

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA

FACULDADE UNIGUAÇU

ENGENHARIA CIVIL

PROJETO FINAL DE CURSO II

EDUARDO RANNO BRANDT

**DESEMPENHO MECÂNICO DE SUB-BASES DE SOLO
ESTABILIZADO COM *FILLER* BASÁLTICO RETIDO NA USINAGEM
DE CONCRETO ASFÁLTICO: ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE
CALIFORNIA (CBR)**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2026

EDUARDO RANNO BRANDT

**DESEMPENHO MECÂNICO DE SUB-BASES DE SOLO
ESTABILIZADO COM *FILLER* BASÁLTICO RETIDO NA USINAGEM
DE CONCRETO ASFÁLTICO: ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE
CALIFORNIA (CBR)**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para
aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso II do
curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Carla Caroline Facchi.

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2026



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO RANNOV BRANDT

DESEMPENHO MECÂNICO DE SUB-BASES DE SOLO ESTABILIZADO COM *FILLER* BASÁLTICO RETIDO NA USINAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO: ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (CBR)

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação da professora Carla Caroline Facchi, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Esp. Carla Caroline Facchi
Faculdade UNIGUAÇU

Me. Daniela Kunz
Faculdade UNIGUAÇU

Dra. Jaqueline Tomasini Orth
Faculdade UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 08 DE JUNHO DE 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus e à minha família, pelo apoio, incentivo e por me proporcionarem essa oportunidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço este trabalho primeiramente a Deus, por me dar forças nos momentos difíceis, sabedoria para seguir em frente e bênçãos incontáveis ao longo dessa jornada. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, me incentivando e acreditando em mim. Ao meu pai, Gelson Brandt, e à minha mãe, Analise Rannow, pelo amor incondicional, pelos valores que me ensinaram e por todo apoio ao longo dessa caminhada. Cada sacrifício, cada palavra de motivação e cada gesto de carinho foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu irmão caçula, Augusto R. Brandt, que, mesmo tão pequeno, é uma das maiores alegrias da minha vida. Sua energia, sua pureza e seu jeito de ver o mundo me lembram todos os dias da importância de sonhar e de nunca perder a essência. Que este trabalho seja, um dia, um motivo de orgulho para você!

Aos meus orientadores e professores, por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pelo compromisso em me ajudar a crescer como profissional e como pessoa. A cada um de vocês, minha mais profunda gratidão.

Aos amigos e colegas que dividiram comigo essa jornada, seja nos momentos de desafios, seja nas pequenas conquistas. O apoio e a amizade de vocês tornaram tudo mais leve e especial.

Por fim, dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este momento fosse possível. A cada um de vocês, meu sincero obrigado!

EPIÍGRAFE

A engenharia é a arte de organizar e dirigir os homens e controlar as forças e materiais da natureza para o benefício da humanidade.

Henry G. Stott

RESUMO

A crescente busca por soluções sustentáveis na engenharia rodoviária tem impulsionado o aproveitamento de resíduos industriais como alternativa aos materiais convencionais empregados na estabilização de solos. Nesse contexto, este trabalho avaliou o desempenho mecânico de misturas solo-*filler* basáltico destinadas à aplicação em sub-bases de pavimentos flexíveis, utilizando como parâmetro principal o Índice de Suporte Califórnia (CBR). O *filler* basáltico utilizado corresponde ao material particulado retido nos filtros de manga de uma usina de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), localizada no município de Itaipulândia-PR. Foram realizados ensaios de caracterização física do solo e do *filler*, incluindo análise granulométrica, limites de Atterberg, compactação Proctor Normal e ensaios de CBR. As misturas foram avaliadas nos teores de 3%, 6%, 9% e 12% de *filler* em relação à massa seca do solo. Os resultados demonstraram redução da plasticidade do material e aumento da densidade seca máxima com a incorporação do resíduo. O valor de CBR evoluiu de 9,57% para o solo natural para 21,41% na mistura contendo 9% de *filler*, representando um ganho de aproximadamente 123,7%. Além disso, observou-se redução da expansão após imersão, mantendo valores inferiores aos limites estabelecidos pelas especificações técnicas. Entre as dosagens avaliadas, o teor de 9% apresentou o melhor desempenho mecânico, atendendo simultaneamente aos requisitos de CBR e expansão para utilização em camadas de sub-base. Conclui-se que o *filler* basáltico apresenta elevado potencial como material estabilizante, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos industriais e para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na infraestrutura rodoviária.

