Tabela 1.1 mostra os resultados obtidos das rodovias pesquisadas.

**Tabela 1.1: Estado da Malha Rodoviária Brasileira (Fonte: adaptado CNT 2015).**

ESTADO GERAL	EXTENSÃO TOTAL	
	km	%
Ótimo	41960	41,6
Bom	9906	9,8
Regular	35620	35,4
Ruim	10203	10,1
Péssimo	3074	3,1
Total	100763	100

Em relação a Minas Gerais, estado com a maior malha rodoviária do Brasil, a situação do estado do pavimento não difere muito da situação do Brasil como um todo. O estado é responsável por 27.942 km de rodovias pavimentadas, isso em porcentagem representa por 13,1% de toda a malha pavimentada brasileira.

A pesquisa CNT (2015), revelou que 61,7% das estradas de Minas Gerais apresentam algum tipo de deficiência, ou seja na sinalização, no pavimento e na geometria das vias. Em relação à pesquisa realizada em 2014, houve uma pequena melhora, quando aproximadamente 67% das rodovias mineiras foram consideradas regulares, ruins ou péssimas. Foram consideradas ótima ou bom somente 33,8% da malha rodoviária.

De acordo com a pesquisa, seriam necessários um investimento de aproximadamente R\$7,15 bilhões para a reconstrução, restauração e manutenção dos trechos das rodovias pesquisadas. No pavimento, são consideradas as condições da superfície da pista principal e do acostamento. Em relação ao pavimento, o estudo classificou como regular, ruim ou péssimo 52,6% da extensão avaliada no Estado, enquanto que 47,4%

foram considerados ótimos ou bons. 41,2% da extensão pesquisada apresentam a superfície do pavimento desgastada.

Com esse resultado fica claro a necessidade dos serviços de manutenção ou restauração nas rodovias brasileiras.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente a preocupação mundial com a preservação do meio ambiente e com os impactos causados pela intervenção do homem, como exemplo os processos industriais empregados na manutenção e restauração viária, atividades que geram uma alta quantidade de resíduos, que em quase da sua totalidade, não há um destino correto em quesito ambiental que seja o mais adequado.

De acordo com BONFIM (2007), a fresagem de pavimentos asfálticos é, nos dias atuais, uma das técnicas constantemente aplicadas no processo de manutenção e restauração do sistema rodoviário como parte do processo de restauração de pavimentos deteriorados, em especial com o objetivo de solucionar problemas frequentemente encontrados, como a elevação do greide das estradas, além de atenuar a propagação de trincas e evitar o alteamento dos dispositivos de drenagem, etc.

A cobrança no que se refere a preservação ambiental, em especial nos impactos causados pelas obras de engenharia, nos leva a procurar soluções realmente eficazes para que os projetos de pavimentação venham mitigar possíveis danos à natureza. Em relação a pavimentação rodoviária existe alternativas para minimizar possíveis danos ao ambiente. Uma dessas soluções é a reutilização do material fresado como um dos componentes no novo pavimento.

Encontrar jazidas cujo material seja de qualidade satisfatória para que se possa executar as camadas do pavimento rodoviário está cada vez mais difícil. Existem muitos desses materiais que não atendem especificações para a construção do pavimento, seja granulometricamente quanto em resistência. Existem algumas soluções para resolver

esse problema, entre elas é a mistura do solo natural ou a mistura de outro material a esse solo. Nesse contexto temos a mistura do pavimento reciclado (fresado) com o solo do terreno afim de conseguir uma melhora nas características geomecânicas do pavimento.

O conceito de reciclagem dos materiais que compõem um pavimento tem sido utilizado por muitos anos de maneira bem variada. Os meios de reciclar pavimentos de rodovias como forma de restaurá-las ainda é relativamente novo. No Brasil, teve início na década de 80 com a chegada dos primeiros equipamentos de fresagem no país.

Anteriormente, reciclar materiais de pavimentação era muito trabalhoso por não existirem equipamentos apropriados para a retirada desse material da pista. Nos dias atuais, a situação é bem mais favorável devido a presença de diversos equipamentos de reciclagem que trituram o pavimento, resultando em materiais de pequenas dimensões, reduzindo consideravelmente o consumo de energia, preservando o meio ambiente, além de reduzir também, a economia de matéria-prima. Recentemente, devido ao interesse despertado pelo reaproveitamento de materiais, a reciclagem tornou-se uma alternativa atraente para a reabilitação de pavimentos.

A reutilização dos materiais constituintes do pavimento, como por exemplo, os agregados desgastados, para fins de uso nos trabalhos de reconstrução, restauração e conservação, propiciam uma redução na demanda de novos materiais, prolongando o período de exploração e fornecimento dos mesmos nas jazidas e pedreiras existentes. Isto pode ser considerado benéfico, no momento em que as fontes próximas das áreas urbanas estão se esgotando, devido não só a sua intensa exploração, como também às restrições impostas às áreas exploráveis pela legislação de proteção do meio ambiente que detêm a exploração agressiva dessas áreas e pela crescente valorização das terras.

Mesmo dispondendo-se de fontes de suprimento de materiais para a produção de agregados, nas áreas urbanas com grande concentração populacional as jazidas, as pedreiras estão cada vez mais afastadas dos locais de aplicação dos materiais, aumentando a distância de transporte e, consequentemente, elevando o custo final da obra.

No projeto de restauração da BR-120, optou-se em utilizar o material fresado misturado ao material de base para a execução de uma camada de uma nova camada de base estabilizada granulometricamente. Esta solução possibilita mitigar o impacto ambiental e melhorar as características do material a ser empregado na rodovia.

Portanto, a utilização da mistura do material fresado com material de base para a estabilização em pavimentos rodoviários apresenta-se como uma das possíveis alternativas para o emprego dos resíduos gerados nas atividades de manutenção e restauração de rodovias.

A preocupação mundial em proporcionar um destino ecologicamente correto aos resíduos gerados pelas atividades de manutenção e restauração rodoviária levou as obras de engenharia à adoção de técnicas de reuso de materiais visando mitigar os impactos ambientais a partir da reutilização dos subprodutos gerados nas intervenções em rodoviárias. A fresagem de pavimentos flexíveis destaca-se dentre as atividades que produzem a maior quantidade de resíduos poluentes nas obras de manutenção e restauração de rodovias. Na composição do material fresado destaca-se o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e o material pétreo, utilizados na camada de revestimento do pavimento.

Dessa forma, o reaproveitamento dos resíduos provenientes das atividades de manutenção e restauração do sistema rodoviário permite a conservação do meio ambiente, tanto para os dias atuais e como para as gerações futuras.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho possui como principal objetivo avaliar laboratorialmente o material reciclado proveniente da mistura solo/revestimento extraídos por meio da máquina recicladora com a adição de 2% de cimento obtidos na BR 120, estacas 241 e 420 cuja finalidade é a verificação da melhora dos parâmetros de resistência (CBR e compressão axial) e do módulo de resiliência da camada de base do pavimento. Nesse presente trabalho foi feito a comparação entre o material proveniente da base existente, o

material reciclado (base + revestimento) adicionada 2% de cimento e o material de base existente com adição de cimento.

Quanto aos objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- ✓ Avaliar a eficiência da mistura solo/revestimento com a adição de cimento;
- ✓ Avaliar a eficiência do material de base proveniente do local em estudo;
- ✓ Propor a melhor solução para o método construtivo da rodovia.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado se encontra estruturada em capítulos, conforme a descrição que se segue.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao assunto estudado, contextualizando a aplicação de resíduos na pavimentação rodoviária, a justificativa do tema proposto, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

Em seguida, o Capítulo 2 é relativo à revisão bibliográfica, contempla o estado da arte sobre o uso e estudos abordando diferentes metodologias para aumento da capacidade de carga do pavimento.

De acordo com a itemização, após a revisão bibliográfica, especifica-se o proposto nesse trabalho com o Capítulo 3 da metodologia adotada com descrição do tipo ensaios e procedimentos. Neste capítulo são detalhados os ensaios de caracterização conforme as normas vigentes que foram feitos para os materiais. Em ordem de execução, primeiramente é descrita a caracterização do solo e material reciclado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios conforme apresentados no Capítulo 3. Também estão apresentados as discussões desse modo a se fazer uma comparação entre os resultados obtidos nos 3 materiais estudados.

No último tópico, Capítulo 5, são feitas as análises e considerações finais sobre o trabalho, as respectivas conclusões sobre o tema e também relacionadas algumas sugestões para futuros estudos com relação ao assunto proposto nesta pesquisa.

Finalizando encontram-se as referências bibliográficas utilizadas para este estudo.

Assim, este trabalho é constituído de cinco capítulos que definem e complementam o assunto abordado de forma abrangente.

## CAPÍTULO 2

---

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de iniciar qualquer projeto relacionado à pavimentação, é preciso conhecer a região onde será construída a rodovia, clima, temperatura, características e parâmetros dos materiais que serão utilizados além do volume de tráfego que o pavimento terá que suportar. Com isso, é preciso adotar uma série de procedimentos para uma melhor eficiência e durabilidade do pavimento, entre elas temos: realização de ensaios de laboratório, investigação de campo, além de avaliações durante a construção e ao longo da vida útil do pavimento.

Segundo Alvim (2001), os primeiros relatos importantes que se tem conhecimento em relação aos serviços de fresagem de revestimentos asfálticos, com estudos relacionados ao reaproveitamento do material fresado, datam do início da década de 60, na Europa, principalmente na antiga Alemanha Ocidental, que estava com sua malha viária quase toda destruída. Esta malha foi recuperada logo após a 2<sup>a</sup> guerra mundial, através do Plano Marshall.

Na década de 70, com a crise do petróleo, a metodologia da reciclagem de pavimentos se expandiu de forma muito rápida nos Estados Unidos e Europa, em consequência dos altos e consecutivos aumentos do preço do petróleo, o que causou também o aumento dos seus derivados. Com a necessidade de restauração dos pavimentos, houve uma procura para mitigar os efeitos desse aumento nas obras de pavimentação. Hoje esta tecnologia compete com vantagem em países do primeiro mundo (JIMENEZ, 1980).

O procedimento de retirado do pavimento era mediante a escarificação do mesmo e depois era levado para o processamento em usinas. Contudo, esse procedimento não era o mais adequado, não era eficiente na redução do material, ficando materiais mais graúdos, que precisavam ser quebrados novamente. Eles passavam pelo processo de

britagem mais de uma vez para depois serem utilizados na reciclagem (BONFIM, 2001).

Com a fabricação das fresadoras e usinas de reciclagem os problemas descritos anteriormente foram reduzidos e na atualidade já se dispõe de máquinas de reciclagem, equipamentos sofisticados e de grande desempenho, que fresam, corrigem a granulometria do fresado, incorporam os aditivos, emulsão, cimento, cal, etc., e executam a compactação da camada reciclada (ARAÚJO 2004).

De acordo com Takahashi et al (2002) em pesquisas realizadas no Japão, a reciclagem de pavimentos tem sido observada como uma metodologia do futuro quanto à manutenção das vias daquele país; cerca de 90% do material fresado do revestimento é reciclado e reempregado na pavimentação de vias.

Nos Estados Unidos, aproximadamente 80% da massa asfáltica empregada apresenta material fresado, propiciando assim uma economia quanto ao consumo de energia, CAP (cimento asfáltico de petróleo) e novos agregados (ARAÚJO, 2004).

De acordo com Campos (1987), as primeiras obras envolvendo serviços de fresagem aconteceram em São Paulo a partir do início da década de 80 e a primeira obra significativa envolvendo reciclagem em usina teve seu começo em 1986 pela da DERSA-SP, em trechos da Via Anhanguera, entre as cidades de São Paulo e Campinas, totalizando cerca de 90,0 km de via. Naquela época foi utilizado uma fresagem de capa asfáltica, com posterior reciclagem em usina drum mix. No entanto, a primeira máquina recicladora apareceu no Brasil na metade da década de 90.

A metodologia de fresagem de pavimento é bastante utilizada no Brasil, sendo utilizada com mais frequência nas obras de recuperação de grandes volumes de pavimento e em vias urbanas. Já a utilização da reciclagem ainda não é tão utilizada em obras de recuperação, mas vem aumentando sua utilização nos últimos anos em nosso país (ARAÚJO, 2004).

## 2.1 PAVIMENTOS

A NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas técnicas, define o pavimento como a estrutura construída após a terraplenagem, destinada tecnicamente e economicamente para as seguintes funções:

- ✓ Resistir aos esforços provenientes do tráfego e distribuí-los as demais camadas;
- ✓ Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- ✓ Resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

De acordo com Senço (1997), para um melhor dimensionamento das camadas de um pavimento, é de extrema importância conhecer perfeitamente as propriedades dos materiais a serem utilizados, resistência à ruptura, deformabilidade e permeabilidade, assim como a repetição de cargas e os possíveis efeitos do clima.

Segundo Senço (1997), para melhor assimilar os significados das camadas de um pavimento, é necessário compreender como que se dá a distribuição dos esforços que são submetidos um pavimento.

Como as pressões oriundas do tráfego decrescem com a profundidade, as camadas integrantes da base, sub-base e reforço, quando necessário, devem atender tanto a condições e qualidade similarmente decrescentes, isto é, o material de base necessariamente deve ser mais resistente que o material de sub-base, e por conseguinte, o material de sub-base tem que possuir qualidade superior à camada de reforço.

Em Senço (1997), os pavimentos são classificados em rígidos e flexíveis. Pavimentos flexíveis são compostos por camada superficial asfáltica, no caso o revestimento, apoiada sobre as demais camadas do pavimento: base, sub-base, reforço do subleito quando necessário. Essas camadas são constituídas por matérias granulares, solos e misturas.

Pavimentos rígidos são compostos por uma camada de concreto, geralmente em placas, e dependendo da solicitação, podendo haver armação ou não. O pavimento é apoiado em uma camada granular ou em certos casos, sobre um material estabilizado com cimento, no caso a sub-base. Nesse tipo de pavimento não há necessidade da base.

A sub-base é apoiada no leito e quando haver necessidade, sobre o reforço do subleito. Há também o pavimento semirrígido, que são bases cimentadas sob o revestimento betuminoso. Quando o pavimento é reforçado de concreto asfáltico sobre uma placa de concreto é chamado de pavimento composto.

As camadas de base e sub-base do pavimento têm como função absorver os esforços gerados pelo tráfego viário, e distribuí-los para o subleito. Por isso a importância do bom dimensionamento dos mesmos, pois influenciam diretamente na durabilidade e qualidade do pavimento.

Materiais empregados nessas camadas do pavimento são geralmente os agregados, solos, e quando necessário, adiciona aditivos a esses materiais. Aditivos usualmente utilizados são o cimento, emulsão asfáltica, cal e outros materiais que misturados ao solo, provoca uma melhora nas propriedades geomecânicas do pavimento.

## 2.2 CAMADAS DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO

As camadas do pavimento possuem nomenclaturas. A seguir descreve-se os principais componentes presentes numa típica seção de pavimentos rígidos e flexíveis.

O subleito é a camada que se localiza abaixo da camada de sub-base ou do reforço do subleito, quando necessário, onde as camadas do pavimento são apoiadas (fundação do pavimento). Antes da construção de uma rodovia é feito estudo de sondagem do terreno para saber a capacidade de carga e o comportamento referente às cargas impostas pelo tráfego. Normalmente é feito estudo do CBR do solo, caso o CBR seja menor que 2% o material é substituído por um de melhor qualidade. Caso ( $2\% \leq CBR \leq 20\%$ ) é feito um reforço do subleito. Com o  $CBR \geq 20\%$  a fundação pode ser usada como sub-base.

O leito é superfície do terreno do subleito obtida por terraplenagem ou obra de arte conformada ao greide e seção transversal.

Reforço do subleito é utilizado para nivelar o subleito por questões técnicas e econômicas a fim de melhorar as propriedades do subleito e regularizar a espessura base.

Sub-base é a camada abaixo da base sendo complementar. Normalmente usada quando a base não tem capacidade de suporte adequada para transmitir os esforços para o subleito sendo uma alternativa econômica e técnica.

Base é a camada que recebe os esforços originados pelo tráfego e tem função de resistir e distribuir estes ao subleito. É a camada sobre a qual o revestimento será construído.

O revestimento é a camada mais externa do pavimento, a mais impermeável possível, o qual recebe diretamente o tráfego e suas cargas. Tem função de fornecer segurança e conforto no rolamento dos veículos. Também chamado de capa, projetado para resistir aos esforços e intempéries. A Figura 2.1 demonstra a seção típica de um pavimento rodoviário flexível.

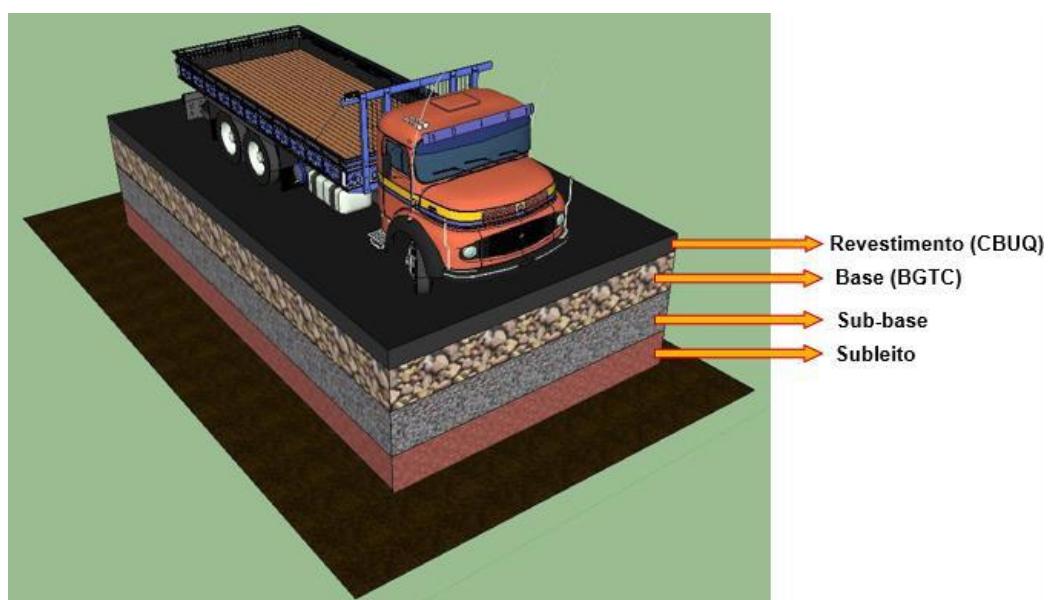
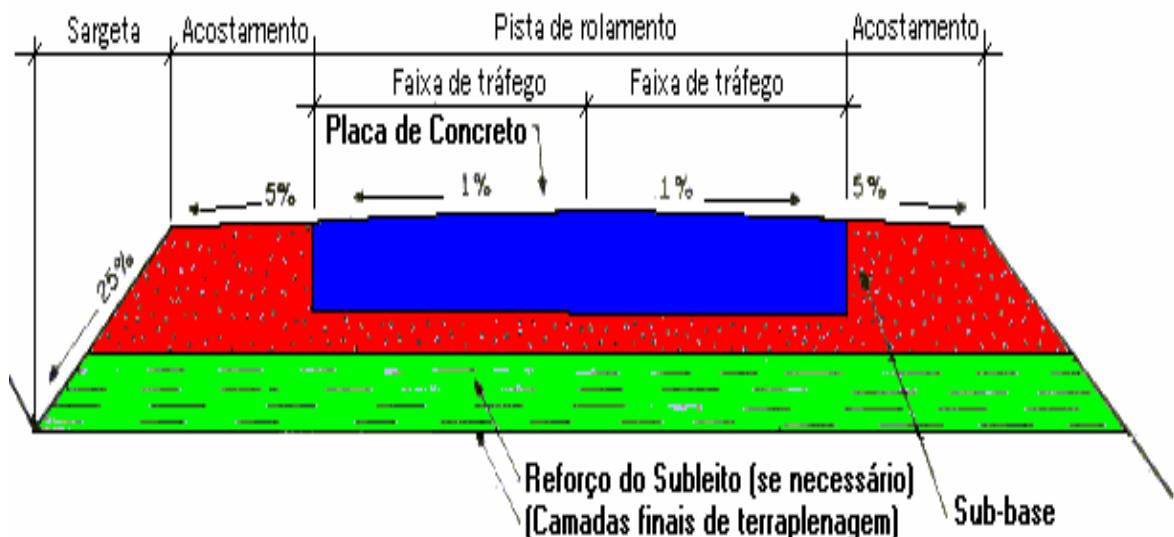


Figura 2.1: Seção típica de um pavimento rodoviário flexível (SILVA, 2015).

Diferentemente do pavimento flexível, o pavimento rígido possui um número menor de camadas, possuindo apenas a sub-base e a placa de concreto e caso necessário o reforço do subleito. A Figura 2.2 mostra uma seção típica de um pavimento rodoviário rígido.



**Figura 2.2: Seção típica de um pavimento rígido (Marques, 2006).**

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Os solos são utilizados como material de construção de rodovias constituindo algumas de suas camadas (base, sub-base e reforço do subleito), além de constituir aterros, barragens e estruturas de contenção. Entretanto, para que isto seja praticável, é fundamental que os responsáveis conheçam as propriedades geotécnicas dos solos comprometidos na construção de obras de terra e pavimentação.

Na preparação de um projeto de rodovia, é muito importante que o projetista utilize um leque de ensaios que seja capaz de caracterizar os solos, de maneira que identifique suas características de comportamento geotécnico.

Entretanto, dependendo da quantidade e da complexidade dos ensaios a serem feitos, a obra pode vir a se tornar extremamente complexa e onerosa. Logo, uma forma de sanar o problema, seria empregar a uma classificação que possa ser feita por meio de ensaios

menos complexos que forneçam os parâmetros necessários à previsão do comportamento do solo que irá compor o futuro pavimento.

A fim de que uma classificação de solos seja adequada à engenharia, ela deve agrupar solos de comportamentos semelhantes para que quando se tenha um grande número de amostras, sejam ensaiadas apenas algumas que representem todos os solos que possuam o mesmo índice classificatório. A classificação também deve permitir que, por meio da classe do solo, o engenheiro possa correlacionar comportamento do material em questão com o de outros solos já conhecidos podendo, por conseguinte, antecipar o comportamento do solo na obra (SÓRIA, 1985).

Os cálculos de um projeto de engenharia envolvendo solos serão baseados nas propriedades específicas da classe a que pertence o solo. Da perfeição com que for realizada tanto a identificação como a classificação do material dependerá todo o processo do trabalho posterior. Assim, antes de tudo, quando o engenheiro enfrenta um problema de solos, procederá a sua identificação e consequente classificação (VARGAS, 1977).

Em síntese, pode-se dizer que as classificações geotécnicas são extremamente importantes, em razão de agruparem solos de comportamento semelhante, permitem prever ou estimar o comportamento dos solos, e facilitam a comunicação entre engenheiros e técnicos.

As classificações conhecidas como tradicionais, criadas em países de clima temperado, são basicamente fundamentados em propriedades índices (limites de Atterberg) e na constituição granulométrica dos solos.

As classificações mais divulgadas no Brasil são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (Unified Soil Classification System - SUCS), descrito pela norma americana D2488-00 (ASTM, 2000), e a classificação para finalidades rodoviárias da AASHTO, a classificação Transportation Research Board (TRB), descrito pela norma, também americana, D3282-73 (ASTM, 2004).

A classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solo proposto por Arthur Casagrande, na década de 40, propunha a classificação dos solos com o propósito de empregá-los na construção de aeroportos. Só depois foi adotada pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos que lhe deu o nome e a divulgou.

O Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS possui como parâmetros para a determinação da classificação dos solos a granulometria e os limites de Atterberg (LL e IP), além da presença de matéria orgânica. Os solos são reunidos em quinze grupos distintos representados por duas letras, sendo que a primeira é relativa a granulometria e a segunda à plasticidade.

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

Segundo o Manual do DNIT (2006), o SUCS é baseado na identificação dos solos em conformidade com as suas qualidades de textura e plasticidade, e agrupando conforme seu comportamento quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações. Neste sistema, são considerados as seguintes características de solos:

- ✓ Percentagens de pedregulhos, areia e finos (fração que passa na peneira nº 200: silte e argila);
- ✓ Enquadramento da curva granulométrica;
- ✓ Plasticidade e Compressibilidade.

As principais divisões são: solos de granulação grossa (mais de 50% em peso retido na peneira nº 200), solos de granulação fina (mais de 50% em peso passando na peneira nº 200) e solos altamente orgânicos (facilmente identificáveis pelo seu aspecto). O critério granulométrico empregado diverge do correspondente do TRB e da AASHTO (DNIT 2006).

Os métodos de identificação de campo e de laboratório e as características dos grupos de solos referentes a estradas e aeroportos são fornecidos por meio de uma tabela do SUCS, como mostrado na Tabela 2.1.

As vantagens do emprego do SUCS estão no exercício da identificação de campo, na adoção de uma simbologia que diz da natureza do solo, e no valor prático das indicações que a classificação proporciona a vários ramos da engenharia de solos (DNIT 2006).

**Tabela 2.1: Sistema Unificado de Classificação de Solos.**

Pedregulhos: ≥ 50% da fração graúda retida na peneira de nº 4	Pedregulho 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 de ped. com pouco ou nenhum fino
Solos de Graduação Grossa: 50% ou mais retido pela peneira de nº 200	Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. de areia e silte
		GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. de areia e argila
Areias: ≤ 50% da fração graúda passando na peneira de nº 4	Areia 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
Siltes e Argilas com LL ≤ 50	Areia com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte
		SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila
Siltes e Argilas com LL ≥ 50		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas
Solos de Graduação Fina: 50% ou mais passando pela peneira de nº 200		OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade
		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

O gráfico de plasticidade, apresentado na Figura 2.3, foi elaborado pelo professor Artur Casagrande. O gráfico é um diagrama cartesiano com limite de liquidez (LL) nas abcissas e o índice de plasticidade (IP) nas ordenadas, no qual duas linhas são

projetadas, uma reta inclinada, denominada linha "A", e a outra vertical com  $LL = 50$ . A linha "A" evidencia uma importante divisão experimental entre as argilas tipicamente sem matéria orgânica (CL e CH), em geral acima dessa linha; os solos plásticos contendo coloides orgânicos (OL e OH) ou solos siltosos sem matéria orgânica (ML e MH). A linha vertical  $LL = 50$  separa os siltes e argilas, com baixo LL (L), daqueles que têm LL alto (H).

Na parte inferior do gráfico, abaixo de  $LL = 50$ , com aproximadamente IP entre 4 e 7, há considerável superposição nas propriedades dos solos argilosos e dos siltosos. Por esse motivo, a linha "A" nessa zona transforma-se numa área, e os solos aí situados são classificados como limítrofes.

A experiência tem demonstrado que a compressibilidade é aproximadamente proporcional ao LL, e que os solos com o mesmo LL têm aproximadamente a mesma compressibilidade, supondo que os outros fatores sejam essencialmente os mesmos. Foi constatado que nos solos com o mesmo LL, quando o IP aumenta, aumentam também as características coesivas e diminui a permeabilidade (DNIT, 2006)

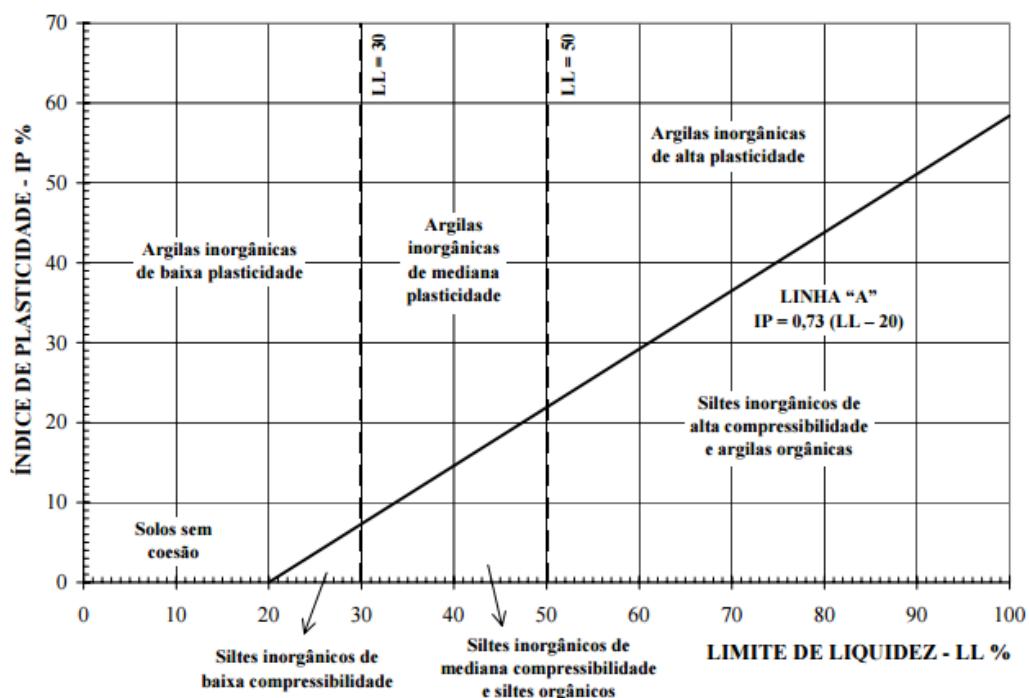


Figura 2.3: Gráfico de Plasticidade (Davilla, C.).

