

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

GUILHERME ANTÔNIO ALMEIDA FONTES

**CONSTRUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL DE UM
PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM ESCÓRIA DE ACIARIA E
GEOSSINTÉTICOS**

OURO BRANCO - MG
DEZEMBRO DE 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

GUILHERME ANTÔNIO ALMEIDA FONTES

**CONSTRUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL DE UM
PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM ESCÓRIA DE ACIARIA E
GEOSSINTÉTICOS**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: M.Sc Prof. Tales Moreira de Oliveira

OURO BRANCO - MG
DEZEMBRO DE 2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: CONSTRUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL DE UM PAVIMENTO
RODOVIÁRIO COM ESCÓRIA DE ACIARIA E GEOSSINTÉTICOS

Autor: Guilherme Antônio Almeida Fontes

Aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. M.Sc Tales Moreira de Oliveira - UFSJ
(Orientador)

Prof. M.Sc Paulo Roberto Borges - UFSJ
(Banca Examinadora)

Prof. Bruno Oliveira da Silva - UFSJ
(Banca Examinadora)

Ouro Branco-MG
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me proporcionado fé, sabedoria e serenidade para a realização do meu sonho com tamanha qualidade e dedicação. Sem sua força e benção não teria alcançado o bacharelado em Engenharia Civil.

Agradeço aos meus pais por estarem presentes em todos os momentos, sempre apoiando, proporcionando amor e carinho, e por serem exemplos de pessoas vencedoras nas quais me espelho. As minhas irmãs, Ana Laura e Mariana, por todos os conselhos, amizade, união e incentivos nas horas mais difíceis da graduação. A minha namorada Lorena pelo companheirismo, atenção, amor e apoio incondicional. Aos familiares por sempre acreditarem e confiarem em meu potencial. E principalmente meus avós por me mostrarem que com humildade, caráter e dedicação conseguimos conquistar nossos objetivos.

Aos professores, mestres, doutores e funcionários da Universidade Federal de São João Del-Rei, por todo o conhecimento, acolhimento e oportunidades durante esses anos de graduação.

Aos membros do grupo de pesquisa do INFRAGEO, pelo auxílio, companheirismo, dedicação e amizade durante o desenvolvimento da pesquisa. Em especial, ao Marcelo Henrique Simões Freitas, Anne Karoline e Robinson.

Aos amigos, por terem transformado as horas difíceis e complicadas em momentos com muita alegria, comprometimento e satisfação.

Ao grande mestre Tales Moreira de Oliveira, por toda a amizade construída ao longo da graduação, pela orientação em todas as horas, conselhos e paciência. Sou grato por todo o aprendizado e espero levá-lo para toda a vida.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Meu grande agradecimento!

RESUMO

O presente trabalho, feito com intuito de aprimorar as técnicas de pavimentação e a aplicabilidade de novos materiais na pavimentação, desenvolveu-se na Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto do Paraopeba, localizado na cidade de Ouro Branco-MG. Desse modo, executou-se um trecho experimental da camada de sub-base de uma rodovia com utilização de escória de aciaria como agregado e aplicação de geossintéticos (geogrelha e geotêxtil) como material de reforço do subleito. Para isso, fez-se necessário a caracterização do subleito, a fim de descobrir as características físicas e mecânicas do solo residual de gnaiss de cor marrom claro variegado. Para ensaios de caracterização da escória foram fornecidas 24 toneladas de material nas faixas 0,1,2 e 3, conforme padrão da Gerdau. Inicialmente, pelo método da tentativa, enquadrou-se o material na faixa I e III do DER-PR. Posteriormente, os ensaios de caracterização da escória de aciaria foram feitos. Os geossintéticos StrataGrid SGI60 (geogrelha) e StrataTex W5050 (geotêxtil tecido), fornecidos pela GeoSoluções, foram aplicados como reforço da camada do subleito. De posse dos resultados de caracterização do solo do subleito e da escória, calculou-se o trecho experimental pela combinação do método do DNER – Eng. Murilo Lopes de Souza e do método adaptado da AASHTO (1993). A partir da realização do trecho experimental, foi possível concluir que, a princípio, a escória pode ser utilizada para compor a camada de sub-base de um pavimento, devido a suas características adequadas e por ser economicamente e ambientalmente viável. Além disso, os resultados evidenciaram que o uso do geossintético reduz significativamente as espessuras das camadas do pavimento, além de ser uma excelente alternativa para atuar como material de reforço de subleito.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento, escória de aciaria, geossintéticos, trecho experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Composição da malha rodoviária brasileira (CNT,2017).	4
Figura 2.2: Comparação da qualidade do modal rodoviário nos países da América do Sul. (CNT,2017)	5
Figura 2.3: Esquema de um pavimento flexível. (Oliveira,2016)	5
Figura 2.4: Esquema de um pavimento rígido. (Oliveira,2016)	6
Figura 2.5: Classificação das vias e obtenção do número equivalente. (IP-05,2014).	7
Figura 2.6: Gráfico do número de eixo (N) e espessura do pavimento (DNIT,2006).	9
Figura 2.7: Simbologia utilizada no dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNIT,2016).	9
Figura 2.8: Equipamento Speedy utilizado para determinação da umidade.	13
Figura 2.9: Calibração do frasco de areia: (a) pesagem do conjunto; b) peso da areia deslocada; c) peso da areia em um cilindro de volume conhecido.	14
Figura 3.1: Retirada de amostras deformadas de solo do campo experimental.	20
Figura 3.2: Geogrelha StrataGrid	20
Figura 3.3: Geotêxtil tecido (StrataTex W).	21
Figura 3.4: Escória de aciaria em diferentes faixas granulométricas comercializada pela Gerdau.	22
Figura 3.5: Preparação do solo para ensaios. (a) Retirada de matéria orgânica para coleta do solo; (b) Destorroamento do solo.	23
Figura 3.6: Ensaio de limite de liquidez do solo.	24
Figura 3.7: Realização do ensaio de limite de plasticidade.	25
Figura 3.8: Ensaio de compactação do solo: (a) Medição do cilindro; (b) Verificação da compactação das camadas; (c) Escarificação após a compactação; (d) Compactação da última camada; (e) Nivelamento do solo.	26
Figura 3.9: Imersão dos corpos de prova.	27
Figura 3.10: Realização do ensaio de CBR na prensa.	27
Figura 3.11: Armazenamento das misturas de escória de aciaria conforme faixas utilizadas no trabalho: (a) Preparação do material, (b) Faixas estocadas.	29
Figura 3.12: Corpos de prova imersos para realização de ensaio de expansibilidade livre.	30
Figura 3.13: Imersão dos corpos de prova das faixas I e III do DER-PR.	32
Figura 3.14: Realização do ensaio de CBR da escória na prensa.	32
Figura 3.15: Alocação das estacas no campo experimental.	33

Figura 3.16: Croqui do trecho experimental.....	34
Figura 3.17: Retirada da matéria orgânica: (a) Uso da retroescavadeira para retirar a matéria orgânica (b) Verificação da espessura da camada retirada em cerca de 20 cm.....	35
Figura 3.18: Preparação do subleito para compactação: (a) Teste da umidade pelo método da frigideira; (b) Escarificação e homogeneização do subleito com ancinho.	35
Figura 3.19: Compactação da camada do subleito com uso da placa vibratória.	36
Figura 3.20: Método do frasco de areia: (a) Abertura de uma concavidade cilíndrica no solo;(b) Enchimento da concavidade com o frasco de areia de massa específica conhecida.	36
Figura 3.21: Inserção da geogrelha entre a camada de subleito e a sub-base.....	37
Figura 3.22: Colocação do geotêxtil tecido entre a camada de subleito e a sub-base.	37
Figura 3.23: Homogeneização da escória aplicada na sub-base com auxílio da betoneira.	38
Figura 3.24: Compactação da sub-base com uso da placa vibratória.	38
Figura 3.25: Ensaio do frasco do frasco e método do speedy para obtenção da umidade.	39
Figura 3.26: Retirada de amostras de geossintéticos no trecho experimental:(a) Geotêxtil tecido; (b)Geogrelha.....	40
Figura 4.1: Curva granulométrica do subleito.....	42
Figura 4.2: Gráfico do limite de liquidez.	42
Figura 4.3: Curva de compactação do solo do subleito.....	44
Figura 4.4: Curva granulométrica da escória de aciaria fornecida pela Gerdau.....	45
Figura 4.5: Estabilização granulométrica da escória de aciaria na Faixa I do DER-PR.	46
Figura 4.6: Estabilização granulométrica da escória de aciaria na Faixa III do DER-PR.....	47
Figura 4.7: Curva de compactação para a Faixa I do DER-PR.	49
Figura 4.8: Curva de compactação para a Faixa III do DER-PR.	49
Figura 4.9: Pavimento rodoviário sem reforço.....	52
Figura 4.10: Pavimento rodoviário com reforço	53
Figura 4.11: Foto do trecho experimental no dia 25/10/2017.	54
Figura 4.12: Análise visual de uma sessão da faixa I no dia 08/12/2017.....	54
Figura 4.13: Análise visual de uma sessão da faixa III no dia 08/12/2017.	55
Figura 4.14: Geotêxtil tecido retirado da sessão 4 para análise.....	55
Figura 4.15: Geogrelha retirada da sessão 6 para análise.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Coeficientes de equivalência estrutural (DNER,2006).	7
Tabela 2.2: Espessura mínima de revestimento betuminoso (DNER, 2006).	8
Tabela 2.3: Coeficientes estruturais (AASHTO,1993).....	11
Tabela 2.4: Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (mn) para pavimentos (AASHTO,1993).	11
Tabela 3.1: Características técnicas da Geogrelha StrataGrid SGi 60. (Geosoluções,2017).....	21
Tabela 3.2: Características técnicas do Geotêxtil Tecido: StrataTex W5050. (Geosoluções,2017).....	21
Tabela 4.1: Granulometria do solo do subleito.....	41
Tabela 4.2: Resultado expansão do solo do subleito.	44
Tabela 4.3: Resultado do CBR do solo do subleito.	44
Tabela 4.4: Percentagens de escória passando nas peneiras.....	45
Tabela 4.5: Percentagens de escória utilizadas na Faixa I do DER-PR.	46
Tabela 4.6: Percentagens de escória utilizadas na Faixa III do DER-PR.....	47
Tabela 4.7: Expansibilidade livre da escória de aciaria.....	48
Tabela 4.8: Resultado dos teores de umidade e massa específica aparente seca máxima das faixas de escória estudada.....	50
Tabela 4.9: Valor de expansão para a Faixa I do DER-PR.	50
Tabela 4.10: Valor de expansão para a Faixa III do DER-PR.....	50
Tabela 4.11: Valor de CBR para a Faixa I do DER-PR.	50
Tabela 4.12: Valor de CBR para a faixa III do DER-PR.	51
Tabela 4.13: Controle da compactação do subleito.....	53
Tabela 4.14: Controle da compactação da sub-base.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivo específico	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 PAVIMENTAÇÃO	4
2.1.1. Atual cenário brasileiro	4
2.1.2 Tipos de Pavimento	5
2.1.3 Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis	6
2.1.4 Controle da compactação no campo	12
2.2 GEOSSINTÉTICOS	15
2.2.1 Geotêxteis	16
2.2.2 Geogrelha	16
2.3 ESCÓRIA DE ACIARIA	16
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 MATERIAIS	20
3.2 MÉTODOS.....	22
3.2.1 Ensaios de caracterização do solo	22
3.2.2 Ensaios de caracterização física e mecânica da escória de aciaria	27
3.2.3 Trecho experimental	32
4 RESULTADOS	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO.....	41
4.1.2 Ensaios de caracterização do solo	41
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SUB-BASE.....	45
4.2.1 Ensaios de caracterização da escória	45
4.3 TRECHO EXPERIMENTAL	51
4.3.1 Dimensionamento do trecho experimental	51
4.3.2 Execução e controle do trecho experimental	53
4.3.3 Analisar visualmente a camada de sub-base.....	54
4.3.4 Observar os danos causados nos geossintéticos	55

5 ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	57
5.1 SOLO RESIDUAL DO SUBLEITO	57
5.2 ESCÓRIA UTILIZADA NA SUB-BASE	57
5.3 TRECHO EXPERIMENTAL	57
5.3.1 Controle da compactação.....	57
5.3.1 Análises visuais	58
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A engenharia de pavimentação, possui, como objetivo principal, garantir a trafegabilidade durante todo o ano e sob qualquer tipo de condição climática, o que proporciona aos usuários condições adequadas de conforto e segurança ao rolamento (Bernucci et al., 2008).

A construção do pavimento é necessária, visto que o solo natural não é resistente o suficiente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações importantes. Sendo assim, sua função é suportar as cargas dos veículos, de modo que as solicitações sejam distribuídas igualmente às suas diversas camadas e ao subleito, o que limita as tensões e as deformações e garante um desempenho adequado da via por um longo período de tempo (Croney, 1977).

No Brasil, o processo siderúrgico gera, em média, 450 kg de coprodutos e resíduos por tonelada de aço produzida. Esse índice possui variações em função da rota tecnológica de produção, sendo superior, em alguns casos, a 700 Kg. Desse total, 70% são escórias (IBS,2017). A alta porcentagem desse material demonstra a necessidade de empregá-lo em algo útil e viável para a construção civil.

No entanto, as escórias, apesar de seus inúmeros usos, ainda são classificadas como resíduos. Desse modo, competem de forma desigual com materiais que poderiam substituir, promovendo condições ambientais mais favoráveis. Esse problema, decorrente da falta de normatização e restrições não fundamentadas impostas por alguns órgãos ambientais, desestimula a compra de escória por consumidores em potencial, além de promover uma queda no preço de mercado.

O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais exigíveis. Aliado a esses dois objetivos, o pavimento deve ainda ser projetado da forma mais econômica possível, atendendo às restrições orçamentárias.

Novas técnicas e estudos estão buscando de maneira econômica e sustentável dar um destino adequado para materiais que sejam utilizados como agregados na construção civil. Dentre os agregados possíveis de se utilizar na pavimentação, escolheu-se a escória de aciaria como

elemento de estudo devido sua propriedade e alta taxa de estocagem sem destino nas siderúrgicas da região do Alto do Paraopeba. Visto que sua conversão em insumo para a pavimentação é de grande valia ao meio ambiente e à infraestrutura viária.

Segundo Ante (2012), falhas ou patologias nas rodovias devidas a deficiências estruturais podem acontecer precocemente ou ao longo do tempo por causa dos efeitos combinados de tráfego dos veículos, características do pavimento e fatores ambientais. As cargas cíclicas podem ocasionar a aparição de deformações permanentes na sub-base e no subleito.

Neste caso, o reforço do subleito usando geossintéticos pode aumentar a resistência do pavimento e reduzir a incidência dessas patologias. Dentre esses produtos, as geogrelhas e os geotêxtil não-tecido correspondem àqueles que têm se notabilizado como os mais amplamente empregados em obras de pavimentação, devido as suas propriedades de engenharia e às facilidades.

De forma similar à maioria dos municípios brasileiros, os municípios da região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais, apresentam uma significativa malha rodoviária não pavimentada, para a qual não apenas a pavimentação, mas também a adoção de técnicas adequadas de pavimentação se faz necessária.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Visando aprimoramento das técnicas de pavimentação, desenvolveu-se o presente trabalho na Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto do Paraopeba, localizado na cidade de Ouro Branco-MG, tendo como objeto o desenvolvimento de um trecho experimental de uma rodovia com utilização de escória de aciaria como agregado, e aplicação de geossintéticos (geogrelha e geotêxtil) como material de reforço do subleito. Para isso, fez-se necessário a caracterização do subleito, da escória, para posterior dimensionamento das camadas do pavimento, e análises no trecho experimental.