Palavras-chave: *filler* basáltico; estabilização de solos; pavimentação; sub-base rodoviária; Índice de Suporte Califórnia; sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in pavement engineering has encouraged the use of industrial by-products as alternatives to conventional soil stabilization materials. In this context, this study evaluated the mechanical performance of soil-basalt *filler* mixtures intended for application in flexible pavement subbase layers, using the California Bearing Ratio (CBR) as the main performance parameter. The basalt *filler* used in this research consisted of fine particulate material retained in the baghouse filters of a Hot Mix Asphalt (HMA) production plant located in Itaipulândia, Paraná, Brazil. Laboratory tests were carried out to characterize the soil and *filler*, including grain-size distribution, Atterberg limits, Standard Proctor compaction, and CBR tests. Mixtures containing 3%, 6%, 9%, and 12% basalt *filler* by dry soil mass were evaluated. The results showed a reduction in soil plasticity and an increase in maximum dry density with the incorporation of the residue. The CBR value increased from 9.57% for the natural soil to 21.41% for the mixture containing 9% *filler*, representing an improvement of approximately 123.7%. Furthermore, a reduction in expansion after soaking was observed, with all values remaining below the limits established by technical specifications. Among the evaluated mixtures, the 9% *filler* content provided the best mechanical performance, meeting both CBR and expansion requirements for subbase applications. It is concluded that basalt *filler* has significant potential as a soil stabilizing material, contributing to the reuse of industrial waste and the development of more sustainable solutions for road infrastructure.

Keywords: basalt *filler*; soil stabilization; pavement engineering; pavement subbase; California Bearing Ratio; sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 JUSTIFICATIVA	11
3 OBJETIVOS	12
3.1 OBJETIVO GERAL	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4 REVISÃO DE LITERATURA	13
4.1 A INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA E SEU PAPEL ESTRATÉGICO NO BRASIL	13
4.2 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL	15
4.3 AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS	17
4.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	21
4.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM RESÍDUOS	22
4.6 NORMAS TÉCNICAS E DIRETRIZES PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	23
4.7 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE	24
4.8 <i>FILLER</i> BASÁLTICO E SUAS PROPRIEDADES	26
4.9 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)	27
4.10 LACUNAS E POTENCIAIS DE USO DE <i>FILLER</i> BASÁLTICO	28
5 MATERIAIS E MÉTODOS	30
5.1 COLETA DOS MATERIAIS	30
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	30
5.2.1 Análise granulométrica (abnt 7181:2025)	30
5.3 ENSAIOS NO SOLO NATURAL	32
5.3.1 Limite de Liquidez (LL) (ABNT NBR 6459:2018) – Método Casagrande	32
5.3.2 Limite de Plasticidade (LP) (ABNT NBR 7180:2016)	34
5.4 ENSAIO CBR (ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA) (ABNT NBR 9895:2016)	35
5.4.1 Moldagem dos corpos de prova	35
5.4.2 Processo de Imersão	36
5.4.3 Ensaio de Penetração	37
5.5 ENSAIO CBR DAS MISTURAS SOLO- <i>FILLER</i>	38
5.5.1 Adaptações Metodológicas	38