Os nomes pedras, cascalho ou pedregulho (gravel), areia (sand) e finos, incluindo silte (silt) e argila (clay), são utilizados para caracterizar a escala de granulometria no tamanho das partículas do solo, sendo empregado, arbitrariamente, os limites de tamanho, apresentado pela Tabela 2.2.

**Tabela 2.2: escala granulométrica – SUCS.**

PEDRAS	ACIMA DE 3" (76mm)
CASCALHO GROSSO	ENTRE 3" E 3/4"(76 e 19 mm)
CASCALHO FINO	ENTRE 3/4" E PENEIRA Nº 4 (19 e 4,76 mm)
AREIA GROSSA	ENTRE AS PENEIRAS DE Nº 4 E Nº 10 (4,76 e 2 mm)
AREIA MÉDIA	ENTRE AS PENEIRAS DE Nº 10 E Nº 40 (2 e 0,43 mm)
AREIA FINA (LIMO OU MÓ)	ENTRE AS PENEIRAS DE Nº 40 E Nº 200 (0,43 e 0,075 mm)
FINOS (SILTE E ARGILA)	PASSANTE NA PENEIRA DE Nº 200 (abaixo de 0,075 mm)

O silte e a argila diferenciam-se pelo primeiro ter uma baixa plasticidade e o segundo possuir uma alta plasticidade.

Analizando o gráfico da Figura 2.3, no momento que um ponto, possuir como coordenadas o LL e o IP do material fino, localizar-se sob a linha "A", ele será silte, caso contrário, será uma argila. Os limites da Atterberg (LL, LP e IP) definem-se com o material que passa na peneira normal nº40. Essa caracterização pelo gráfico de plasticidade é válida para siltes, quer orgânicos mas não é válida para as argilas orgânicas devido seus pontos representativos também se situam abaixo da linha "A".

De acordo com a classificação SUCS apresentadas no Manual do DNIT (2006), solos de granulometria mais graúda, ou seja, com mais de 50% em massa de solo retido na peneira nº 200 são correspondem aos seguintes grupos:

- ✓ Grupos GW e SW: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos e arenosos bem graduados que contém menos de 5% de finos não plásticos passantes na peneira nº. 200. Os finos encontrados neste material não interferem nas

características de resistência da fração grosseira e nas características de livre drenagem desta fração;

- ✓ Grupos GP e SP: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos e arenosos mal graduados que contém menos de 5% de finos não plásticos passantes na peneira no. 200. Estes solos podem ser constituídos de pedregulhos uniformes, areias uniformes ou misturas não uniformes de material muito grosso e areia muito fina com vazios de tamanhos intermediários;
- ✓ Grupo GM e SM: Normalmente estes grupos incluem pedregulhos ou areias que contém mais de 12% de finos com pouca ou nenhuma plasticidade. A graduação não é relevante e tanto materiais bem ou mal graduados podem estar incluídos nestes grupos;
- ✓ Grupos GC e SC: Estes grupos compreendem solos pedregulhosos ou arenosos com mais de 12% de finos que exibem tanto baixa quanto alta plasticidade. A graduação não é relevante, porém sua fração fina normalmente é constituída por argilas que exercem maior influência sobre o comportamento do solo.

Os solos de granulometria fina (50% ou mais de massa de solo passa pela peneira no. 200) estão agrupados nos respectivos grupos (DNIT 2006):

- ✓ Grupos ML e MH: Estes grupos incluem materiais predominantemente siltosos e solos micáceos. Solos deste grupo são siltes arenosos, siltes argilosos ou siltes inorgânicos com relativa baixa plasticidade;
- ✓ Grupos CL e CH: Os grupos CL e CH abrangem argilas inorgânicas com baixos e altos limites de liquidez respectivamente;
- ✓ Grupos OL e OH: Os solos deste grupo são caracterizados pela presença de matéria orgânica, incluindo siltes e argilas orgânicas;
- ✓ Os solos que apresentam uma grande quantidade de matéria orgânica são representados pelo Grupo Pt. Tais solos são tranquilamente identificados pela cor, cheiro, porosidade e frequentemente pela textura fibrosa. São muito compressíveis e com características pouco aceitas e utilizáveis para a construção civil. Turfas, húmus e solos pantanosos com altas texturas orgânicas são típicos deste grupo.

### 2.3.2 Classificação TRB

Essa classificação foi estabelecida pela revisão da classificação do Bureau of Public Roads de 1945 (norma D-3282 e método M145 da AASHTO). Tem como finalidade classificar solos a serem empregados na pavimentação rodoviária. É uma classificação muito empregada não só no Brasil como também em diversos países.

Na classificação TRB, os solos são agregados em grupos e subgrupos, de acordo com sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. A Tabela 2.3 abaixo apresenta o quadro de classificação dos solos, de acordo com o TRB. Define-se o grupo do solo, por meio de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação.

O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

**Tabela 2.3: Classificação de solos – TRB (Adaptado DNIT 2006).**

Classificação Geral	MATERIAIS GRANULARES ( $\leq 35\%$ passante na peneira nº 200)								MATERIAIS GRANULARES ( $\geq 35\%$ passante na peneira nº 200)		
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7, A7-5*, A-7-6**
Classificação do Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Análise Granulométrica (percentagem passante)											
Nº 10	máx. 50										
Nº 40	máx. 30	máx. 50	máx. 51								
Nº 200	máx. 15	máx. 25	máx. 10	máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 36	mín. 36	mín. 36	mín. 36	mín. 36
Característica da fração na peneira de Nº40											
LL				máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	mín. 41
IP	máx. 6		NP	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	máx. 4	máx. 4	máx. 8	máx. 12	máx. 16	máx. 20
Tipos comuns de materiais constituintes significativos	Fragments de pedra, pedregulho e areia	Areia fina	Pedregulho e areia siltosos ou argilosos		Solos Siltosos		Solos Argilosos				
Classificação como subleito	De excelente a bom								Mediano a ruim		

\* para A-7-5, IP  $\leq$  LL – 30

\*\* para A-7-6, IP > LL – 30

Para verificar se tal solo tem um bom parâmetro para ser utilizado como material em rodovias, é fundamental inserir o índice de grupo (IG) juntamente com os grupos e subgrupos do solo. O índice de grupo de um solo é calculado pela seguinte fórmula (DNIT 2006):

$$IG = (F_{200} - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad (2.1)$$

onde,

$F_{200}$  = percentagem passante pela peneira nº 200;

LL = Limite de liquidez;

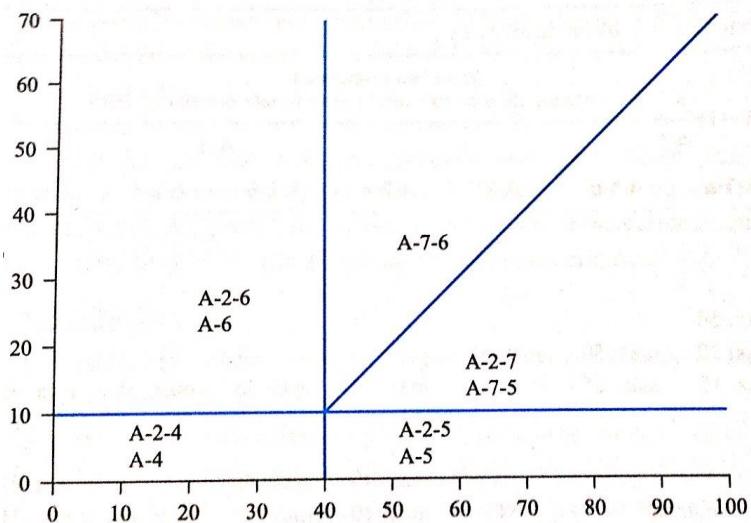
IP = Índice de plasticidade.

A primeira parte da Fórmula (2.1), isto é,  $(F_{200} - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)]$ , é o padrão do grupo parcial intitulado por meio do limite de liquidez. Já a segunda parcela da equação,  $0,01(F_{200} - 15)(IP - 10)$ , é o índice de grupo parcial definido por meio do índice de plasticidade. Abaixo está descrito regras para a determinação do índice de grupo:

- ✓ Se o resultado da Fórmula (2.1) der um valor abaixo de zero para o IG, esse valor será considerado zero;
- ✓ O valor do IG é sempre um número inteiro igual ou maior do que zero. Caso dê um valor decimal, o mesmo é arredondado para o número inteiro mais próximo;
- ✓ Não existe limite superior para o valor de IG;
- ✓ Para os solos pertencentes aos grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 e A-3, o IG será sempre zero;
- ✓ O cálculo do IG dos solos pertencentes aos grupos A-2-6 e A-2-7, é feito usando o IG parcial para o IP, ou pela equação:

$$IG = 0,01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad (2.2)$$

Para os solos dos grupos A-2, A-4, A-5, A-6 e A-7 é apresentado no gráfico da Figura 2.4, as variações dos limites de liquidez e do índice de plasticidade de acordo com cada grupo pela classificação TRB.



**Figura 2.4: Faixa do limite de liquidez e índice de plasticidade (BRAJA, 2013).**

Logo a seguir estão descritas as características de cada grupo e subgrupo de solos do sistema de classificação para uso em pavimentação rodoviária como citado em DNIT (2006):

- ✓ Grupo A-1: O material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. No entretanto, este grupo inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., que não contêm aglutinantes de solo.
- ✓ Subgrupo A-1-a: Inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.
- ✓ Subgrupo A-1-b: Inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.
- ✓ Grupo A-2: Este grupo inclui grande variedade de materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.

- ✓ Subgrupos A-2-4 e A-2-5: Incluem solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.
- ✓ Subgrupos A-2-6 e A-2-7: Incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2- 4 e A-2-5, exceção feita da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e percentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.
- ✓ Grupo A-3: O material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.
- ✓ Grupo A-4: O solo típico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira n º 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.
- ✓ Grupo A-5: O solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das percentagens decrescentes de material grosso.
- ✓ Grupo A-6: O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira n º 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n º 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do

grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.

- ✓ Grupo A-7: O solo típico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.
- ✓ Subgrupo A-7-5: Encerra materiais 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: Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

### 2.3.3 Classificação Resiliente de Solos (DNIT, 2006)

Com base em estudos da Mecânica dos Pavimentos originados pela COPPE/UFRJ no ano de 1976, por Pinto e Preussler, sob a direção Jacques Medina, foi permitido o desenvolvimento de uma classificação de solos fundamentado em suas características resilientes, possibilitando assim sua classificação quanto ao comportamento mecânico em termos de deformabilidade elástica.

No total, foram estudados 20 solos, sendo 14 arenosos dos quais 9 que se enquadravam na faixa granulométrica A e 5 na faixa granulométrica B do DNIT. Neste trabalho foi verificado que os solos arenosos finos e uniformes da faixa B apresentavam módulos de resiliência (MR) com valores superiores que os da faixa A, de melhor graduação. Foi observado também que, para estes solos, a natureza dos finos tinha efeito significativo no valor do MR da faixa B, mas não influenciava no MR dos solos da faixa A.

Nos solos argilosos e siltosos pesquisados (no total foram estudados 6), foi verificado que o MR sofreu influência da fração argila dos finos. Quanto menor a fração argila e, por conseguinte maior a de silte nos finos, verificou-se que o MR era menos sensível à

variação da tensão-desvio. Segundo Medina e Preussler (1980), também correlacionaram o MR com o valor de CBR dos materiais e propuseram uma tentativa de classificação dos solos quanto às propriedades resilientes, onde agruparam solos arenosos e argilosos em categorias às quais correspondem determinados modelos matemáticos de comportamento resiliente. Os solos também foram agrupados conforme sua granulometria, plasticidade e valor de CBR.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006), nos fornece uma classificação resiliente de solos baseada nos estudos de Medina & Preussler. Tal classificação qualifica os solos quanto ao comportamento mecânico, em termos de deformabilidade elástica.

A Classificação Resiliente fundamenta-se no conhecimento do módulo de resiliência dos solos (MR), determinado pelo DNER-ME 131/94, expresso por modelos de comportamento elástico não linear.

Para os fins de classificação, os solos granulares são aqueles que apresentam menos que 35% de peso em material passando na peneira nº200. A Figura 2.5 apresenta três grupos de solos (Grupo A, B e C), que retratam o comportamento dos solos granulares, definido pelo modelo:

$$M_R = K_1(\sigma_3)^{k_2} \quad (2.3)$$

sendo  $k_1$  e  $k_2$  os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ), e MR o módulo de resiliência correspondente.

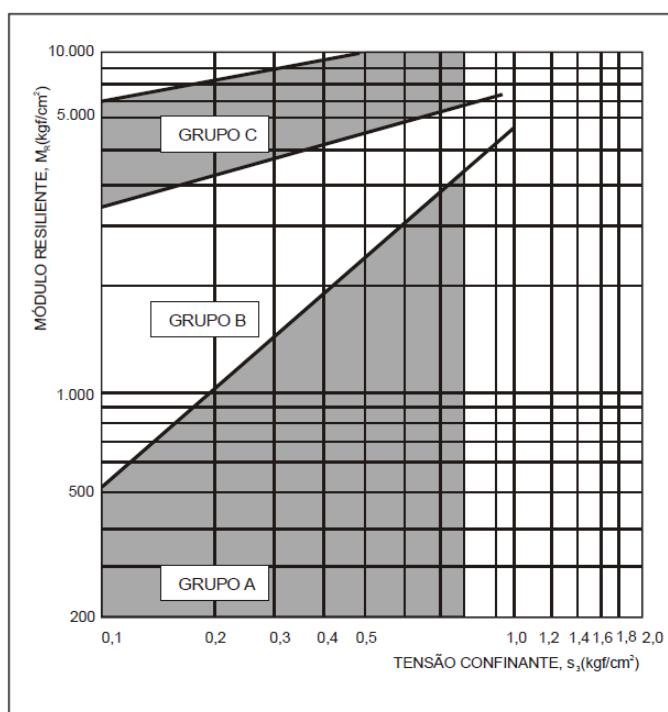
Os solos pertencentes ao Grupo A apresentam grau de resiliência elevado, por isso quando usado na construção de subleitos, proporciona a essa camada uma qualidade inferior quando utilizado em estruturas de pavimentos rodoviários, por isso, não é aconselhável ser empregado o material para este fim. Apenas ser utilizado se o mesmo for estabilizado para melhora das propriedades do mesmo.

Os solos incluídos no Grupo B possuem grau de resiliência intermediário, podendo ser empregados em estruturas de pavimentos como base, sub-base e reforço do subleito, ficando seu comportamento dependente das seguintes condições conforme seu parâmetro de resiliência:

$K_2 < 0,50$ , solos de bom comportamento para serem utilizados em estruturas de pavimento;

$K_2 > 0,50$ , solos com comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

O Grupo C reúne solos com baixo grau de resiliência, podendo ser utilizado em todas as camadas do pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.



**Figura 2.5: Classificação Resilitente de Solos Granulares (DNIT, 2006)**

Os solos finos são aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material que passa pela peneira nº200 (0,075mm). A Figura 2.6 mostra os grupos de solos finos separados segundo seu comportamento em solos do Tipo I, Tipo II e Tipo III, conforme descrito a seguir (DNIT 2006):

- ✓ Solo Tipo I: solo de bom comportamento quanto a resiliência para a utilização como subleito e reforço do subleito, podendo ser usado também como camada de sub-base;
- ✓ Solo Tipo II: solo de comportamento regular quanto a resiliência para ser utilizado como subleito e reforço de subleito;
- ✓ Solo Tipo III: solo de comportamento ruim quanto a resiliência. É vedado seu emprego em camadas de pavimentos. Para utilização em subleito requer cuidados e estudos especiais.

Os módulos de resiliência considerados representativos dos três tipos de solos finos, podem ser determinados por meios das equações (2.4), (2.5) e (2.6). Estes valores foram determinados por Preussler e Pinto (1981), sendo apresentados no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006):

$$\text{Solos Tipo I e Tipo II: } M_R = k_2 + k_3 * (k_1 - \sigma_d) \text{ para } \sigma_d < k_1 \quad (2.4)$$

$$M_R = k_2 + k_4 * (\sigma_d - k_1) \text{ para } \sigma_d > k_1 \quad (2.5)$$

$$\text{Solos Tipo III: } M_R = 530 \text{ Kgf/cm}^2 \quad (2.6)$$

Sendo  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ , os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais de carregamento repetido sob tensões-desvio  $\sigma_d$ , e  $M_R$  o módulo de resiliência correspondente.

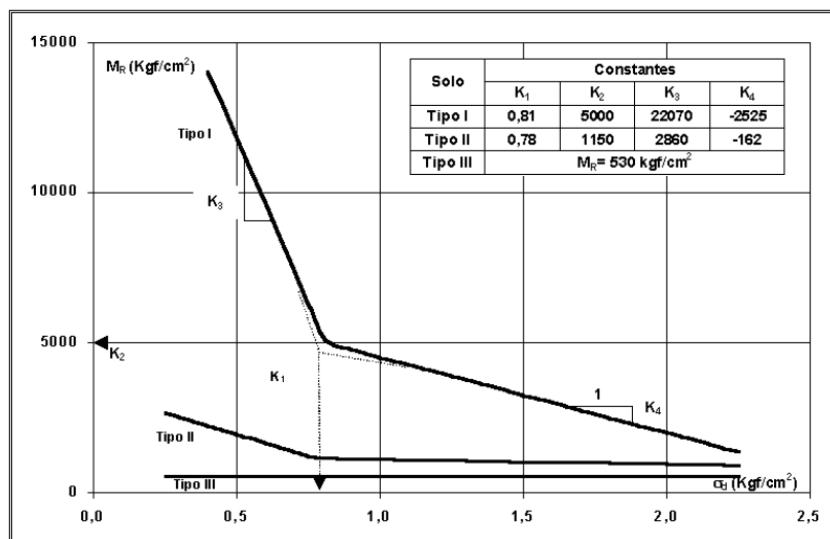


Figura 2.6: Classificação Resilitente de Solos Finos (DNIT, 2006).

No impedimento para se calcular o Módulo de Resiliência para estes solos, existe a possibilidade de estimar a classificação indiretamente por meio da percentagem de silte, S%, e do CBR, apresentada na Tabela 2.4 (DNIT,2006).

**Tabela 2.4: Classificação de solos finos – método indireto (DNIT 2006).**

CBR	S (%)		
	≤35	35 a 65	≥65
≤5	III	III	III
6 a 9	II	II	III
≥10	I	II	III

Sendo:

$$\text{Solo Tipo I: } M_R = 4874 \sigma_d - 1,129$$

$$\text{Solo Tipo II: } M_R = 1286 \sigma_d - 0,5478$$

$$\text{Solo Tipo III: } M_R = 530 \text{ kgf/cm}^2$$

Ao final desses estudos foram obtidos nos ensaios triaxiais dinâmicos os parâmetros de resiliência das equações de correlação do módulo resiliente com a tensão confinante  $\sigma$  (solos arenosos) e a tensão desvio  $\sigma_d$  (solos argilosos).

## 2.4 ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS

A estabilização de solos não é uma técnica nova, pelo contrário, ela é usada há séculos. Com a ajuda da literatura, podemos verificar que as primeiras técnicas criadas pelo homem visando a estabilização de solos e por conseguinte, melhoria das vias utilizadas para transporte, foram misturas de argila e areia.

O ramo viário, seja rodoviário ou aeroportuário, a procedimento de estabilização de solos está diretamente relacionada aos procedimentos de tratamento utilizados aos quais

os solos são sujeitados, com ou sem aditivos, de forma que as camadas de um pavimento sejam capazes de suportar as cargas oriundas do tráfego viário.

Os solos são utilizados nas mais diferentes áreas construtivas da Engenharia Civil. Em certos casos e, dependendo de sua utilização, os solos não podem ser utilizados no mesmo estado em que são retirados nas jazidas, especialmente quando os mesmos não satisfazem uma série de especificações técnicas para os serviços executados na obra, tornando-se necessário o emprego da técnica de estabilização. Para tal serviço, usam-se como os materiais asfálticos, cimento e cal. Esses aditivos são considerados materiais convencionais usados na estabilização de solos, em especial na estabilização de camadas de pavimento rodoviário.

De acordo com Marques (2006), o processo de estabilizar um determinado solo representa atribuir ao mesmo uma capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços provenientes do tráfego frequentemente aplicados sobre o pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais sob as mais variadas solicitações consideradas no seu dimensionamento.

Para Batista (1976), em relação aos pavimentos rodoviários, intitula-se como estabilização dos solos os métodos de construção nos quais os mesmos passam por um tratamento sem ou com aditivos, de maneira que se tenham os subleitos, as sub-bases e bases, preparado para resistir ao longo da sua vida útil, as cargas provenientes do tráfego frequentemente aplicadas sobre o pavimento, sem deslocamentos apreciáveis, desgaste excessivos e desagregação devido às intempéries.

Segundo Cordeiro (2007), a estabilização de um solo envolve os seguintes requisitos:

- ✓ As propriedades de resistência mecânica do mesmo e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos físicos, químicos, e mecânicos;
- ✓ A escolha de um método em bases econômicas e práticas para o estudo dos materiais necessários à suplementação desejada;

- ✓ A construção, que consiste normalmente em pulverização, na mistura dos materiais, na compactação e nas considerações de ordem econômica com relação ao custo de cada material.

O conhecimento adequado das técnicas de estabilização dos solos possibilita nortear a consideráveis reduções nos tempos de execução de obras, viabilizando a industrialização do processo construtivo e com isso, possibilitando redução considerável para o empreendimento (LIMA, 1993).

Rezende (1999) avaliou algumas técnicas para construção e reforço de base para pavimento rodoviário. Foram avaliadas as seguintes metodologias para base: solo-brita, solo-cal, base com expurgo, solo fino e solo fino com geotêxtil. Em seu trabalho, além da caracterização de laboratório, também houve a avaliação de campo, sendo construídos trechos experimentais. No final, além da eficiência mecânica, tanto em laboratório, tanto campo, houve a avaliação da viabilidade econômica de cada metodologia.

Fernandes (2005) em seu trabalho de doutorado, avaliou o comportamento das estruturas de um pavimento ferroviário utilizando solos finos, rejeitos de mineração e co-produto siderúrgico associados a geossintético. Além de um extenso trabalho laboratorial, foram construídas 7 seções experimentais na Estrada de Ferro Vitória Minas. Essas seções foram instrumentadas e monitoradas a fim de avaliar o comportamento estrutural das misturas em campo.

#### 2.4.1 Estabilização Mecânica

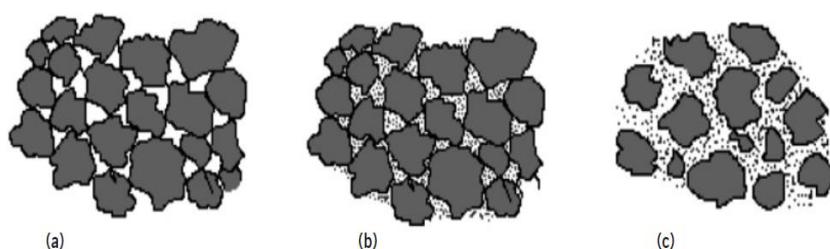
O objetivo da estabilização mecânica é atribuir ao solo (ou mistura de diferentes solos) a ser empregado como camada do pavimento uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. É também conhecida como estabilização por compactação. É uma metodologia que sempre é aplicada na construção das camadas de um pavimento, sendo complementar a outras metodologias de estabilização (MARQUES 2006).

#### 2.4.2 Estabilização Granulométrica

Essa metodologia consiste em alterar as propriedades dos solos por meio da adição ou retirada de partículas de solo. A metodologia é fundamentada, essencialmente, na aplicação de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de forma a se enquadrem em uma determinada especificação.

Segundo Marques (2006), os solos arenosos são, de uma forma geral, naturalmente fragmentados por agentes abrasivos, quando estudados de forma separada, em razão da falta do “ligante”. Porém solos argilosos, quando analisados de forma separada, possuem uma deformação alta, uma baixa resistência ao cisalhamento, no momento que absorvem água. É comum e necessário misturarmos estes dois tipos de solos, isto é, solos com características granulares e solos com características coesivas, para obtermos uma mistura com propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade. Os projetos que são realizados com a de mistura de solo e outros materiais são muito empregados na realização de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, em misturas betuminosas ou em quaisquer outras misturas que resultam dois ou mais materiais de granulometrias diferentes.

Solos-agregados são misturas naturais ou preparadas de britas, pedregulhos ou areia predominantemente, contendo silte e argila – material natural (solo) que passa na peneira nº 200 (AASHTO M 146-70, 2004). De acordo com Yoder e Witczak (1975), podemos subdividir solos-agregados em três tipos diferentes dependendo da proporção relativa entre a parte graúda e a parte fina. Os itens (a), (b) e (c) mostram as diferentes características e a comparação entre os três tipos de misturas mostrados pela Figura 2.7.



**Figura 2.7: Tipos de solo-agregado (Yoder e Witczak, 1975).**

- a) Contato grão-grão: baixa densidade, permeável, não suscetível a mudanças com a umidade; compactação em geral difícil;
- b) Finos preenchem os vazios, proporcionando alta densidade, permeabilidade mais baixa que o do tipo (a), contato grão-grão, mais resistente em geral que o tipo (a), menor deformabilidade; moderadamente difícil de compactar;
- c) Matriz de finos, não se garante contato grão-grão devido ao excesso de finos; densidade mais baixa em geral que o tipo (b), permeabilidade inferior ao tipo (b), podendo ser mesmo impermeável, dependendo da natureza dos finos; a mistura é afetada por variações de umidade; facilidade na compactação.

De forma geral, essa distribuição das frações granulométricas de diâmetros variados é tal que os vazios dos grãos de granulometria mais grossa são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses, pelos grãos ainda menores. De acordo com Bernucci *et al* (2007), para a utilização em bases e sub-bases de pavimentos, as classificações mais usuais preconizam o uso de materiais do tipo (a) e (b), onde o contato grão-grão seja mais eficiente. Quando não existe solos de qualidade superior disponíveis para realização de rodovias de menor circulação, as misturas tipo (b) e (c) são frequentemente empregadas.

#### 2.4.3 Estabilização Química

De acordo com Marques (2006), a estabilização química quando utilizada em solos granulares, tem a função de propiciar a melhora de sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) mediante a adição de quantidades reduzidas de ligantes nas interfaces de contato dos grãos. Os ligantes usualmente empregados são o cimento portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, etc. Em solos argilosos (coesivos), são encontradas estruturas floculadas e dispersas que são mais vulneráveis à presença de água, influenciando assim, sua resistência ao cisalhamento. É usual a adição de agentes químicos que promovem a dispersão ou flocação das partículas ou uma substituição prévia de

cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidro-repelentes seguida de uma adição de cimentos.

A melhora provocada no solo pelo procedimento de estabilização obedece não apenas as características do material agregador, mas também do tipo de solo e das condições climáticas. Das diversas modificações proporcionadas pelo processo de estabilização, podemos destacar as seguintes:

- ✓ Aumento da resistência dos solos, e por conseguinte;
- ✓ Aumento da sua capacidade de suporte;
- ✓ Proporciona uma melhora no grau de compactação;
- ✓ A sua expansão é reduzida;
- ✓ Seu limite de contração aumenta;
- ✓ Proporciona uma melhor trabalhabilidade pois ocorre uma redução do índice de plasticidade;
- ✓ Permeabilidade diminui;
- ✓ Durabilidade aumenta.

#### *2.4.3.1 Solo-Cimento*

Segundo Marques (2006), o procedimento de estabilização de um solo com o cimento acontece por meio do desenvolvimento das reações químicas que são originadas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água). Com base nisso, é desenvolvido associações químicas entre as superfícies dos grãos do cimento e as partículas de solo que estão em contato com o mesmo. Em solos com maior fração graúda é desenvolvido vínculos de coesão nos pontos de contato entre os grãos (semelhante ao concreto, entretanto o ligante não ocupa todos os espaços). Nos solos argilosos, isto é, com uma fração mais fina, a ação da cal originada sobre a sílica e alumina do solo resulta o surgimento de fortes pontos entre as partículas de solo.

Solo-cimento é o resultado do endurecimento decorrente da mistura compactada de solo, cimento e água. Essa mistura é feita por meio de proporções estabelecidas com

uma dosagem coerente, realizada mediante normas aplicáveis ao solo em estudo. No Brasil, o solo cimento começou a ser utilizado a partir de 1940 na área de pavimentação e, em 1948, já existia aplicação na construção de paredes de solo-cimento. Abaixo são descritos os diferentes tipos de solos melhorados com cimento (MARQUES 2006).

- a) Mistura solo-cimento: produto obtido pela compactação e cura de uma mistura de solo, cimento e água, de modo a satisfazer a critérios de estabilidade e durabilidade exigidos.
- b) Solo melhorado com cimento: quando um solo mostrar-se economicamente inviável de ser estabilizado com cimento, ainda poderá ser utilizado para fins de pavimentação através da adição de pequenas quantidades de cimento (1 a 5%), que visam modificar algumas de suas propriedades físicas, por exemplo, diminuir o índice de plasticidade através do aumento do LP e da diminuição do LL ou diminuir as mudanças de volume e inchamento do solo.
- c) Solo-cimento plástico: material endurecido formado pela cura de uma mistura de solo, cimento e água, em uma quantidade suficiente para produzir uma consistência de argamassa. A quantidade de água no solo-cimento é apenas para permitir uma boa compactação e completa hidratação do cimento. No solo-cimento plástico a quantidade de cimento é aproximadamente 4% a mais para satisfazer os critérios de durabilidade e estabilidade exigidos e também devido a maior quantidade de água necessária para deixar a mistura na consistência de argamassa.