1.2.2 Objetivo específico

Para tornar possível as hipóteses a serem tratadas neste trabalho. Faz-se necessário os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as características físicas e mecânicas do solo do subleito;
- Conhecer as características físicas e mecânicas da escória de aciaria;
- Dimensionar a sub-base de um pavimento rodoviário;
- Construir um trecho experimental;
- Verificar a viabilidade técnica do emprego dos geossintéticos para fins de melhoria das propriedades de engenharia do subleito;
- Averiguar visualmente a camada de sub-base;
- Observar visualmente os danos construtivos nos geossintéticos;
- Analisar futuramente os danos construtivos nos geossintéticos;
- Analise futuramente a capacidade de suporte da pista experimental por meio do ensaio da prova de carga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTAÇÃO

2.1.1. Atual cenário brasileiro

O transporte rodoviário no Brasil é primordial para movimentação de cargas e pessoas, contribuindo de modo considerável para o desenvolvimento socioeconômico nacional. Com uma participação de mais de 61% na matriz de transportes de cargas e de 95% na de passageiros, a infraestrutura rodoviária é também a principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte no país. (CNT,2017)

A Figura 2.1, apresenta a composição da malha rodoviária brasileira, com base na gestão e o tipo de rodovia. Onde se verifica que as maiores parcelas das vias não são pavimentadas.

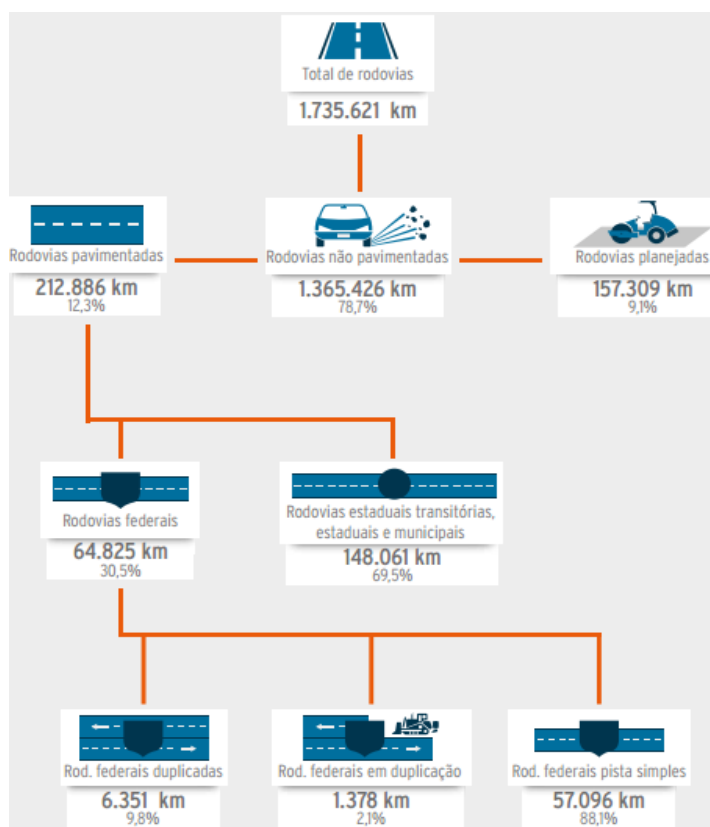


Figura 2.1: Composição da malha rodoviária brasileira (CNT,2017).

Além disso, grande parte das rodovias pavimentadas apresentam algum tipo de problema e conforme a Figura 2.2 que compara a qualidade desse modal, o Brasil ocupa a 103ª colocação

mundial e na América do Sul encontra-se neste ranking atrás de países como Chile, Equador, Uruguai e Argentina.

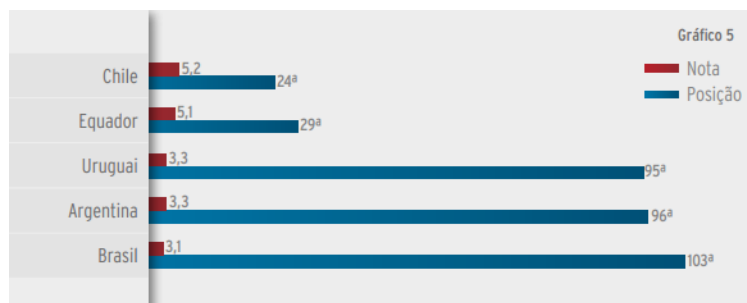


Figura 2.2: Comparação da qualidade do modal rodoviário nos países da América do Sul. (CNT,2017)

Um sistema de logística eficaz, seguro e eficiente torna o país mais competitivo no mercado nacional e na exportação de seus produtos. Visando um atendimento à demanda atual do transporte rodoviário, são necessários investimentos e estudos contínuos para se proporcionar uma infraestrutura rodoviária de qualidade.

2.1.2 Tipos de Pavimento

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superficial final de terraplenagem (subleito), destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhorias nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Os pavimentos são classificados em flexíveis e rígidos:

- Flexível: são constituídos por uma ou mais camadas (reforço de subleito, sub-base, base), e a camada superior (revestimento) (Oliveira, 2016). O dimensionamento é governado pela resistência do subleito (fundação). A Figura 2.3 mostra um pavimento flexível.



Figura 2.3: Esquema de um pavimento flexível. (Oliveira,2016)

- Rígido: são constituídos, predominantemente, por camadas que trabalham à tração. O dimensionamento é governado pela resistência à tração do concreto. A Figura 2.4, retrata a configuração de um pavimento rígido.

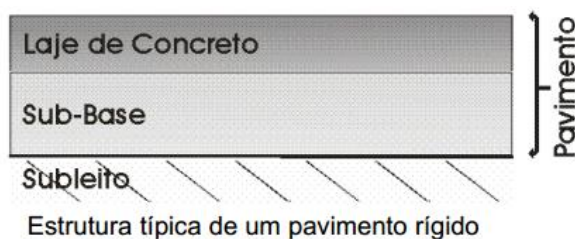


Figura 2.4: Esquema de um pavimento rígido. (Oliveira,2016)

2.1.3 Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis

2.1.3.1 Método do DNER – Eng. Murilo Lopes de Souza

O método tem como base o trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads na Traffic Volume”, da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foester e R.G. Ahlvin, do corpo de engenheiros do exército dos E.E.U.U e conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO.

Relativamente aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na pista experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo ensaio de CBR, adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER, em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço.

O dimensionamento pelo método do DNER, leva em consideração inicialmente o tráfego, que é calculado em função do número equivalente (N), nesse trabalho, utilizou-se como referência a IP – 05/2004 de São Paulo, obtido segundo a classificação das vias pela Figura 2.5.

FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VIDA DE PROJETOS (ANOS)	VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA		EQUIVALENTE POR VEÍCULO COMERCIAL	N	N característico
			VEÍCULO LEVE	CAMINHÕES E ÔNIBUS			
Via Coletora Principal	Meio Pesado	10	1 501 a 5.000	101 a 300	2.30	1,4 x 10 ⁶ a 3,1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶
Via Arterial	Pesado	12	5.001 a 10 000	301 a 1 000	5.90	1,0 x 10 ⁷ a 3,3 x 10 ⁷	2 x 10 ⁷
Via Arterial Principal ou Expressa	Muito Pesado	12	> 10 000	1 001 a 2.000	5.90	3,3 x 10 ⁷ a 6,7 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷
Faixa Exclusiva de Ônibus	Volume Médio	12	-	< 500	-	3 x 10 ⁶	10 ⁷
	Volume Elevado	12	-	> 500	-	5 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷

Figura 2.5: Classificação das vias e obtenção do número equivalente. (IP-05,2014).

Para os materiais que compõe o pavimento são adotados coeficientes de equivalência estrutural baseados nos resultados da pista experimental da AASHTO, obtidos conforme Tabela 2.1. A terminologia dos coeficientes estruturais são:

- Revestimento: K_R
- Base: K_B
- Sub-base: K_S
- Revestimento: K_{Ref}

Tabela 2.1: Coeficientes de equivalência estrutural (DNER,2006).

Componentes do pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Segundo o DNER, adota-se espessuras mínimas para o revestimento betuminoso, a Tabela 2.2, o valor a ser utilizado está relacionado com o número equivalente (N).

Tabela 2.2: Espessura mínima de revestimento betuminoso (DNER, 2006).

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Com base, no gráfico da Figura 2.6, obtém-se a espessura total do pavimento, em função de N e de I.S. ou C.B.R. Entra-se com N, nas abcissas, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (I.S. ou C.B.R), procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas, a espessura do pavimento.

A Figura 2.7 apresenta simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento, H_m designa, de modo geral, a espessura total do pavimento necessário para proteger um material com CBR = m, h_n designa, de modo geral, a espessura de camada do pavimento com CBR = n.

Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20, a espessura do pavimento necessário para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20, e por esta razão, usam-se a simbologia, H_{20} e h_{20} para designar as espessuras do pavimento sobre sub-base e espessura da sub-base, respectivamente. Os símbolos B e R designam, respectivamente, as espessuras de base e de revestimento.

Uma vez determinadas as espessuras H_m , H_n e H_{20} , com base no gráfico da Figura 2.6, e R pela Tabela 2.2, as espessuras da base (B) e sub-base (h_{20}) e reforço de subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (2.1)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (2.2)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S + h_nK_{Ref} \geq H_m \quad (2.3)$$

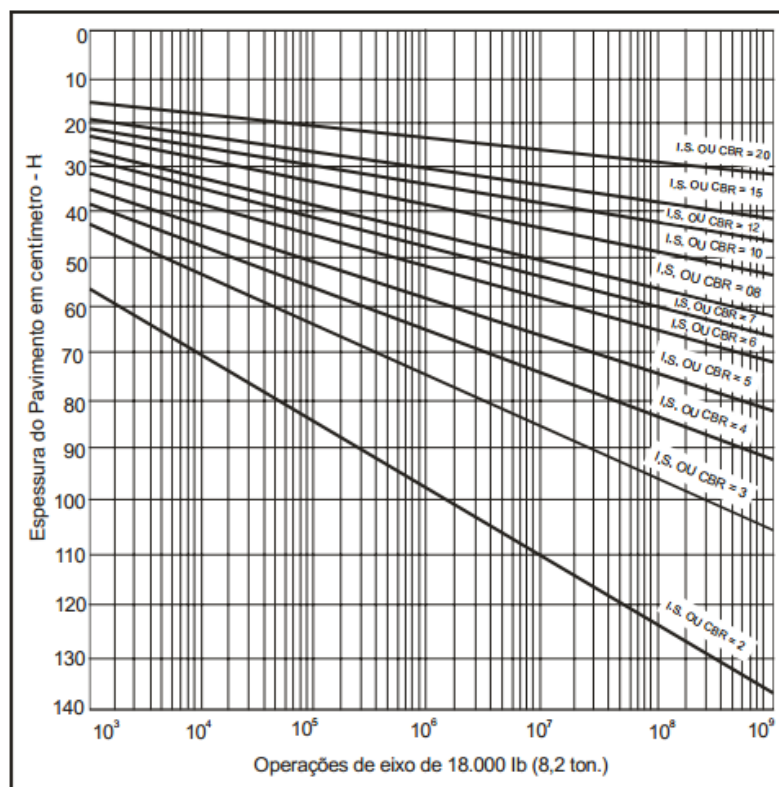


Figura 2.6: Gráfico do número de eixo (N) e espessura do pavimento (DNIT,2006).

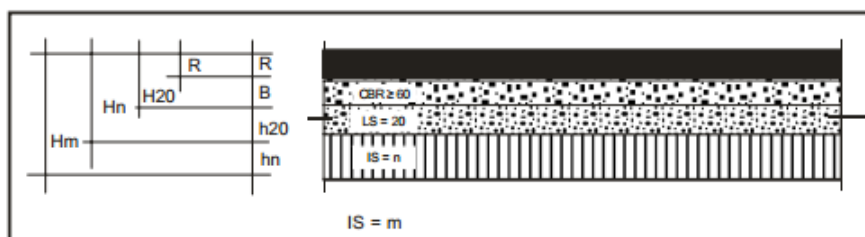


Figura 2.7: Simbologia utilizada no dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNIT,2016).

2.1.3.2 Método adaptado da AASHTO (1993)

O dimensionamento de estruturas de rodovias pavimentadas reforçadas com geossintéticos pode ser feito por meio de vários métodos (IGS,2002). Apresenta-se como sugestão o emprego do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis indicado pelo Guia da AASHTO (1993), cuja equação é:

$$9,36 \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} - \log W_{18} + 2,32 \log(M_R) + Z_R S_0 - 8,27 = 0 \quad (2.4)$$

Onde:

ΔPSI : perda de serventia esperada durante o período de projeto (tipicamente, entre 1,7 e 2,2);

W_{18} : número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 82kN, calculado com os coeficientes da AASHTO;

M_R : módulo de resiliência do subleito (psi);

Z_R : desvio padrão para a probabilidade de êxito que se quer para a estrutura dimensionada (valores entre -0,84 e -1,34 para probabilidade de êxito de 80 e 91%, respectivamente);

S_0 : desvio padrão que leva em conta as incertezas das variáveis medidas e do processo construtivo (tipicamente entre 0,44 e 0,49);

SN : número estrutural que representa a capacidade que o pavimento dimensionado deverá ter para atender ao tráfego estimado para o período de projeto;

O número estrutural é calculado pela equação:

$$SN = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2 m_2 + \alpha_3 D_3 m_3 \quad (2.50)$$

Sendo:

α_i : coeficiente estrutural do material da camada i ;

D_i : espessura da camada i (polegadas);

m_i : coeficiente de drenagem do material da camada i ;

Os coeficientes estruturais (α) são fornecidos pela AASHTO (1993), conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Coeficientes estruturais (AASHTO,1993).

Material	Parâmetro de controle	CE
CAUQ, PMQ a 20°C	MR= 3.160 MPa	0,44
	MR= 2.110 MPa	0,37
	MR= 1.406 MPa	0,30
Bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 33%	0,10
Sub-base granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 23%	0,10
Materiais cimentados (7 dias)	R _{c,7} = 5,6 MPa	0,22
	R _{c,7} = 3,1 MPa	0,16
	R _{c,7} = 1,4 MPa	0,13

A Tabela 2.4 a seguir apresenta os valores recomendados (m_n) para correção dos coeficientes estruturais em função da qualidade do sistema de drenagem e do tempo em que a estrutura estará exposta a elevados teores de umidade.

Tabela 2.4: Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (m_n) para pavimentos (AASHTO,1993).

Valores recomendados para (m_n) para modificação dos coeficientes estruturais dos materiais não cimentados das camadas de base e de sub-base				
Qualidade do sistema de drenagem	Porcentagem do tempo em que a estrutura estará exposta a teores de umidade próximos ao de saturação			
	< 1%	1 – 5%	5 – 25%	>25%
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bom	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Médio	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muito Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Devido à complexidade do ensaio para determinação do módulo de resiliência, são utilizadas diversas correlações com o valor da capacidade de suporte (CBR). A proposta por HEUKELON E FOSTER (1960) é a mais utilizada quando os valores de CBR são menores que 10%. Nessa pesquisa, para determinar o módulo de resiliência do subleito, utilizou-se a Equação 2.6:

$$MR = 100 \times CBR \left(em \frac{kgf}{cm^2} \right) \quad (2.6)$$

TRICHÊS E BERNUCCI (2004, p. 154) relatam ainda que “Em quase todos os experimentos, o principal indicador que quantifica a melhoria do desempenho do pavimento com a inclusão

do geossintético é a taxa de benefício de tráfego, TBR (traffic benefit ratio), definida pela Equação 2.7:

$$TBR = \frac{N_{geo}}{N} \quad (2.7)$$

Onde:

N_{geo} : número de repetições do eixo padrão de 82 kN que produz um determinado afundamento em trilha de roda (T_R) no pavimento com geossintético;

N : número de repetições do eixo padrão de 82 kN que produz o mesmo afundamento em trilha de roda (T_R) no pavimento sem o geossintético.

Dessa forma, para contemplar o aumento da vida útil ou período de projeto que a geogrelha proporciona, pode-se adaptar o método da AASHTO incluindo a TBR conforme a equação 3.12:

$$9,36 \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} - \log \frac{W_{18}}{TBR_{18}} + 2,32 \log(M_R) \quad (2.8)$$

$$+ Z_R S_0 - 8,27 = 0$$

Onde:

TBR: taxa de benefício de tráfego;

SN_{BR} : número estrutural considerando-se a contribuição da geogrelha.