5.5.2 Parâmetros Avaliados	39
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO <i>FILLER</i> BASÁLTICO	41
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO- <i>FILLER</i> BASÁLTICO	41
6.3 COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL	44
6.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA – CBR.....	45
6.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE <i>FILLER</i>	47
6.6 IMPLICAÇÕES PRTÁTICAS E APLICABILIDADE	49
7 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS.....	52
APÊNDICE A	55
APÊNDICE B	56
APÊNDICE C	57
APÊNDICE D	58
APÊNDICE E	61
APÊNDICE F.....	64
APÊNDICE G.....	67
APÊNDICE H	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Classificação de solos - SUCS.....	188
Quadro 2-Classificação Rodoviária - HRB - AASHTO	199
Quadro 3-Classificação de solos TRB	20
Quadro 4-Resumo dos Resultados.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A matriz de transporte brasileira no ano de 2014.....	14
Figura 2: Composição da pavimentação flexível.....	17
Figura 3: Local de coleta de material.....	30
Figura 4: Ensaio do Limite de Liquidez.....	33
Figura 5: Ensaio do Limite de Plasticidade.....	34
Figura 6: Processo de Imersão.....	35
Figura 7: Limites de Atterberg.....	42
Figura 8: pd máxima seca.....	44
Figura 9: Expansão Axial (96h de imersão).....	47
Figura 10: Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	48

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, materiais estabilizantes como a cal, o cimento e as cinzas volantes têm sido amplamente empregados em obras geotécnicas e de pavimentação para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos. Entretanto, a crescente demanda por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis tem impulsionado pesquisas voltadas ao reaproveitamento de resíduos industriais com potencial de aplicação na estabilização de solos. Nesse contexto, destacam-se os resíduos gerados pela indústria de rochas ornamentais e pela mineração de agregados, que podem representar até 30% da produção total. Frequentemente descartados de forma inadequada, esses materiais constituem importantes passivos ambientais, tornando seu reaproveitamento uma alternativa promissora tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental (Santos et al., 2020).

No contexto da pavimentação asfáltica, um desses resíduos é o *filler* basáltico, gerado na usinagem do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Esse material particulado, retido nos filtros de manga das usinas, possui granulometria fina e composição mineralógica potencialmente reativa, características que indicam viabilidade para sua aplicação como agente estabilizante em solos (Cavalcanti; Prado, 2018).

Assim, esta pesquisa tem como objetivo investigar o potencial do *filler* basáltico proveniente da usina de CBUQ de uma empresa como estabilizante em sub-bases rodoviárias, com foco na análise do CBR sob diferentes dosagens. A metodologia adotará ensaios laboratoriais conforme normativas técnicas da ABNT, DER e DNIT, buscando contribuir para o avanço de soluções em pavimentação que estejam alinhadas às diretrizes de economia circular e logística reversa na construção civil.

2 JUSTIFICATIVA

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos, o que exige a constante busca por alternativas que minimizem esses impactos. Nesse contexto, o rejeito de pó de pedra, proveniente do processo de fabricação do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), apresenta-se como um material com potencial para ser reutilizado, contribuindo para a diminuição do descarte inadequado e a preservação do meio ambiente (Fonseca, 2020).

A usinagem do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) gera uma quantidade significativa de partículas finas, especialmente o *filler* basáltico retido nos filtros de manga, que, na maioria dos casos, é descartado sem destinação adequada.

A utilização do *filler* basáltico representa uma oportunidade de transformar um passivo ambiental em um insumo valioso para a construção civil, alinhando-se aos princípios da economia circular e da gestão sustentável de resíduos. Além disso, o reaproveitamento desse material pode resultar em benefícios econômicos, como a redução do consumo de materiais naturais, diminuição dos custos de produção e prolongamento da vida útil das estruturas rodoviárias (Fonseca, 2020).