#### *2.4.3.2 Cimento sendo utilizado para a estabilização de camadas de pavimento rodoviário*

Segundo Oliveira *et al* (2004), em pesquisas, participou de trabalhos relacionados com reciclagem *in situ*, com a adição de brita e cimento, executados em uma dimensão de aproximadamente 21,9 quilômetros em uma rodovia do estado de São Paulo (SP-351),

compreendendo os trechos de Bebedouro até Palmares Paulista. Afim de recompor as condições funcionais e estruturais da rodovia, a metodologia utilizada foi a de reciclar o revestimento e a base a uma espessura de 18 cm de profundidade, sendo adicionado 3,5 % de Cimento Portland CP III – 40 RS e 10 % da mistura de brita 1 e 2, em peso. Ensaios de caracterização física, compressão simples e de deformabilidade da estrutura com o deflectômetro de impacto (FWD) e Viga Benkelman foram realizados com o objetivo de atestar e eficiência do processo. O estudo concluiu que a intervenção realizada na rodovia estudada restaurou as condições funcionais e estruturais do pavimento, deixando o mesmo propício a cumprir um novo ciclo de vida útil. Os autores relataram em seu trabalho que as deflexões medidas apresentaram valores baixos quando realizado ensaio com a Viga Benkelman. Isso mostrou a eficiência da metodologia de estabilização utilizada para a melhoria do pavimento estudado.

Em trabalhos publicados, foram analisados os efeitos da adição de cimento e agentes ativadores, exemplo deles podemos citar: cloreto de sódio, cloreto de cálcio, hidróxido de sódio e renolith, em solos residuais graníticos em relação a capacidade de carga e durabilidade. Foram realizados estudos no solo e nas misturas de solo-cimento e solo-cimento-agentes ativadores por meio dos ensaios de resistência a compressão simples e a tração por compressão diametral, afim de avaliar as características mecânicas. Para a obtenção durabilidade, foram feitos ensaios de absorção de água por capilaridade e compressão simples de corpos de prova. Os copos de prova foram submetidos a saturação por ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo. Com resultados apresentados, pode-se concluir que a utilização do cimento ocasionou uma melhora no desempenho mecânico e na durabilidade dos solos residuais graníticos. Em relação aos ativadores, alguns que foram estudados proporcionaram uma melhora expressiva em suas características mecânicas (CRUZ e LURDES 2006).

De acordo com Santos (2010), que em sua pesquisa, avaliou a reutilização de resíduos oleosos, juntamente com solo e agentes aglomerantes, cimento e cal, para estabilização de camadas pavimentos rodoviários. Foram realizados ensaios de caracterização física e química dos materiais e a caracterização mecânica das misturas solo-resíduo-cimento e solo-resíduo-cal, sendo adotado um teor de 17,5% para os resíduos oleosos. Em relação

aos agentes aglomerantes utilizados, variou-se o teor em 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%. De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que a adição de cal e cimento às misturas proporcionou um ganho expressivo em relação aos valores de CBR. Em ambas as misturas estudadas, os valores de CBR de adequaram aos padrões preconizados pelo DNIT para a utilização como sub-base de pavimentos de rodovias, entretanto em relação aos ensaios de expansão, apenas as misturas com adição de cal apresentou resultados satisfatórios.

#### *2.4.3.3 Cal utilizada na estabilização das camadas de pavimento rodoviário*

De acordo com Lovato (2004), no qual estudou o comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal cálcita e com cal dolomítica. Para o solo e para as misturas solo-cal nos teores de 3%, 4% e 5%, submetidos a tempos de cura de até 168 dias, foram realizados os ensaios de caracterização física, compactação, compressão simples, tração por compressão diametral, tração na flexão, módulo de resiliência e durabilidade. Os resultados obtidos demonstraram que o solo é reativo à cal, sendo necessário um teor de 3% do aglomerante para sua estabilização. A mistura de solo-cal com 4% de aglomerante (cal cálcita), após 28 dias, apresentou elevados valores de resistência à compressão simples, à tração na compressão diametral e módulo de resiliência. Também foi observado que, para os tempos de cura mais longos, houve a redução de resistência e rigidez da mistura solo-cal, possivelmente pela formação de  $\text{CaCO}_3$  e/ou produtos expansivos (etricita e taumasita). O autor relatou que as misturas estudadas (solo-cal), apresentam comportamento aceitável para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos e que a adoção de camadas estabilizadas faz com que os revestimentos asfálticos trabalhem apenas à compressão, não sofrendo ruptura por fadiga.

Segundo Rosa *et al* (2006), em trabalho foi pesquisado o comportamento de três tipos de solos finos, sendo estes dois siltosos e um argiloso, que foram estabilizados com os teores diferentes cal hidratada (3% e 6%), afim de serem utilizados para obras de rodovias e barragens. Nestes materiais, o solo e as misturas, foram feitos ensaios de caracterização física, mini-Proctor, mini-CBR (nas energias normal e intermediária) e

expansão. Os resultados se mostraram satisfatórios na estabilização de solos com uso da cal, os quais houve um ganho de resistência em relação aos valores de CBR, viabilizando as misturas na utilização de sub-base de pavimentos rodoviários. Algumas misturas o ganho de resistência foi tão significativo, que viabilizou também a sua aplicação como material de base para rodovias. Em relação à expansão dos materiais, os resultados também foram satisfatórios quando comparados aos padrões preconizados pelo DNIT (ES-140 e ES-142) para utilização como base e sub-base de rodovias.

A reutilização de resíduos asfálticos, misturados com solo e cal, para que possa ser utilizado para estabilização de camadas base e sub-base de pavimento rodoviários são objetos de estudos. Foram realizados ensaios de caracterização física e química dos materiais e a caracterização mecânica das misturas solo-resíduo-cal, sendo utilizado o teor fixo de 25% de resíduo oleoso e teores de cal variando de 3% a 9%. Os resultados mostraram um aumento no teor de umidade (%), entretanto houve uma redução da massa específica aparente seca em comparação ao solo no seu estado natural. Em relação à resistência do material, houve um ganho significativo nos valores de CBR e as misturas solo-resíduo-cal tiveram uma redução nos valores de expansão (CORDEIRO 2007).

#### 2.4.4 Estabilização Elétrica

Para estabilização do solo, é introduzida uma corrente elétrica no mesmo. As descargas sucessivas de alta tensão são utilizadas no adensamento de solos arenosos saturados e as de baixa tensão contínua são usadas em solos argilosos utilizando os fenômenos de eletrosmose, eletroforese e consolidação eletroquímica. Essa metodologia não é aplicada para estabilização de solos para pavimentos (MARQUES 2006).

#### 2.4.5 Estabilização Térmica

É realizada por meio da utilização da energia térmica mediante congelamento, aquecimento ou termosmose. A metodologia de congelamento geralmente é provisória, alterando-se a textura do solo. O aquecimento tem a finalidade em arranjar a rede

cristalina dos minerais constituintes do solo. A termosmose é uma metodologia de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura. Assim como a estabilização térmica, também não é utilizado para estabilização de solos para pavimentos (MARQUES 2006).

## 2.5 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reutilização de materiais reciclados na pavimentação, por meio do uso do próprio pavimento reciclado, é uma técnica que vem ganhando um espaço cada vez maior nas obras de pavimentação devido ao quesito ambiental, trazendo também consequências no lado social e econômico (SACHET, 2007).

De acordo com Momm e Domingues (1995), a reciclagem de pavimentos abrange a reutilização total ou parcial dos materiais constituintes do revestimento, quanto na base, quanto na sub-base ou até em ambos, em que os mesmos são misturados no estado em que se encontram após a reciclagem ou realizar uma estabilização química ou quando for o caso, realizar uma estabilização granulométrica.

De acordo com o guia da FHWA (2005), são destacadas as seguintes vantagens da reciclagem. Essas vantagens estão descritas abaixo:

- ✓ Redução nos custos de construção;
- ✓ Conservação de agregados e ligantes;
- ✓ Preservação da geometria do pavimento existente;
- ✓ Preservação do meio ambiente;
- ✓ Conservação de energia;
- ✓ Rápida liberação da pista.

Estudos realizados em alguns estados americanos, durante os anos de 1980 a 1986 apontam que a reciclagem pode reduzir o custo das obras em até 50%. Uma revisão bibliográfica realizada pela Federal Highway Administration - FHWA (2005), mostra que economias acima de 40, 50, 55 e 67% podem ser alcançadas usando reciclagem de

misturas a quente, a quente *in situ*, a frio *in situ*, e reciclagem profunda (espessura total), respectivamente.

De acordo com Oliveira et al. (1997), foi desenvolvido um trabalho com o objetivo de analisar o comportamento mecânico de materiais recicláveis para base de pavimentos. A mistura empregada era constituída de aproximadamente 30% de material fresado de revestimento asfáltico e 70% de material granular proveniente da base do pavimento. Foram realizados ensaios de laboratório convencionais para a obtenção dos parâmetros de resistência, ou seja, compactação dinâmica nas energias Proctor Intermediário e Modificado e CBR. Foram executados também os ensaios de compactação estática e dinâmica, seguido de CBR e compressão simples com e sem pré-aquecimento, para as condições de teor e umidade ótima. Os resultados encontrados pelo trabalho descrito acima estão resumidos na Tabela 2.5 e Tabela 2.6.

**Tabela 2.5: Resultados do CBR e compressão simples com e sem aquecimento da amostra compactada dinamicamente (Oliveira et al., 1997).**

Parâmetro	Proctor Modificado		Proctor Intermediário	
	Amostra sem pré aquecimento	Amostra pré aquecida	Amostra sem pré aquecimento	Amostra pré aquecida
Massa Específica Aparente Máxima (kN/m <sup>3</sup> )	20,65	20,4	20,17	20,6
Umidade Ótima (%)	9,0	9,1	9,6	9,5
CBR (%)	28,0	15,0	12,0	9,0
Resistência à Compressão Simples (kN/m <sup>2</sup> )	10,8	11,8	6,4	6,4
Temperatura Final de Ensaio	22°	52°	22°	48°

**Tabela 2.6: Resultados do CBR e compressão simples com e sem aquecimento da amostra compactada estaticamente (Oliveira et al., 1997).**

Parâmetro	Proctor Modificado		Proctor Intermediário	
	Amostra sem pré aquecimento	Amostra pré aquecida	Amostra sem pré aquecimento	Amostra pré aquecida
Massa Específica Aparente Máxima (kN/m <sup>3</sup> )	20,25	20,4	19,95	19,97
Umidade Ótima (%)	8,6	8,4	9,2	9,1
CBR (%)	12	5,0	8,0	9,0
Resistência à Compressão Simples (kN/m <sup>2</sup> )	3,7	1,2	2,1	0,8
Temperatura Final de Ensaio	22°	56°	22°	55°

Entre as conclusões encontradas no trabalho descrito, podemos destacar os valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima que apresentaram valores muito próximos e independentes da energia aplicada. Entretanto, o valor de CBR variou, principalmente para a compactação dinâmica. O método de compactação influenciou no comportamento resistente do material reciclado, e este fato foi melhor evidenciado na energia modificada. Tal fato pode estar intimamente associado à estrutura do material após compactação. Em relação ao efeito da temperatura, foi verificado uma interferência no comportamento mecânico da mistura e este fato deve-se, provavelmente, às características de fluênciam do ligante presente no revestimento fresado incorporado ao material reciclado.

De acordo com McKeen *et all* (1998), no ano de 1984, o Departamento de Estradas e Transportes do Estado do Novo México (NMSHTD), teve início o uso de um processo de restauração de pavimentos flexíveis usando a reciclagem a frio *in situ*. Este projeto apresentou avaliações de custo e desempenho de pavimentos que foram executados utilizando essa técnica. O estudo deixou bem claro que a reciclagem a frio *in situ* não tem uma boa eficiência em lugares que apresentam materiais com uma elevada quantidade de água. Quando uma camada estiver próxima da saturação, o material reciclado pode não curar corretamente e não desenvolver resistências satisfatórias. Os autores, ainda, concluíram que as trilhas de roda nos pavimentos diminuíram significativamente quando este tipo de técnica foi usado, sendo evidenciadas em apenas 3 de 45 projetos e que o desempenho dos pavimentos após 10 anos de vida apresentou um desempenho satisfatório.

Uma metodologia que vem sendo empregada em muitas obras de pavimentação no Brasil é a reciclagem com espuma de asfalto, entretanto em se tratando da reciclagem de base *in situ* com a adição do material fresado, ainda não são muitos autores que estudaram e pesquisaram sobre o assunto (OLIVEIRA et al., 1997; MIRANDA Jr e SILVA, 2000; ARAÚJO, 2004; SACHET, 2007; QUEIROZ, 2011). Desta forma existem muitos pontos a serem estudados para reduzir possíveis questionamentos em relação à eficiência do método (SACHET, 2007).

De acordo com Bonfim (2001), a metodologia de reciclagem *in situ* possibilita a reutilização do material possibilitando menores danos à natureza, fazendo com que as misturas se enquadrem de uma faixa especificada pelo projeto. No momento da execução da reciclagem, recomenda-se a possibilidade de aumentar o diâmetro do fresado. Isso pode ser feito, aumentando a velocidade do corte. Essa é uma metodologia com finalidade de melhorar a granulometria dos materiais a serem misturados.

A reciclagem permite a reutilização de pavimentos existentes, sendo assim, apresenta como um processo inovador, que permite um aumento de forma expressiva a capacidade estrutural e a homogeneidade dos mesmos, com uma redução da utilização de materiais provenientes de jazidas e/ou demais lugares. Essa metodologia é

recomendada para a restauração de pavimentos flexíveis em estado bem deteriorado, sendo sua base granular e seu pavimento se enquadre no seu estado último de utilização (FONSECA, 2002).

Segundo bibliografias citadas por Araújo (2004), propostas para reciclar pavimentos teve início no ano de 1915, mas não teve uma boa divulgação até a década de 70. No Brasil, por exemplo, essa metodologia teve início no ano de 1980, abrangendo apenas o concreto betuminoso usinado a quente reciclado (DNIT, 2006). Atualmente já temos vários trabalhos divulgados relacionados ao assunto (Previato et al., 1987; Ferreira et al., 1994; Bonfim e Domingues, 1995; Ramos et al., 1995).

De acordo com Lima (2003), estudos realizados nos últimos anos indicam que as misturas com materiais reciclados apresentam um desempenho similar e em alguns casos, desempenhos melhores aos agregados asfálticos usualmente utilizados, quando é levado em consideração as propriedades mecânicas. Em relação ao tempo de execução do serviço de restauração do pavimento rodoviário, é notório sua redução.

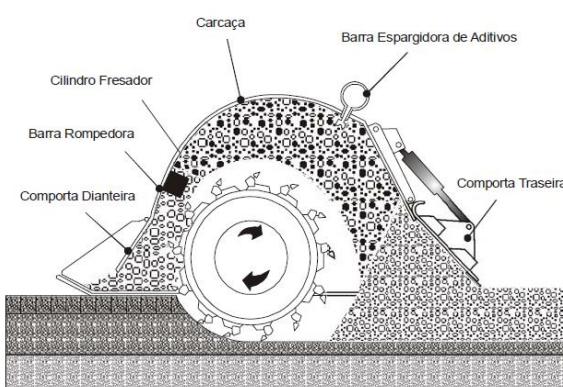
Para Castro (2003), a reutilização de materiais provenientes das camadas do pavimento existente proporciona a produção de um novo material, o qual promove uma economia considerável em termos de agregados. Podemos destacar também outra vantagem do processo de restauração: a geometria da rodovia não é modificada, podendo ser mantido seu traçado original, largura das faixas e espessura das camadas.

Jensen (2004), cita como referência em seu trabalho que o Instituto Rodoviário Dinamarquês anunciou alguns outros de materiais que tem a possibilidade de serem reutilizados na construção de rodovias, respeitando normas europeias.

De acordo com o autor materiais como concreto britado, tijolo britado e material asfáltico fresado podem ser utilizados como camadas de um pavimento rodoviário. Segundo o mesmo autor, o asfalto fresado é um excelente material para ser utilizado como material de camadas de base e sub-base de rodovias de menor volume de tráfego como também em rodovias de um maior volume de tráfego.

Segundo Araújo (2004), a reciclagem de um pavimento pode ser resumida a uma metodologia de restauração, no qual esse tipo de serviço se aproveita totalmente ou parcialmente o material fresado, com adição ou não de outros materiais e a execução de uma nova camada, com características que preconizam às especificações de projeto.

A Figura 2.8 mostra o processo de reciclagem de um pavimento rodoviário.



**Figura 2.8: Dispositivo de reciclagem a frio (DNIT, 2006).**

De acordo com Araújo et al (2004), em construção de pavimentos é gerado uma quantidade considerável de material da fresa do asfalto existente quando é realizada a sua restauração. Quando este material é reaproveitado para a construção do novo revestimento, o ligante é reaproveitado por meio da associação de agentes rejuvenescedores e sua quando for preciso, sua granulometria é corrigida incorporando com a adição de outros agregados. No caso de reutilização do material fresado, tanto na base quanto na sub-base de uma rodovia, a ideia é a utilização dos materiais com suas características que apresentam na situação de campo, misturando outros agregados, realizando uma estabilização granulométrica, sendo incorporando materiais como cimento, cal ou outro material ou não.

Com amostras de material fresado, que foram removidas de alguns trechos de vias do Distrito Federal (DF), foram realizadas pesquisas que constataram que ao se adicionar material fresado ao cascalho de base fez com que a mistura se enquadrasse na faixa granulométrica especificada, pois o material fresado contém uma quantidade reduzida

partículas finas. Durante a pesquisa foi constatado que o material fresado se comporta como não plástico. O material fresado misturado a base proporcionou um aumento da massa específica e uma redução da umidade ótima da mistura. Foi constatado também pelos os autores que com a adição do material fresado, houve uma redução significativa no valor do CBR. Pelo fato da presença de material betuminoso, o ângulo de atrito entre as partículas do material fresado é reduzido, devido a isso, o valor do CBR também sobre uma redução. Foi reforçado pelos autores que tal fato ocorre em misturas com maior proporção de material fresado adicionados a mistura. Pelo estudo realizado, foi verificado um teor ideal de material fresado a ser misturado. As misturas com a porcentagem que ficaram entre 20% e 25% tiveram aumento da resistência. Entretanto, em misturas com quantidade de material fresado acima dessas porcentagens, houve uma perda de resistência do material analisado (ARAÚJO E FARIAS, 2004).

De acordo com Filho (2005), uma obra que deve ser levado em consideração é a do aeroporto de Pouso Alegre/MG, no qual foi estudado a viabilidade econômica de se aplicar reciclagem a frio *in situ* para a sua restauração, comprovando que essas técnicas trazem vantagens ambientais devido a reutilização de materiais existentes, não tendo a necessidade de materiais provenientes de desmonte de rochas, isto é, material proveniente de pedreiras, reduzindo a DMT e no caso específico desta obra, apresentou uma redução de aproximadamente 27% no valor da final da obra em relação ao projeto inicial onde seria utilizado metodologias convencionais de restauração de pavimentos.

Segundo a Federation of Canadian Municipalities (FCM, 2005), além das vantagens descritas anteriormente, podemos destacar as vantagens econômicas da reciclagem. Estes materiais tendem ter um custo menor quando comparados ao custo que a disposição destes resíduos acarreta. A reutilização e a reciclagem tende a reduzir o montante de materiais que podem ser reaproveitados que são lançados nos aterros, com isso aumentando as áreas destinadas para resíduos domésticos, fazendo com que vida útil dos aterros aumente. Isso possibilita uma redução na procura e construção de novos aterros. Não só o setor público, como também o privado (profissionais e empresas da construção civil) estão tendo muito sucesso em relação a utilização e aplicação de tecnologias de reutilização e reciclagem do pavimento. Considerando estes sucessos,

alguns aterros municipais não mais aceitaram materiais que possuíam um potencial de serem reciclados e reutilizados na construção e manutenção de rodovias.

Segundo a Federation of Canadian Municipalities (FCM, 2005), é de grande importância enfatizar que a tecnologia a ser utilizada deve ter a capacidade de gerar um material reciclado que proporcione que as propriedades evidenciadas por ele certifiquem que problemas antes apresentados não se manifestem novamente na via a ser restaurada.

Desse modo, é possível que o Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) seja processado corretamente para garantir que as propriedades de engenharia sejam equivalentes às dos materiais virgens. Por isso, um gerenciamento minucioso do RAP resultará em um material relativamente homogêneo.

De acordo com Bonola (2005), a reciclagem nasceu em razão da necessidade de proteção ao meio ambiente. Mediante isso, podemos constatar e enumerar alguns pontos positivos do uso dessa metodologia de reciclagem de pavimentos, tais como:

- ✓ A redução do consumo de recursos naturais;
- ✓ Economias no custo da produção devido à redução no consumo de energia associado à preparação de matérias-primas a ser incorporado nos produtos finais;
- ✓ Economia no custo da produção devido à redução na exploração de pedreiras, porque reutiliza material da estrutura existente.

A execução de metodologia de um pavimento reciclado é feita da maneira descrita abaixo:

- ✓ Camadas compactadas são removidas;
- ✓ Agregados são adicionados com a finalidade de corrigir a granulometria do material que é o resultado do processo anterior;
- ✓ Regenera-se a ligação entre os materiais da camada na mistura final adicionando um polímero ou betume e aditivo, no caso, um agente rejuvenescedor.

Segundo DNIT (2006), a reciclagem de pavimentos *in situ*, é uma metodologia inovadora que vem mostrando excelentes resultados em diversos locais onde estão sendo empregados ao redor do mundo. Tal metodologia aproveita a camada do pavimento existente para a execução da recuperação da via e tem se mostrado uma solução praticável, tanto em relação à técnica e tanta no quesito ambiental, para os revestimentos asfálticos, pois há um aproveitamento total do material *in situ*, eliminando a necessidade de se explorar pedreiras ou executar aterros de bota fora, resolvendo, assim, um grande problema, que é a disposição final dos materiais em locais inadequados, principalmente ao longo de uma estrada.

Em Araújo (2004), o trabalho tinha como objetivo encontrar um teor ótimo de fresado a ser adicionado ao cascalho laterítico de base, e foi definido aplicar as seguintes percentagens, em peso, de 16%, 20%, 25% e 35% de fresado adicionado à mistura reciclada. Essas proporções foram adotadas baseando-se na profundidade de corte da fresadora, que em média é de 30,0 cm em virtude do aspecto prático e executivo em campo. Idealizou-se um revestimento de aproximadamente 5,0 cm como referência, e partindo-se dos 30,0 cm de profundidade de corte da fresadora, definiu-se as percentagens de fresado a serem incorporadas ao cascalho de base. A partir dos teores de fresado definidos foram realizados, nas misturas, ensaios de caracterização (NBR 6457/86), granulometria (NBR 7181/84), compactação (NBR 7182/86), índice de suporte Califórnia (NBR 6865/87) e compressão simples (com base na NBR 12770/92). Para cada mistura, foi realizado o ensaio do módulo de resiliência a partir da umidade ótima. No estudo foi utilizado a energia do Proctor Intermediário em todas as compactações.

Do trabalho descrito acima foi adotado uma percentagem de 2% de cal hidratada (CH I, marca Ical, procedente de São José da Lapa, MG) a ser incorporada à mistura de cascalho laterítico e fresado de capa asfáltica. Esta percentagem foi escolhida tendo como referência os resultados de Campello et al. (2000), uma vez que para 2% de cal o estudo apresentou um considerável ganho de resistência (CBR igual a 76%). Em segundo plano tentou-se levar em conta o aspecto econômico e a prática corrente, pois a

maior parte das obras de reciclagem executadas com adição de cal no Brasil, trabalham em uma faixa de 2% a 5% do aditivo incorporado na mistura.

Em Araújo (2004), também foi estudada a estabilização química com cimento, sendo adotado uma percentagem de 2% de cimento Portland (CP II - F 32), da marca Tocantins, adicionado à mistura de cascalho laterítico e material fresado de capa asfáltica. Essa percentagem de cimento foi determinada, principalmente em função do teor de cal já previamente escolhido, uma vez que se tinha o propósito de se realizar uma análise comparativa dos resultados conseguidos, para os dois diferentes tipos de agente químico incorporados à reciclagem. O aspecto econômico e a prática corrente também estão relacionados à escolha.

As cinco principais categorias para diferentes metodologias de reciclagem definidas pela Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming – ARRA) são:

- ✓ Reciclagem a frio (Cold recycling);
- ✓ Reciclagem a quente (Hot recycling);
- ✓ Reciclagem a quente *in situ* ( Hot in-place recycling);
- ✓ Reciclagem a frio in-situ (Cold in-place recycling)
- ✓ Reciclagem profunda (Full depth reclamation).

### 2.5.1 Reciclagem *in-situ*

De acordo com o DNIT (2006), a metodologia de reciclagem a frio engloba a retirada de toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, com redução do material a dimensões apropriadas para ser misturada a frio na construção de uma nova camada, onde poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. A mistura final poderá ser utilizada como camada de base, porém esta camada deverá ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de ser submetida à ação direta do tráfego (DNIT, 2006).

De acordo com o guia da FHWA (1997), FDR (reaproveitamento em toda a espessura) é definido como uma metodologia de reciclagem, no qual toda a seção do pavimento asfáltico e uma quantidade pré determinada de material das camadas subjacentes podem ser tratadas afim de executar uma nova base, sendo essa estabilizada. Neste tipo de mistura, vários tipos de aditivos podem ser incorporados se obter uma melhora estrutural da base, tais como: emulsões asfálticas e agentes químicos como a cal hidratada, cimento portland e cinza volante.

Essa metodologia consiste em incorporar as camadas do pavimento com a camada de revestimento, utilizando ou não, novos materiais a essa mistura, formando assim uma nova camada de sub-base ou base para o pavimento que estava deteriorado. A vantagem desta metodologia é que possibilita a correção de defeitos na estrutura do pavimento, em especial nas camadas de base e sub-base.

Existem cinco passos principais para a realização desse processo, sendo eles:

- ✓ Pulverização;
- ✓ Introdução do aditivo;
- ✓ Produção da mistura;
- ✓ Compactação;
- ✓ Aplicação de um revestimento.

De acordo com estudos da *Federation of Canadian Municipalities* - FCM (2005), há alguns diferentes tipos de FDR, incluindo mistura pulverizada (“pulvi-mixing”) ou reprocessamento *in situ*, neste caso, sem estabilização. Há também o FDR com estabilização betuminosa, utilizando emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. O FDR com estabilização química com o uso de cimento Portland, cinza volante, cal ou aditivos como cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio. E por fim, FDR com estabilização mecânica, utilizando para isso a estabilização granulométrica.

De acordo com o DNIT (2006), a técnica de reciclagem a frio possui vantagens e desvantagens. As vantagens são:

- ✓ Quando uma camada de concreto asfáltico existente é pulverizada e misturada juntamente com o agregado da base existente, o asfalto residual atua como um excelente ligante para auxiliar na confecção de uma base reciclada menos suscetível à ação da água;
- ✓ A adição de um novo ligante ou de um estabilizante químico, tais como cal ou cimento, poderá contribuir para evitar a expansão da base reciclada, aumentar a impermeabilização da base e aumentar a capacidade de carga da estrutura do pavimento;
- ✓ Aumentando a capacidade de carga da camada de base, a estrutura do pavimento poderá ser mais delgada, o que significará menor quantidade de material necessária e, portanto, economia de materiais virgens selecionados;
- ✓ O material considerado como rejeito, devido ao grau de exigência da nova camada de revestimento, poderá ser estocado para uso futuro.

Entretanto as desvantagens são:

- ✓ O equipamento de pulverização necessita frequentemente de reparos e portanto a produção pode ser baixa;
- ✓ A interrupção do tráfego pode ser maior do que em outras atividades de restauração;
- ✓ O período de cura normalmente é necessário para se obter a resistência desejada;
- ✓ Durante a execução e o período de cura existe muita susceptibilidade às condições climáticas, como temperatura e umidade;
- ✓ O controle de qualidade das operações na pista não é tão bom quanto nas operações com usina central.

## 2.6 RESILIENCIA DE SOLOS

Segundo Medina e Motta (2015), o estudo da deformabilidade de solos teve início com Fancis Haveem em 1955. O órgão rodoviário americano, mais precisamente do estado da Califórnia, havia começado em 1938 a medir as deflexões de pavimentos submetidos ao tráfego rodoviário. Heveem entendia que as rachaduras que apareciam nos

revestimentos asfálticos eram ocasionadas pela deformação resiliente das demais camadas do pavimento, em especial a camada de subleito. O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo que sofre uma deformação elástica, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Representa a energia potencial de deformação.

De acordo com Medina (1997), é a deformação resiliente que controla a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas dos pavimentos sujeitas a flexões sucessivas. Não sendo os solos e britas materiais elásticos lineares, os módulos resilientes dos solos dependem do estado de tensões atuante. O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental que descreve o comportamento dos módulos de resiliência em função da tensão de confinamento e da tensão desvio.