Segundo Manual Brasileiro de Geossintéticos (2015, p.214), o valor usual para a TBR é 2. Preferencialmente, o geossintético deverá apresentar um módulo secante superior a 600 Kn/m.

2.1.4 Controle da compactação no campo

De acordo com o DNIT, o grau de compactação de todas as camadas do pavimento deve atingir no mínimo 100%. São necessárias as realizações de ensaios laboratoriais e de campo para obter-se o grau de compactação da camada.

2.1.4.1 Determinação da umidade em campo

A determinação da umidade obtida em campo obtém-se pelo método da frigideira, do álcool e do Speedy.

2.1.4.1.1 Método da frigideira

Processo mais utilizado nos ensaios de campo para determinação da umidade de solos. Normatizado pela norma DNIT ME 86-64 – Determinação da umidade pelo método expedito da frigideira, consiste em utilizar-se de uma frigideira e um fogareiro, onde se faz uma secagem rápida e violenta, no próprio campo, das amostras de solo.

2.1.4.1.2 Método do Speedy

Ensaio normatizado pela norma DNIT-ME 052-94 – Determinação da umidade obtida pelo método expedito Speedy. Utilizado na maioria das vezes para solos arenosos, pedregulhos e agregados. Este aparelho consiste em um recipiente metálico, hermeticamente fechado, onde são colocadas duas esferas de aço, a amostra do material do qual se quer determinar a umidade e uma ampola de carbureto de cálcio (carbonato de cálcio (CaC_2)). A Figura 2.8, mostra o equipamento utilizado para o ensaio.



Figura 2.8: Equipamento Speedy utilizado para determinação da umidade.

Para determinação da umidade, agita-se o frasco, a ampola é quebrada pelas esferas de aço e o CaC_2 combina-se com a água contida no material, formando o gás acetileno, que exercerá pressão no interior do recipiente, acionando o manômetro localizado na tampa do aparelho. Com o valor da pressão medido, os valores de umidade são obtidos por meio de uma tabela específica, que correlaciona a umidade em função da pressão manométrica e do peso da amostra.

2.1.4.2 Método do frasco de areia

Este ensaio é normatizado através do DNER-ME 92/94 – Determinação da massa específica aparente, in situ, com o emprego do frasco de areia. Executa-se um furo de 10 cm de diâmetro por 15 a 20 cm de altura, retirando-se cuidadosamente o solo, e determina-se o peso úmido (W) do material que ocupava o volume (V) do furo, que não se conhece. Para o cálculo do peso específico natural (γ), resta saber a determinação deste volume.

A calibração do equipamento é realizada da seguinte forma: utilizou-se uma areia (fração compreendida entre 0,8 mm e 0,6 mm), e determinou-se o peso deslocado, que encheu o volume do funil e do rebaixo do orifício da bandeja. Para obter a massa específica aparente da areia: utilizou-se um cilindro de volume conhecido e abriu-se o registro para determinação do peso da areia que encheu o cilindro, por meio da relação, peso e volume, determinou-se a massa específica da areia ($1,391 \text{ g/cm}^3$). A Figura 2.9 mostra os procedimentos feitos em laboratório para calibração do equipamento.

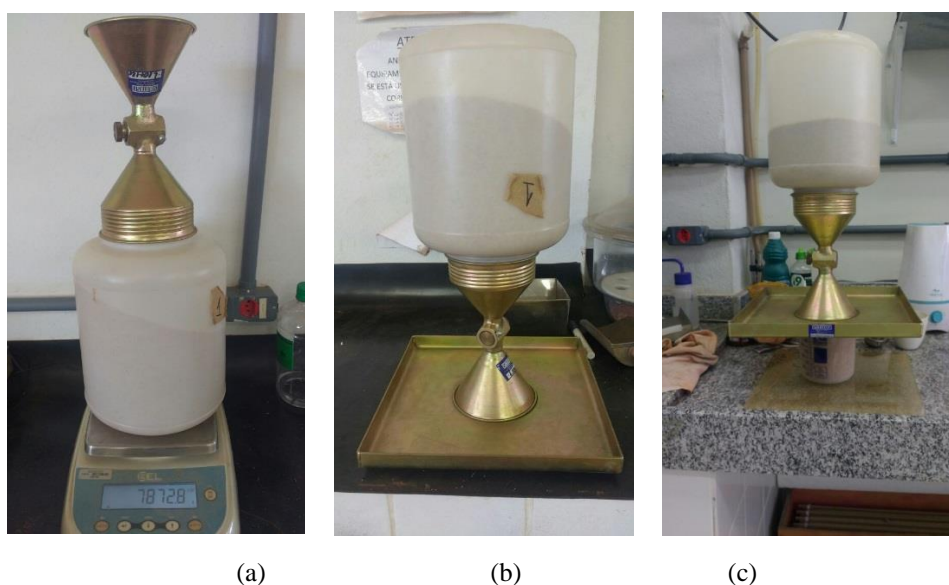


Figura 2.9: Calibração do frasco de areia: (a) pesagem do conjunto; b) peso da areia deslocada; c) peso da areia em um cilindro de volume conhecido.

2.1.4.3 Determinação do grau de compactação no campo

Para ter certeza se a compactação está sendo feita corretamente, deve-se determinar a umidade e a massa específica aparente do material. Para esse controle pode ser utilizado os ensaios mencionados no item 2.1.4.1 para determinação da umidade e o frasco de areia na determinação da massa específica (DNER ME 092/94). O grau de compactação (G_c), é definido pela seguinte Equação 2.9:

$$GC(\%) = \frac{\gamma_s (\text{campo})}{\gamma_{s,\text{max}} (\text{laboratório})} \times 100 \quad (2.9)$$

2.2 GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e aditivos. Os aditivos têm o objetivo de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou alterar os aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico. Grande parte, são fabricados a partir de polímeros sintéticos, derivados de petróleo, embora algumas fibras naturais, como as de junta, sisal e de coco. (LATTI, BUENO,2015).

Esses materiais desempenham inúmeras funções em um projeto de engenharia, como, por exemplo, reforço, impermeabilização, separação entre dois materiais distintos, drenagem de líquidos e gases. (BUENO, VILAR, 2015).

Atualmente os geossintéticos veem ganhando espaço em obras de superestruturas, alterando ou aprimorando técnicas existentes, permitindo associações e combinações com solos e agregados, resultando em soluções mais rápidas, leves, confiáveis e econômicas. (VERTEMATTI,2015).

No Brasil, grande parte dos pavimentos são do tipo flexível. E tem-se verificado que o uso de camadas granulares diretamente sobre os subleitos de baixa capacidade de suporte, pode ocasionar problemas como: diminuição de espessura e resistência da camada granular pela cravação no subleito, e a heterogeneidade da camada granular resulta em menor densificação da parte inferior da camada granular compactada. (VERTEMATTI, 2015).

Em obras viárias, os geotêxtis e as geogrelhas atuam como reforço, elemento separador, filtrante e podem reduzir espessuras das camadas granulares ou aumentar a vida útil de projeto do pavimento. (TRICHÊS,2015).

2.2.1 Geotêxtis

Os geotêxtis são mantas têxtis permeáveis, tecida ou não-tecidas, produzidos geralmente a partir de poliéster (PET) e polipropileno (PP), cujas funções principais na pavimentação são separador ou elemento filtrante com intuito de prevenir a penetração do material da sub-base na camada inferior. Além disso, Holtz et al. (1995) considera que o uso dos geotêxtis é indicado em obras de pavimentação, em que, o subleito apresenta baixa capacidade de resistência.

2.2.2 Geogrelha

As geogrelhas são estruturas em forma de grelha, compostas geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), de poliéster (PET) ou de polipropileno (PP), caracterizando pela baixa deformabilidade e elevada resistência à tração.

O aumento na capacidade estrutural da camada granular com o emprego de geogrelhas se dá por meio de quatro mecanismos principais: intertravamento, tensão de tração, confinamento e separação. (TRICHÊS,2015).

2.3 ESCÓRIA DE ACIARIA

As escórias siderúrgicas são produtos resultantes de processo industrial destinado a obter o ferro gusa líquido, e em seguida o aço. Vários resíduos são oriundos do beneficiamento do aço: escória de alto-forno, pó de alto forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa. As escórias são os resíduos de maior geração neste tipo de processo e existem dois tipos produzidos em larga escala: alto forno: resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa e aciaria: resultante da produção do aço, oxidantes ou redutoras (ROCHA, 2011).

O tipo de resfriamento deste rejeito também afeta a sua granulometria, porque é neste momento que ocorre a maior parte das reações químicas (LIMA *et al.*, 2000). As escorias que são

resfriadas ao ar são, geralmente, inertes devido à cristalização de seus óxidos. Escórias resfriadas rapidamente (ar ou vapor) possuem natureza expandida e tornam-se leves. Escórias resfriadas bruscamente (jato d' água) são vítreas, com granulometria semelhante à de areia de rio, ficando com estrutura porosa e textura áspera. As escórias ácidas costumam ser mais densas, enquanto que as básicas possuem estrutura mais porosa ou vesicular (GEYER, 2001 e CASTELO BRANCO, 2004).

Durante o processo de produção de produção do aço são eliminados carbono, CaO (óxido de cálcio ou cal), os íons de alumínio, silício e fosforo que torna, o aço frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras. Estes elementos e compostos eliminados entram na composição da escória, geralmente compostos por: silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcia (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO) e CaO, entre outros. A composição química da escória, é variável, sendo caracterizada pelos seguintes fatores:

- A escória de alto forno não contém cal livre a ser liberado;
- A escória de aciaria contém cal cristalizado, que retém a cal livre e se expande em contato com a umidade.

O Brasil é um grande gerador desses resíduos e o Estado de Minas Gerais possui um dos maiores parques siderúrgicos do país, respondendo pelo maior percentual de produção do aço brasileiro. Porém, essa grande produção de aço gera enorme quantidade de resíduos que não são aproveitados, e que ocupam extensas áreas de estocagem com sérios danos ambientais. Dessa forma, torna-se imprescindível a busca de alternativas para a utilização dessa gigantesca quantidade de escória disponível nos pátios das siderúrgicas, e o setor de pavimentação aparece como um dos mais promissores a realizas essa tarefa (IBS,2017).

O uso da escória de aciaria na pavimentação rodoviária justifica-se pelas boas propriedades físicas, alta capacidade de resistência mecânica, baixo custo de aquisição e ainda por ser subproduto da produção do aço, em que seus estoques se localizam a pequenas distâncias de centros urbanos.

As escórias podem ser utilizadas nas camadas granulares do pavimento (reforço de subleito, sub-base e base) e, adicionalmente, como agregado nos revestimentos betuminoso. A utilização desse material alternativo em obras viárias de baixo custo pode beneficiar as populações de baixa renda em localidades carentes de infraestrutura (PEDROSA,2011).

As escórias apresentam excelentes características físicas, como: alta resistência mecânica, bom adensamento, alta rugosidade, mobilidade para enquadrar nas faixas granulométricas. Porém, apresentam elevado índice de absorção e alta expansibilidade quando não curadas.

O DNER-EM 262/94, apresenta requisitos gerais e específicos concernentes as escórias de aciaria, visando sua aplicação em camadas do pavimento. Entre essas, estão:

- Máximo de 3,0% de expansão;
- Isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais;
- Granulometria: 40% até 12,7 mm, e 60% entre 12,7 e 50,8 mm de abertura nominal e atender a granulometria de projeto;
- Absorção de água: 1,0% a 2,0% em peso;
- Massa específica: 3,0 a 3,5 g/cm³
- Massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/dm³;
- Desgaste Los Angeles: $\leq 25,0\%$ para sub-base, base e revestimento;
- Durabilidade ao sulfato de sódio: 0,0% a 5,0%, em 5 ciclos.

No Brasil, várias rodovias foram pavimentadas com escória de alto-forno ou de aciaria, podendo-se citar a BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), a RJ-157 (Barra Mansa – Divisa RJ/SP), a RJ – 141 (BR-393-Vargem Alegre), a BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), 13 km da rodovia que liga Volta Redonda e o distrito Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa), várias ruas do município de Volta Redonda, Resende, Barra do Piraí, Itaguaí, e Magé, todos localizados no Estado do Rio de Janeiro, do município de Mogi das Cruzes (SP), revestimentos primários na região Sul Fluminense. (CASTELO BRANCO, 2004).

SILVA et al. (2002) relatam que o uso da escória de aciaria tem apresentado bons resultados no Espírito Santo. Como exemplo a pavimentação urbana de mais de 100 km, realizados em 1986, com escória de aciaria na base e sub-base, que após 14 anos de tráfego intenso apresentava-se em bom estado.

CARVALHO FILHO (2006) relata que no município de Praia Grande, Estado de São Paulo, a prefeitura utilizou escória nas obras de 1.200.000 m² de ruas, inclusive em camadas asfálticas.

Recentemente, a rodovia: BR-381, trecho entre contorno de Coronel Fabriciano – Ipatinga, pavimentou-se a base e sub-base com escória de aciaria. Além disso, ruas e avenidas da cidade de Ipatinga e Coronel Fabriciano, foram pavimentadas com esse material.

Neste contexto, um estudo detalhado pode ser feito para que se utilize a escória de aciaria como agregado em uma das camadas do pavimento, também na região do Alto do Paraopeba - MG. Nesse trabalho, o objetivo foi caracterizar fisicamente e mecanicamente o agregado siderúrgico, e utiliza-lo como material de sub-base para um trecho experimental, construído no campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João Del Rei, no município de Ouro Branco – MG.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

O campo experimental onde se instalou o trecho de estudo localiza-se sobre um solo residual de gnaiss de cor marrom claro variegado, sendo o mesmo o subleito, conforme Figura 3.1. Como elemento de reforço do solo, utilizou-se uma geogrelha (Figura 3.2) e o geotêxtil tecido (Figura 3.3), fornecidos pela GeoSoluções, cujas as características técnicas encontram-se detalhadas na Tabela 3.1 para a StrataGrid SGi60 e na Tabela 3.2 para StrataTex W5050. Para agregado utilizou-se a escória de aciaria, fornecida pela empresa Gerdau em 4 diferentes faixas com cerca de 24 toneladas, conforme retratado na Figura 3.4.



Figura 3.1: Retirada de amostras deformadas de solo do campo experimental.



Figura 3.2: Geogrelha StrataGrid



Figura 3.3: Geotêxtil tecido (StrataTex W).

Tabela 3.1: Características técnicas da Geogrelha StrataGrid SGi 60. (Geosoluções,2017)

Geogrelha: StrataGrid SGi 60			
Resistência característica, Tchar (MARV)	ASTM D 6637	(kN/m)	60
Fator de redução para fluência (120 anos), FRcr	ASTM D 5262/ ASTM D 6992	-	1,51
Fator de redução para danos de instalação (areia, silte e argila), Frid	ASTM D 5818	-	1,07
Peso molecular/Grupos carboxílicos finais (CEG)	ASTM D 4603/ ASTM D 7409	(mmol/kg) (g/mol)	> 25.000/<30

Tabela 3.2: Características técnicas do Geotêxtil Tecido: StrataTex W5050. (Geosoluções,2017)

Geotêxtil Tecido: StrataTex W 5050			
Resistência nominal Longitudinal (MD), TN	ABNT NBR ISO 10319	kN/m	50
Resistência nominal Transversal (CD), TN	ABNT NBR ISO 10319	kN/m	50
Resistência ao rasgo rapezoidal	ASTM D 4533	Kn	0,5
Resistência ao puncionamento	ABNT NBR 13359	Kn	5
Permissividade	ASTM D 4491	1/s	0,02
Abertura de filtração (95)	AFNOR G 38017	mm	100



Figura 3.4: Escória de aciaria em diferentes faixas granulométricas comercializada pela Gerdau.