O motivo de se usar o módulo de resiliência e não o CBR se dá pelas seguintes razões de acordo com Bernucci *et all* (2007):

- ✓ A indicação de uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecanística de sistemas de múltiplas camadas;
- ✓ É uma metodologia aceita no mundo inteiro para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho;
- ✓ Existem metodologias disponíveis para estimar o módulo de resiliência em campo com testes rápidos e não destrutivos. Isso facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamentos de pavimentos antigos.

Em Motta (2003), para que se utilize um único corpo de prova no ensaio triaxial dinâmico, é preciso que este seja ensaiado em diversos níveis de tensão compatíveis com os apresentados nos pavimentos, de preferência com solicitações a serem empregados no pavimento a ser estudado, com a pretensão de eliminar o efeito da história de tensões no comportamento resiliente do solo em estudo. As condições de drenagem devem sempre ser livres, com a finalidade de se evitar as variações nas pressões neutras.

Em seu trabalho, Chaves *apud* Motta (2003), para se determinar dos módulos resilientes, o ensaio deve ser realizado após a aplicação de um número mínimo de repetições de carga, a partir do qual as deformações elásticas permanecem praticamente constantes para cada nível de tensão. A frequência da aplicação de carga é definida pelas condições de tráfego da via, enquanto o tempo de aplicação de carga é função da velocidade dos veículos e da profundidade das camadas do pavimento.

Nos dias de hoje, o modelo que é considerado mais adequado para se utilizar para interpretar ensaios dinâmicos é a chamada de modelo composto, no qual é levado em consideração duas tensões, a confinante ( $\sigma_3$ ) e a tensão desvio ( $\sigma_d$ ).

Neste modo, sendo feita a junção de modelos de materiais arenosos e coesivos, criou-se um modelo composto que foi utilizado para a obtenção do Módulo de Resiliência, modelo esse que foi utilizado neste presente trabalho. Esse modelo por ser utilizado para quaisquer solos ou brita. A equação 2.7 apresenta esse modelo proposto.

$$MR = k1 \sigma_3^{k2} \sigma_d^{k3} \quad (2.7)$$

Sendo:

- ✓ MR: Módulo Resiliente;
- ✓  $\sigma_3$ : tensão confinante;
- ✓  $\sigma_d$ : Tensão desvio;
- ✓  $k1, k2$  e  $k3$ : constante empíricas.

## 2.7 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO ÀS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As referências indicam que a reutilização de materiais provenientes da execução de serviços de restauração de rodovias, neste caso a fresagem do material proveniente da camada asfáltica juntamente com as camadas de base ou sub-base, quando misturados, podem ser utilizados nas camadas estruturais do pavimento, melhorando as características do solo e reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais.

A metodologia da reciclagem garante um novo destino dos materiais gerados pelas atividades da engenharia, fazendo com que materiais que antes seriam descartados no ambiente, sejam reutilizados na própria atividade da engenharia, proporcionando uma diminuição nos impactos causados no ambiente. Esses materiais chamados de resíduos, passam a servir com eficiência como um novo recurso para evitar a contaminação do meio ambiente, contribuindo e muito para um desenvolvimento sustentável.

## CAPÍTULO 3

---

---

### 3 METODOLOGIA

O presente estudo se desenvolveu de forma experimental visando comparar a eficiência da metodologia empregada para a estabilização e reforço da base da BR-120 utilizando material reciclado da base e revestimento sendo incorporado 2% de cimento com o material de base existente e também com a mistura de base com cimento.

O local escolhido para realização do estudo foi a BR-120 localizada no estado de Minas Gerais, ligando as cidades de Alvinópolis e Visconde do Rio Branco, conforme mostrado na Figura 3.1. Sua extensão é de 134,3 km. Ela é dividida em dois seguimentos. O primeiro ligando as cidades de Alvinópolis e Ponte Nova. Já o segundo seguimento liga as cidades de Ponte Nova e Visconde do Rio Branco. No trecho estudado, o número “N” de repetições do eixo padrão de rodas duplas de 8,2 t com fatores de equivalência da AASHTO e da USACE são respectivamente,  $5,9 \times 10^6$  e  $7,65 \times 10^6$ .

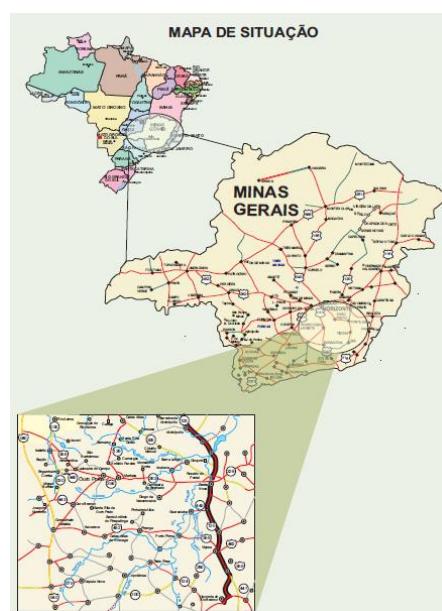


Figura 3.1: Mapa de Situação (Projeto – Memória Justificativa).

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram colhidos em duas estacas na BR-120, no trecho entre as cidades de Ponte Nova e Teixeiras. Os locais de coleta de material para o estudo foram as estacas 241 e 420. A escolha das mesmas se deu pelo fato que elas estavam sendo executadas durante o período da pesquisa de mestrado e em conversa com os responsáveis pela obra, seria mais adequado a retirada de material dessas estacas.

#### 3.1.1 Material de Base

A escolha se deu, conforme descrito acima, pelo fato do estudo ser em duas estacas da reforma da BR-120. O material que foi colhido, foram amostras indeformadas para análise em laboratório afim de analisar suas características geomecânicas. Para isso, foi preciso retiradar a capa asfáltica para chegar até o material de base. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam material provenientes das estacas 241 e 420, respectivamente.



Figura 3.2:Material de base – estaca 241 (Arquivo pessoal).



**Figura 3.3:Material de base – estaca 420 (Arquivo pessoal).**

### 3.1.2 Material Reciclado

O material reciclado (base + revestimento) foi colhido com a ajuda da máquina recicladora atendendo especificações de projeto conforme mostrado pelas Figuras 3.4 a 3.6.



**Figura 3.4:Máquina recicladora (Arquivo pessoal).**



**Figura 3.5:Máquina recicladora (Arquivo pessoal).**



**Figura 3.6:Material reciclado (Arquivo pessoal).**

De acordo com o projeto de restauração da rodovia, a altura da camada a ser reciclada é de 20 cm, sendo que 14 cm abrangendo material de base e 6 cm material de revestimento. Durante o processo de retirada do material reciclado, não foi adicionado o cimento. O cimento foi adicionado em laboratório.

### 3.1.3 Cimento

O cimento utilizado foi Cimento Portland Pozolânico Campeão CP – IV 32, da marca LAFARGE conforme Figura 3.7. De acordo com o fabricante, este cimento cimento pode ser utilizado em todas as obras sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. É indicado em casos de exposição a ambientes agressivos e de grande volume de concreto por causa das suas propriedades de tornar o concreto mais impermeável e gerar menor calor de hidratação. A escolha do cimento foi atendendo especificações de projeto e o mesmo foi adquirido em visita a obra de restauração da rodovia.



**Figura 3.7: Cimento utilizado no trabalho (Arquivo pessoal).**

## 3.2 PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

A metodologia de trabalho empregado nessa pesquisa consistiu primeiramente na escolha do local a ser estudado. Escolhido o local, foi realizada a ida em campo para recolher o material a ser estudado. Em laboratório, primeiramente o material foi separado e, separadamente, foram realizados os ensaios. Na sequência foi realizado os ensaios no material de base. Em relação a mistura solo/cimento, foi feito uma leitura da norma para ser escolhido a proporção a ser misturado de cimento ao solo (em item abaixo será explicado a escolha). Já na mistura material reciclado com cimento, foi respeitada a mistura escolhida em projeto.

As etapas dos ensaios estão evidenciadas no fluxograma da Figura 3.8 abaixo.

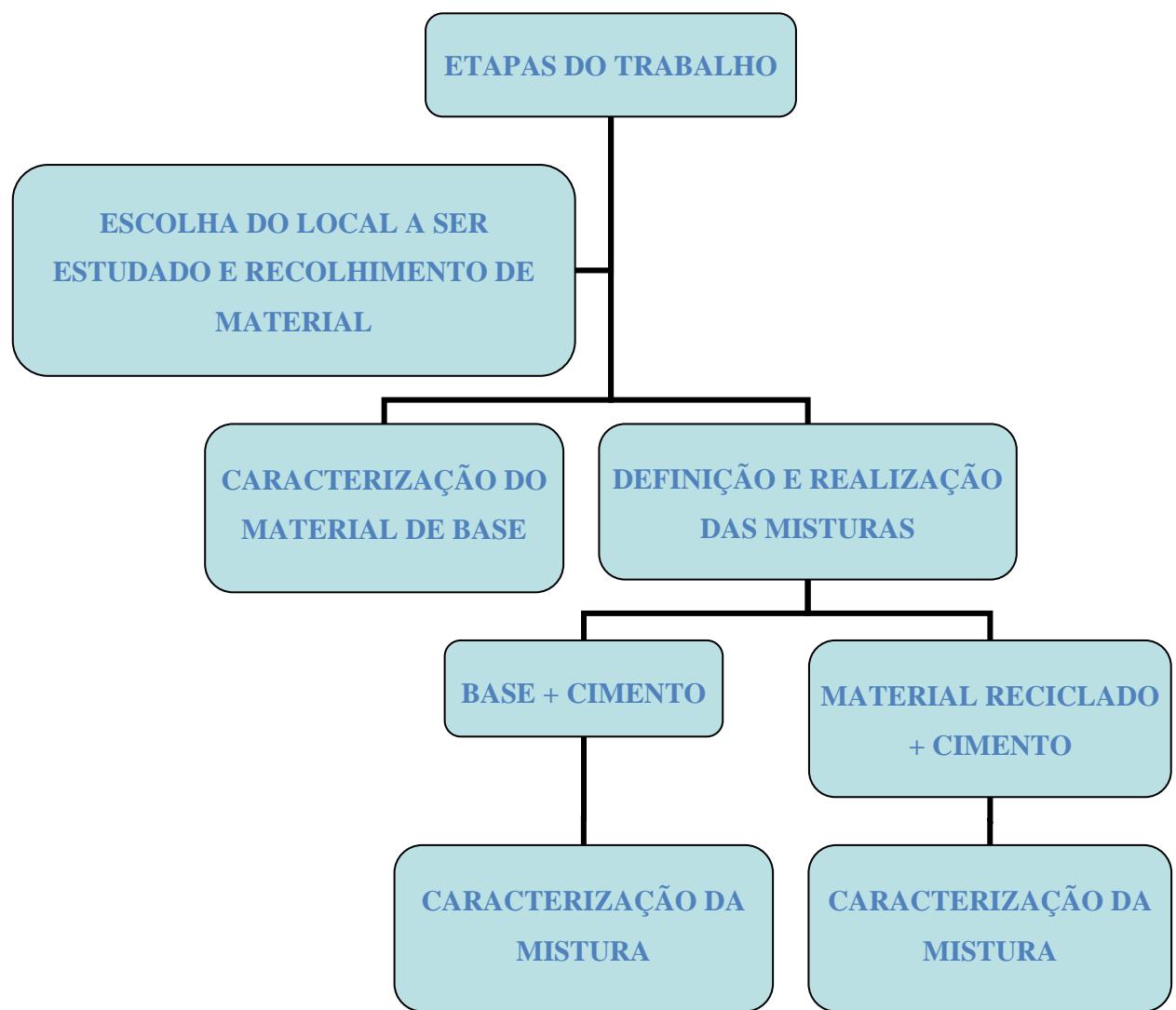


Figura 3.8: Fluxograma das etapas de trabalho.

### 3.2.1 Definição das Misturas

#### 3.2.1.1 Mistura material de base com cimento

A mistura do material de base com cimento se deu a partir da definição da norma ABNT NBR 12253/1992 – Solo-cimento – Dosagem para emprego em camada de pavimento. A Tabela 3.1 mostra o teor de cimento a ser misturado ao solo de acordo com a norma ASTM D 3282.

**Tabela 3.1: Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação solo-cimento (ABNT NBR 12253/92).**

Classificação de solo segundo ASTM D 3282	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A - 1 - a	5
A - 1 - b	6
A 2	7
A 3	9
A 4	10

### *3.2.1.2 Mistura material reciclado com cimento*

A escolha do teor de cimento misturado ao material reciclado se deu por um intenso estudo das bibliografias pesquisadas e também para atender definição do projeto de restauração da rodovia, sendo escolhido para o reforço da base do pavimento a proporção: 30% do revestimento, 70% da base sendo adicionado o teor de 2% de cimento a mistura.

A Figura 3.9 mostra como é feita a mistura em campo e a processo de compactação da base do pavimento.



**Figura 3.9: Reciclagem e compactação da camada de base (Arquivo pessoal).**

### 3.2.2 Ensaios realizados

Abaixo estão descritos toda a bateria de ensaios de laboratório realizados neste presente trabalho.

#### 3.2.2.1 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado conforme especificação da norma NBR ABNT 7181/1984. Paralelamente ao ensaio de granulometria, foi realizado o ensaio para a determinação da massa específica do material, que é feito de acordo com a norma NBR ABNT 6508/1984.

Em um dado solo, existem partículas de variados tamanhos. Nem sempre é fácil identificar as partículas porque grãos de areia, por exemplo, podem estar envoltos por uma grande quantidade de partículas argilosas, finíssimas, apresentando o mesmo aspecto de uma aglomeração formada exclusivamente por estas partículas argilosas.

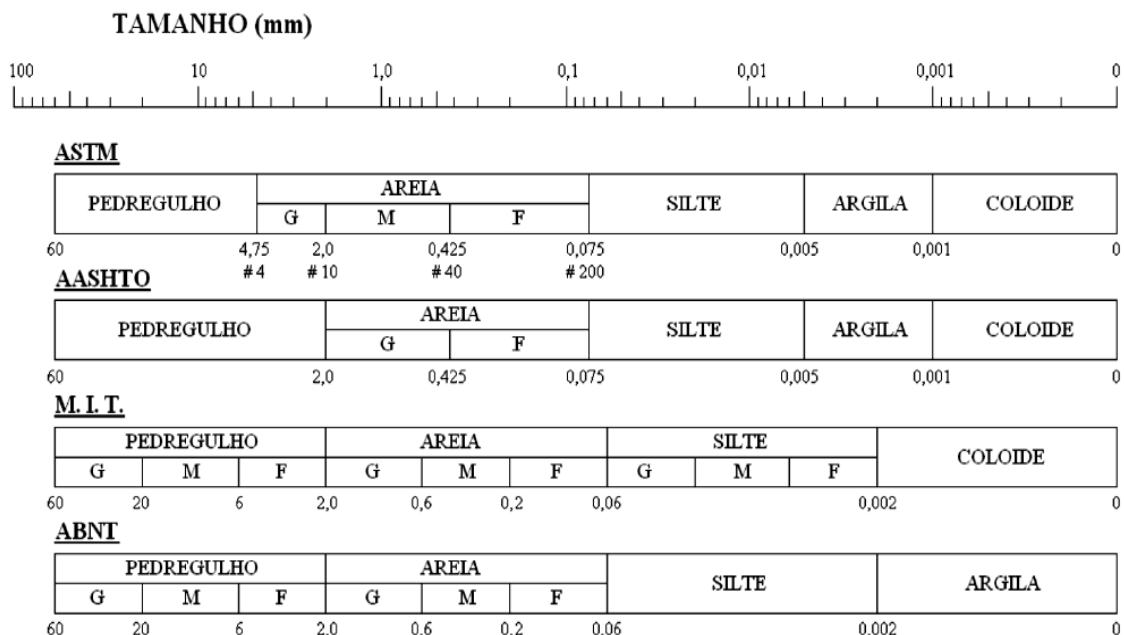
Quando secas, as duas formações são dificilmente diferenciáveis. Quando úmidas, entretanto, a aglomeração de partículas argilosas se transforma em uma pasta fina, enquanto que a partícula arenosa revestida é facilmente reconhecida pelo tato.

O ensaio de granulometria é dividido em duas partes distintas, utilizáveis de acordo com o tipo de solo e as finalidades do ensaio para cada caso particular. São elas: análise granulométrica por peneiramento e análise granulométrica por sedimentação.

Os solos grossos (areias e pedregulhos), possuindo pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada utilizando-se somente o peneiramento.

Em solos possuindo quantidades de finos significativas, deve-se proceder ao ensaio de granulometria conjunta, que engloba as fases de peneiramento e sedimentação.

Por meio dos resultados obtidos desses ensaios, é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, que possui fundamental importância na caracterização geotécnica do solo. A Figura 3.10, apresenta as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais.



**Figura 3.10: Escalas granulométricas (SANTOS,2013).**

O peso do material que passa em cada peneira, referido ao peso seco da amostra, é considerado como a “porcentagem que passa”, e representado graficamente em função da abertura da peneira, esta em escala logarítmica.

A abertura nominal da peneira é considerada como o “diâmetro” das partículas. Trata-se, evidentemente, de um “diâmetro equivalente”, pois as partículas não são esféricas. O referido ensaio foi utilizado a granulometria por peneiramento e por sedimentação.

A análise por peneiramento tem como limitação a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. A menor peneira costumeiramente empregada é a de nº 200, cuja abertura é de 0,075 mm. Existem peneiras mais finas para estudos especiais, mas são pouco resistentes e por isso não são usadas rotineiramente. Mesmo estas, por sinal, têm aberturas muito maiores do que as dimensões das partículas mais finas do solo.

A amostra seca é colocada na peneira de maior abertura da série escolhida e o peneiramento pode ser manual ou utilizando-se um vibrador de peneiras por cerca de 15 minutos - 60hz. Em seguida é determinada a massa retida em cada peneira, calculando-se a percentagem correspondente.

Peneiramento grosso: 50,00 mm (2"); 38,00 mm (1 1/2"); 25,4 mm (1"); 19,10 mm (¾"); 12,70 mm (1/2"); 9,51 mm (3/8"); 4,76 (nº. 4); 2,00 mm (nº. 10).

Peneiramento fino: 1,20 mm (nº. 16); 0,6 mm (nº. 30); 0,42 mm (nº. 40); 0,30 mm (nº. 50); 0,15 (nº. 100); 0,075 mm (nº. 200).

A Figura 3.11, apresenta o conjunto de peneiras normalizado pela NBR 2395/1997, para a realização do ensaio de granulometria.



**Figura 3.11: Jogo de peneiras utilizado – Padrão ABNT (Arquivo Pessoal).**

Alguns sistemas de classificação utilizam a curva granulométrica para auxiliar na previsão do comportamento de solos grossos.

Estes sistemas utilizam alguns índices característicos da curva granulométrica, para uma avaliação de sua uniformidade e curvatura. Tais índices são chamados de coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc), e são obtidos a partir de alguns diâmetros equivalentes característicos do solo na curva granulométrica.

Diâmetros Equivalentes:

- ✓  $D_{10}$  – Diâmetro efetivo: diâmetro equivalente da partícula para o qual temos 10% das partículas passando (10% das partículas são mais finas que o diâmetro efetivo), tomado na curva granulométrica;
- ✓  $D_{30}$  – Diâmetro correspondente a 30% das partículas passando, tomado na curva granulométrica;
- ✓  $D_{60}$  – Diâmetro correspondente a 60% das partículas passando, tomado na curva granulométrica.

As equações 3.1 e 3.2 apresentam os coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc).

- ✓ Coeficientes de Uniformidade (Cu):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

- ✓  $Cu < 5$  – Muito uniforme;
- ✓  $5 < Cu < 15$  – Uniformidade média;
- ✓  $Cu > 15$  – Não uniforme.

- ✓ Coeficiente de Curvatura (Cc):

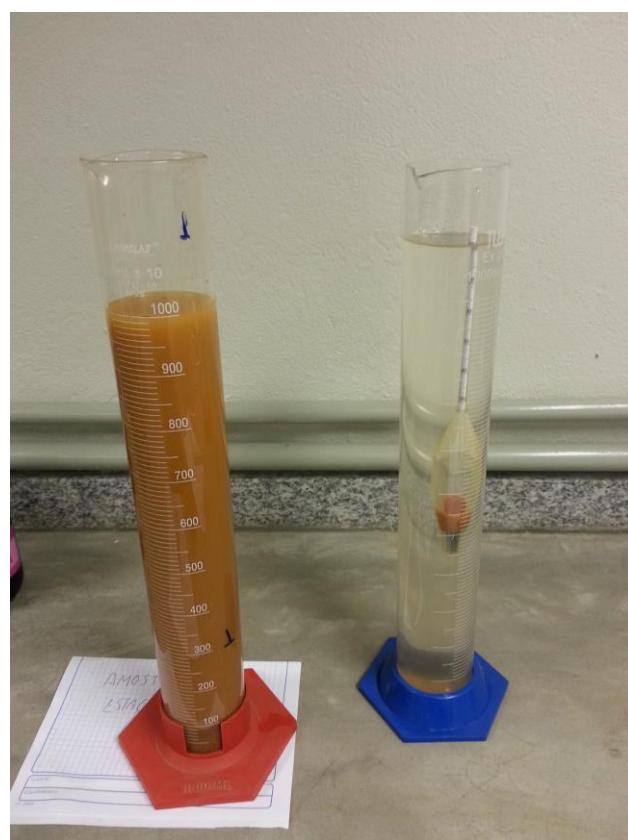
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})} \quad (3.2)$$

- ✓  $1 < Cc < 3$  – Solo bem graduado;
- ✓  $Cc < 1$  ou  $Cc > 3$  – Solo mal graduado.

A granulometria por sedimentação tem a finalidade de determinar a fração silte e a fração argila.

Para os solos finos, siltes e argilas, com partículas menores que 0,075mm (#200), emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes: a velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera, do peso específico do fluido, da viscosidade do fluido, e do diâmetro da esfera.

Colocando-se certa quantidade de solo (aproximadamente 120g) em suspensão em água (cerca de um litro), as partículas cairão com velocidades proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. A Figura 3.12 apresenta o ensaio de sedimentação.



**Figura 3.12: Ensaio de sedimentação (Arquivo Pessoal).**

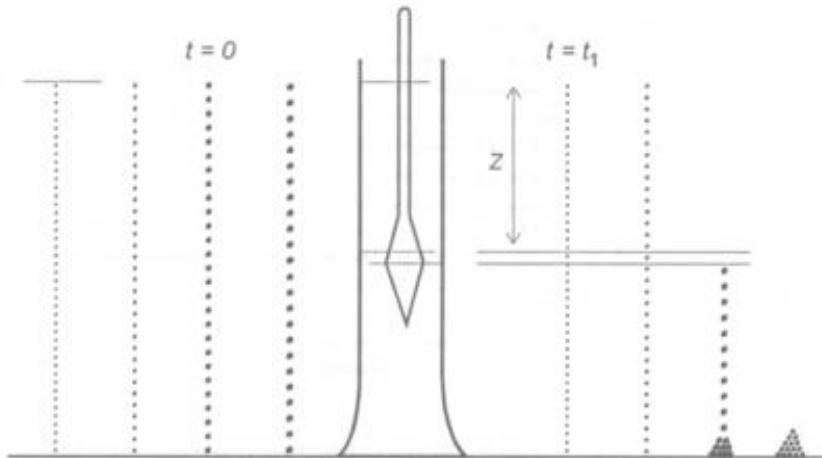
A esquerda do frasco está indicada grãos com quatro diâmetros diferentes igualmente representados ao longo da altura, o que corresponde ao início do ensaio.

A direita do frasco está representada a situação depois de decorrido certo tempo. No instante em que a suspensão é colocada em repouso, a sua densidade é igual ao longo de toda a profundidade.

Quando as partículas maiores caem, a densidade na parte superior do frasco diminui. Numa profundidade qualquer, em certo momento, a relação entre a densidade existente e a densidade inicial indica a porcentagem de grãos com diâmetro inferior ao determinado pela Lei de Stokes.

As densidades de suspensão são determinadas com um densímetro, que também indica a profundidade correspondente. Diversas leituras do densímetro, em diversos intervalos de tempo, determinarão igual número de pontos na curva granulométrica, complementando a parte da curva obtida por peneiramento.

A Figura 3.13 apresenta o desenho esquemático do ensaio de sedimentação.



**Figura 3.13: Representação do ensaio de sedimentação (Davilla, C).**

De acordo com a figura acima, do lado esquerdo do recipiente, está representado os grãos com quatro diâmetros diferentes igualmente representados ao longo da altura, o que corresponde ao início do ensaio. A direita do recipiente, é representado a situação depois de ter passado um determinado período. No instante em que a suspensão é colocada em repouso, a sua densidade é igual ao longo de toda a profundidade. Quando

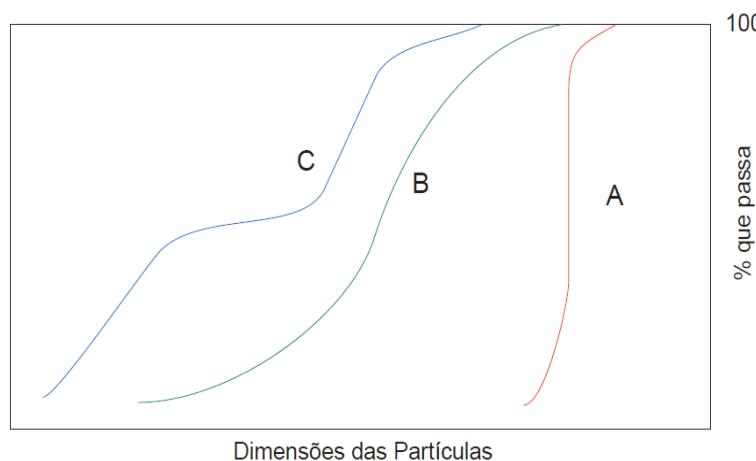
as partículas maiores caem, a densidade na parte superior do frasco diminui. Novamente, neste caso, o que se determina é um diâmetro equivalente, pois as partículas não são as esferas às quais se refere a Lei de Stokes. Diâmetro equivalente da partícula é o diâmetro da esfera que sedimenta com velocidade igual à da partícula. A equação 3.3 mostra o cálculo do diâmetro das partículas.

$$D = \sqrt{\left[ \frac{(1800 \cdot \eta)}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot g} \right] \frac{z}{t}} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{(1800 \cdot \eta)}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot g} \frac{z}{t}} \quad (3.3)$$

Onde:

- ✓  $D$  = diâmetro equivalente da partícula (mm);
- ✓  $\eta$  = coeficiente de viscosidade do meio dispersor ( $10^{-4}$  Pa . s);
- ✓  $g$  = aceleração da gravidade, cte =  $9,81\text{ m/s}^2$ ;
- ✓  $z$  = altura de queda das partículas, para as leituras do densímetro (cm);
- ✓  $\gamma_s$  = massa específica das partículas ( $\text{g/cm}^3$ );
- ✓  $\gamma_w$  = massa específica da água, variável com a temperatura ( $\text{g/cm}^3$ );
- ✓  $t$  = tempo de sedimentação (s).

Pelo ensaio de granulometria, por meio do gráfico gerado, podemos apresentar a forma da curva de acordo com as dimensões das partículas. Podemos distinguir os seguintes tipos de granulometria: uniforme (curva-A); bem graduada (curva-B); mal graduada (curva-C). A Figura 3.14 apresenta estas curvas.



**Figura 3.14: Dimensão das partículas (DNIT 2006).**

### *3.2.2.2 Limites de Atterberg*

Os limites se baseiam na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos conforme o seu teor de umidade.

Quando muito úmido, ele se comporta como um líquido; quando perde parte de sua água, fica plástico; e quando mais seco, torna-se quebradiço. Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são definidos como:

- ✓ Limite de Liquidez (LL);
- ✓ Limite de Plasticidade (LP).

A diferença entre estes dois limites, que indica a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico, é definida como o índice de Plasticidade (IP) do solo. Em condições normais, só são apresentados os valores do LL e do IP como índices de consistência dos solos. O LP só é empregado para a determinação do IP.

O limite de liquidez foi concebido como o menor teor de umidade com que uma amostra de um solo pode ser capaz de fluir. Os ensaios para determinar o limite de liquidez de solos finos têm o teor de umidade como parâmetro, por causa da dificuldade de medir e controlar o grau de saturação. Como a variância dos resultados era muito grande no método de realização do ensaio original de Atterberg, Casagrande padronizou o ensaio, mecanizando o processo primitivo de Atterberg.

No processo padronizado, coloca-se parte da amostra no recipiente de porcelana e aos poucos, adiciona-se até a homogeneização da massa, em seguida, passa-se para a concha do aparelho de Casagrande certa quantidade dessa massa aplaíando-a com a espátula, de tal forma que a parte central fique com 1cm de espessura. Então, faz-se com o cinzel uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho. Após este procedimento, dar-se início a aplicação dos golpes girando-se a manivela à razão de duas voltas por segundo, contando o número de golpes até que se constate o fechamento da ranhura num comprimento de 1,0cm quando se deve parar a operação.

A Figura 3.15, apresenta o aparelho de Casagrande.



**Figura 3.15: Aparelho de Casagrande (Arquivo Pessoal).**

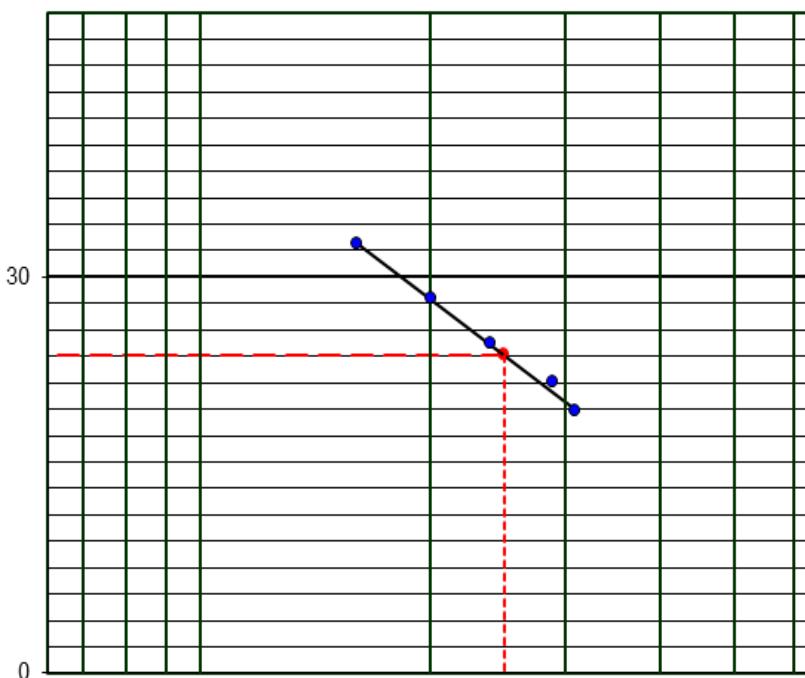
Retira-se uma pequena quantidade do material no local onde as bordas da ranhura se tocaram para a determinação da umidade. O material que sobra na concha é transferido de volta ao recipiente de porcelana, adiciona-se mais um pouco d'água e repete-se o processo por mais cinco vezes, no mínimo, aumentando gradativamente a quantidade de solo de modo que o número de golpes necessários para o fechamento da canelura seja aproximadamente de 15 a 35 golpes. O procedimento de ensaio é padronizado no Brasil pela ABNT (Método NBR 6459/1984).

Diversas tentativas são realizadas, com o solo em diferentes umidades, anotando-se o número de golpes para fechar a ranhura. Colocam-se esses valores em gráfico semi-logarítmico. Quando o ensaio é bem executado e todos os pontos obtidos são válidos, esses pontos dispõem-se próximos de uma linha reta, denominada reta de escoamento. (A teoria da resistência ao cisalhamento dos solos plásticos confirma essa linearidade).

O Limite de Plasticidade é o teor de umidade em que o solo, estando do estado plástico, se perder umidade, passa para o estado semissólido. Atterberg convencionou que a condição para que uma amostra de solo esteja no estado plástico é a possibilidade de

com ela ser possível moldar um cilindro de 10 cm de comprimento por 3 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro.

O gráfico da Figura 3.16, apresenta o gráfico do limite de liquidez, onde no eixo das abscissas é o número de golpes e no eixo das ordenadas a umidade em porcentagem.



**Figura 3.16: Gráfico do Limite do Liquidez.**

O procedimento é realizado colocando-se a amostra de solo na bacia de porcelana, adicionar água destilada com pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente, com a espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. O tempo de homogeneização deve estar entre 15 e 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos.

Em seguida, com cerca de 10 g da amostra assim preparada e formar com os dedos uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar forma de cilindro.

Quando a moldagem do cilindro com as dimensões mencionadas for conseguida, estará caracterizado que o solo está no estado plástico. Refazer a esfera e repetir a rolagem até

que haja fragmentação do cilindro com dimensões próximas às do gabarito de comparação, então, transfere-se imediatamente as partes fragmentadas para um recipiente adequado, para determinação da umidade pelo método da estufa (NBR 6457/1986). Repetir as operações para obter pelo menos três valores de umidade que difiram de sua respectiva média menos que cinco por cento do valor dessa média. O procedimento é padronizado no Brasil pelo Método NBR 7180.

A Figura 3.17 apresenta o ensaio do Limite de Plasticidade.



**Figura 3.17: Ensaio de Limite de Plasticidade (Arquivo Pessoal).**

O Índice de Plasticidade (IP) é obtido através da diferença numérica entre o Limite de liquidez(LL) e o Limite de plasticidade (LP). Equação 3.4.

$$IP = LL - LP \quad (3.4)$$

O IP é expresso em percentagem e pode ser interpretado, em função da massa de uma amostra, como a quantidade máxima de água que pode lhe ser adicionada, a partir de seu Limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica. Burmister (1949) classificou o índice de plasticidade de forma quantitativa. A Tabela 3.2, apresenta a classificação de Burmister.

**Tabela 3.2: Classificação do índice de plasticidade (Burmister, 1949).**

IP	Descrição
0	Não plástico
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade média
20 – 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

O Índice de Plasticidade é importante para a classificação de solos com grãos finos. É fundamental para o gráfico de plasticidade de Casagrande, que atualmente é a base para o Sistema Unificado de Classificação do Solo (USCS).

### *3.2.2.3 Classificação de Solos*

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos foi elaborado originalmente pelo Prof. Casagrande para obras de aeroportos, tendo seu emprego sido generalizado. Atualmente, é utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra.

O SUCS baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade, e agrupa-os de acordo com seu comportamento quando usado em estradas, aeroportos, aterros, e fundações.

O Sistema de Classificação do AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) foi desenvolvido nos Estados Unidos e é baseado na granulometria e nos limites de Atterberg.

Esse sistema foi proposto com a finalidade de classificar os solos para fins rodoviários e, por isso, é chamado também de sistema rodoviário de classificação.

A classificação enquadra os solos em grupos com denominações A1 a A3 (solos grossos) e A4 a A7 (solos finos). Existem ainda subgrupos para esses grupos e o índice de grupo (IG) que é um número inteiro que varia de 0 a 20.

As características dessas duas classificações foram apresentadas nesse estudo no capítulo 2. A Tabela 3.3 abaixo apresenta uma correlação entre as duas classificações.

**Tabela 3.3: Correlação entre as classificações TRB (AASHTO) e SUCS (DNIT 2006).**

Classificação AASHTO	Classificação SUCS		
	Mais provável	Possível	Possível, mais improvável
A – 1 – a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A – 1 – b	SW, SP, GM, SM	GP	-
A – 3	SP	-	SW, GP
A – 2 – 4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A – 2 – 5	GM, SM	-	GW, GP, SW, SP
A – 2 – 6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A – 2 – 7	GM, GC, SM, SC	-	GW, GP, SW, SP
A – 4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A – 5	OH, MH, ML, OL	-	SM, GM
A – 6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A – 7 – 5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A – 7 – 6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

### 3.2.2.4 Ensaio de CBR

O ensaio Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio – CBR) foi desenvolvido por Porter, em 1929, voltado, especificamente, para o dimensionamento

de pavimentos rodoviários, sendo mais tarde adaptado pelo Corpo de Engenheiros para o projeto de pavimentos de aeroportos, mantendo-se ainda hoje como o parâmetro de projeto mais utilizado.

Por definição, CBR é a relação, em percentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado, necessária à penetração no solo até determinado ponto (0,1" e 0,2") e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada. O ensaio permite, também, obter-se um índice de expansão do solo durante o período de saturação por imersão do corpo-de-prova.

Com o índice de expansão é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações da perda de resistência do solo com a saturação. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Embora o ensaio seja mais frequentemente realizado com amostras moldadas em laboratório, é possível sua realização em amostras indeformadas ou mesmo *in situ*. O procedimento de ensaio mais usado no meio rodoviário e é determinado pela norma NBR 9895/1987 – Índice de Suporte Califórnia.

A preparação do solo é descrita abaixo:

- ✓ Secando-se a amostra ao ar e fazem-se a pesagem;
- ✓ Destorroando-se a amostra e fazem-se o peneiramento na peneira de 19mm;
- ✓ Determinando-se a umidade higroscópica;
- ✓ Adicionando-se água até atingir a umidade prevista para o ensaio (normalmente a umidade ótima).

Para a moldagem das amostras é feito de acordo como descrito abaixo:

- ✓ Coloca-se o disco espaçador no cilindro, cobrindo-o com papel filtro;

- ✓ Compacta-se o corpo de prova à umidade ótima (05 camadas e 55 golpes do soquete “caindo” de 45cm) e, invertendo-se o cilindro, substitui-se o disco espaçador pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos. Esse peso ou sobrecarga corresponderá ao do pavimento e não deverá ser inferior a 4,5kg.

Entre o prato perfurado e o solo coloca-se outro papel-filtro. A Figura 3.18 apresenta a moldagem dos copos de prova para o ensaio de CBR.



**Figura 3.18: Realização do Ensaio de Compactação (Arquivo Pessoal).**

A seguir está descrito o ensaio de expansão do solo:

- ✓ Imerge-se o cilindro com o corpo de prova e sobrecarga no tanque durante 96 horas, de tal forma que a água banhe o material tanto pelo topo quanto pela base;
- ✓ Realiza-se leituras de deformação (expansão ou recalque) com aproximação de 0,01mm a cada 24h;
- ✓ Terminada a “saturação”, deixa-se escorrer a água do corpo de prova durante 15 minutos e pesa-se o cilindro + solo úmido.

O ensaio de penetração é feito da seguinte forma:

- ✓ Instala-se o conjunto, molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga, na prensa;
- ✓ Assenta-se o pistão da prensa na superfície do topo do corpo de prova, zerando-se em seguida os extensômetros;

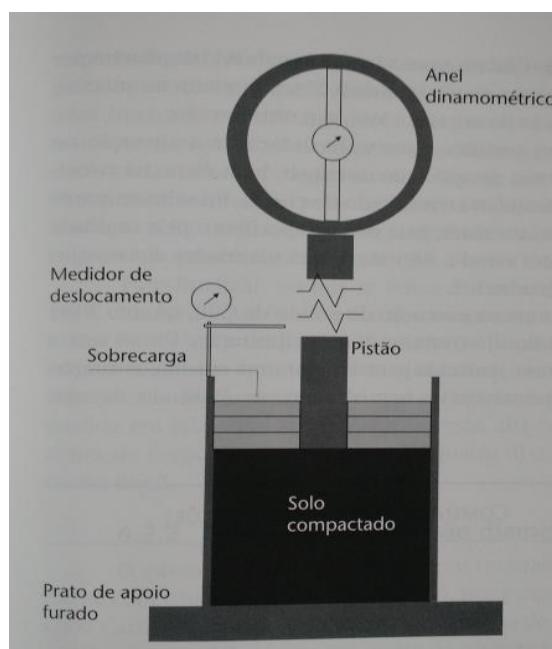
- ✓ Aplica-se o carregamento com velocidade de 1,27 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até decorridos o tempo de 6 minutos.

A Figura 3.19 mostra os copos de prova debaixo d'água e os extensômetros para a medição da expansão.



**Figura 3.19: Corpos de prova imersos e extensômetros para medição da expansão (Arquivo pessoal).**

A Figura 3.20 apresenta um desenho esquemático do funcionamento da prensa de CBR.



**Figura 3.20: Desenho esquemático da prensa de CBR (BALDO, 2007).**

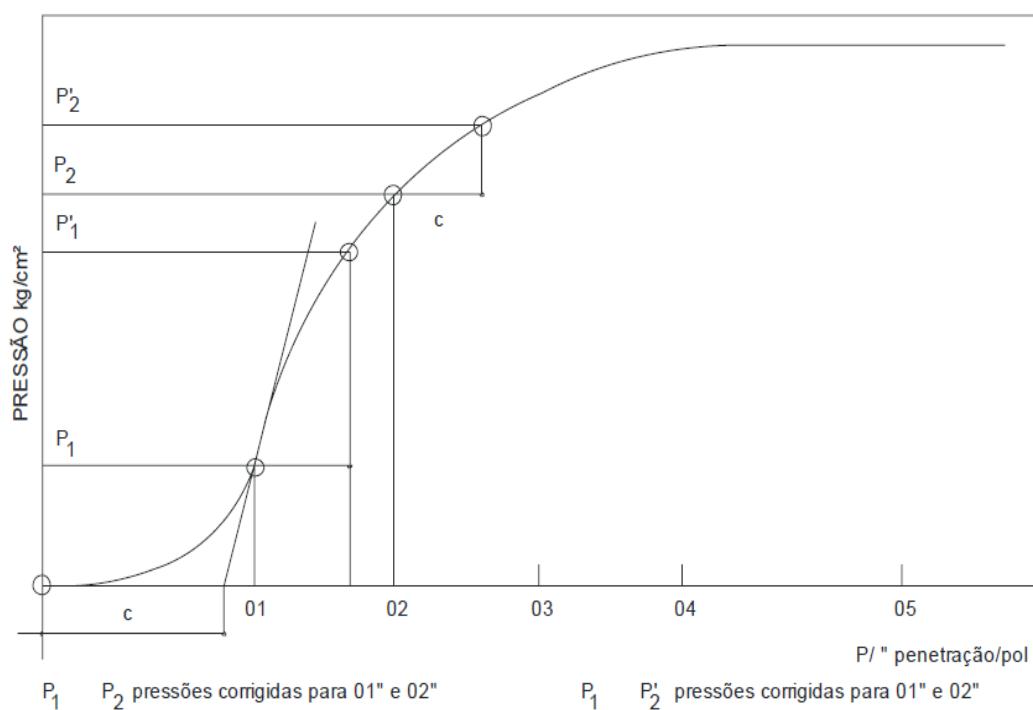
As leituras de deformação do anel, devem ser feitas afim de que forneçam as cargas correspondentes às penetrações de 0,63; 1,25; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 mm.

Com os valores de carga e penetração, pode-se traçar uma curva, colocando-se no eixo das ordenadas os valores de carga (Kgf) e no eixo das abscissas, os valores de penetração (mm). Se a curva apresentar ponto de inflexão, traça-se por ele uma reta seguindo o comportamento da curva, até que intercepte o eixo das abscissas.

Esse ponto de interseção será a nova origem, provocando assim uma translação no sistema de eixos. Do gráfico obtém-se, por interpolação, as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0mm. O índice de suporte Califórnia (CBR), em porcentagem, para cada corpo de prova, é obtido pela equação 3.5:

$$CBR = \left( \frac{\text{Pressão calculada ou Pressão corrigida}}{\text{Pressão padrão}} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

A Figura 3.21 mostra o gráfico da curva de penetração corrigida.



**Figura 3.21: Curva penetração (DNIT 2006).**

O valor do CBR é o maior dos valores obtidos para as penetrações de 0,1" (2,5 mm) e 0,2" (5,0 mm).

Para o ensaio de compactação, foi utilizada a energia modificada. A Tabela 3.4 apresenta as energias de compactação, número de golpes e número de camadas de acordo com a NBR 7182/1986.

**Tabela 3.4: Energia de compactação (NBR7182/1986).**

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
Pequeno	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

### *3.2.2.5 Compressão simples*

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados segundo Método de Ensaio NBR 12025 (ABNT, 2012). Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados com as amostras de solo da base, solo/cimento (com a proporção solo/cimento sendo estabelecida após a realização do ensaio de granulometria do solo) e material reciclado com cimento. Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com os procedimentos sugeridos pela NBR 12024 da ABNT (2012) para teores definidos por norma e projeto. Procurou-se com isso, um solo estabilizado que se enquadrasse dentro dos critérios estabelecidos pelo DNIT para materiais de base.

A quantidade de água utilizada nas misturas foi determinada a partir dos resultados dos ensaios de compactação. Os ensaios foram realizados com corpos de prova com 0 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias de cura. O incremento de tensão foi de 0,06 MPa/s.

O rompimento dos corpos de prova foi feito no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto com o equipamento mostrado nas Figuras 3.22 a 3.24.



Figura 3.22: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).



Figura 3.23: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).



Figura 3.24: Equipamento para compressão simples (Arquivo pessoal).

A Figura 3.25 mostra o corpo de prova do ensaio de compressão simples após o rompimento.



Figura 3.25: Ensaio de compressão simples finalizado (Arquivo pessoal).

Para a determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova foi utilizada a norma NBR 12025 da ABNT (2012). A resistência à compressão simples expressa em MPa foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova de acordo com a Equação 3.6.

$$RCS = \frac{C}{A} \times 0,1 \text{ (MPa)} \quad (3.6)$$

Sendo:

- ✓ C: Carga de Ruptura (kgf);
- ✓ RCS: Resistência à Compressão Simples;
- ✓ A: Área da seção transversal do corpo de prova.

### *3.2.2.6 Ensaio de Triaxial Dinâmico*

Os ensaios de triaxial dinâmico para a obtenção do MR (módulo de resiliência) dos solos foram realizados no Laboratório de Pavimentos da Universidade Federal de Juiz de Fora. Os copos de provas foram moldados de acordo com a umidade ótima de cada material obtidas por meio do ensaio de compactação.

De acordo com Medina e Motta (2015), o módulo de resiliência de um solo é obtido por meio de uma relação entre a tensão-desvio aplicada axial e ciclicamente em um corpo de prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável conforme a equação abaixo:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.7)$$

Os procedimentos para a realização do Ensaio Triaxial Dinâmico para determinação do Módulo de Resiliência em amostras de solos, são descritos pela norma DNIT 134/2010,

Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio. O ensaio foi realizado na energia modificada de acordo com Tabela 3.5.

**Tabela 3.5: Energia de compactação e seus parâmetros (SANTOS 2009).**

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE GOLPES POR CAMADA							
Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Energia (kgf.cm/cm <sup>3</sup> )	Nº de camadas	Altura de queda	Peso do cilindro (kgf)	Nº de golpes por camada
10	20	1570,8	Normal - 6	10	30,5	2,5	12,4
					45,7	4,53	4,6
					30,5	4,53	6,8
					45,7	2,5	8,2
					30,5	2,5	26,8
					45,7	4,53	9,9
- 13		Intermediária - 13		10	30,5	4,53	14,8
					45,7	2,5	17,9
					30,5	2,5	56,2
					45,7	4,53	20,7
					30,5	4,53	31
					45,7	2,5	37,5
Modificada - 27,3							

A seguir, são apresentadas as diversas fases de execução do ensaio em amostras conforme realizado no Laboratório de Pavimentos da Universidade Federal de Juiz de Fora. Para que se tenha uma garantia na qualidade do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas é necessário muito cuidado na montagem do corpo de prova e colocação na câmara triaxil. De forma sucinta os procedimentos adotados foram:

- ✓ Coloca-se o corpo de prova envolvido na membrana de borracha, já com a base porosa, na base do aparelho e o cabeçote sobre o mesmo;
- ✓ Realiza-se a fixação dos transdutores do tipo LVDT ("linear variable differential transformer"), presos ao cabeçote superior e apoiado numa haste guia que se estende até a base, onde se localiza o parafuso de ajuste que se liga externamente à célula, neste ponto devem ser pré-ajustados os LVDTs;
- ✓ Em seguida, é colocado o invólucro cilíndrico da câmara e a placa superior de vedação, sendo corretamente fixada;

- ✓ Novamente se promove o ajuste dos transdutores, através de guias na base do aparelho e observando o monitor do computador que registra os deslocamentos dos LVDTs;
- ✓ Com os dados do material, do molde e da energia de compactação utilizada registrados na tela de comando do ensaio, dá-se início ao condicionamento que é aplicação de 500 pulsos de carga para minimizar os efeitos da deformação plástica e da história de tensões, sendo que o equipamento triaxial já está automaticamente programado para realização desta fase (chamada de pré-condicionamento);
- ✓ Após condicionamento, ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial, onde as condições para o ensaio já estão programadas (segundo os pares de tensão definidos na norma);
- ✓ Ao término do ensaio, pode-se, verificar os valores e os gráficos diretamente no monitor, possibilitando sua impressão imediata, e caso todos os pontos tenham sido computados ou nenhuma anomalia verificada, o ensaio pode ser dado como terminado e o corpo de prova deve ser retirado imediatamente para pesagem e secagem em estufa. Havendo qualquer anomalia nos resultados, pode-se imediatamente reiniciar o ensaio triaxial, sem a necessidade de proceder ao condicionamento.

Em linhas gerais, a metodologia empregada atualmente pela UFJF para realização dos ensaios triaxiais dinâmicos, independente do material e da energia, considera para a fase de condicionamento, a aplicação de cerca de 500 vezes três pares crescentes de tensões desvio e confinante. A Tabela 3.6 apresenta as sequências de tensões para a fase de condicionamento e tensão de confinamento (Adaptado DNIT 134/2010).

**Tabela 3.6: Tensão de confinamento (Adaptado – DNIT 134/2010).**

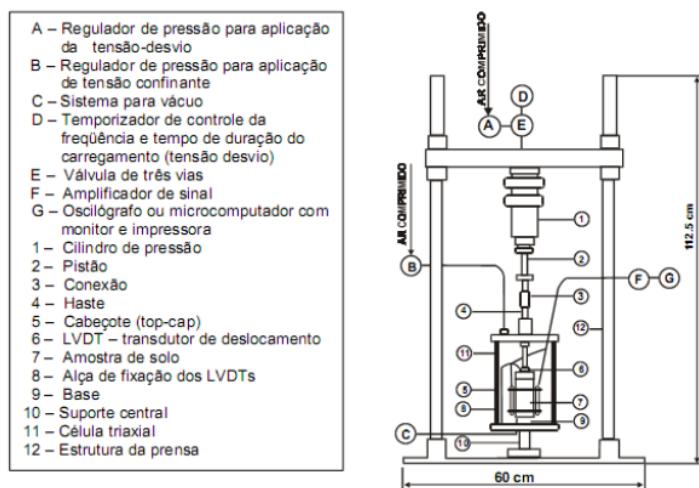
Tensão Confinante - $\sigma_3$ (MPa)	Tensão Desvio - $\sigma_1$ (MPa)	Relação - $\sigma_1 / \sigma_3$
0,069	0,069	2
0,069	0,207	4
0,103	0,309	4

Para a realização do ensaio, aplica-se tensões em pares alternando as tensões axias com as confinantes. Essas tensões aplicadas estão descritas na Tabela 3.7 a seguir.

**Tabela 3.7: Sequencias de Tensões para determinação do módulo de resiliencia (Adaptado – DNIT 134/2010).**

Tensão Confinante - $\sigma_3$ (MPa)	Tensão Desvio - $\sigma_1$ (MPa)	Relação - $\sigma_1 / \sigma_3$
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,154	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

A Figura 3.26 apresenta o desenho esquemático do equipamento de Ensaios Triaxiais de Carga Repetida, (Medina e Motta, 2005).



**Figura 3.26: Desenho esquemático do equipamento de Ensaios triaxiais de carga repetida.**

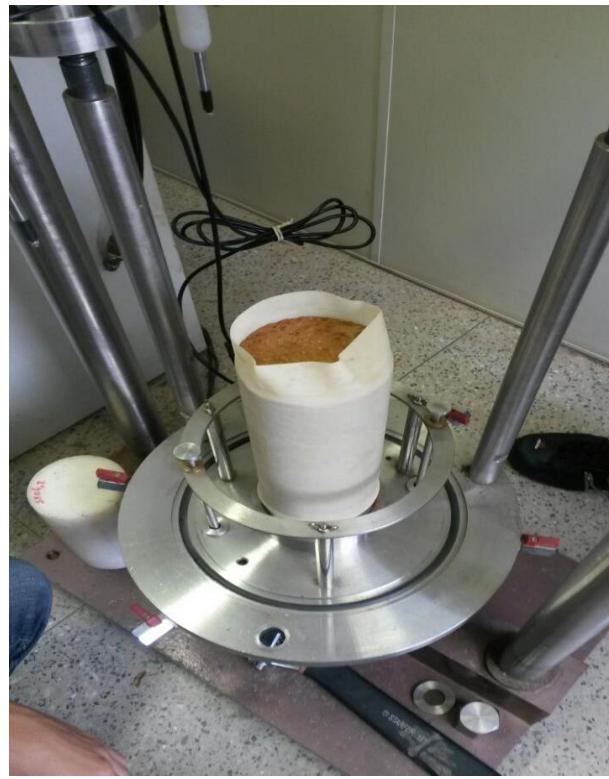
As Figuras 3.27 a 3.34 apresentam a preparação para a realização do ensaio (BONARA 2015).



**Figura 3.27: Compactação da amostra** (BONARA 2015).



**Figura 3.28: Colocação da membrana no corpo de prova** (BONARA 2015).



**Figura 3.29:** Corpo de prova sobre a base do equipamento de triaxial (BONARA 2015).



**Figura 3.30:** Colocação de elástico (detalhe em preto na parte de cima e na base do corpo de prova) para melhor fixação da membrana (BONARA 2015).



**Figura 3.31:** No detalhe LVDT's instalados (BONARA 2015).



**Figura 3.32:** No detalhe cilindro de acrílico da célula do equipamento de triaxial (BONARA 2015).



**Figura 3.33: Detalhe da tampa metálica do equipamento do ensaio triaxial de carga repetida (BONARA 2015).**



**Figura 3.34: Instalação do mangote para a aplicação de ar comprimido (BONARA 2015).**

## CAPÍTULO 4

---

---

### 4 RESULTADOS E ANÁLISES

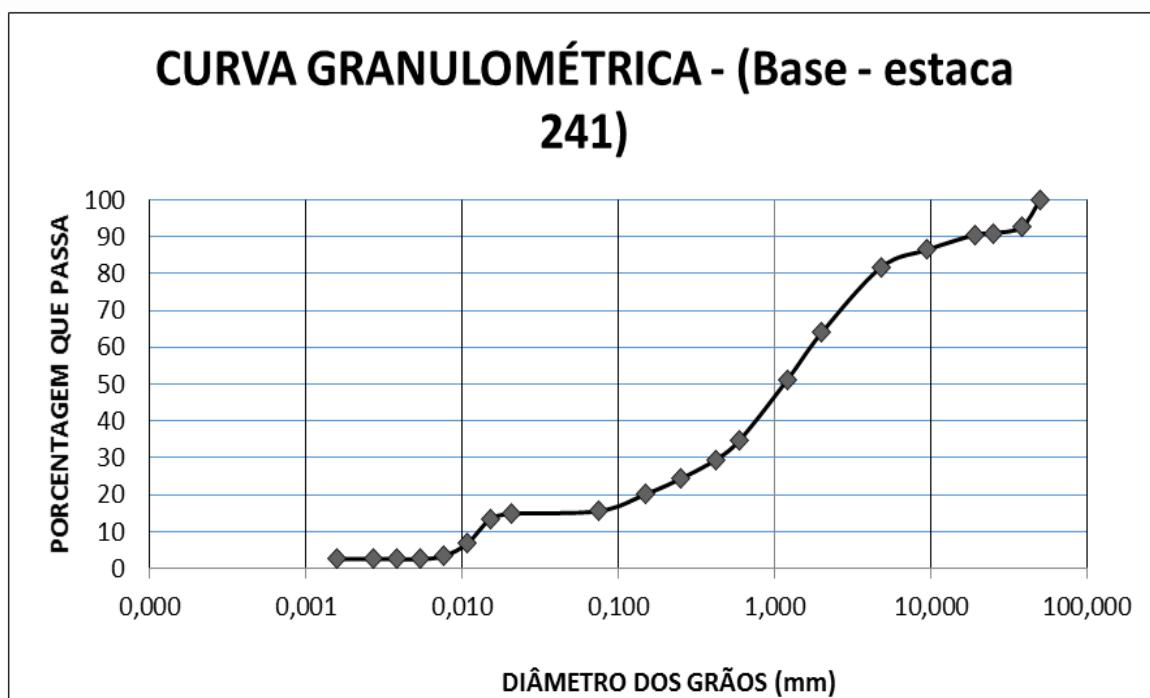
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório executados ao longo de toda a pesquisa.

Nos itens seguintes, os resultados dos ensaios de laboratório são apresentados e discutidos, de acordo com as normas vigentes para projeto e construção de um pavimento.

#### 4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

##### 4.1.1 Estaca 241

A Figuras 4.1 apresenta o gráfico de granulometria do material da base da estaca 241.



**Figura 4.1:** Curva granulométrica da base da estaca 241.

Pela curva granulométrica, temos as porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho. Esta análise é feita de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT 2006), que usa a padrão usado pela ASTM, como mostrado no Capítulo 3. As frações dos materiais estão evidenciadas na Tabela 4.1 abaixo.

**Tabela 4.1: Proporções dos materiais de acordo com a granulometria (base 241).**

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Base (241)	2,5	13,1	13,9	34,5	36,0

Os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$  assim como os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) de cada material ensaiado também calculados pela curva granulométrica estão apresentados na Tabela 4.2.