3.2 MÉTODOS

A caracterização presente no subleito e da escória desenvolveu-se nas instalações do Laboratório de Geotécnica e de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto Paraopeba (UFSJ/CAP).

3.2.1 Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios laboratoriais de caracterização dos solos constituem uma das componentes de grande relevância na engenharia geotécnica. Um adequado estudo características do solo ocorrentes em uma obra, auxiliam o desenvolvimento de um projeto de pavimentação. Para análise das características do subleito sobre o qual foi assentado os geossintéticos e a sub-base, foi realizado diversos ensaios que forneceram números para avaliação de seu comportamento, e que foram tomados como base para dimensionamento das camadas subjacentes.

As características e propriedades do solo analisado foram obtidas mediante a realização dos ensaios a seguir listados:

- Preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização (NBR 6457/86);
- Análise granulométrica por peneiramento (DNER-ME 080/94);
- Limites de liquidez (NBR 6459/84);
- Limite de plasticidade (NBR 7180/84);
- Índice de grupo (DNIT-2006);

- Classificação dos solos (AASHTO 1993);
- Compactação do solo (NBR 7182/86);
- Índice de suporte Califórnia (NBR 9895/87).

3.2.1.1 Preparação e retirada do solo em campo

Inicialmente, retirou-se aproximadamente 20 cm da camada de matéria orgânica no local do trecho experimental, conforme Figura 4.1. Fez-se um levantamento da quantidade necessária de solo e coletou-se amostras deformadas para realização dos ensaios. Após a coleta, conforme a NBR 6457/86 preparou-se o solo para os ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia e de caracterização (análise granulométrica, determinação do limite de liquidez e plasticidade). Na Figura 3.5 está ilustrado o procedimento para preparação das amostras.



Figura 3.5: Preparação do solo para ensaios. (a) Retirada de matéria orgânica para coleta do solo; (b) Destorramento do solo.

3.2.1.2 Análise granulométrica do solo

Para determinar a curva granulométrica do solo, realizou-se o ensaio da análise granulométrica por peneiramento pela norma do DNIT 080/94. Este método pode ser resumidamente descrito como se segue:

- Preparação da amostra: seca ao ar, reduziu-se o material e passou na peneira 2,0 mm para determinação da umidade higroscópica;
- Lavar o material nas peneiras 2,00 mm e 0,075 mm;

- Peneirar o material conforme malhas das peneiras 4,75 – 2,00 – 1,2 – 0,60 – 0,42 – 0,30 – 0,15 e 0,075 mm;
- Determinar a curva granulométrica do solo.

3.2.1.3 Limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez é executado conforme recomendações da NBR 6459/84. Para execução do ensaio deve-se calibrar o aparelho de Casagrande. Posteriormente, colocou-se o material na concha e fez-se uma ranhura, aplicando-se os golpes, de modo que, cubra o intervalo de 35 a 15 golpes, e haja pelo menos três pontos de ensaio. Com os resultados, fez-se uma reta (teor de umidade x número de golpes). O teor de umidade correspondente a 25 golpes, é o limite de liquidez do solo. A Figura 3.6 mostra a realização do ensaio utilizando-se o aparelho de Casagrande.



Figura 3.6: Ensaio de limite de liquidez do solo.

3.2.1.4 Limite de plasticidade

Para determinar o limite de plasticidade, utilizou-se a NBR 7180/84. Tomou-se metade da quantidade de amostra preparada de acordo com a NBR 6457/86, adicionou-se água e formou-se uma pequena bola. Deve-se rolar o material até atingir uma formação cilíndrica de 3 mm e comprimento de 100 mm (o que se verifica com o gabarito de comparação). Após fragmentação, transferiu-se partes do solo e determinou-se a umidade conforme NBR 6457/86. Na Figura 3.7 está ilustrado o ensaio realizado com gabarito de comparação.



Figura 3.7: Realização do ensaio de limite de plasticidade.

3.2.1.5 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade (IP) ajuda a definir a plasticidade de um solo, foi obtido por meio da diferença entre os limites de liquidez e plasticidade.

3.2.1.6 Índice de grupo

O índice de grupo (IG) define a “capacidade de suporte” do terreno de fundação de um pavimento. Os seus valores extremos representam solo ótimos (IG=0) e solos péssimos (IG=20). De posse dos valores dos limites de consistência e da curva granulométrica determina-se o IG.

3.2.1.7 Classificação dos solos conforme o sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

O sistema de classificação da AASHTO, leva em consideração os limites de Atterberg (Limite de liquidez, limite de plasticidade e Índice de plasticidade), a granulometria dos solos e o índice de grupo. De posse dos resultados, utiliza-se a tabela da AASHTO para classificação dos materiais constituintes nos solos.

3.2.1.8 Compactação

Após a coleta e preparação do solo conforme a NBR 6457/86. E com base, nos valores dos limites de consistência, esperou-se que a umidade ótima do solo estivesse em torno de 25%,

dessa forma, umidificou-se e homogeneizou-se o solo com três pontos abaixo e três pontos acima da umidade esperada de 25% ($\pm 2\%$, $\pm 4\%$, $\pm 6\%$). Procedeu-se o ensaio conforme recomendações da NBR 7182/86, na realização do ensaio foi utilizado o cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor), o soquete pequeno (2500 ± 10 g) e uma energia de compactação normal. Por meio do ensaio, obteve-se um gráfico da massa específica aparente pela umidade. A Figura 3.8 mostra os procedimentos realizados durante a execução do ensaio.

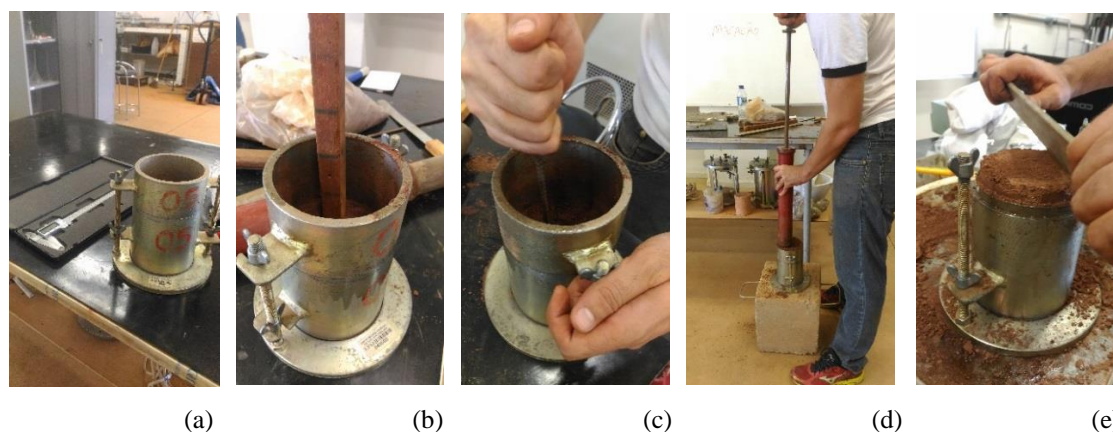


Figura 3.8: Ensaio de compactação do solo: (a) Medição do cilindro; (b) Verificação da compactação das camadas; (c) Escarificação após a compactação; (d) Compactação da última camada; (e) Nivelamento do solo.

3.2.1.9 CBR ou Índice de suporte Califórnia

Neste estudo, os ensaios de CBR, ou Índice de suporte Califórnia, foram executados conforme as recomendações da norma brasileira da NBR 9895/87. Preparou-se amostras de solos para umidade ótima obtida na curva de compactação. Os corpos de prova foram compactados na energia Proctor normal. Após, foram imersos em uma caixa d` água durante 4 dias para avaliação da expansão, conforme ilustrado na Figura 3.9. Decorridos esse período, realizou-se o ensaio de penetração na prensa de CBR para determinação da capacidade de suporte do subleito, a Figura 3.10 mostra a realização do ensaio.

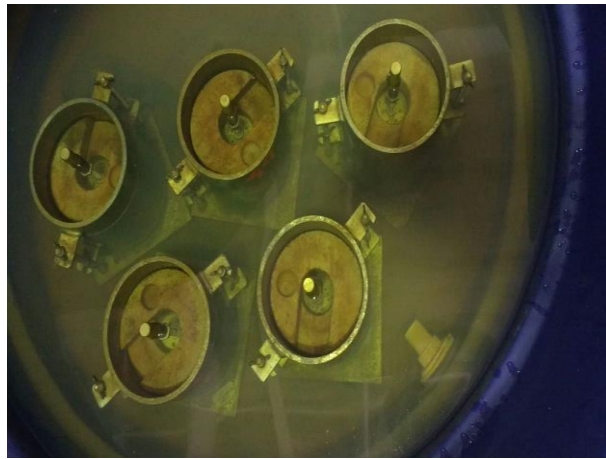


Figura 3.9: Imersão dos corpos de prova.

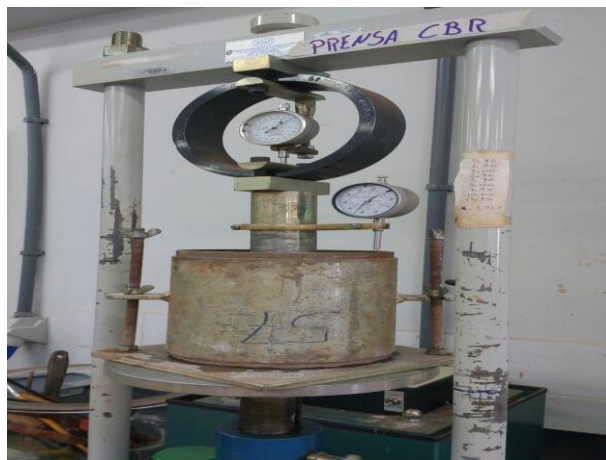


Figura 3.10: Realização do ensaio de CBR na prensa.

3.2.2 Ensaios de caracterização física e mecânica da escória de aciaria

O comportamento mecânico das construções rodoviárias, perante carregamento, depende das características físicas e propriedades dos materiais utilizados nessas construções. Os agregados siderúrgicos constituintes nas camadas de base e sub-base, tem função de contribuir na estabilidade mecânica, suportando as tensões impostas na superfície e no interior do pavimento.

Um estudo adequado das propriedades físicas e mecânicas da escória são fundamentais visando sua aplicabilidade em obras de infraestrutura, entre essas estão:

- Análise granulométrica (DNER-ME 083/98);
- Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98);
- Resistência ao esmagamento (DNER-ME 197/97);

- Expansibilidade livre (PMT-130, adaptado pelo DER/MG em 1982);
- Massa específica dos agregados graúdos e absorção (DNER-ME 081/98);
- Massa específica dos agregados miúdos (DNER-ME 194/98);
- Durabilidade ao sulfato de sódio (DNER-ME 089/94);
- Índice de forma (DNER-ME 086/94);
- Compactação da escória (DNER-ME 129/94);
- CBR ou Índice de suporte Califórnia (ISC) (DNIT 049/14).

3.2.2.1 Análise granulométrica

A empresa Gerdau, comercializa a escória de aciaria nas faixas estabelecidas pela empresa: faixa 0, 1, 2 e 3. Forneceu-se cerca de 24 toneladas de escória nessas faixas. No laboratório, realizou-se o ensaio para as faixas 0 e 1. E peneirou-se a escória 0 para obtenção de finos, de modo que a quantidade que passasse 100% de material na peneira #10, posteriormente, até atingir cerca de 20 kg de material e realizou-se o ensaio de granulometria nessa amostra. Os ensaios foram realizados, conforme a norma do DNER-ME.

Após realizado os ensaios de granulometria, das escórias: Escória 0, Escória 1 e parcela fina (Escória F), utilizou-se o método das tentativas para saber qual a porcentagem de escória iria compor as faixas Faixas I e III do DER-PR ES-P 05/05.

Para a realização da mistura das diferentes percentagens das escórias nas faixas I e III do DNER-PR, utilizou-se uma betoneira. E a medida que foram realizados esse procedimento, armazenou-se no laboratório as misturas e controlou-se umidade. Na Figura 3.11 está ilustrado o processo realizado.



(a)



(b)

Figura 3.11: Armazenamento das misturas de escória de aciaria conforme faixas utilizadas no trabalho: (a) Preparação do material, (b) Faixas estocadas.

3.3.2.2 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles permite determinar a abrasão sofrida por materiais utilizados como agregados, quando colocado na máquina de Los Angeles juntamente com a carga abrasiva, o ensaio é padronizado pelo DNER-ME 035/98. De acordo, com a faixa granulométrica obtida na mistura, utilizou-se 5kg de materiais passantes nas peneiras 38 a 9,5 mm (graduação A), e aplicou-se 500 rotações a uma velocidade média de 31,5 rpm e uma carga abrasiva de 5000 ± 25 g (12 esferas). E determinou-se a abrasão “Los Angeles” do agregado.

3.2.2.3 Resistência ao esmagamento

O ensaio de resistência ao esmagamento é normatizado pelo DNER-ME 197/97. Utilizou-se o material que passa pela peneira 12,5 mm e que fica retido na peneira 9,5 mm, compactando-o em um cilindro padrão. Depois, colocou-se o conjunto na máquina de ensaio, obteve-se a massa final do material retido na peneira 2,4 mm e calculou-se a resistência ao esmagamento da escória.

3.2.2.4 Expansibilidade livre

Neste estudo, utilizou-se o método do ensaio PTM-130, formulado na Pensilvânia, EUA e adaptado em 1982 pela Divisão de Estudo de Materiais do DER/MG. A realização do ensaio deu-se da seguinte forma: compactou-se a escória de aciaria no cilindro de Proctor na energia intermediária de compactação, com uso do soquete grande. E deixou-se os corpos de prova submersos durante o período de 45 dias para avaliar a expansibilidade livre da escória. A Figura 3.12 mostra os corpos de prova imersos durante o ensaio.



Figura 3.12: Corpos de prova imersos para realização de ensaio de expansibilidade livre.

3.2.2.5 Massa específica dos agregados graúdos e absorção

O ensaio para determinação da densidade aparente de agregados graúdos e da absorção foi executado pelo método do DNER-ME 081/98. Deve ser desprezado todo o material passante na peneira 4,8 mm através de peneiramento a seco, onde a massa seca da amostra é medida em balança e o volume é medido na balança hidrostática. Para o cálculo da massa específica dos grãos, utiliza-se o volume da amostra sem os vazios permeáveis. E, para o cálculo da massa específica aparente dos grãos utiliza-se o volume da amostra com os vazios permeáveis. Posteriormente, calcula-se a absorção por meio da relação entre a massa do agregado em condição saturada e a massa do agregado seco em estufa.

3.2.2.6 Massa específica dos agregados miúdos

O ensaio para determinação da densidade aparente de agregados miúdos é executado pelo DNER-ME 084/95. Considera-se todo o material passante na peneira 4,8 mm através de peneiramento a seco, onde a massa seca da amostra é medida em balança e o volume é medido na balança hidrostática. Para o cálculo da massa específica dos grãos, utiliza-se o volume da

amostra sem os vazios permeáveis. E, para o cálculo da massa específica aparente dos grãos utiliza-se o volume da amostra com os vazios permeáveis.

3.2.2.7 Índice de forma

Para determinação do índice de forma da escória de aciaria utilizou-se o método de ensaio do DNER-ME 086/94. Por meio da realização desse procedimento determina-se a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado siderúrgico.

3.2.2.8 Compactação

Após a mistura e armazenamento das faixas estudadas, determinou-se a curva de compactação das escórias utilizando a norma do DNER-ME 129/94. Preparou-se o material esperando que a umidade ótima da escória estaria em torno de 3%, com isso, umidificou-se e homogeneizou-se o agregado com 4 pontos abaixo e 4 pontos acima da umidade esperada ($\pm 0,5$, $\pm 1,0$, $\pm 1,5$, $\pm 2,0$). O ensaio foi realizado com cilindro metálico pequeno, soquete grande e compactado na energia de compactação intermediária.