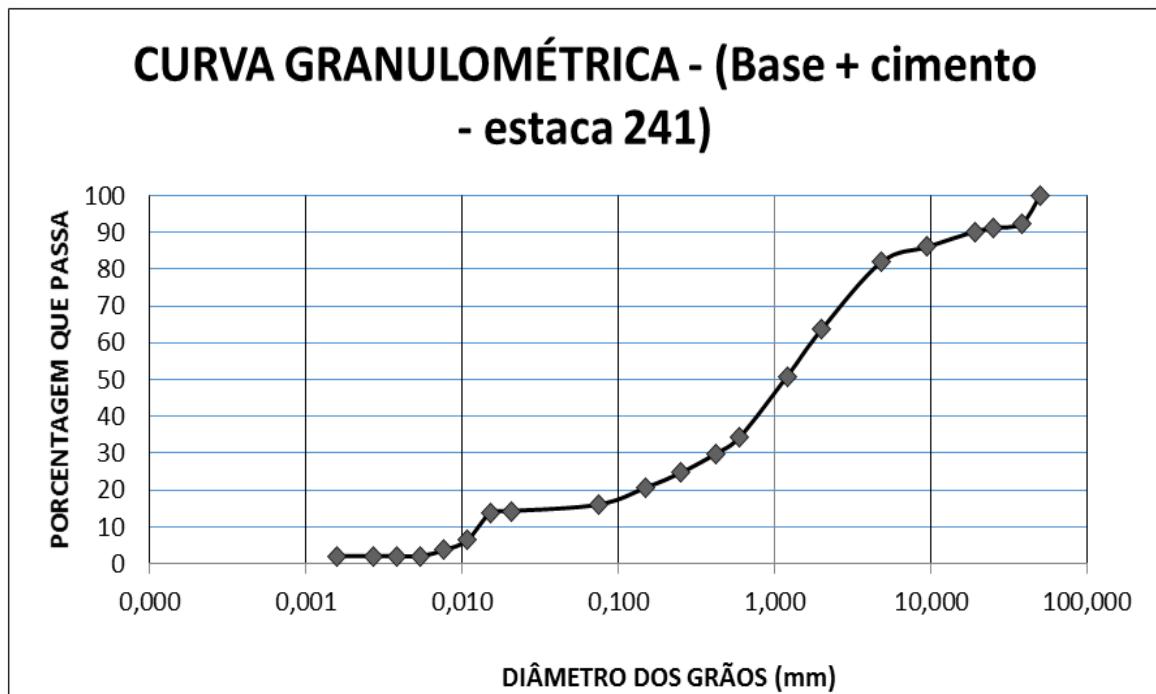
**Tabela 4.2: Índices característicos da curva granulométrica (base 241).**

	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	Cu	Cc
Base (241)	0,013	0,44	1,77	134,01	8,27

Analizando a figura e os gráficos relacionados ao material de base da estaca 241, podemos concluir que o material possui uma curva granulométrica não uniforme e mal graduada. Isso fica evidente com os valores de Cu e Cc.

Analizando estes resultados, fica claro que o material de base precisa de uma metodologia de estabilização para que o material atinja uma melhor curva granulométrica. A classificação SUCS e TRB estão apresentadas no item 4.5.

Em relação da mistura solo-cimento, a Figura 4.2 apresenta a curva granulométrica do material. A Tabela 4.3 apresenta os valores das porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho. A Tabela 4.4 evidencia os valores os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$ , como também os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) do material ensaiado da mistura solo-cimento que foram calculados por meio da curva granulométrica.



**Figura 4.2:** Curva granulométrica da base-cimento da estaca 241.

**Tabela 4.3: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (solo-cimento – 241).**

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Base + cimento (241)	2,1	14,0	13,8	33,8	36,3

**Tabela 4.4: Índices característicos da curva granulométrica (solos-cimento – 241).**

	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Cu	Cc
Base + cimento (241)	0,014	0,425	1,773	129,99	7,47

Comparando a a granulometriada mistura solos cimento com o material de base, percebeu-se uma curva não uniforme e mal graduada, tendo pouca alteração nas porcentagens passantes nas peneiras.

Os valores de Cu e Cc apesar de terem reduzidos da mistura solo-cimento em relação ao material de base, ficaram muito fora dos padrões de solos para um curva granulométrica ideal.

Em relação à melhora na curva granulométrica, a metodologia da mistura solo cimento não foi eficiente.

A Figura 4.3 apresenta a curva granulométrica do material reciclado misturado com cimento. A Tabela 4.5 apresenta os valores das porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho da mistura.

Já a Tabela 4.6 apresenta os valores os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$ , assim como os valores do Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) e o Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ) da mistura ensaiada que foram calculados pela curva granulométrica.

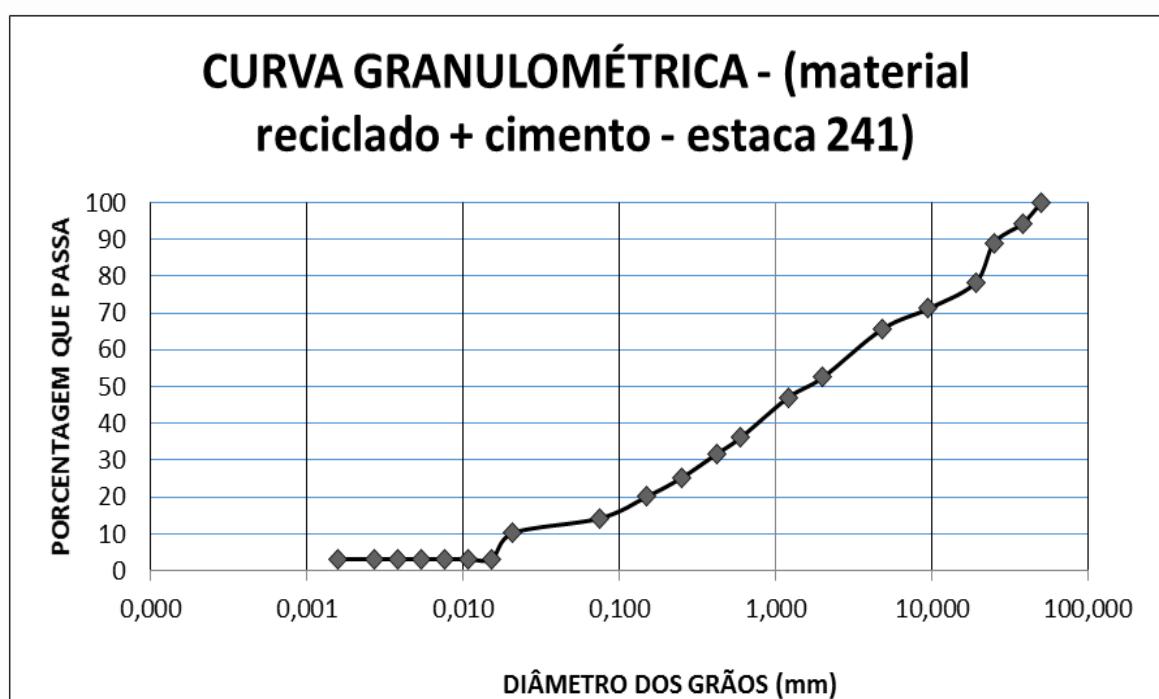


Figura 4.3: Curva granulométrica da mistura material reciclado + cimento – estaca 241.

Tabela 4.5: Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (material reciclado + cimento – 241).

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Material reciclado + cimento (241)	3,2	11,0	17,5	20,8	47,5

**Tabela 4.6: Índices característicos da curva granulométrica (material reciclado + cimento – 241).**

	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Cu	Cc
Material reciclado + cimento (241)	0,02	0,36	3,2	160,0	2,025

Analizando os resultados da mistura do material reciclado adicionado cimento, fica evidenciado que houve uma melhora na sua curva granulométrica em relação ao material de base e a mistura solo-cimento. Apesar do valor de Cu ter aumentado, mostrando uma curva não uniforme, o valor de Cc mostrou um solo bem graduado. A proporção de pedregulho à mistura teve um aumento, assim como o valor de areia fina. A proporção de areia grossa na mistura teve seu valor reduzido.

Outra característica que podemos obter por meio do ensaio de granulometria, é o enquadramento do material reciclado nas faixas do DNIT como material para uso em pavimentação. A Tabela 4.7 apresenta as faixas usadas pelo DNIT e suas porcentagens de material passante nas peneiras.

**Tabela 4.7: Granulometria para base granular (DNIT 2006).**

Tipos Peneiras	Para N > 5x 10 <sup>6</sup>			Para N < 5x 10 <sup>6</sup>			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
% em peso passando							
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30 - 65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº4	25 - 55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±7
Nº10	15 - 40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

A Tabela 4.8 apresenta as porcentagens passantes nas peneiras e o enquadramento da amostra nas respectivas faixas do DNIT.

**Tabela 4.8: Enquadramento das amostras na faixa do DNIT.**

	2"	1"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	Faixa DNIT
% em peso passante								
Base (241)	100	91	86,5	81,7	64,0	29,5	15,6	D
Base + cimento (241)	100	91,2	86,1	81,9	63,7	29,9	16,1	D
Material reciclado + cimento (241)	100	89,1	71,2	65,6	52,5	31,7	14,2	B

Em relação ao enquadramento dos materiais nas faixas do DNIT, considerando que a rodovia em estudo apresenta  $N > 5 \times 10^6$ , os materiais de base existente e a mistura solo cimento não se enquadrariam para o uso como base da rodovia em questão, pois se enquadram na faixa D.

Por outro lado, a metodologia da reciclagem do pavimento se mostrou eficiente. Considerando as tolerâncias da faixa de projeto, o material reciclado misturado com cimento da estaca 241, se enquadrou melhor na faixa B. Viabilizando seu uso como material de base mostrando assim a eficiência da metodologia empregada.

Apesar do material reciclado, que foi utilizado como material de base da rodovia, pelas curvas granulométricas, foi evidenciado a necessidade de uma melhor fiscalização para que as curvas granulométricas se encaixem dentro da faixa e também para que tenha uma granulometria mais uniforme e melhor graduada.

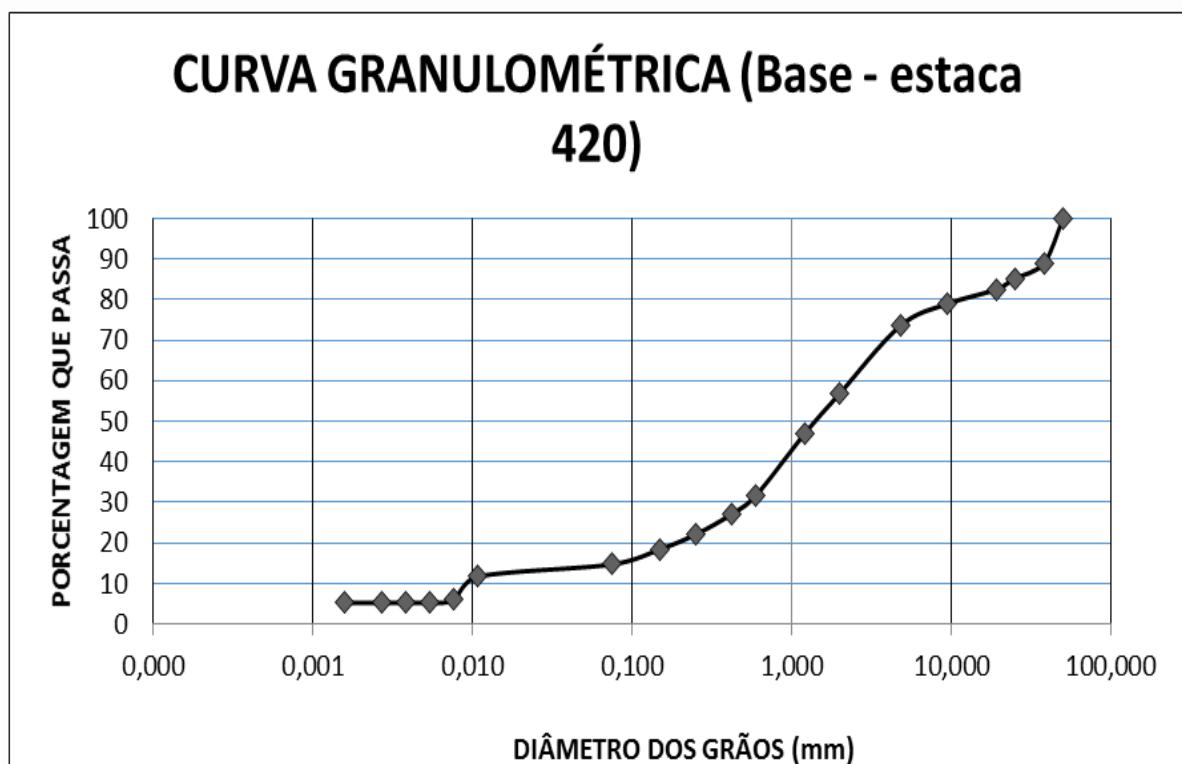
Considerando os resultados da granulometria, uma solução para corrigir a curva granulométrica dos materiais, seria a mistura de um material de uma maior graduação

para que seja feita uma estabilização granulométrica. Outra solução seria no momento da reciclagem do pavimento, calibrar a máquina recicladora para que a granulometria do material tivesse uma curva mais uniforme e melhor graduada.

Apesar de não terem sido utilizados, o material de base e a mistura da base com cimento, se forem misturados a eles um material mais graúdo, poderia viabilizar o uso como base de rodovia.

#### 4.1.2 Estaca 420

A Figuras 4.4 apresenta o gráfico de granulometria do material da base da estaca 420.



**Figura 4.4:** Curva granulométrica da base da estaca 420.

Pela curva granulométrica, temos as porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho. Esta análise é feita de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT 2006), que usa o padrão usado pela ASTM, como mostrado no Capítulo 3 desse trabalho. As proporções dos materiais estão evidenciadas na Tabela 4.9 abaixo.

**Tabela 4.9: Proporções dos materiais de acordo com a granulometria (base 420).**

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Base (420)	5,3	9,4	12,4	29,8	43,1

Os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$  assim como os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) de cada material ensaiado também calculados pela curva granulométrica estão apresentados na Tabela 4.10.

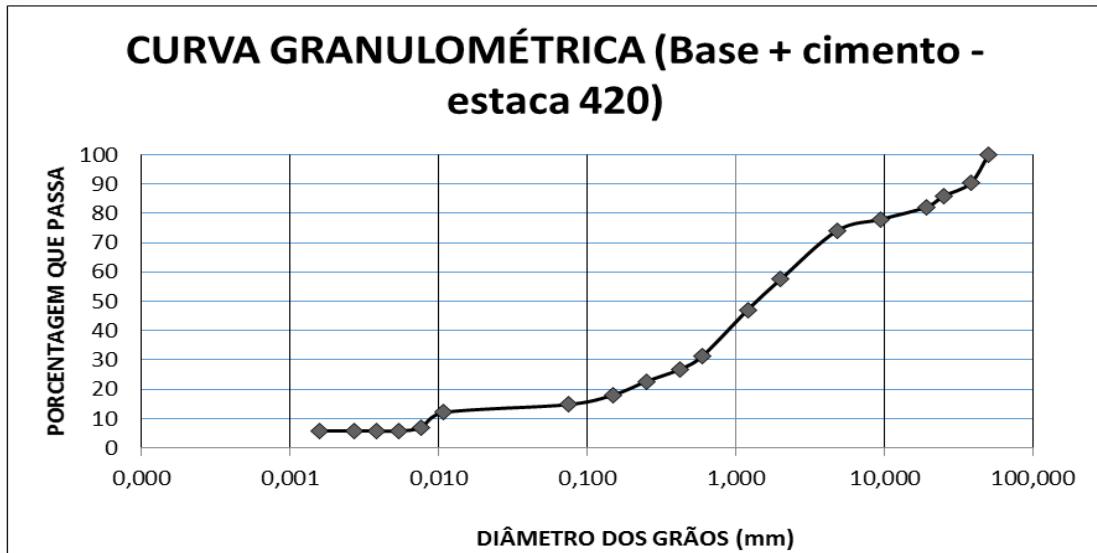
**Tabela 4.10: Índices característicos da curva granulométrica (base 420).**

	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	Cu	Cc
Base (420)	0,09	0,533	2,31	<b>256,67</b>	<b>13,66</b>

Analizando a figura e os gráficos relacionados ao material de base da estaca 420, foram verificados resultados parecidos com os encontrados na estaca 241, com uma curva granulométrica não uniforme e mal graduada com valores para Cc e Cu ainda bem altos.

Assim como o material de base da estaca 241, com resultados apresentados por meio da curva granulométrica da estaca 420 e seus índices característicos, fica claro que o material também precisa de uma metodologia de estabilização para que sua curva granulométrica apresente melhores resultados.

Em relação a mistura solo-cimento, a Figura 4.5 apresenta a curva granulométrica do material. A Tabela 4.11 apresenta os valores das porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho. A Tabela 4.12 evidencia os valores os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$ , como também os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) do material ensaiado da mistura solo-cimento que foram calculados por meio da curva granulométrica.



**Figura 4.5:** Curva granulométrica da base-cimento da estaca 420.

**Tabela 4.11:** Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (solo-cimento – 420).

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Base + cimento (420)	5,8	9,0	12,0	30,7	42,5

**Tabela 4.12:** Índices característicos da curva granulométrica (solos-cimento – 420).

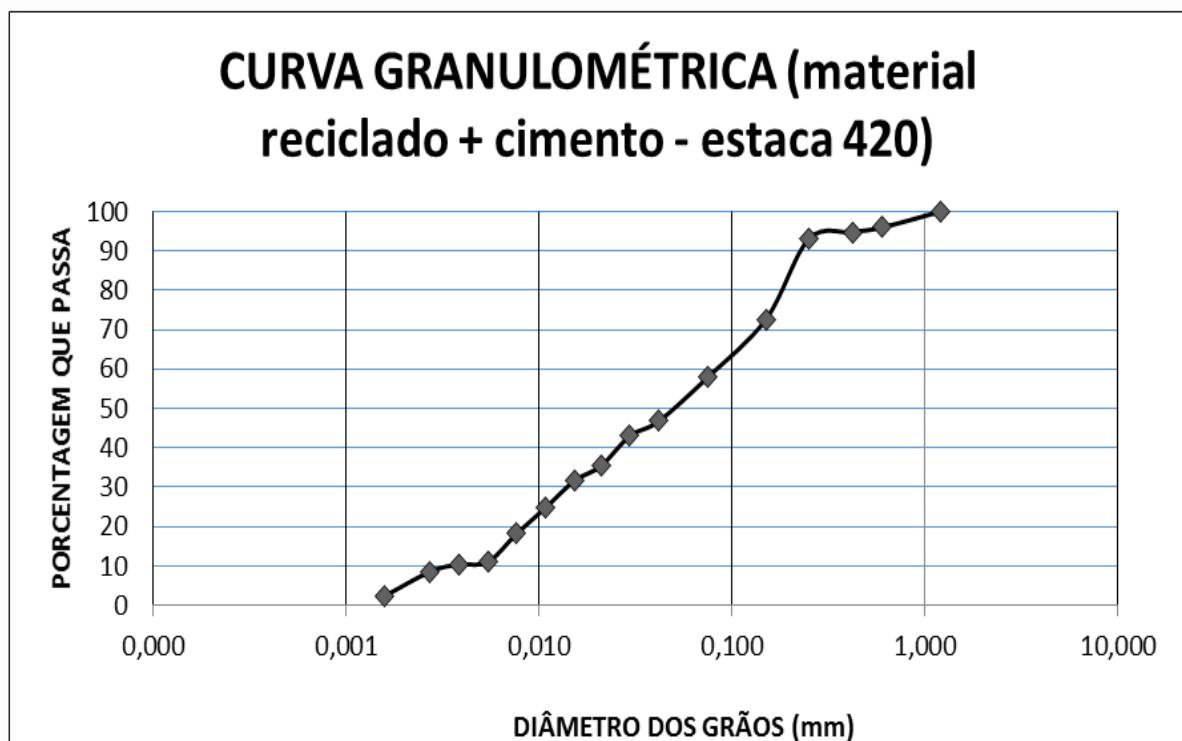
	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Cu	Cc
Base + cimento (420)	0,009	0,560	2,3	264,37	15,56

Comparando a mistura solo-cimento com o material de base pela curva granulométrica, percebeu-se uma curva não uniforme e mal graduada, tendo pouca alteração nos material passantes nas peneiras.

Os valores de Cu e Cc em comparação ao valores do material de base, pouco alteraram, mostrando uma curva mal graduada e não uniforme, fora dos padrões de um boa curva granulométrica.

Em relação à melhora na curva granulométrica, a metodologia da mistura solo cimento não foi eficiente assim como apresentado para a estaca 241.

A Figura 4.6 apresenta a curva granulométrica do material reciclado misturado com cimento. A Tabela 4.13 apresenta os valores das porcentagens de argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho da mistura. Já a Tabela 4.14 apresenta os valores os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , e  $D_{60}$ , assim como os valores do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc) da mistura ensaiada que foram calculados pela curva granulométrica.



**Figura 4.6:** Curva granulométrica da mistura material reciclado + cimento – estaca 420.

**Tabela 4.13:** Proporção dos materiais de acordo com a granulometria (material reciclado + cimento – 420).

	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Material reciclado + cimento (420)	2,5	8,5	20,6	15,2	53,2

**Tabela 4.14:** Índices característicos da curva granulométrica (material reciclado + cimento – 420).

	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	Cu	Cc
Material reciclado + cimento (420)	0,035	0,015	0,082	2,34	0,008

Analizando os resultados da mistura do material reciclado adicionado cimento, fica evidenciado que houve uma melhoria na sua curva granulométrica em relação ao material de base e a mistura solo-cimento. Em relação ao valor de Cu, a curva mostrou-se muito uniforme. O valor de Cc mostrou um solo mal graduado, mas este valor apresentou uma melhoria em comparação aos valores do material de base e da mistura solo-cimento. A proporção de pedregulho da mistura teve um aumento, assim como o valor de areia fina. A proporção de areia grossa teve seu valor reduzido. O mesmo aconteceu com o material reciclado da estaca 241.

Outra característica que podemos obter por meio do ensaio de granulometria, é o enquadramento dos materiais nas faixas do DNIT para uso em pavimentação. As faixas utilizadas pelo DNIT estão apresentadas na Tabela 4.3 do item 4.1.1. A Tabela 4.15 apresenta as porcentagens passantes nas peneiras e o enquadramento da amostra nas respectivas faixas do DNIT.

**Tabela 4.15: Enquadramento das amostras na faixa do DNIT.**

	2"	1"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	Faixa DNIT
% em peso passante								
Base (420)	100	85,2	79,0	73,6	56,9	27,1	14,7	D
Base + cimento (420)	100	85,9	78,0	74,1	57,5	26,8	14,8	D
Material reciclado + cimento (420)	100	94,8	72,7	58,0	46,8	31,6	11,0	B

Em relação ao enquadramento dos materiais nas faixas do DNIT, considerando que a rodovia em estudo apresenta  $N > 5 \times 10^6$ , assim como os materiais de base existente e a mistura solo cimento da estaca 241, os da estaca 420 também não se enquadram para o uso como base da rodovia em questão, ficando enquadrada na faixa D.

Por outro lado, a metodologia da reciclagem do pavimento se mostrou eficiente. Considerando as tolerâncias da faixa de projeto, o material reciclado misturado com cimento da estaca 420, se encaixou melhor na faixa B. Viabilizando seu uso como material de base mostrando assim a eficiência da metodologia empregada.

Apesar do material reciclado, que foi utilizado como material de base da rodovia, pelas curvas granulométricas, foi evidenciado a necessidade de uma melhor fiscalização para que as curvas granulométricas se encaixem dentro da faixa e também para que tenha uma granulometria mais uniforme e melhor graduada.

Considerando os resultados da granulometria, uma solução para corrigir a curva granulométrica dos materiais, seria a mistura de um material de uma maior graduação para que seja feita uma estabilização granulométrica. Outra solução seria no momento da reciclagem do pavimento, calibrar a máquina recicladora para que a granulometria do material tivesse uma curva mais uniforme e seja melhor graduada.

A mesma metodologia proposta para os materiais de base e mistura solo-cimento da estaca 241, deve ser utilizada na estaca 420 visando uma melhoria em sua granulometria e a viabilidade do seu uso como base de rodovia. Os resultados apresentados para esses materiais de ambas as estacas foram muito parecidos.

## 4.2 LIMITES DE ATTERBERG

### 4.2.1 Estaca 241

A Tabela 4.16 a seguir apresenta os resultados dos ensaios dos limites de consistência dos materiais estudados.

**Tabela 4.16: Resultado dos limites de consistência (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
LL (%)	24,1	22,7	21,9
LP (%)	21,7	20,3	19,4
IP (%)	2,4	2,4	2,5

Analizando os resultados dos limites de consistência, todos os materiais de enquadram para o uso como base de rodovias de acordo com o DNIT (2006). De acordo com especificações do DNIT, o material para ser utilizado como base de rodovias, deve ter um limite de liquidez menor do que 25 e um índice de plasticidade menor do que 6.

Nota-se que houve uma pequena alteração quando comparamos os valores de LL, LP e IP, mostrando que a metodologia utilizando o material reciclado como base é viável, não alterando os parâmetros dos limites de Atterberg para o uso como base de pavimento rodoviário. Pelos valores encontrados para o IP, todos os materiais são considerados não plásticos.

#### 4.2.2 Estaca 420

A Tabela 4.17 apresenta os valores dos limites de consistência dos materiais estudadas da estaca 420.

**Tabela 4.17: Resultado dos limites de consistência (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
LL (%)	24,1	23,5	22,3
LP (%)	23,6	21,3	20,8
IP (%)	0,5	2,2	1,5

Igualmente encontrado para a estaca 241, os valores de LL, LP, e IP da estaca 420, os credenciam para serem utilizados como base de pavimento rodoviário. Os valores encontrados para todos os materiais em estudo, ficaram dentro dos limites preconizados pelas especificações do DNIT. Mais uma vez a eficiência da metodologia de reciclagem do pavimento é mostrada, visto que não mudou os parâmetros dos seus limites, enquadrando dentro da faixa de utilização.

## 4.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRUPO

### 4.3.1 Estaca 241

Os valores dos índices de grupo dos materiais estão apresentados na Tabela 4.18 a seguir.

**Tabela 4.18: Resultado do IG (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
IG	0	0	0

De acordo com especificações do DNIT, o IG para materiais granulares usados em camadas de pavimento deve ser igual a zero. Na estaca 241, os materiais estudados, todos os valores de IG foram iguais a 0. Isso mostra que a metodologia do uso de material reciclado, não altera esse parâmetro, e o credenciando para o seu uso para base de pavimento.

### 4.3.2 Estaca 420

A Tabela 4.19 apresenta os valores para o IG dos materiais da estaca 420.

**Tabela 4.19: Resultado do IG (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
IG	0	0	0

Assim como a estaca 241, os valores de IG dos materiais da estaca 420 foram todos zero. Em relação ao material reciclado, a metodologia mostrou-se eficiente, ficando

dentro dos parâmetros do DNIT, não tendo alteração do seu valor em relação ao material da base e da mistura solo-cimento.

#### 4.4 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

##### 4.4.1 Estaca 241

A Tabela 4.20 a seguir apresenta os resultados do ensaio de massa específica dos grãos dos materiais estudados da estaca 241.

**Tabela 4.20: Massa específica dos grãos (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,705	2,690	2,751
Densidade dos grãos	2,711	2,697	2,76

Pelos resultados encontrados podemos concluir que em relação aos materiais de base e as misturas base com cimento, os valores de massa específica dos grãos e das densidades tiveram pouca variação. O material reciclado com adição de cimento, teve um aumento dos valores da massa específica e consequentemente de sua densidade em relação aos outros materiais.

##### 4.4.2 Estaca 420

A Tabela 4.21 mostra os resultados de massa específica dos materiais estudados da estaca 420.

**Tabela 4.21: Massa específica dos grãos (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,718	2,718	2,752
Densidade dos grãos	2,723	2,725	2,762

Pelos resultados encontrados podemos concluir que em relação aos materiais de base e as misturas solo-cimento, os valores de massa específica dos grãos e das densidades tiveram pouca variação. O material reciclado com adição de cimento, teve um aumento dos valores da massa específica e consequentemente de sua densidade em relação aos outros materiais, assim como para a estaca 241.

## 4.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

### 4.5.1 Estaca 241

Este item classifica os solos de acordo com a classificação SUCS e TRB (AASHTO) levando em consideração resultados descritos anteriormente (análise granulométrica, limites de consistência e o valor do IG). A Tabela 4.22 apresenta as classificações das misturas.

**Tabela 4.22: Classificação dos solos.**

Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
TRB	A-1-b	A-1-b
SUCS	SM	SM

Os resultados nos mostra que os materiais em relação a classificação têm características semelhantes.

Em relação aos valores do IG das misturas com a classificação TRB, os resultados estão completamente coerentes, pois de acordo com o que foi apresentado no item 2.3.2, sendo um material A-1-b, seu valor do IG é sempre igual a zero.

Sobre a correlação das duas classificações, mostrou-se coerente, como foi mostrado na Tabela 3.3 do Capítulo 3. Para um solo A-1-b de acordo com a classificação TRB, quando correlacionado com a classificação SUCS, os mais prováveis que ele seja são:

- ✓ SW;
- ✓ SP;
- ✓ GM;
- ✓ SM.

De acordo com a classificação TRB, todos os materiais ensaiados variam de bom a excelente para serem usados na pavimentação. Com isso, nota-se que o material reciclado não altera essas características em relação aos outros materiais, mostrando a eficiência de sua utilização.

#### 4.5.2 Estaca 420

A Tabela 4.23 apresenta a classificação dos materiais de acordo com TRB e SUCS.

**Tabela 4.23: Classificação dos solos.**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
TRB	A-1-b	A-1-b	A-1-b
SUCS	SM	SM	SM

Assim como na estaca 241, a classificação encontrada para os materiais da estaca 420, foram os mesmos, não alterando este parâmetro de classificação, mostrando que a metodologia da reciclagem do pavimento é eficiente, não alterando esse parâmetro de classificação.

#### 4.5.3 Escolha do teor de cimento a ser misturado com o material de base

Em relação a mistura do solo com cimento, a porcentagem de cimento misturada foi de 6%, pois os solos das estacas 241 e 420 de acordo com a classificação TRB é A-1-b. Esse teor foi escolhido devido ao valor sugerido pela Tabela 3.1.

## 4.6 ENSAIO DE CBR

### 4.6.1 Estaca 241

#### 4.6.1.1 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7182/1986. A energia utilizada para a realização do ensaio de compactação foi a modificada por questão de projeto da rodovia estudada.

A Tabela 4.24 apresenta os resultados de umidade ótima e a densidade máxima seca da estaca 241.

**Tabela 4.24: Resultados de umidade ótima e densidade máxima (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
Umidade ótima (%)	6,75	7,11	6,63
Densidade máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,222	2,172	2,213

Em relação a umidade ótima, houve pouca variação entre os materiais estudados. Podemos notar uma pequena redução desse valor no material reciclado em relação ao material de base e a mistura solo-cimento. Em campo, isso significa uma economia, mesmo que pequena na utilização de água para se atingir a umidade ótima do material. Mesmo que essa variação da porcentagem seja pequena, em uma construção de uma rodovia, no valor final de projeto, pode ser bastante significativo.

Em relação à densidade máxima, o valor da mistura solo-cimento foi menor em relação ao material de base e do material reciclado. Comparando os valores do material de base e do material reciclado, os valores foram muito próximos. Podemos concluir que houve pouca alteração dessa propriedade em relação a esses dois últimos materiais.

A Figura 4.7 apresenta a realização do ensaio de compactação na energia modificada.



**Figura 4.7:** Ensaio de compactação (Arquivo pessoal).

#### 4.6.1.2 Resultado do CBR

Os resultados de ensaio de CBR estão apresentados na Tabela 4.25 abaixo

**Tabela 4.25: Resultados do ensaio de CBR (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
CBR (%)	65,78	306,25	201,79

De acordo com a tabela acima, podemos concluir que tanto a mistura solo-cimento, quanto o material reciclado, tiveram um aumento significativo em relação ao valor de CBR. Isso já era esperado pela presença de cimento na mistura.

O valor do CBR do material de base mostrou a necessidade de uma metodologia para aumentar a capacidade de carga da rodovia, visto que, para a rodovia estudada, que é de

tráfego pesado (estabelecido pelo número N), pelas especificações do DNIT, o CBR tem que ter um valor acima de 80 para o uso do material como base de pavimento. Sendo assim, a necessidade de serem feitas intervenções para que as características geomecânicas do material seja melhorado.

Tanto a mistura solo-cimento como também o material reciclado, foram eficientes para que obtivessem esse aumento da capacidade de carga, apresentando valores de CBR muito maiores do que o material de base como também do valor preconizado pelo DNIT.

Em relação ao material reciclado, mais uma vez se mostrou uma metodologia eficiente, pois proporcionou o uso como material de base de rodovia, tendo seu valor de CBR maior que 80, valor preconizado pelo DNIT para o uso em rodovias para o valor do número N da mesma.

Vale ressaltar que, para os padrões de hoje, o valor do CBR e de outros parâmetros do material de base não se enquadra para o número N da rodovia, mas para os valores de quando ela foi projetada e construída, sim.

A Figura 4.8 mostra a realização do ensaio de penetração no corpo de prova de CBR.



**Figura 4.8: Ensaio de penetração do corpo de prova de CBR (Arquivo pessoal).**

#### 4.6.1.3 *Expansão*

O ensaio de expansão é realizado juntamente com o ensaio de CBR. O material depois de compactado, é colocado em um tanque com água para que se possa medir a expansão, como mostrado da Figura 4.9.



**Figura 4.9: Corpos de prova de CBR imersos em água (Arquivo pessoal).**

A Tabela 4.26 apresenta os valores da expansão dos materiais estudados da estaca 241.

**Tabela 4.26: Resultados dos ensaios de expansão (estaca 241).**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Material reciclado + cimento (241)
Expansão (%)	0,05	0,05	0,08

De acordo com manual do DNIT, o valor máximo para a expansão do material a ser utilizado para base de um pavimento rodoviário deve ser de 0,5%.

Pelos resultados apresentados mostrou pouca variação nos valores de expansão dos materiais um em relação ao outro. Todos os materiais estudados, em relação a expansão,

se enquadraram no valor preconizado pelo DNIT. Levando em consideração o valor de CBR e a expansão, a metodologia utilizando o pavimento reciclado foi eficiente, obtendo um valor de resistência ao CBR maior do que o material da base existente no pavimento e também um valor de CBR maior que o preconizado, associado a um valor bem baixo de expansão, viabilizando o seu uso como base de uma rodovia.

#### 4.6.2 Estaca 420

##### *4.6.2.1 Compactação*

A Tabela 4.27 a seguir apresenta os resultados do ensaio de compactação dos materiais da estaca 420.

**Tabela 4.27: Resultados de umidade ótima de densidade máxima (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
Umidade ótima (%)	6,71	6,77	5,91
Densidade máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,277	2,165	2,235

Os resultados de analisados acima mostraram um comportamento igual aos apresentados na estaca 241. Assim como na outra estaca estudada, houve pouca variação em relação a umidade ótima e a densidade máxima seca.

##### *4.6.2.2 Resultado do CBR*

Os resultados de ensaio de CBR dos materiais da estaca 420 estão apresentados na Tabela 4.28.

**Tabela 4.28: Resultados do ensaio de CBR (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
CBR (%)	74,97	307,67	143,51

Assim como os resultados da estaca 241, os valores de CBR tiveram um aumento significativo da mistura solo-cimento e do material reciclado em relação ao material de base existente. Isso também já era esperado pela presença de cimento às misturas.

Não podemos esquecer que, para os padrões de hoje (número N da rodovia), pelo valor encontrado de CBR de dos demais parâmetros analisados, o material de base existente não seria indicado para sua utilização. Mas quando a mesma foi projetada e construída, atendia para seus padrões.

Comparando os valores de CBR das misturas com material reciclado das duas estacas estudadas, temos uma diferença significativa entre os valores. Isso será melhor explicado em um item mais à frente deste capítulo.

#### 4.6.2.3 *Expansão*

A Tabela 4.29 apresenta os valores da expansão dos materiais estudados da estaca 420.

**Tabela 4.29: Resultados dos ensaios de expansão (estaca 420).**

	Base (420)	Base + cimento (420)	Material reciclado + cimento (420)
Expansão (%)	0,06	0,07	0,07

Assim como os resultados da estaca 241, os valores de expansão dos materiais estudados da estaca 420 tiveram pouca variação de um em relação ao outro. Todos os materiais se enquadram no valor preconizado pelo DNIT, ficando abaixo de 0,5%.

#### 4.6.3 Valores de CBR para os materiais reciclados

Em relação ao material reciclado sendo adicionado 2% de cimento, a metodologia utilizada foi eficiente, pois houve um aumento do valor do CBR considerável. Entretanto, o valor do CBR da estaca 241 foi maior do que a 420, sendo que esse valor no ensaio só da base ficou muito próximo. A diferença entre os valores de CBR das duas estacas pode ser explicada pelo fato de que visivelmente a proporção de

revestimento misturado a mistura da estaca 420 é maior do que na estaca 241, como mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11.

Conforme mostrado no item 2, quanto maior o teor de revestimento na mistura, a resistência tende a diminuir. Porém, mesmo com um teor de asfalto maior, o valor do CBR ainda foi maior que especificado em norma, mostrando a eficiência da metodologia. A Figura 4.10 apresenta o material reciclado da estaca 241 enquanto a Figura 4.11 apresenta o material reciclado da estaca 420.



**Figura 4.10:** Material reciclado da estaca 241 (Arquivo pessoal).



**Figura 4.11:** Material reciclado da estaca 420 (Arquivo pessoal).

## 4.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples foi realizado devido aos valores de CBR do material reciclado e da mistura solo-cimento terem apresentado um valor acima do 100. Com isso, os corpos de prova foram moldados no cilindro de CBR, com a umidade encontrada no ensaio de compactação. Os corpos de prova foram moldados no Laboratório de Pavimentos da Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA-NUGEO). Foram realizados ensaios em amostras com 0 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias de cura. Exceto as amostras de 0 dias, as demais foram colocadas em uma câmara úmida no Laboratório de Caracterização de Solos do CTGA/NUGEO. Os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção pertencente a Universidade Federal de Ouro Preto.

### 4.7.1 Estaca 241

A Tabela 4.30 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das amostras das amostras do material de base da estaca 241.

**Tabela 4.30: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 241).**

Base (241)	
Resistência à Compressão Simples (MPa)	0,55

Os resultados dos ensaios com as amostras de solo-cimento e material reciclado, em MPa, estão apresentados na Tabela 4.31.

**Tabela 4.31: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 241).**

	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Solo cimento (241) - MPa	1,06	3,96	4,15	4,57
Material reciclado + cimento (241) - MPa	1,33	1,54	1,97	2,56

Analizando os resultados de compressão axial, podemos notar um aumento significativo dos parâmetros de resistência das misturas em relação ao material de base. De acordo

com o DNIT, misturas de cimento ao solo no teor de 2 a 4% é considerado solo melhorado com cimento e teores que variam de 6 a 10% de cimento é mistura solo-cimento. Seus parâmetros de resistência também variam. De acordo com o DER/PR ES-P 11/05, são definidos os parâmetros mínimos de resistência à compressão axial aos 7 dias. Para solo tratado com cimento, esse valor deve estar entre 1,5 e 2,1 MPa para materiais de base. Já para mistura solo-cimento, esse valor tem que ser acima de 2,1 MPa. Fazendo uma análise dos resultados, as duas misturas utilizadas na pesquisa atendem as especificações.

Os resultados do ensaio de compressão simples também foram analisados de acordo com Batista (1976). O autor cita que o Departamento Estradas e Rodagem do Texas, preconiza valores mínimos para o ensaio de compressão simples dos materiais a serem usados como sub-base e base de rodovias. Tais Valores estão apresentados na Tabela 4.32.

**Tabela 4.32: Valores mínimos de resistência (Batista – modificado – 1976).**

	Sub-base	Base
Resistência Mínima à Compressão Simples (MPa)	0,35	0,70

Fazendo uma análise dos resultados, o resultado do material de base, ficaria abaixo da especificação mostrada acima, mostrando a necessidade de uma melhoria dos seus parâmetros de resistência. Com isso as duas metodologias estudadas, se mostraram muito eficientes, ficando bem acima dos padrões exigidos.

Os resultados atestam mais uma vez a eficiência da metodologia da reciclagem de pavimento, se mostrando eficaz em seus resultados.

#### 4.7.2 Estaca 420

O resultado do ensaio de compressão simples do material de base da estaca 420 está apresentado na Tabela 4.33 abaixo.

**Tabela 4.33: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 420).**

Base (241)	
Resistência à Compressão Simples (MPa)	0,59

Os resultados do ensaio de compressão simples, em MPa, com a misturas estão apresentados na Tabela 4.34.

**Tabela 4.34: Resultados dos ensaios de compressão simples (base 420).**

	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Solo cimento (420) - MPa	1,28	3,17	4,48	5,1
Material reciclado + cimento (420) - MPa	1,28	1,62	2,07	2,77

Assim como ocorreu na estaca 241, os valores da resistência das misturas ficaram bem acima do valor do material de base. Mostrando assim a eficiência das metodologias estudadas.

Os valores de resistência das misturas ficaram dentro das especificações normativas apresentadas no item anterior.

Sobre a metodologia de reciclagem de pavimento para uso como base utilizada na construção da rodovia, se mostrou muito eficiente a sua aplicação. Nas duas estacas estudadas os valores foram maiores do que foi preconizado para seu uso.

#### 4.7.3 Plano de ruptura dos corpos de prova

Analisando os planos de ruptura, em todos os ensaios, os corpos de prova se romperam paralelos à força de aplicação da carga. Isso pode ser evidenciado nas Figuras 4.12 a 4.15, que mostram as sequencias dos ensaios até sua ruptura.



Figura 4.12: Amostra a ser ensaiada (Arquivo pessoal).



Figura 4.13: Detalhe da amostra antes do ensaio (Arquivo pessoal).



**Figura 4.14:** Amostra ao final do ensaio (Arquivo pessoal).



**Figura 4.15:** Amostra ao final do ensaio (Arquivo pessoal).

#### 4.8 ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

O ensaio triaxial dinâmico foi realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora.

##### 4.8.1 Estaca 241

Os resultados dos MR's estão apresentados na Tabela 4.35. São apresentados os valores médios do MR obtidos do ensaio triaxial dinâmico para vários níveis de tensões.

**Tabela 4.35: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.**

	Base (241)	Base + cimento (241)	Reciclado + cimento (241)
MR médio (MPa)	691,0	1725,7	978,5

Foi constatado que os valores de MR das misturas solo-cimento e as misturas com material reciclado em relação ao material de base aumentaram, mostrando a eficiência dos métodos estudados.

O ensaio de MR tem sido utilizado em vários projetos e estudos de pavimentos no Brasil. Exemplo disso, podemos citar Franzoi (1990) *apud* Baldo (2015) que realizaram ensaios em diversos solos no estado de São Paulo, e os seus resultados estão apresentados na Tabela 4.36.

**Tabela 4.36: Valores médios de módulos de resiliência para diversos tipos de solos (Adaptado Franzoi *apud* Baldo).**

Procedência	TRB	M <sub>r</sub> (MPa)
SP-310/km 222	A-2-4	150
SP-425/E280	A-6	250
SP-255/KM 63	A-6	340
Jazida em S. André (SP)	A-7-5	200
SP333/KM 320	A-7-5	500
SP-310/KM 257	A-7-5	300
SP-55/KM 94,9	A-1-b	45
SP-280/KM 40	A-6	32
SP-280	A-7-5	80
SP/KM 168,8	A-7-5	125

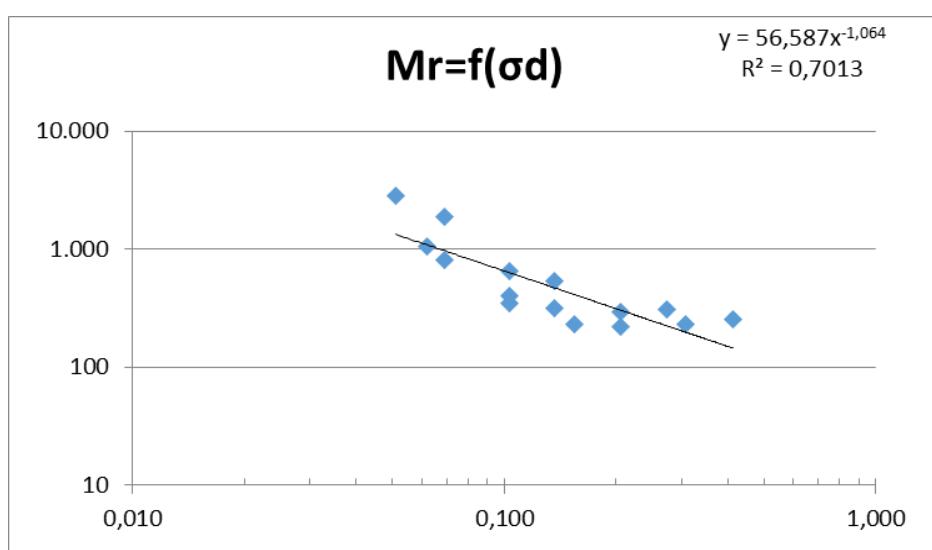
Valle e Baldo (1997), apresentam valores de MR obtidos por retroanálise de superfícies deformadas com o emprego do FWD, para bases graduadas em trechos de pavimentos asfálticos no estado de Santa Catarina. Os valores estão apresentados na Tabela 4.37.

**Tabela 4.37: Valores de MR para solos granulares (Adaptado – Valle e Valdo, 1997).**

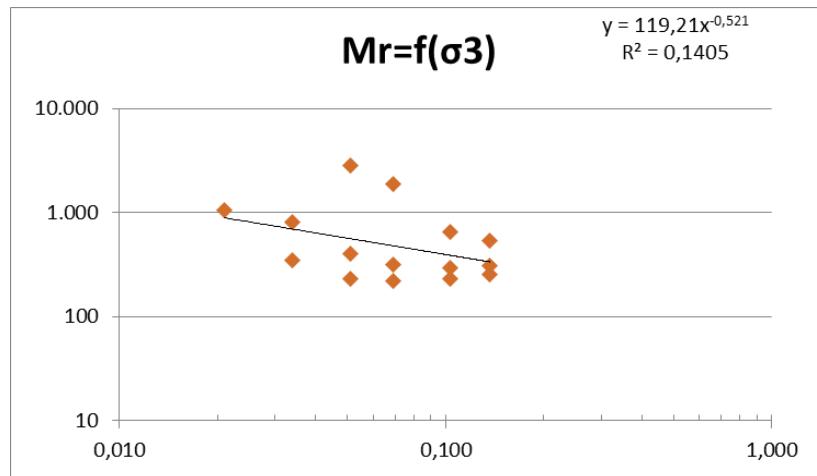
Trecho	1	2	3	4	5	6
Valor do MR - base em BGS (MPa)	115	210	180	290	360	415

Segundo Holz, os valores sugeridos de MR para base de pavimentos flexíveis, variam de 150 a 300 MPa. Já para pavimentos semi-rígidos, esses valores variam de 300 a 500 MPa. Rodolfo e Baldo (1996), apresentaram uma série de modelos para cálculos de deformação específica na fibra inferior do concreto asfáltico. Para tais parâmetros, variou-se o valor do MR para base de pavimentos flexíveis utilizando brita graduada de 100 MPa a 300 MPa. Já para misturas solo-cimento, os parâmetros utilizados variam de 2500 MPa a 7500 MPa.

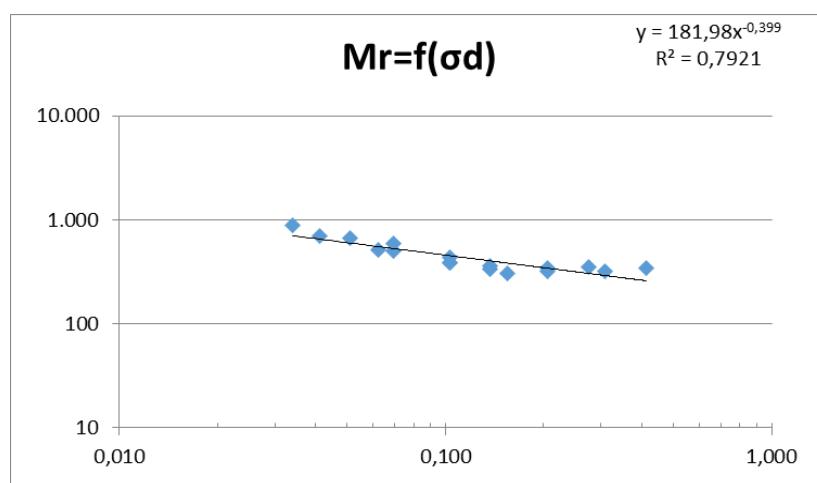
Analisando os dados do ensaio de triaxial dinâmico, podemos verificar que valores encontrados para o MR dos materiais estudados neste trabalho apresentam valores coerentes aos de outras referências. O que precisa ser feito é um estudo mais aprofundado para MR para diversos tipos de materiais para camadas de pavimento. Nas Figuras 4.16 a 4.21 são apresentados em forma de gráficos a variação dos valores obtidos para o MR em função da tensão de desvio ( $\sigma_d$ ) e tensão confinamento ( $\sigma_3$ ). Também são apresentadas as expressões para o MR por meio dos modelos de regressão em função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$ .



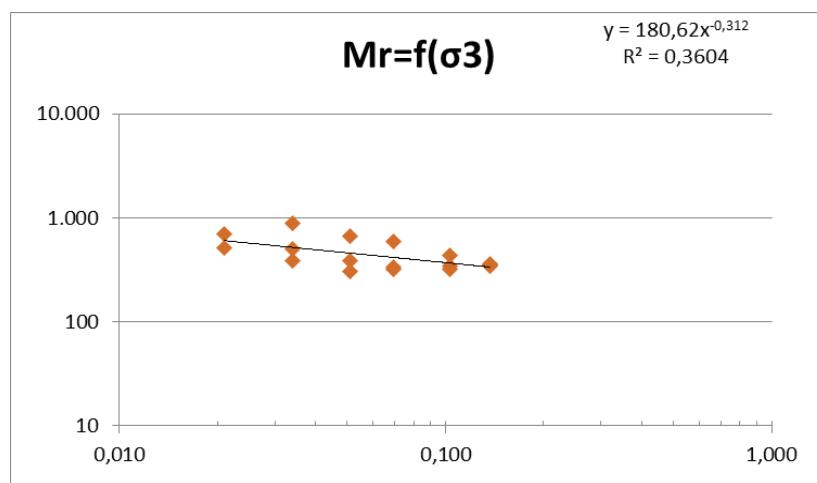
**Figura 4.16: MR x tensão desvio – base – estaca 241.**



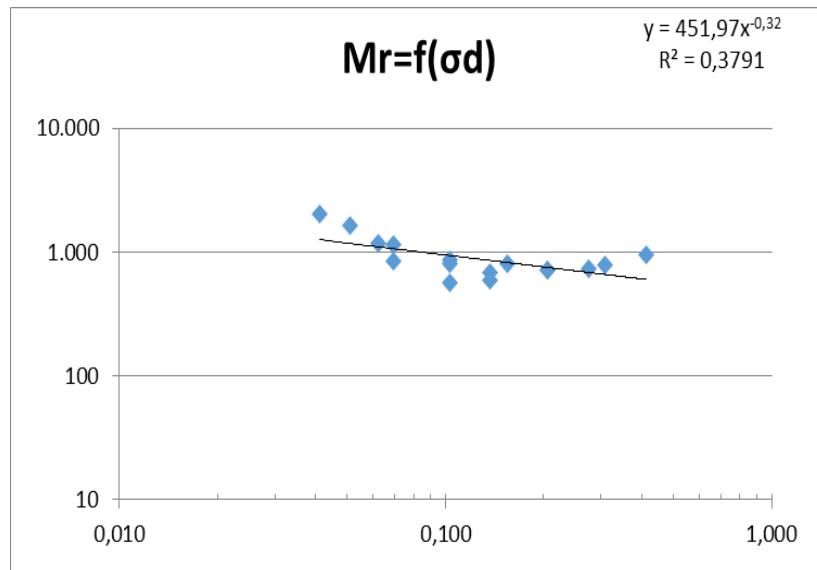
**Figura 4.17: MR x Tensão de confinamento – base – estaca 241.**



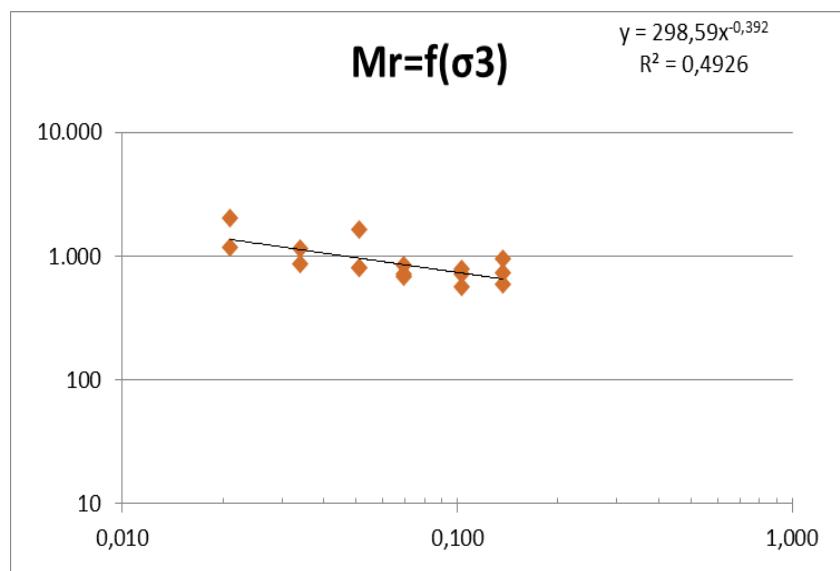
**Figura 4.18: MR x desvio – material reciclado – estaca 241.**



**Figura 4.19: MR x Tensão de confinamento – material reciclado – estaca 241.**



**Figura 4.20: MR x Tensão desvio – solo cimento – estaca 241.**



**Figura 4.21 MR x Tensão de confinamento – solo cimento – estaca 241.**

Analizando os gráficos das Figuras 4.16 a 4.21, podemos observar que o material de base apresentou uma reta mais inclinada tanto para a tensão desvio quanto para a tensão de confinamento. Isso significa que os valores de MR para este material foram sensíveis tanto para a tensão confinante quanto para a tensão de desvio, indicando que o material tem influência tanto da parte granular quanto da sua parte fina. A representação segundo o modelo composto (função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  ao mesmo tempo) talvez seja a mais indicada para este material.

Em relação ao material reciclado com cimento, já apresentou uma reta mais horizontalizada, devido ao cimento incorporado à mistura. Isso mostra uma equação quase linear, mostrando que os valores de MR pouco se alteram com a variação da tensão confinante ou de desvio.

Isso fica melhor evidenciado na mistura solo cimento, que teve uma reta ainda mais horizontalizada, mostrando os valores de MR sofreram pouca alteração mesmo com a variação da tensão confinante ou desvio.

Analizando os resultados de MR por meio do modelo composto (função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  ao mesmo tempo), temos as seguintes equações para o módulo de resiliência apresentados na Tabela 4.38.

**Tabela 4.38: Equações do modelo composto.**

	Equação do Módulo Resiliente do modelo composto	$R^2$
Base (241)	$Mr = 241x\sigma_3^{0,6329}x\sigma_d^{-1,4768}$	0,869
Reciclado + cimento (241)	$Mr = 1853x\sigma_3^{0,6758}x\sigma_d^{-0,5548}$	0,867
Solo-cimento (241)	$Mr = 3523x\sigma_3^{0,5412}x\sigma_d^{-0,3597}$	0,713

Analizando a tabela, observamos que o modelo composto foi a que melhor representou os valores de MR dos materiais estudados, visto que os valores de  $R^2$  foram maiores em comparação aos que foram apresentados nos gráficos das Figuras 4.16 a 4.21. Isso nos mostra valores menos dispersos para os valores de MR em função da tensão de confinamento e de desvio. Isso se deve ao fato de que no modelo composto, os valores de tensão desvio e tensão confinante são analisados de forma conjunta para a obtenção dos valores das constantes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ . O modelo composto pode ser usado tanto para solos arenosos quanto para argilosos.

Mas de maneira geral, sobre o objeto de estudo deste trabalho que é a mistura de pavimento reciclado com cimento, é importante destacar que é extremamente viável a sua utilização como material de base, não só pelo valor de CBR encontrado, como também o valor do MR.

#### 4.8.2 Estaca 420

Os resultados dos MR's estão apresentados na Tabela 4.39. São apresentados os valores médios do MR obtidos do ensaio triaxial dinâmico para vários níveis de tensões.

**Tabela 4.39: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.**

	Base + cimento (420)	Reciclado + cimento (420)	Base (420)
MR médio (MPa)	2340,7	1299,7	433,4

Foi constatado que os valores de MR das misturas solo-cimento e as misturas com material reciclado em relação ao material de base aumentaram, mostrando a eficiência dos métodos estudados.

O ensaio de MR tem sido utilizado em vários projetos e estudos de pavimentos no Brasil. Exemplo disso, podemos citar Franzoi (1990) *apud* Baldo (2015) que realizam ensaios em diversos solos no estado de São Paulo, e os seus resultados estão apresentados na Tabela 4.40.

**Tabela 4.40: Valores médios de módulos de resiliência para diversos tipos de solos (Adaptado Franzoi *apud* Baldo).**

Procedência	TRB	M <sub>r</sub> (MPa)
SP-310/km 222	A-2-4	150
SP-425/E280	A-6	250
SP-255/KM 63	A-6	340
Jazida em S. André (SP)	A-7-5	200
SP333/KM 320	A-7-5	500
SP-310/KM 257	A-7-5	300
SP-55/KM 94,9	A-1-b	45
SP-280/KM 40	A-6	32
SP-280	A-7-5	80
SP/KM 168,8	A-7-5	125

Valle e Baldo (1997), apresenta valores de MR obtidos por retroanálise de superfícies deformadas com o emprego do FWD, para bases de graduadas em trechos de pavimentos asfálticos no estado de Santa Catarina. Os valores estão apresentados na Tabela 4.41.

**Tabela 4.41: Valores de MR para solos granulares (Adaptado – Valle e Valdo, 1997).**

Trecho	1	2	3	4	5	6
Valor do MR - base em BGS (MPa)	115	210	180	290	360	415

Segundo Holz, os valores sugeridos de MR para base de pavimentos flexíveis, variam de 150 a 300 MPa. Já para pavimentos semi-rígidos, esses valores variam de 300 a 500 MPa.