3.2.2.9 CBR ou Índice de suporte Califórnia (ISC)

Os ensaios de CBR, ou Índice de suporte Califórnia, foram executados conforme as recomendações do DNER-ME 129/94. Após, obter a curva de compactação de cada faixa granulométrica, preparou-se amostras de escórias para umidade ótima obtida nas respectivas curvas de compactação. Os corpos de prova foram compactados na energia intermediária. Posteriormente, foram imersos em uma caixa d' água durante o período de quatro dias para avaliação da expansão, conforme ilustrado na Figura 3.13. Decorridos esse período, realizou-se o ensaio de penetração na prensa de CBR para determinação da capacidade de suporte da sub-base, a Figura 3.14 mostra a realização do ensaio.

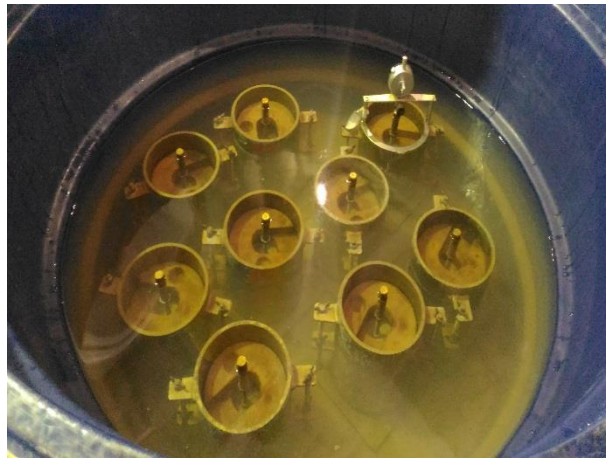


Figura 3.13: Imersão dos corpos de prova das faixas I e III do DER-PR.



Figura 3.14: Realização do ensaio de CBR da escória na prensa.

3.2.3 Trecho experimental

3.2.3.1 Métodos de dimensionamento de pavimento flexíveis

O dimensionamento e execução do trecho experimental é o objeto do trabalho. Sabe-se que para o dimensionamento faz-se necessário saber as propriedades dos materiais que irão compor o mesmo. Principalmente, a capacidade de suporte do mesmo, obtidos pelo ensaio de CBR ou ISC.

Para estudo e dimensionamento do trecho experimental do trabalho utilizou-se o método do DNER desenvolvido pelo Eng. Murilo Lopes de Souza (3ªEd. 2006) e o método adaptado pela AASHTO (1993).

3.2.3.2 Execução e controle da compactação

Durante a realização da pista experimental são necessários alguns ensaios e procedimentos, de modo que, se tenha um controle da compactação das camadas do pavimento em campo. Na prática, o procedimento do controle da compactação se dá por meio da comparação dos parâmetros de compactação obtidos em laboratório (umidade ótima e peso específicos) e os atingidos em campo.

Inicialmente, alocou-se as estacas no trecho experimental, conforme a Figura 3.15, e referenciou-se à estaca 1 (E1), com auxílio do GPS, e obteve-se altitude de 1069 m, S $W20^{\circ}31'14.27''$ e WO $43^{\circ}44'39.62''$. Na Figura 3.16, está retratada um croqui do trecho experimental. A execução do trecho experimental deu-se por várias etapas, abaixo estão detalhas as etapas realizadas.



Figura 3.15: Alocação das estacas no campo experimental.

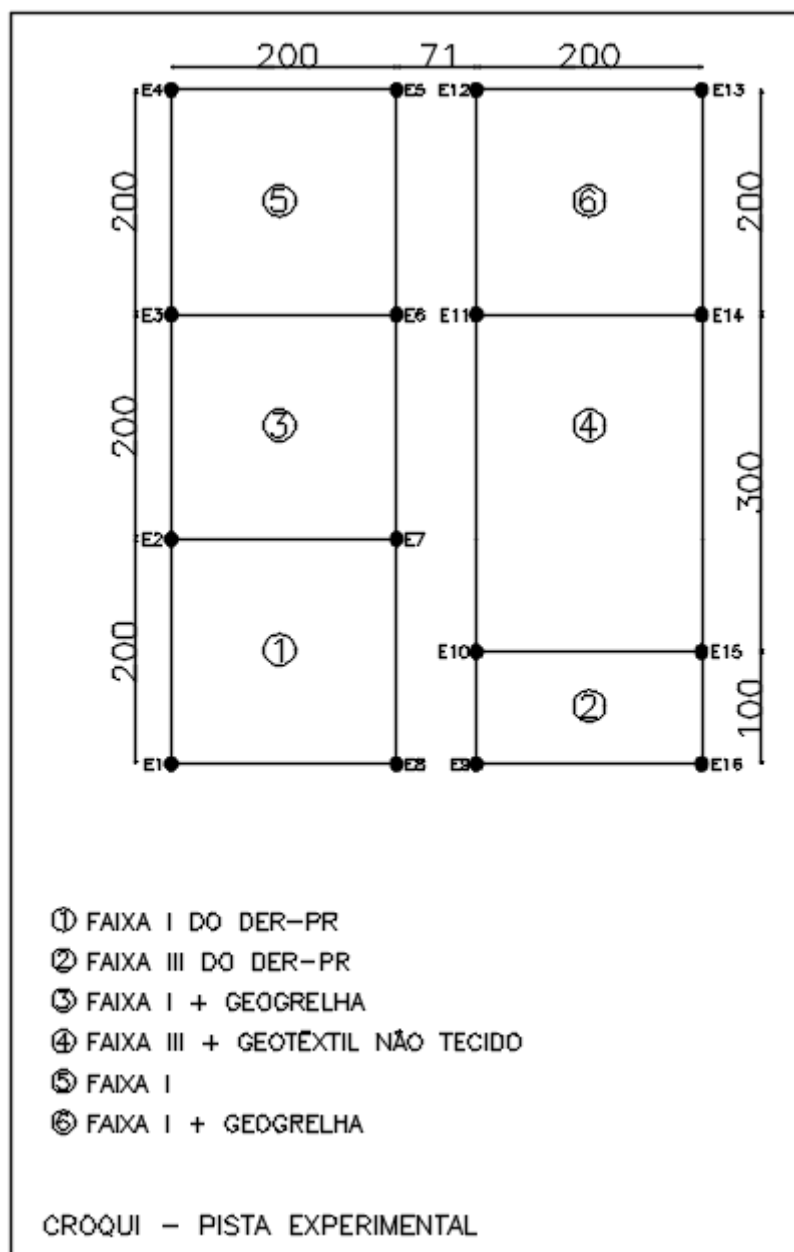


Figura 3.16: Croqui do trecho experimental

3.2.3.2.1 Subleito

O subleito é a última camada do pavimento, para compactação da camada de sub-base é necessário a preparação e compactação do mesmo. A preparação do subleito deu-se da seguinte forma:

1. Retirou-se cerca de 20 cm de matéria orgânica com auxílio da retroscavadeira, conforme observado na Figura 3.17.

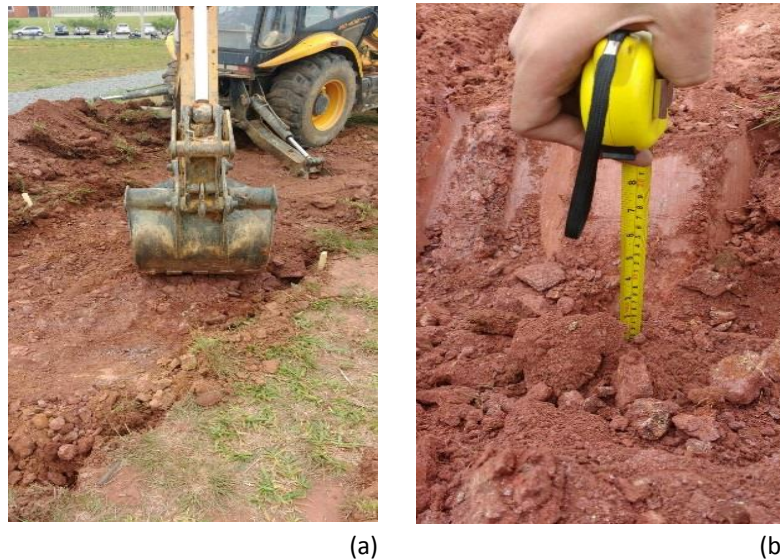


Figura 3.17: Retirada da matéria orgânica: (a) Uso da retroescavadeira para retirar a matéria orgânica (b) Verificação da espessura da camada retirada em cerca de 20 cm.

2. Após, retirada da matéria orgânica, escarificou-se o subleito (cerca de 20 cm), e retirou-se amostras para realização do teste de umidade pelo método da frigideira. A umidade do campo foi de 29,4%, pelo fato dela está aproximadamente 2% da ótima (27,1%), procedeu-se com a escarificação do subleito com auxílio do ancinho, conforme retratado na Figura 3.18.

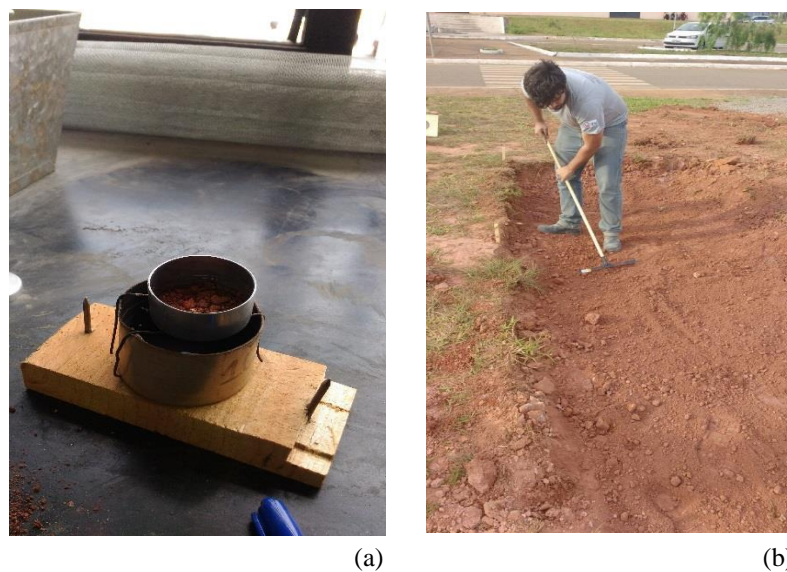


Figura 3.18: Preparação do subleito para compactação: (a) Teste da umidade pelo método da frigideira; (b) Escarificação e homogeneização do subleito com ancinho.

3. Compactou-se o subleito passando a retroescavadeira inúmeras vezes, de modo que, atuasse como um rolo pé de carneiro. Posteriormente, compactou-se a camada do subleito com uso de placa vibratória, o equipamento utilizado está ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19: Compactação da camada do subleito com uso da placa vibratória.

4. Após, a compactação do subleito, utilizou-se o método do frasco de areia para obtenção da massa específica aparente seca, em campo, e a umidade foi adquirida pelo método da frigideira. E calculou-se o grau de compactação por meio da Equação 2.9. A Figura 3.20 mostra o ensaio realizado “in situ”.



(a)



(b)

Figura 3.20: Método do frasco de areia: (a) Abertura de uma concavidade cilíndrica no solo;(b) Enchimento da concavidade com o frasco de areia de massa específica conhecida.

3.2.3.2.2 Sub-base

Para realização da compactação da camada de sub-base são necessários alguns procedimentos, esses foram realizados da seguinte forma:

1. Inseriu-se os geossintéticos nas sessões do trecho experimental, antes de realizar o lançamento das escórias, a Figura 3.21 mostra a colocação da geogrelha entre a camada do subleito e a sub-base. E na Figura 3.22 está ilustrado a inserção do geotêxtil tecido.



Figura 3.21: Inserção da geogrelha entre a camada de subleito e a sub-base.



Figura 3.22: Colocação do geotêxtil tecido entre a camada de subleito e a sub-base.

2. As misturas armazenadas no laboratório das faixas I e III, estavam com umidade de 0,5%. Dessa forma, para chegar na umidade ótima, conforme a curva de compactação das faixas estudadas, realizou-se a homogeneização das misturas com auxílio da betoneira, esse procedimento está ilustrado na Figura 3.23.



Figura 3.23: Homogenização da escória aplicada na sub-base com auxílio da betoneira.

3. Lançou-se e assentou-se a escória de aciaria com auxílio da retroscavadeira, em cada sessão, conforme o croqui do trecho experimental (Figura 3.16). Posteriormente, procedeu-se a compactação da camada de sub-base com uso da placa vibratória, na Figura 3.24 mostra a realização desse procedimento.



Figura 3.24: Compactação da sub-base com uso da placa vibratória.

4. Após, a compactação do subleito, utilizou-se o método do frasco de areia descrito no item 2.1.4.2, para obtenção da massa específica aparente seca, em campo, e realizou-se o método do Speedy para determinação da umidade durante esse procedimento. Na Figura 3.25 percebe-se a realização do ensaio do frasco de areia.



Figura 3.25: Ensaio do frasco do frasco e método do speedy para obtenção da umidade.

3.2.3.3 Averiguar visualmente a camada de sub-base

A realização de análise na sub-base do trecho experimental são de extrema relevância. Pois, por meio delas, conseguimos verificar se a camada sofreu com danos causados pelas intempéries físicos, se eles causaram alguma trinca ou fissuras na camada de sub-base. Para isso, tirou-se fotos após a execução da pista experimental (no dia 24/10/17), e analisou-se visualmente o comportamento do pavimento, após um extenso período de chuvas intensa no município de Ouro Branco-MG.

3.2.3.4 Observar visualmente os danos construtivos nos geossintéticos

Com intuito de uma avaliação preliminar nos geossintéticos. Analisou-se os danos construtivos ocasionados pela compactação das escórias de aciaria, nesses produtos, após a execução do trecho experimental. Com auxílio de uma picareta, conforme ilustrado na Figura 3.26, retirou-se amostras de geogrelha e geotêxtil para verificação visual dos danos construtivos nesses produtos.



(a)



(b)

Figura 3.26: Retirada de amostras de geossintéticos no trecho experimental:(a) Geotêxtil tecido; (b)Geogrelha.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBLEITO

4.1.2 Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios laboratoriais de caracterização dos solos constituem uma das componentes de grande relevância na engenharia geotécnica.

4.1.2.1 Análise granulométrica

O ensaio da curva granulométrica foi realizado conforme as especificações técnicas da norma do DNIT ME (080, 1994). A Tabela 4.1, indica as aberturas das malhas e as porcentagens passantes nas peneiras da ASTM. A Figura 4.1, representa a curva granulométrica do solo.

Tabela 4.1: Granulometria do solo do subleito.

Peneira n°	Abertura (mm)	Passante (%)
4	4,750	99,96
10	2,000	98,87
16	1,180	91,27
30	0,600	61,93
40	0,425	54,61
50	0,300	38,71
100	0,150	14,16
200	0,075	0,63
Fundo	0	0,00

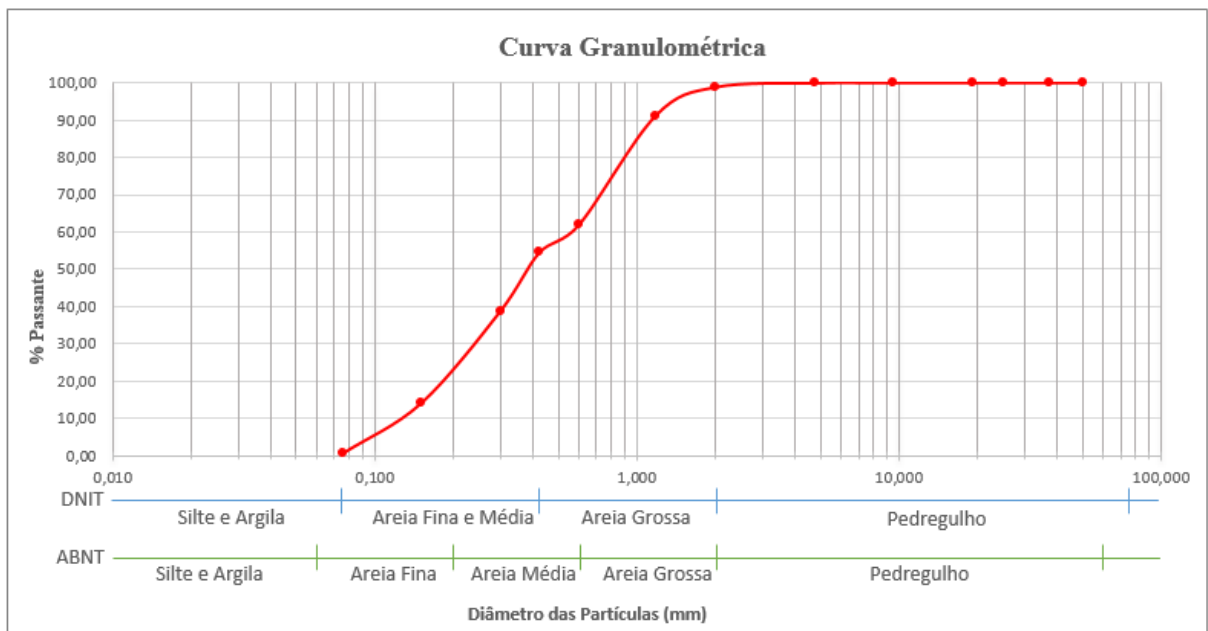


Figura 4.1: Curva granulométrica do subleito.