De acordo com Rodolfo e Baldo (1996), apresentaram uma série de modelos para cálculos de deformação específica na fibra inferior do concreto asfáltico. Para tais parâmetros, variou-se o valor do MR para base de pavimentos flexíveis utilizando brita graduada de 100 MPa a 300 MPa. Já para misturas solo-cimento, os parâmetros utilizados variam de 2500 MPa a 7500 MPa.

Analizando os dados do ensaio de triaxial dinâmico, podemos verificar que valores encontrados para o MR dos materiais estudados neste trabalho apresentam valores coerentes aos de outras referências. O que precisa ser feito é um estudo mais aprofundado para MR para diversos tipos de materiais para camadas de pavimento.

Nas Figuras 4.22 a 4.27 são apresentados em forma de gráficos a variação dos valores obtidos para o MR em função da tensão de desvio ( $\sigma_d$ ) e tensão confinamento ( $\sigma_3$ ). Também são apresentadas as expressões para o MR por meio dos modelos de regressão em função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$ .

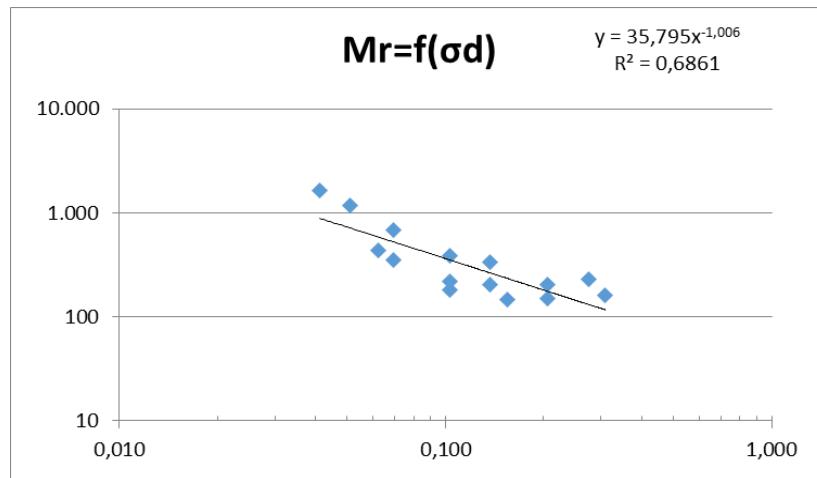


Figura 4.22: MR x Tensão desvio – base – estaca 420.

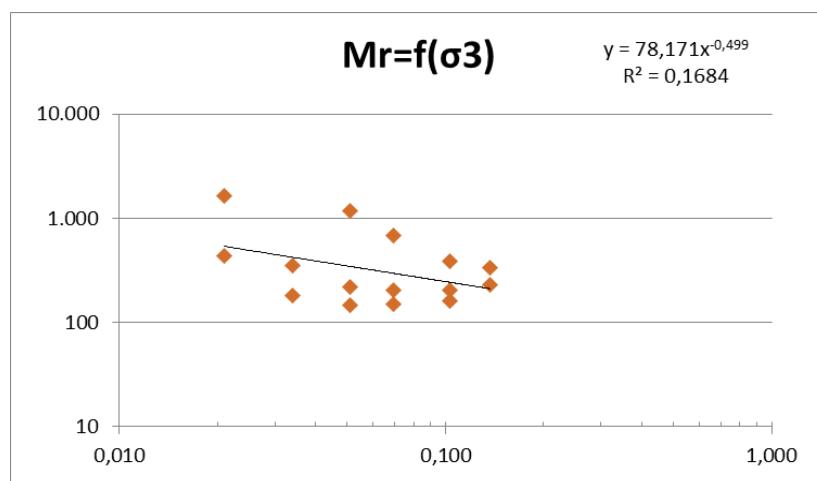


Figura 4.23: MR x Tensão de confinamento – base – estaca 420.

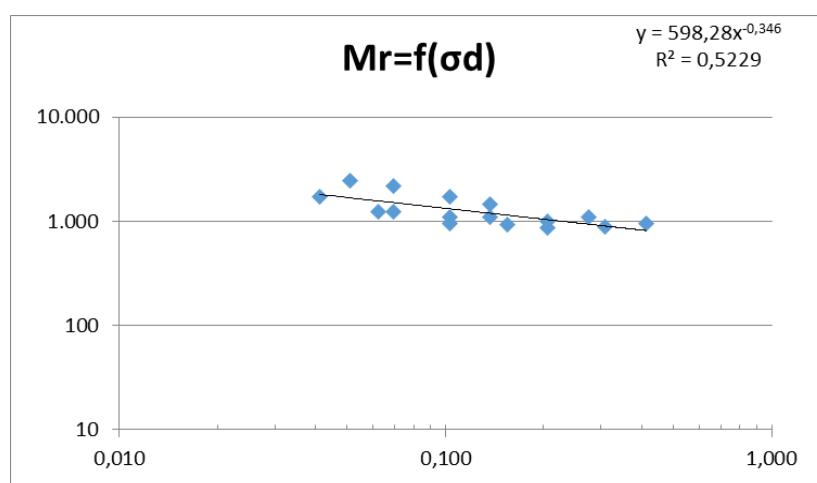
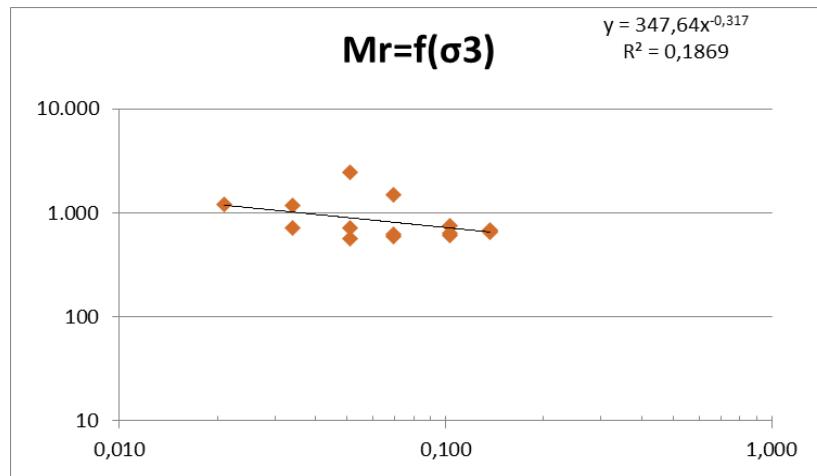
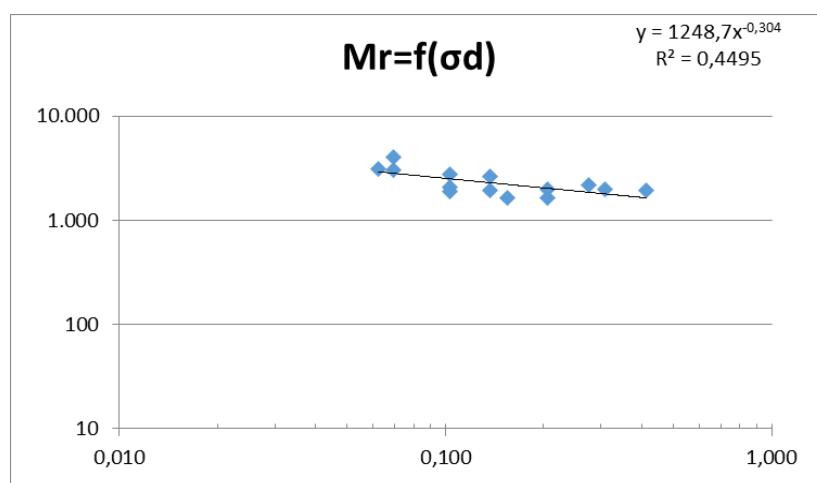


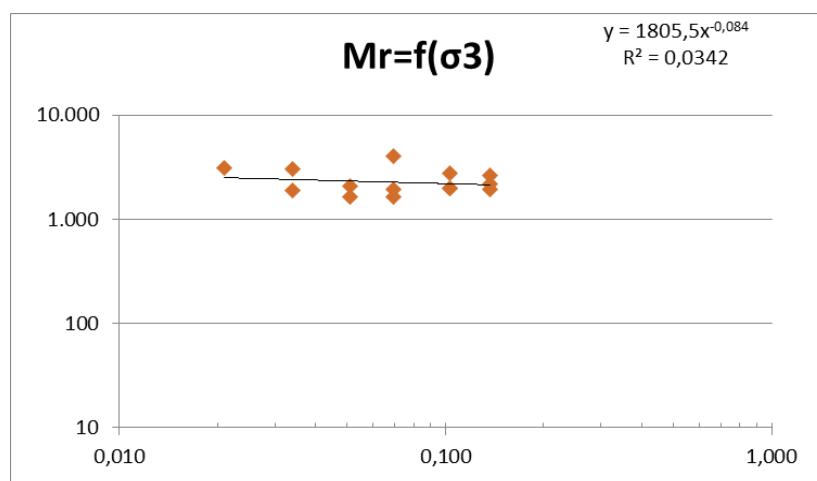
Figura 4.24: MR x Tensão desvio – material reciclado – estaca 420.



**Figura 4.25: MR x Tensão de confinamento – material reciclado – estaca 420.**



**Figura 4.26: MR x Tensão desvio – solo cimento – estaca 420.**



**Figura 4.27: MR x Tensão de confinamento – solo cimento – estaca 420.**

Analizando os gráficos das Figuras 4.22 a 4.27, podemos observar que o material de base apresentou uma reta mais inclinada tanto para a tensão desvio quanto para a tensão de confinamento. Isso significa que os valores de MR para este material foram sensíveis tanto para a tensão confinante quanto para a tensão de desvio, indicando que o material tem influência tanto da parte granular quanto da sua parte fina. A representação segundo o modelo composto (função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  ao mesmo tempo) talvez seja a mais indicada para este material.

Em relação ao material reciclado com cimento, já apresentou uma reta mais horizontalizada, devido ao cimento incorporado à mistura. Isso mostra uma equação quase linear, mostrando que os valores de MR pouco se alteram com a variação da tensão confinante ou de desvio.

Isso fica melhor evidenciado na mistura solo cimento, que teve uma reta ainda mais horizontalizada, mostrando os valores de MR sofreram pouca alteração mesmo com a variação da tensão confinante ou desvio.

Analizando os resultados de MR por meio do modelo composto (função de  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  ao mesmo tempo), temos as seguintes equações para o módulo de resiliência apresentados na Tabela 4.42.

**Tabela 4.42: Equações do modelo composto.**

	Equação do Módulo Resiliente do modelo composto	$R^2$
Base (420)	$Mr = 69x\sigma_3^{0,5474}x\sigma_d^{-1,4112}$	0,746
Reciclado + cimento (420)	$Mr = 1104x\sigma_3^{0,4859}x\sigma_d^{-0,6949}$	0,895
Solo-cimento (420)	$Mr = 1808x\sigma_3^{0,2970}x\sigma_d^{-0,5211}$	0,691

Analizando a tabela, observamos que o modelo composto foi a que melhor representou os valores de MR dos materiais estudados, visto que os valores de  $R^2$  foram maiores em comparação aos que foram apresentados nos gráficos das Figuras 4.16 a 4.27. Isso nos

mostra valores menos dispersos para os valores de MR em função da tensão de confinamento e de desvio. Isso se deve ao fato de que no modelo composto, os valores de tensão desvio e tensão confinante são analisados de forma conjunta para a obtenção dos valores das constantes k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> e k<sub>3</sub>. O modelo composto pode ser usado tanto para solos arenosos quanto para argilosos.

Como no material reciclado da estaca 241, o material da estaca 420 se mostrou viável a sua utilização como base de pavimento rodoviário, apresentando não só um valor de CBR satisfatório, como também valores para o MR.

## CAPÍTULO 5

---

### 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 CONSIDERAÇÕES

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência da metodologia de reforço de base de pavimento rodoviário com o uso de material do reciclado oriundo do próprio pavimento existente.

De acordo estudos feitos quanto ao uso dessa metodologia e também neste trabalho em escala laboratorial foi obtido êxito a utilização dessa metodologia, sendo viável a aplicação desse estudo na pavimentação.

Também, foi possível se obter uma análise para o desenvolvimento sustentável, já que a reciclagem de pavimentos é uma alternativa que contribui com redução de passivo ambiental, reutilizando o próprio pavimento na construção de um novo e consequentemente, reduzindo também a busca por materiais provenientes de pedreiras e também de materiais provenientes de jazidas, podendo reduzir as interferências negativas que tais atividades causam ao meio ambiente.

Foi objeto de estudo a viabilidade técnica do uso e aproveitamento do pavimento reciclado com o objetivo de melhorar as propriedades do mesmo.

Para isso contemplou uma extensa campanha laboratorial, com a caracterização dos materiais provenientes da base, mistura solo-cimento e material reciclado misturado com cimento.

Os materiais provenientes da rodovia em estudo foram analisados por caracterizações físicas e com parâmetros de resistência, que contribuiu para relacionar os índices físicos

e as mudanças ocorridas, o que contribuiu para um melhor entendimento de suas propriedades.

Os resultados indicaram que a metodologia de reciclagem de pavimento é viável, e mostrou um desempenho satisfatório em âmbito laboratorial. Tal mistura melhorou seu desempenho em relação ao material de base. Apesar dos resultados de CBR da mistura solo-cimento tenham sido melhores, a metodologia de reciclagem se mostrou eficaz em relação a melhora granulométrica da base, tornando-a muito eficiente e credenciando o seu uso, pois se enquadrou nos valores preconizados pelo DNIT. Isso nos mostra que os parâmetros adquiridos com a metodologia da reciclagem a credencia seguramente como material de base de rodovia.

Foram realizados diversos ensaios laboratoriais para a viabilização do estudo para a utilização de pavimento reciclado para o seu uso como camada de base de pavimento rodoviário.

No estudo de caso realizado foram realizados ensaios com materiais provenientes de duas estacas da rodovia BR-120 no estado de Minas Gerais. Estudaram-se as características e propriedades dos materiais com a finalidade de viabilizar o seu uso como base do pavimento.

## 5.2 CONCLUSÕES

Analizando os ensaios de granulometria, podemos concluir que o material que melhor se adequou a faixa granulométrica para base granular do DNIT exigida para a rodovia em relação a carga a ser solicitada, foram os materiais reciclados com cimento.

O material de base e mistura solo-cimento, quanto ao ensaio de granulometria, a faixa que melhor se enquadrou foi a D. Para os parâmetros de projeto da rodovia (número N) em estudo, a faixa granulométrica para base granular deve ser a B. Já do material reciclado, respeitando as faixas de tolerâncias preconizadas pelo DNIT, enquadrou melhor na faixa B, no material de ambas as estacas mostrando a eficiência do método

empregado fazendo com que a nova base se enquadre nas normas de utilização apresentando no Manual de Pavimentação do DNIT.

Analizando ainda a granulometria, pode-se perceber que os materiais são não uniformes e mal graduados. Em relação a mistura que foi objeto principal de estudo, isso poderia ser melhorado no momento da reciclagem, regulando melhor a máquina recicladora.

Em relação aos limites de consistência, os valores de todos os materiais de enquadram nas especificações para o uso como base. Os valores pouco se alteraram, mostrando mais uma vez a eficiência da metodologia de reciclagem de pavimento, não alterando esses parâmetros.

Os ensaios de classificação pelo Transportation Research Board (TRB) mostraram que os materiais foram todos classificados como A-1-b, não tendo alteração quanto essa classificação, assim como a classificação do Sistema Unifica de Classificação de Solos (SUCS) que foi SM.

Foi observado que os valores de CBR dos materiais de pavimento reciclado com cimento em relação a base existente, tiveram um aumento significativo desses valores. Os valores da base atual ficaram abaixo do preconizado pelo DNIT ( $CBR \geq 80\%$ ) para rodovias de tráfego pesado (DNIT 142/2010 ES). Já os valores de CBR para os materiais reciclados de ambas as estacas ficaram acima do preconizado pela norma.

A incorporação de uma quantidade maior de asfalto ao material de base tende a diminuir o valor de CBR da mistura de forma considerável. Esta diminuição é atribuída a película de asfalto que envolve os grãos do material fresado, que afeta a compactação dinâmica da mistura. Isso ficou evidenciado quando analisamos separadamente os valores de CBR dos materiais reciclados das estacas 241 e 420.

Visivelmente, na estaca 420 a quantidade de asfalto foi maior, fazendo com o seu CBR tivesse um valor menor em relação à estaca 241. Mas mesmo com esse valor de asfalto maior, o seu CBR em relação ao material de base aumentou consideravelmente.

Para todos materiais, os valores de expansão foram compatíveis para uso em camadas de base de rodovias, conforme as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, ficando bem abaixo dos valores exigidos para a utilização como base de pavimento rodoviário (< 0,5%).

Os valores encontrados nos ensaios de compressão simples para as misturas recicladas com cimento foram satisfatórios, com valores superiores aos recomendados pelo Departamento de Rodagem do Texas, que para materiais de base, preconiza o valor de 0,7 MPa. Os valores do ensaio com os materiais de base ficaram abaixo desse valor. Com o aumento, a mistura do material reciclado com cimento mostrou-se eficiente.

Em relação ao ensaio de triaxial dinâmico, os resultados de MR se mostraram satisfatórios. Os valores de MR das misturas de pavimento reciclado com cimento tiveram um aumento quando comparados aos materiais de base. A utilização do modelo composto para o a representação do MR se mostrou mais eficiente, tendo em vista que os valores de  $R^2$  são mais próximos de 1, tendo assim valores menos discrepantes um do outro. Pode-se concluir também que em relação aos ensaios nos materiais reciclados que curva tende a ser mais horizontalizada. Valores de MR tem pouca alteração quando se varia o valor da tensão confinamento.

Nas referências, é descrito que com o aumento da quantidade de revestimento em relação ao material natural, o valor de CBR da mistura tende a diminuir. Isso ficou evidenciado no ensaio de CBR. Mas quando analisamos os ensaios de compressão simples e de MR, essa redução não se aplica pois na resistência à compressão o resultado foi o mesmo para as duas estacas analisadas (material de base com revestimento reciclado). O MR do material que possui uma quantidade de revestimento maior, teve resultados melhores para o ensaio. Dessa forma se faz necessário um maior estudo com diversos teores de asfalto em relação ao ensaio de MR. Interessante também seria o estudo de campo, para analisar como se daria o comportamento dessas diferentes misturas com ensaios específicos de campo, além de verificar seu comportamento quando solicitado pelo tráfego local.

Com base nos ensaios laboratoriais realizados, pode-se afirmar que mistura de pavimento reciclado adicionado cimento mostrou-se eficiente para o uso como base de pavimento rodoviário, possibilitando uma redução do problema ambiental. A não utilização de materiais provenientes de pedreiras e de jazidas de solos, irá reduzir possíveis danos ao meio ambiente causados por essas atividades. Oferecendo uma alternativa para o uso no próprio pavimento, estaremos reduzindo o passivo ambiental causado pela essa atividade de engenharia, permitindo um uso adequado para tais materiais.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos não foram contemplados nesta pesquisa, portanto, recomenda-se que sejam realizados estudos complementares para melhor compreensão das relações dos materiais na aplicação como base de pavimento rodoviário. Dentre eles destacam-se:

- ✓ Substituição do cimento incorporado ao pavimento reciclado por rejeito, sendo esse uma escória ou um rejeito de mineração para a avaliação da eficiência dessas novas misturas;
- ✓ Utilizar ensaios de campo, exemplo seria FWD, viga Benkelman e GEOGAUGE, para avaliação estrutural do pavimento, e verificar em campo se a mistura de material reciclado com cimento terá a mesma eficiência que já mostrado em laboratório;
- ✓ Acompanhar a construção das camadas do pavimento, instalando equipamentos de monitoramento nessas camadas para a avaliação em campo da eficiência da metodologia de reciclagem ao longe de um determinado período;
- ✓ Em relação aos ensaios de MR, propor um estudo com as mesmas tensões que seriam aplicadas no pavimento para determinar o MR que o material estaria sendo solicitado;
- ✓ Realizar estudos mecânicos com os materiais reciclados afim de ter um melhor entendimento em relação ao MR.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

ALVIM, I. M. Fresagem e Reciclagem de Pavimentos e suas Aplicações na Restauração Rodovias, 2001

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2000) - Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure) – D2488.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2004) - Soil Classification System - from AASHTO M 145 or ASTM D3282.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2004) - Terms Relating to Subgrade, Soil-Aggregate, and Fill Materials - from AASHTO M 146 or ASTM D3282.

ARAÚJO, L. A.; Manual de Siderurgia. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997.

ARAÚJO, L. M. D. Estudo Do Comportamento De Material Fresado De Revestimento Asfáltico Visando Sua Aplicação Em Reciclagem De Pavimentos, Tese de Doutorado, UnB, 2004;

ARAÚJO, L. M. D., de FARIAS, M. M. Estabilização química na reciclagem de material asfáltico fresado e cascalho de base. 8º ENACOR. Gramado, RS. 11 p. 2004.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. Cold recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. Hot in place recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. Hot recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982) – Terminologia e classificação de pavimentação: NBR 7207.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – Solo – Análise granulométrica: NBR 7181.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica: NBR 6508.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) – Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização: NBR 6457.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) – Solo – Ensaio de Compactação: NBR 7182.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987) – Solo – Índice de Suporte Califórnia: NBR 9895.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) – Solo-cimento – Dosagem para emprego em camada de pavimento: NBR 12253.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) – Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico: NBR NM ISSO 2395.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012) – Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento: NBR 12024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012) – Solo-cimento – Ensaio de Compressão Simples – Método de Ensaio: NBR 12025.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo, 2015.

BAPTISTA, C. N. Pavimentação: Compactação dos Solos no Campo, Camadas de Base e Estabilização dos solos, 4<sup>a</sup>ed. Rio de Janeiro: Globo, 1976.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica. Rio de Janeiro, 2007.

BONFIM, V. Fresagem de Pavimentos Asfálticos. Editora Fazendo Arte, São Paulo, 2a edição, 2001.

BONFIM, V. Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 1999.

BOMFIM, V. & Domingues, F. A. A. Utilização de Fresagem e Reciclagem “In Situ” a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos. 29a Reunião Anual de Pavimentação, Volume 3, Cuiabá, MT, pp. 602-621, 1995.

BONFIM, V. Fresagem de Pavimentos Asfálticos. São Paulo: Fazendo Arte, 2007.

BONOLA, M. Cold & hot in-place recycling & their combination for the maintenance of road flexible pavements. 29º annual meeting of the asphalt recycling & reclaiming association. 2005.

BONORA, B. C.: Utilização do Módulo de Resiliência na Caracterização de Materiais de Subleito e Sub-Base de Um Pavimento Flexível. Trabalho Final de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015

BOURDEAU, J.; Collaborative Ontological Engineering of Instructional Design Knowledge for an ITS Authoring Environment. Proceedings of the 6th Intl. Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS 2000), Springer Verlag, 2000.

BRAJA, M.D. Fundamentos da Engenharia Geotécnica, 2013.

CAMPOS, O. de Souza (1987). Serviços de Reciclagem de Pavimentos Realizados nas Rodovias da DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S. A. 22a Reunião Anual de Pavimentação, Volume 2, Maceió, AL, pp. 363-367.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, CNT. Pesquisa CNT Rodovias, 2015.

CORDEIRO, J. F. S. Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

CRUZ, M; LURDES, S. Avaliação do melhoramento de solos residuais graníticos com cimento e activadores, 2006.

Davilla, C. Mecânica dos Solos. Notas de Aula, CEFETES. [ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Notas%20de%20aula/unidade\\_4.pdf](ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Notas%20de%20aula/unidade_4.pdf), Acesso em 29/11/2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ. Pavimentação: Solo-Cimento e Solo Tratado com Cimento – DER/PR ES-P 11/05, Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ. Pavimentação: Reciclagem de Pavimento in situ com adição de cimento – DER/PR ES-P 33/05, Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. DNER - ME 131/94.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Pavimentação Asfáltica. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação, Base Estabilizada Granulometricamente, DNIT 141/2010-ES.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação, Base de Solo Melhorado com Cimento, DNIT 142/2010-ES.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INTRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “*in situ*” com adição de cimento Portland – Especificação de serviço - DNIT 167/2013 – ES.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentos Flexíveis – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. DNIT 134/2009 ME.

FERREIRA, M. A. J.; NEVES M. A.; DE SOUZA, F. S. V.; BARROS, R. M. V. e LIMA e SILVA, P. (1994). Reciclagem do Pavimento da MG-050 como Alternativa Econômica de Restauração. 28a Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, Volume 3, pp. 684-703.

FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES (FCM). Roads and sidewalks - reuse and recycling of road construction and maintenance materials - National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure (InfraGuide). Canadá. 50 p. 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Cold in-place asphalt recycling – application checklist. Publication No. FHWA-IF-06-012. 2005.

FERNANDES, G. Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2005.

FILHO, J.D.P. Reconstruction of the airport of the city of Poso Alegre/MG, for recycling the cold *in situ* – A economic measure and ecologic. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP, 2005.

FONSECA, P. Engenharia e Pavimento, LTDA, 2009.

JENSEN, M. O. Recycling in road construction has been upgraded. Swedish National and Transport Research Institute – Nordic Road & Transport Research. Number 03. 03 p. 2004.

JIMENEZ, R. A. (1980). State-of-the-art of Surface Recycling. Transportation Research Record, no780, pp. 41-51.

LIMA, A. T. Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2003.

LIMA, D. C; RÖHM, S. A; BARBOSA, P. S. A. Estabilização de solos II – Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa. Viçosa: Empresa Universitária, p.32, 1993.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

MARQUES, G. L. O. Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação. Notas de Aula, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

McKEEN, G. R., HANSON, D. I., STOKES, J. H. Construction and performance using cold in-situ recycling in New Mexico. KANDHAL, P.S., GARDINER, M.S. Flexible pavement rehabilitation and maintenance. ASTM stock STP 1348. Baltimore – USA. 1998. p. 53-67, 1998.

MEDINA, J., MOTTA, M. G. Mecânica dos pavimentos. 3<sup>a</sup> Edição. 2015. Rio de Janeiro

MEDINA, J. e E. S. PREUSSLER (1980) Características Resilientes de Solos em Estudos de Pavimentos. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, RJ.

MIRANDA JR, J. e da Silva, C. A. R. (2000). Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-Base Estabilizada com Cimento na BR 381: Uma Experiência. 32a Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, Volume II, pp. 488-497.

MOMM, L. & DOMINGUES, F. A. A. (1995). Reciclagem de pavimentos a frio in situ superficial e profunda. 29a Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MG, Volume 3, pp. 570-601.

MOTTA, 2003, 12<sup>a</sup> Reunião de Pavimentação Urbana – ABPV, Aracaju – 2003, Mini Curso Noções de Mecânica dos Pavimentos.

OLIVEIRA, S. A. G.; Reis, J. M., Pereira, J. H. F., Camapum de Carvalho, J. e Farias, M. M. (1997). Caracterização Mecânica de Materiais Recicláveis para Base de Pavimento. 1º Simpósio Internacional de Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, Rio de Janeiro, RJ, Volume 2, pp. 695-699.

PEREIRA, K. L. A. Estabilização de um Solo com Cimento e Cinza de Lodo para Uso em Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PREUSSLER, Ernesto Simões; Medina, Jacques de; Pinto, Salomão. Resiliência de solos tropicais e sua aplicação à mecânica dos pavimentos. In: Simpósio de Solos Tropicais EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. v. 1, p. 591-634.

QUEIROZ, K. L. A. Utilização de Material Fresado para Aplicação em Camadas Estabilizadas de bases e sub-bases de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

RAMOS, C. R.; TIZO LÀO, V. L. E. S.; SCHILLING, A. B. Z. K. e BORGES, M. G. L. (1995). Reciclagem a Frio In Situ no Município do Rio de Janeiro. 29a Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT, Volume 4, pp. 417-447.

Relatório de Caracterização de Solos, Laboratório de Ferrovias e Asfalto, Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

REZENDE, L. R. Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 1999.

ROSA, J. B; FERREIRA, C. J; GUIMARÃES, R. C. Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação. Unidade universitária de ciência exatas e tecnológicas, UEG, 2006.

SACHET, T. Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem in situ de Bases de Pavimentos Asfálticos, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2007.

SANTOS, M.N. Análise do Efeito de Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra. Relatório Final de Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-RIO, 2013.

SANTOS, R.B.R.; Determinação do módulo de Resiliência de materiais típicos de pavimentos através do Ensaio Triaxial Dinâmico. Trabalho final de curso da UFJF, Juiz de Fora, 2009.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. 1<sup>a</sup>ed. São Paulo, v.1, p.746, 1997.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. 1<sup>a</sup>ed. São Paulo, V.2, p.734, 1997.

SILVA, R. G. O. Notas de aula, Ouro Branco, 2015.

SÓRIA, M. H. A. (1985). Reflexões lógicas sobre classificação de solos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos – SP.

TAKAHASHI, O; HACHIYA, Y. & YAMAGUCHI, S. Applicability of Recycled Asphalt Mixtures with the Thick-Lift Method for Full-Depth Pavement of Airport Runways. International Journal of Pavements, Mississippi, pp. 35-44, 2002.

VARGAS, Milton. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill; USP, 1977.

YODER , E. J; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. 2<sup>a</sup>ed. New York, 1975.

WIRTGEN. Manual de reciclagem a frio. 2<sup>a</sup> ed. 2012. Wirtgen GmbH. Alemanha.