4.1.2.2 Limite de liquidez

O ensaio do limite de liquidez foi realizado conforme a NBR 6459/84. De acordo, com o gráfico da figura 4.2, ao atingir 25 golpes o valor encontrado foi de 51%.

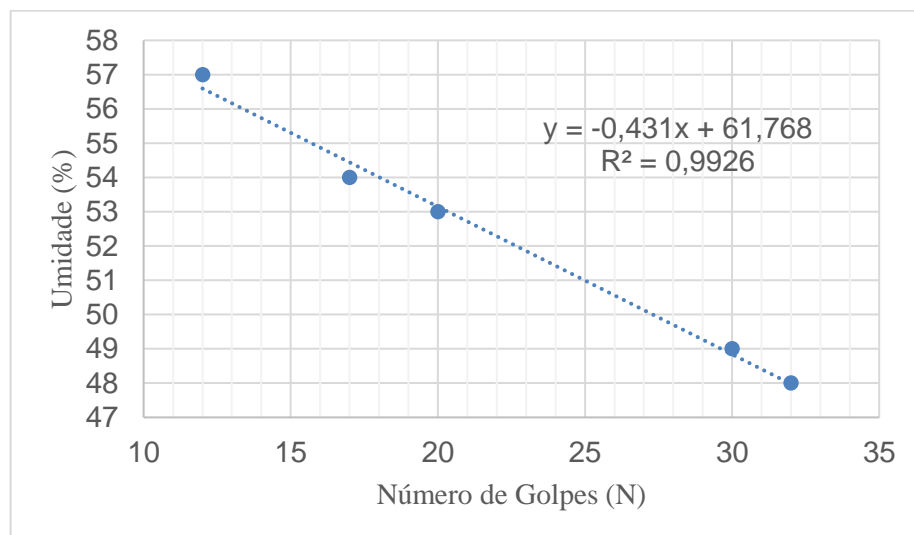


Figura 4.2: Gráfico do limite de liquidez.

4.1.2.3 Limite de plasticidade

O ensaio do limite de plasticidade foi feito de acordo com a NBR 6457/86, e encontrou-se o valor de 39%.

4.1.2.4 Índice de plasticidade

Com base, nos valores obtidos de limite de liquidez e limite de plasticidade, o valor do índice de plasticidade foi de 12,0%.

4.1.2.5 Índice de grupo

Conforme a equação do índice de grupo do Manual de Pavimentação do DINIT 2006, obteve-se os seguintes valores para “a”, ”b”, ”c” e “d”:

- a = 0;
- b = 0;
- c = 10,6;
- d = 0,6;

Substituindo-se os valores encontrados na equação, o valor do IG = 0.

4.1.2.6 Classificação dos solos conforme o sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

De posse dos resultados (LL=51,0%; LP=39%; IP=12,0% e IG=0), entrou-se com os dados na tabela de classificação dos solos da AAHTO de 1993, e classificou-se o grupo em A-2-7 (Solo arenoso com finos argilosos de média plasticidade).

4.1.2.7 Curva de compactação

O resultado da curva de compactação encontrado, conforme o item 3.2.1.8. está ilustrado na Figura 8. Percebe-se que o valor encontrado para umidade ótima e massa específica aparente seca máxima foram 27,1% e 1,462 g/cm³, respectivamente.

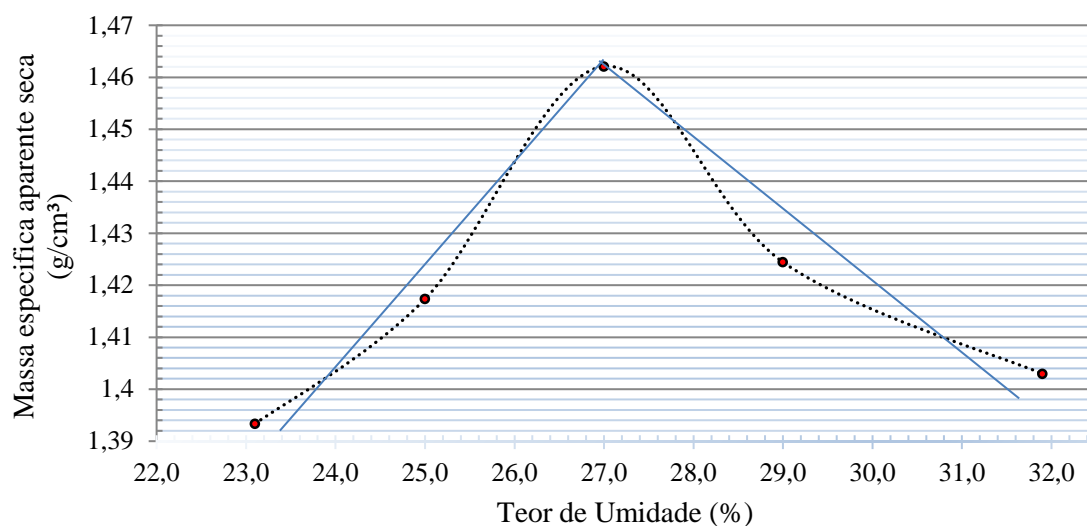


Figura 4.3: Curva de compactação do solo do subleito.

4.1.2.8 Índice de suporte Califórnia e expansão

Inicialmente, após a realização do ensaio, calculou-se a expansão conforme a Tabela 4.2. E calculou-se a capacidade de suporte do solo, conforme a NBR 9895/87 e obteve-se o resultado expresso na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Resultado expansão do solo do subleito.

Corpo de Prova	W (%)	Expansão CBR (%)	Expansão CBR _{média} (%)	Desvio Padrão (%)
1	27,08	3,64		
2	27,51	3,02	3,18	0,33
3	27,08	2,88		

Tabela 4.3: Resultado do CBR do solo do subleito.

Corpo de Prova	W (%)	CBR (%)	CBR _{médio} (%)	Desvio Padrão (%)
1	27,08	4,80		
2	27,51	4,54	4,5	0,27
3	27,08	4,15		

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SUB-BASE

4.2.1 Ensaios de caracterização da escória

4.2.1.1 Análise granulométrica

Os ensaios foram realizados, conforme a norma do DNIT – ME (083,1998). A Tabela 4.4, indica as percentagens de escória que passam nas peneiras. E a Figura 4.4, mostra a curva granulométrica das escórias fornecidas de acordo com a Gerdau.

Tabela 4.4: Percentagens de escória passando nas peneiras.

Agregados		Escória 0	Escória 1	Escória F
Peneiras		Total	Total	Total
Pol.	mm			
2"	50,8	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	99,4	74,8	100,0
3/4"	19,1	95,3	38,1	100,0
1/2"	12,7	77,4	2,8	100,0
3/8"	9,5	57,3	0,8	100,0
Nº 4	4,8	29,2	0,5	100,0
Nº 10	2,0	16,4	0,4	100,0
Nº 40	0,42	8,2	0,3	47,8
Nº 80	0,18	5,2	0,3	28,5
Nº 200	0,074	3,4	0,2	17,4

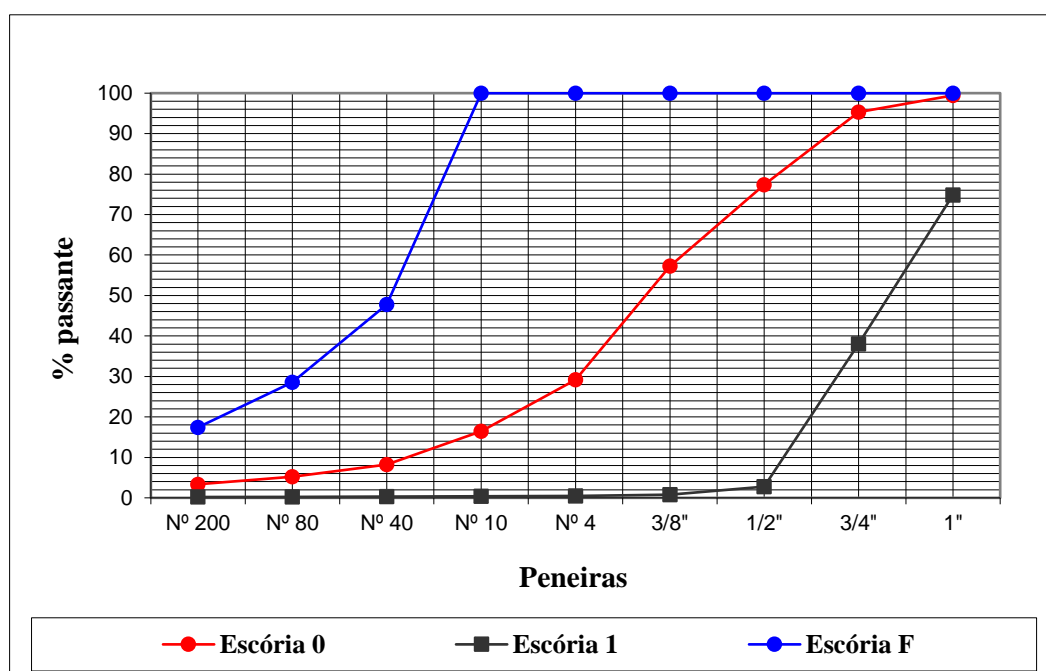


Figura 4.4: Curva granulométrica da escória de aciaria fornecida pela Gerdau.

Pelo método das tentativas chegou-se a uma mistura dentro das faixas utilizadas neste estudo (Faixa I e Faixa III do DER-PR). A Tabela 4.5, mostra os valores e percentagens de cada escória para a Faixa I, e a Figura 4.5, retrata esses valores graficamente.

Tabela 4.5: Percentagens de escória utilizadas na Faixa I do DER-PR.

Agregado		Escória 0		Escória 1		Escória F		Mistura de Agregados	Faixa de Trabalho	Faixa "I" DER-PR		
% Usada		40,0		40,0		20,0				Total	% Enc.	Total
Peneiras		Total	% Enc.	Total	% Enc.	Total	% Enc.	Mistura de Agregados	Faixa de Trabalho			
Pol.	mm											
2"	50,8	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	20,0	100,0	100,0	93,0	100	100
1 1/2"	38,1	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	20,0	100,0	97,0	93,0	90	100
1"	25,4	99,4	39,8	74,8	29,9	100,0	20,0	89,7	77,0	85,5	70	92,5
3/4"	19,1	95,3	38,1	38,1	15,2	100,0	20,0	73,4	57,0	78,0	50	85
1/2"	12,7	77,4	30,9	2,8	1,1	100,0	20,0	52,1	49,5	68,0	42,5	75
3/8"	9,5	57,3	22,9	0,8	0,3	100,0	20,0	43,2	42,0	58,0	35	65
Nº 4	4,8	29,2	11,7	0,5	0,2	100,0	20,0	31,9	29,0	41,0	25	45
Nº 10	2,0	16,4	6,6	0,4	0,2	100,0	20,0	26,7	22,0	31,0	18	35
Nº 40	0,42	8,2	3,3	0,3	0,1	47,8	9,6	13,0	12,0	18,0	8	22
Nº 80	0,18	5,2	2,1	0,3	0,1	28,5	5,7	7,9	9,5	11,5	5,5	15,5
Nº 200	0,074	3,4	1,3	0,2	0,1	17,4	3,5	4,9	7,0	5,0	3	9

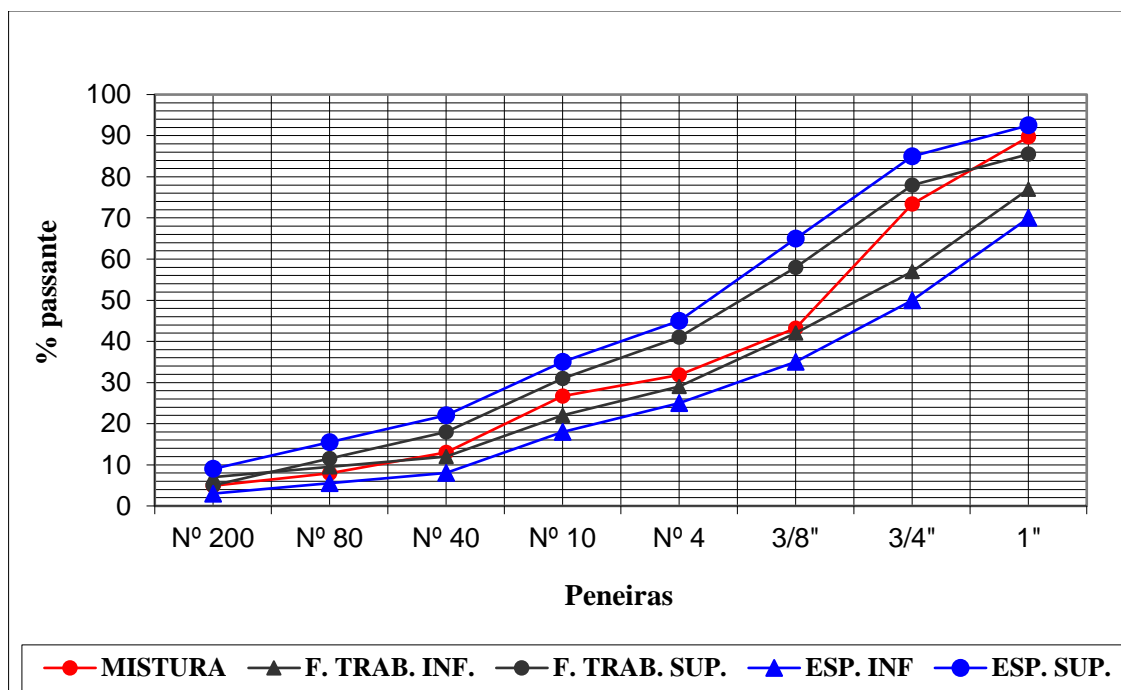


Figura 4.5: Estabilização granulométrica da escória de aciaria na Faixa I do DER-PR.

A Tabela 4.6, mostra os valores e porcentagens de cada escória para a Faixa III, e a Figura 4.6 retrata esses valores graficamente.

Tabela 4.6: Percentagens de escória utilizadas na Faixa III do DER-PR.

Agregado		Escória 0		Escória 1		Escória F		Mistura de Agregados	Faixa de Trabalho	Faixa "III" DNR-PR		
% Usada		40,0		30,0		30,0				Total	% Enc.	Total
Peneiras		Total	% Enc.	Total	% Enc.	Total	% Enc.	Total	% Enc.			
Pol.	mm											
2"	50,8	100,0	40,0	100,0	30,0	100,0	30,0	100,0	100,0	93,0	100	100
1 1/2"	38,1	100,0	40,0	100,0	30,0	100,0	30,0	100,0	100,0	93,0	100	100
1"	25,4	99,4	39,8	74,8	22,5	100,0	30,0	92,2	84,0	93,0	77	100
3/4"	19,1	95,3	38,1	38,1	11,4	100,0	30,0	79,6	73,0	81,0	66	88
1/2"	12,7	77,4	30,9	2,8	0,8	100,0	30,0	61,8	63,0	72,5	56	79,5
3/8"	9,5	57,3	22,9	0,8	0,2	100,0	30,0	53,1	53,0	64,0	46	71
Nº 4	4,8	29,2	11,7	0,5	0,1	100,0	30,0	41,8	34,0	52,0	30	56
Nº 10	2,0	16,4	6,6	0,4	0,1	100,0	30,0	36,7	24,0	40,0	20	44
Nº 40	0,42	8,2	3,3	0,3	0,1	47,8	14,3	17,7	12,0	21,0	8	25
Nº 80	0,18	5,2	2,1	0,3	0,1	28,5	8,6	10,7	10,5	13,5	6,5	17,5
Nº 200	0,074	3,4	1,3	0,2	0,1	17,4	5,2	6,6	9,0	6,0	5	10

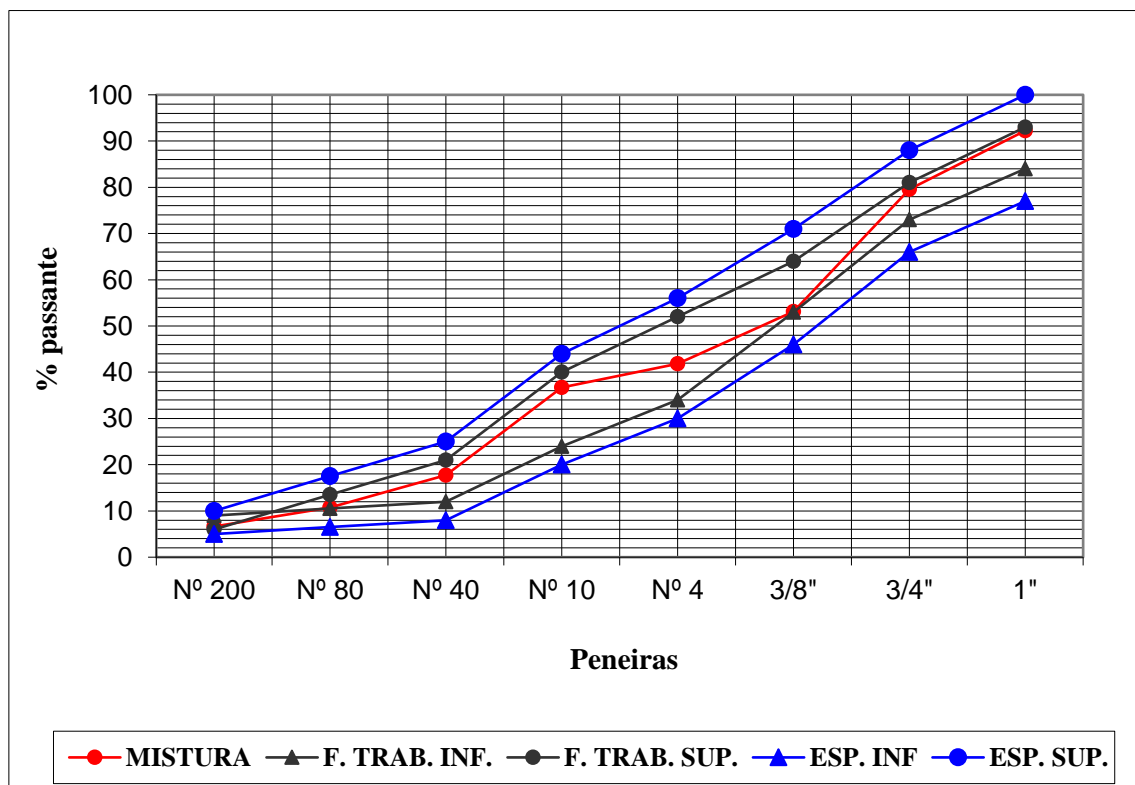


Figura 4.6: Estabilização granulométrica da escória de aciaria na Faixa III do DER-PR.

4.2.1.2 Abrasão Los Angeles

Avaliou-se o desgaste por Abrasão Los Angeles de acordo com a norma DNER ME 035/98. O valor encontrado foi de 23,24%.

4.2.1.3 Resistência ao esmagamento

O ensaio de Esmagamento foi realizado conforme a norma DNER ME 197/97. Realizou-se o ensaio duas vezes. A média dos resultados de resistência do agregado ao esmagamento foi de 16,64%.

4.2.1.4 Expansibilidade livre

Para obtenção da expansibilidade livre utilizou-se o método do ensaio PTM-130, formulado na Pensilvânia, EUA e adaptado em 1982 pela Divisão de Estudo de Materiais do DER/MG. Após, 45 dias imersos dentro de uma bacia d' água, o valor de expansibilidade média foi de 1,37%, conforme retratado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Expansibilidade livre da escória de aciaria.

Corpo de Prova	Expansibilidade Livre (%)	Expansibilidade Livre (média) %	Desvio Padrão (%)
1	1,17%		
2	2,01%	1,37	0,46
3	0,94%		

4.2.1.5 Massa específica dos agregados graúdos e absorção

O ensaio da massa específica graúda e absorção da mistura foi realizado conforme a norma DNER ME 081/98. Com base, na norma, procedeu-se com o ensaio e obteve-se o valor de massa específica de 3,49 g/cm³ e 3,50 g/cm³. A absorção obtida nas duas amostras ensaiadas foi de 1,24% e 1,10%.

4.2.1.6 Massa específica dos agregados miúdos

O ensaio da massa específica miúda foi realizado conforme a norma DNER ME 194/98. E o valor calculado para massa específica foi de 3,50 g/cm³ e 3,55 g/cm³.

4.2.1.7 Índice de forma

O índice de forma foi realizado conforme o DNER ME 086/94 e o resultado foi de 0,98 para a graduação variando entre 16 a 32 mm.

4.2.1.8 Compactação

A curva de compactação da escória foi obtida conforme o DNER-ME 129/94. A figura 4.7, mostra a curva de compactação para a Faixa I do DER-PR, e na Figura 4.8, está a curva de compactação da Faixa III do DER-PR. A Tabela 4.8, retrata os valores encontrados de massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima.

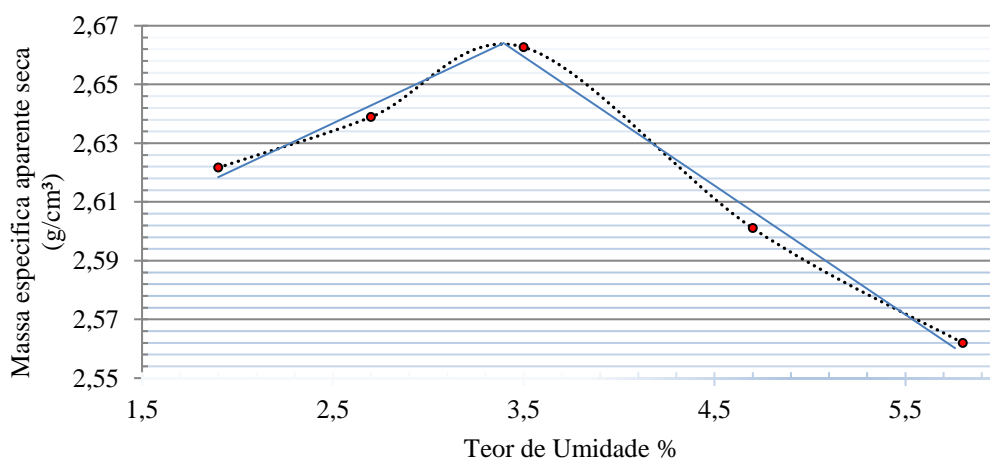


Figura 4.7: Curva de compactação para a Faixa I do DER-PR.

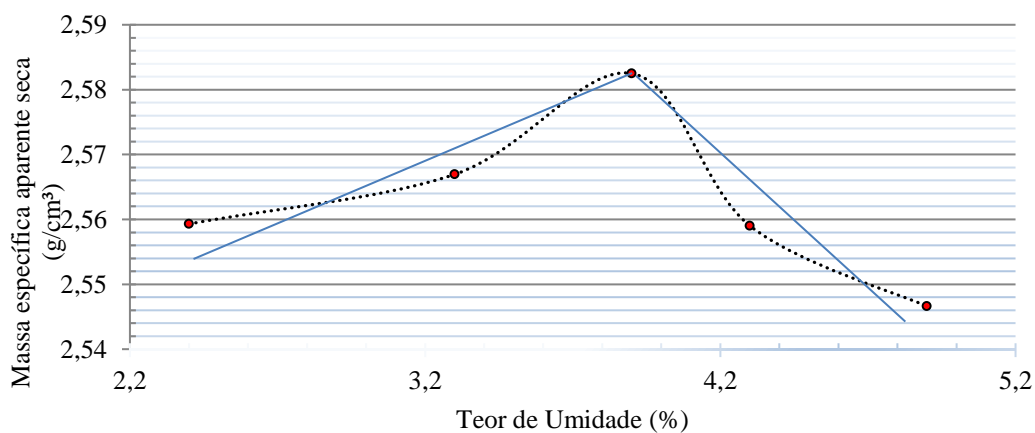


Figura 4.8: Curva de compactação para a Faixa III do DER-PR.

Tabela 4.8: Resultado dos teores de umidade e massa específica aparente seca máxima das faixas de escória estudada.

Faixas	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)
Faixa I	3,45	2,665
Faixa III	3,85	2,585

4.2.1.9 Índice de suporte Califórnia e expansão

Neste estudo, os ensaios de CBR, ou Índice de suporte Califórnia, foram executados conforme as recomendações da norma do DNIT 049/2014. Nas Tabelas 4.9 e 4.10 estão descritos os valores de expansão CBR derivados dos ensaios CBR realizados para as faixas I e III.

Tabela 4.9: Valor de expansão para a Faixa I do DER-PR.

Corpo de Prova	W (%)	Expansão CBR (%)	Expansão CBR média (%)	Desvio Padrão (%)
1	3,35	0,09		
2	3,19	0,08	0,097	0,017
3	3,33	0,12		

Tabela 4.10: Valor de expansão para a Faixa III do DER-PR.

Corpo de Prova	W (%)	Expansão CBR (%)	Expansão CBR média (%)	Desvio Padrão (%)
1	3,75	0,07		
2	3,72	0,12	0,10	0,33
3	3,83	0,12		

Os valores encontrados para Índice de Suporte Califórnia (CBR) segundo as faixas estudadas nessa pesquisa estão representados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11: Valor de CBR para a Faixa I do DER-PR.

Corpo de Prova	W (%)	CBR (%)	CBR médio (%)	Desvio Padrão (%)
1	3,35	121,76		
2	3,19	119,76	122,75	2,93
3	3,33	126,74		

Tabela 4.12: Valor de CBR para a faixa III do DER-PR.

Corpo de Prova	W (%)	CBR (%)	CBRmédio (%)	Desvio Padrão (%)
1	3,75	108,51		
2	3,67	97,82	111,88	9,96
3	3,83	129,30		

4.3 TRECHO EXPERIMENTAL

4.3.1 Dimensionamento do trecho experimental

Para o dimensionamento do trecho experimental utilizou-se o método do DNER – Eng. Murilo Lopes de Souza e o método adaptado da AASHTO (1993). Inicialmente, utilizou-se o método do DNER – Eng. Murilo Lopes de Souza para cálculo da espessura da camada de base. Da seguinte forma:

1. Utilizou-se a Figura 2.5, e classificou-se o tráfego em meio pesado ($1,4 \times 10^6$ e $3,1 \times 10^6$), logo N característico igual a 2×10^6 .
2. De acordo com a Tabela 2.1, obteve-se os coeficientes estruturais:
 - Revestimento de concreto betuminoso usinado: $K_R = 2,0$;
 - Camadas granulares (base e sub-base): K_S e $K_B = 1,0$;
3. Com base na Tabela 2.4, e para $N = 2 \times 10^6$, a espessura da camada do revestimento (R) foi de 5,0 cm.
4. Considerando CBR de 100% para base, $N = 2 \times 10^6$, e conforme gráfico da Figura 2.6, o valor da espessura H_{20} encontrado foi de 27 cm.
5. Substituindo-se o valor de R, K_R , K_B e H_{20} na Inequação 2.1, o valor da espessura da base encontrado foi de 17 cm.

Posteriormente, com o valor encontrado da base de 17 cm, calculou-se o valor da sub-base conforme o método adaptado da AASHTO (1993) para subleito sem reforço e com reforço. Os parâmetros estabelecidos foram os seguintes:

- $\Delta PSI = 1,95$;
- $W_{18} = 2 \times 10^6$;
- $M_R = 100 \times CBR_{\text{subleito}} = 6400,5$ psi;
- $Z_R = -1,09$;
- $S_0 = 0,465$;

- Número estrutural (SN)

Os valores de coeficiente estrutural dos materiais, obtidos pela Tabela 2.4, foram os seguintes:

- $\alpha_1 = 0,44$;
- $\alpha_2 = 0,14$;
- $\alpha_3 = 0,14$;
- Por meio, da Tabela 2.4, os valores obtidos para os coeficientes de drenagem foram iguais a 1,30.
- As espessuras das camadas foram calculadas por meio do método do DNER e transformou-se para polegadas para entrar nas equações da AASHTO, e os valores são:
 - $D_1 = 1,97''$;
 - $D_2 = 6,69''$.

Para o solo sem reforço, considerando-se os parâmetros mencionados acima, utilizou-se a Equação 2.5 e encontrou-se o valor do coeficiente estrutural total de $3,892''$. Posteriormente, substituiu-se esse valor na Equação 3.10, e obteve-se a espessura da sub-base igual a $9,93''$ que equivale a 25 cm. A Figura 4.9 mostra a seção transversal do pavimento dimensionado sem reforço.

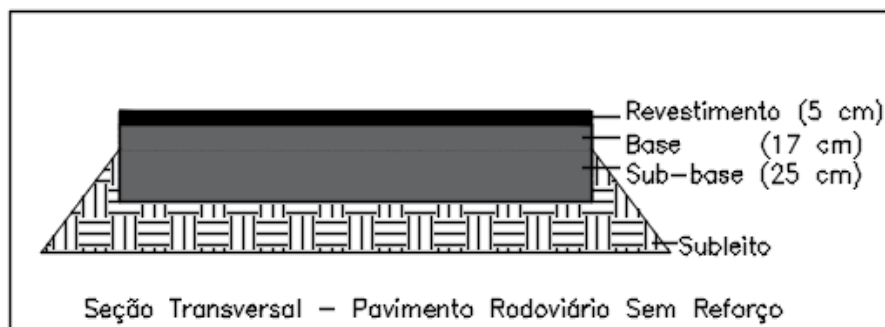


Figura 4.9: Pavimento rodoviário sem reforço.

Para o solo com reforço, deve-se levar em conta a taxa de benefício de tráfego (TBR), segundo Manual Brasileiro de Geossintéticos (2015, p.214), o valor usual para a TBR é 2. Pela Equação 2.8, o valor do coeficiente estrutural encontrado foi de $3,502''$. E conforme a Equação 2.5, encontrou-se o valor da espessura da sub-base de $7,79''$ que equivale a 20 cm. A Figura 4.10 está ilustrado o pavimento rodoviário com reforço.

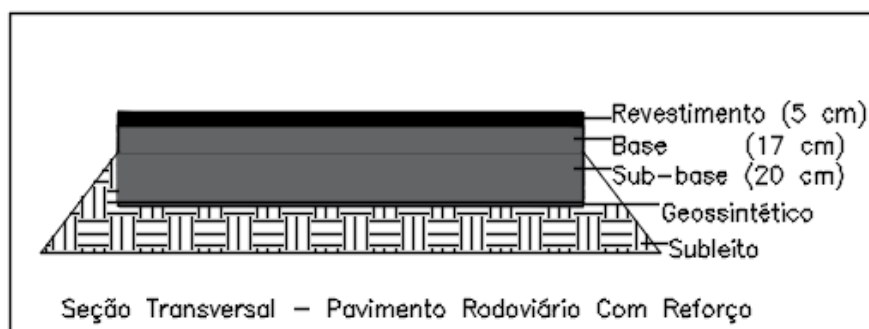


Figura 4.10: Pavimento rodoviário com reforço

4.3.2 Execução e controle do trecho experimental

4.3.2.1 Subleito

Os procedimentos de execução e controle da compactação do subleito estão descritos no item 3.2.3.2.1. Os valores encontrados “in situ” para a massa específica aparente do solo, teor de umidade e grau de compactação, de acordo com o bordo, compreendido entre as sessões do croqui do trecho experimental (Figura 3.16), estão descritos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Controle da compactação do subleito.

Sessões	Umidade (in situ)	Massa específica aparente do solo ($\gamma_{s,campo}$)	Massa específica aparente do solo, ($\gamma_{s,lab}$)	Grau de Compactação
1,3 e 5	27,50%	1,245	1,462	85,15%
2,4 e 6	27,80%	1,315	1,462	89,94%

4.3.2.1 Sub-base

A realização da compactação da sub-base deu-se conforme o item 3.2.3.2.2. Na Tabela 4.14 estão descritos os valores encontrados de massa específica, umidade e grau de compactação obtidos em campo para as diferentes faixas granulométricas estudadas.

Tabela 4.14: Controle da compactação da sub-base.

Faixas	Umidade (in situ) (%)	Massa específica aparente da escória ($\gamma_{s,campo}$) g/cm ³	Massa específica aparente da escória ($\gamma_{s,lab}$) g/cm ³	Grau de Compactação (%)
I	3,30	2,633	2,665	98,80
III	3,60	2,703	2,585	104,55

4.3.3 Analisar visualmente a camada de sub-base

Na Figura 4.11 pode-se verificar o trecho experimental no dia posterior a execução. Decorridos 45 dias, analisou-se e verificou-se a ocorrência de fissuras ou não. A Figura 4.12 mostra uma sessão da Faixa I, onde percebeu-se que não ocorreram fissurações visíveis a olho nu, e na Figura 4.13 retrata-se o comportamento da Faixa III, que sofreu trincas e fissurações visíveis e consideráveis.



Figura 4.11: Foto do trecho experimental no dia 25/10/2017.

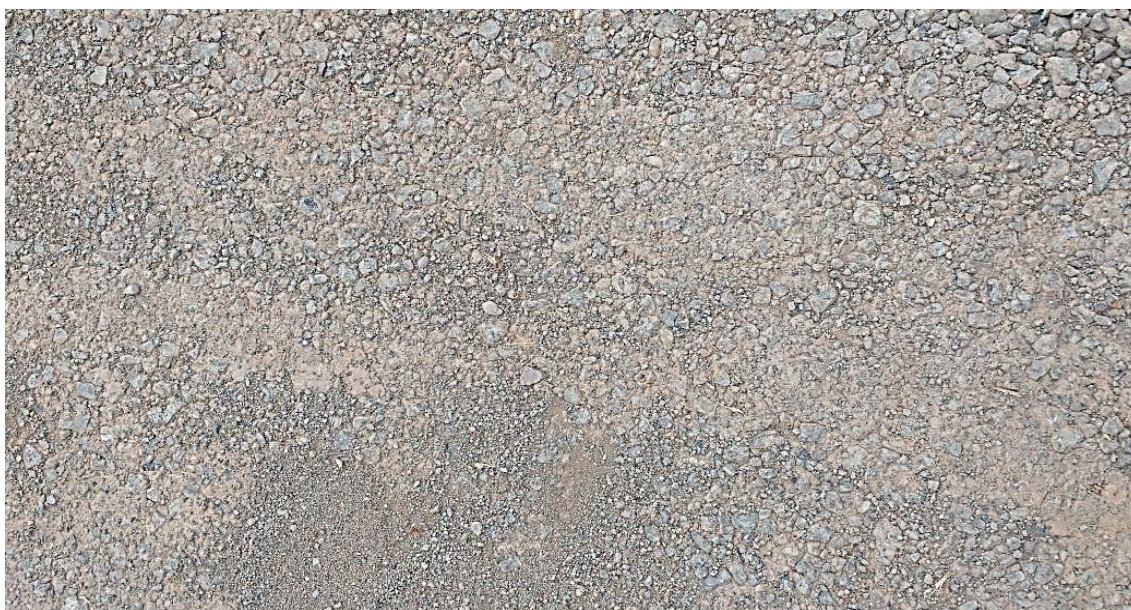


Figura 4.12: Análise visual de uma sessão da faixa I no dia 08/12/2017.



Figura 4.13: Análise visual de uma sessão da faixa III no dia 08/12/2017.

4.3.4 Observar os danos causados nos geossintéticos

Retirou-se os geossintéticos, sete dias depois de ter sido executado o trecho experimental, e analisou-se visualmente visual. A Figura 4.14 retrada uma amostra de geotêtil tecido com pequenos danos oriundos da compactação da escória, e na Figura 4.15 está ilustrada a geogrelha que aparentemente não sofreu nenhuma perda considerável.

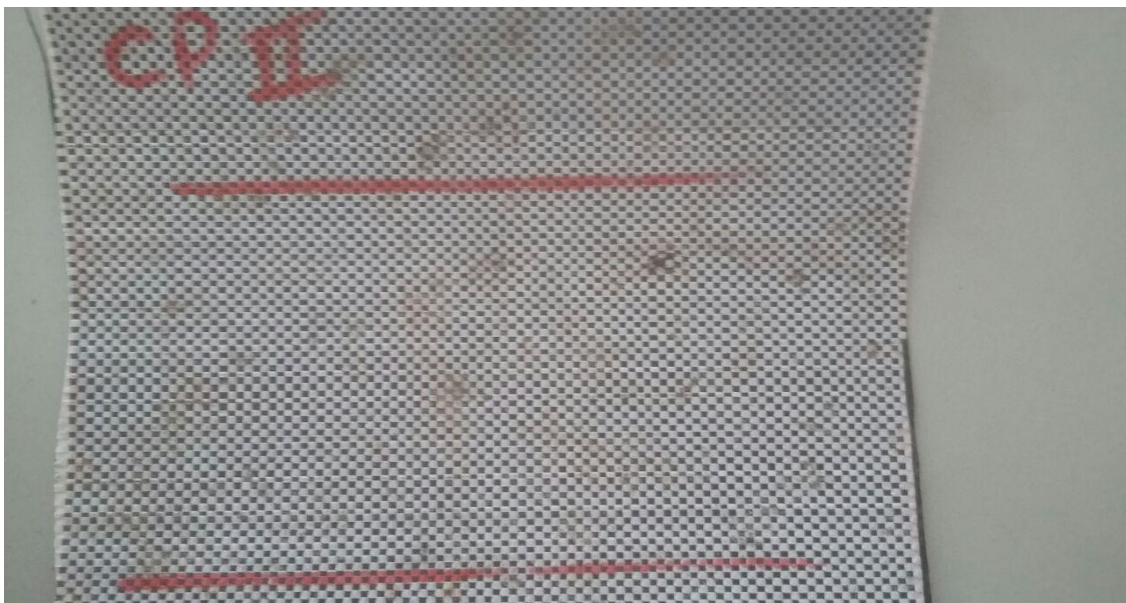


Figura 4.14: Geotêtil tecido retirado da sessão 4 para análise.



Figura 4.15: Geogrelha retirada da sessão 6 para análise.

5 ANÁLISES E DISCUSSÕES

5.1 SOLO RESIDUAL DO SUBLEITO

Segundo, especificações do DNIT, os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio CBR menor ou igual a 2,0% e um $CBR \geq 2\%$. Com base, nas tabelas 4.2 e 4.3, percebe-se que o valor do CBR de 4,5% está acima do mínimo estabelecido, apesar de ser um valor relativamente baixo. Porém, a expansão de 3,18% está maior que o limite máximo estabelecido pelo DNIT. Dessa forma, o uso de geossintéticos (geogrelha e geotêxtil) atuando como elemento de reforço, foram uma excelente alternativa para aumentar a capacidade de suporte do subleito.

5.2 ESCÓRIA UTILIZADA NA SUB-BASE

Os ensaios realizados na escória de aciaria permitiram avaliar suas características mecânicas visando sua aplicação na camada de sub-base de um trecho experimental. Conforme resultados, apresentados no item 4.2.1 – Ensaio de caracterização da escória, a escória de aciaria fornecida pela Gerdau apresentou-se todos os requisitos gerais e específicos de acordo com o DNER-EM 262/94. E apresentou-se elevados valores de capacidade de suporte, verificados nas tabelas 4.10 e 4.12, e que estão acima do limite estabelecido pelo DER/PR ES-P 05/05. Além disso, apresentou-se um baixo valor de expansão nos ensaios de CBR para as faixas I e III, e no ensaio de expansibilidade livre, conforme tabelas 4.9, 4.11 e 4.7.

5.3 TRECHO EXPERIMENTAL

5.3.1 Controle da compactação

Segundo, recomendações do DNIT o grau de compactação de todas as camadas do pavimento deve atingir o grau mínimo de 100%. Porém, verificou-se na Tabela 4.13 que os valores de grau de compactação do subleito ficaram abaixo do limite indicado, o principal fator foi a indisponibilidade de equipamentos adequados, de acordo, com as características apresentadas pelo solo dessa camada. Apesar disso, atingiu-se um grau de compactação satisfatório dentro das condições limitantes.

Em relação a compactação da sub-base, percebe-se pela Tabela 4.14 que os valores de grau de compactação estão dentro do recomendado pelo DNIT. Isso, deve-se ao fato da utilização da placa vibratória que é indicada para solos e materiais granulares.

5.3.1 Análises visuais

A análise visual permite um reconhecimento preliminar dos danos causados nos materiais e na camada da sub-base do trecho experimental. Por meio, das Figura 4.10 e 4.11, após um longo período de chuvas intensas, percebeu-se que para a Faixa I a camada de sub-base manteve-se inalterada, já para a Faixa III apresentou-se trincas provenientes das intempéries. As trincas, podem ter sido ocasionadas pela retirada dos geossintéticos das sessões 4 e 6, que deixaram a camada de sub-base mais exposta às intempéries e pode ter ocorrido um deslocamento da sessão 2, ou, senão terem sido ocasionadas pela expansão da escória de aciaria.

Em relação aos geossintéticos, notou-se pela Figura 4.12 que o geotêxtil tecido sofreu pequenos danos aparentes provenientes da execução do trecho experimental. E pela Figura 4.13 percebe-se aparentemente que a geogrelha não sofreu nenhum dano construtivo.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados desse estudo foi possível concluir que a escória de aciaria produzida pela Gerdau Ouro Branco e utilizada no estudo pode ser, a princípio, utilizada para compor as camadas de sub-base de um pavimento por possuir características adequadas e ser economicamente e ambientalmente viável.

Ademais, os resultados apontaram que o uso do geossintético reduz significativamente as espessuras das camadas do pavimento, além de ser uma excelente alternativa para atuação como material de reforço de subleito.

As conclusões secundárias que podemos levantar com base nesse estudo são as seguintes:

1. As empresas siderúrgicas que tenham como objetivo realizar o beneficiamento da escória para utilização nas camadas do pavimento devem buscar britar o material, de forma a atender às faixas granulométricas utilizadas na construção de cada camada do pavimento, pois assim a escória de aciaria será mais qualificada frente a outros agregados;
2. O uso de geossintéticos como materiais de reforço de subleito e outras camadas do pavimento surge como uma excelente alternativa a busca de materiais e jazidas de empréstimo devido a disponibilidade esgotável desses materiais. Além disso, por ser um produto industrializado, suas características mecânicas e controle de qualidade podem ser medidos de forma mais precisa;
3. O dano visual ocorrido em uma das faixas granulométricas estudadas não pode ser justificado pela expansão da escória de aciaria ao sofrer intempéries durante um período;

As sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao estudo dessa monografia são as seguintes:

- Avaliar os danos construtivos nos geossintéticos por meio de ensaios de resistência a tração;
- Analisar a capacidade de suporte da sub-base através de ensaios de prova de carga;
- Verificar o ganho de resistência das sessões em que foram utilizados geossintéticos;
- Acompanhar a sub-base e as intempéries causadas no trecho experimental;
- Realização de CBR “in situ” para análise no campo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 6459 “**Solo – determinação do limite de liquidez**”.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 7180 “**Solo – determinação do limite de plasticidade**”.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986, NBR 7182 “**Solo – ensaio de compactação**”.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987, NBR 9895 “**Solo – índice de suporte califórnia**”.

ANTE, J.R.O (2012). **Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 166pg.

BALTAZAR, R.P. (2001). Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação. Dissertação de M.Sc, UFV, Viçosa, MG, Brasil.

BERNUCCI, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2008). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA, 504p.

BUENO. B.S; LATTI.C.L. (2015). Matérias Primas. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**, CTG. Editora Blusher, 2 ed.,570pg.

BUENO. B.S; VILLAR.O.M. (2015). Propriedades, Ensaio e Normas. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**, CTG. Editora Blusher, 2 ed.,570pg.

CARVALHO FILHO, A.F. (2006). **Utilização do Agregado Siderúrgico no Município de Praia Grande**. Workshop: Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro, ABM, São Paulo, SP, 08 de novembro.

CASTELO BRANCO, V.T.F., (2004), **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CNT – Confederação Nacional do Transporte (2017). **Pesquisas CNT de Rodovias: relatório gerencial**. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017.

CRONEY, D. (1977). **The design and performance of road pavements**. London: Her Majesty's Stationery Office, 1977.

DER-PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, 2005, ES-P 05/05, **Informações e Recomendações de Ordem Geral**, Paraná.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1944, ME 262 **“Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 052 **“Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy” ”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 080 **“Solos – análise granulométrica por peneiramento”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 086 **“Agregado – determinação do índice de forma”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 092 **“Solo – determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994, ME 129 **“Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1997, ME 097 **“Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 035 **“Agregados – determinação da abrasão Los Angeles”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 081 **“Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 081 **“Agregado miúdo – determinação da densidade real”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, ME 083 **“Agregados – análise granulométrica”**.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 2014, ME 049 **“Solos–determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas”**.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006, IPR-719, **Manual de Pavimentação**, 3ªed, Rio de Janeiro.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes, 1964, ME 86 **“Determinação da umidade pelo método expedito da frigideira”**.

GeoSoluções (2017). **Catálogo de Produtos**. www.geosolucoes.com.br.

GEYER, R.M.T..2001, **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS.

HEUKELON, W.; FOSTER, C.R. (1960). **Dynamic Testing of Pavements**. Journal of Soil Mechanics and Foundation Di

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia (2017). **A siderurgia em números**. www.ibs.org.br, 93pg.

OLIVEIRA, T. M. **Notas de aula da disciplina Superestruturas de Vias Terrestres**. UFSJ, 2016.

PEDROSA, R. A. A. (2010). **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. Dissertação de M.Sc., NUGEO/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

PENA, D.C. Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação. Dissertação de M.Sc. UFES, Vitória, ES, Brasil.

PTM 130, (1978). Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria, adaptado pelo DER/MG – DMA-1 (1982).

RAPOSO, C.O.L. (2005), **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Dissertação de M.Sc., Vitória, ES, Brasil.

ROCHA, F.L.L. (2011), **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial**. Dissertação de M.Sc., NUGEO/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

SILVA, E.A., R.L. MENDONÇA (2001^a). Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento, Revista Engenharia Ciência e Tecnologia, Vol.4, N.2, P7-20.

TRICHÊS, G.; BERNUCCI, L.B. Reforço de Base de Pavimentos. In: VERMATTI, J. C. (coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Bluecer, 2004.

VERTEMATTI, J. C. (2015). Aplicação em reforço de solos. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**, CTG. Editora Blusher, 2 ed., 570pg.