Apesar de seu potencial, ainda são escassas as investigações que avaliem de forma sistemática o comportamento mecânico de misturas solo-*filler* basáltico em diferentes condições de compactação e umidade. Nesse sentido, este trabalho se justifica pela necessidade de ampliar o conhecimento técnico sobre a aplicação desse resíduo como estabilizante de solos, contribuindo para a normatização e difusão de práticas sustentáveis na pavimentação.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho mecânico de sub-bases de pavimentos estabilizadas com rejeito de pó de pedra proveniente de usinas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), com foco no Índice de Suporte Califórnia (CBR).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar fisicamente o rejeito de pó de pedra e o solo utilizado na pesquisa, por meio de ensaios laboratoriais, conforme normas técnicas pertinentes.
2. Determinar a influência da adição de rejeito de pó de pedra nas propriedades mecânicas do solo, com foco no Índice de Suporte Califórnia (CBR).
3. Analisar o efeito de diferentes teores de rejeito de pó de pedra (3%, 6%, 9% e 12%) na compactação e na resistência do material estabilizado.
4. Comparar os resultados obtidos com os parâmetros estabelecidos por normas e estudos anteriores, verificando a viabilidade técnica do uso do rejeito em sub-bases de pavimentos.
5. Propor recomendações para a aplicação prática do rejeito de pó de pedra em obras de infraestrutura, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

4 REVISÃO DE LITERATURA

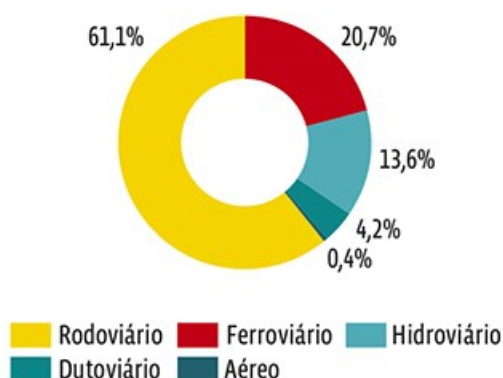
4.1 A INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA E SEU PAPEL ESTRATÉGICO NO BRASIL

O sistema rodoviário brasileiro constitui a espinha dorsal da infraestrutura de transporte do país, sendo o principal meio utilizado para o deslocamento de cargas e passageiros. Sua importância vai além de uma mera via de trânsito, estando diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico, à integração territorial e à inclusão social. A predominância desse modal no Brasil se deve, em parte, à vasta extensão territorial do país e à priorização histórica das rodovias em políticas públicas de transporte desde o século XX (CNT, 2022).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2010), aproximadamente 60% da carga transportada no Brasil é escoada pelas rodovias, o que destaca a necessidade de uma malha viária eficiente, segura e bem conservada.

As rodovias são elementos fundamentais para a logística nacional (Figura 1), com papel crucial em setores como o agronegócio, a indústria de base e o comércio. Em um país de dimensões continentais, cuja matriz de transporte ainda é fortemente dependente do modal rodoviário, essas vias são essenciais para o escoamento da produção do interior aos centros urbanos e portos exportadores, contribuindo para a competitividade do Brasil no cenário internacional. Além disso, garantem o acesso da população a bens de consumo e serviços básicos, desempenhando uma função social importante ao promover maior coesão social, territorial e equidade no acesso ao desenvolvimento (CNT, 2022).

Figura 1 - A matriz de transporte brasileira no ano de 2014.



Fonte: Confederação Nacional do Transporte, (2014).

Além de sua relevância econômica, as rodovias são instrumentos de integração e desenvolvimento regional. Ao conectar áreas urbanas e rurais, elas promovem a inclusão de populações marginalizadas, facilitando o acesso a serviços de saúde, educação, cultura e lazer. Essa conectividade tem papel essencial na redução das desigualdades regionais, pois estimula o crescimento de cidades de menor porte, atrai investimentos para regiões periféricas e amplia as oportunidades de emprego e renda. A qualidade da infraestrutura rodoviária influencia diretamente a qualidade de vida da população, especialmente em áreas distantes dos grandes centros urbanos (Oliveira *et al.*, 2019).

Entretanto, o sistema rodoviário brasileiro enfrenta sérios desafios estruturais. Um dos principais problemas está na deficiência da manutenção periódica das vias. Grande parte da malha rodoviária nacional apresenta sinais de desgaste prematuro, com trincas, buracos, desníveis e falhas estruturais que comprometem tanto a segurança quanto o desempenho logístico. Esses problemas geram consequências negativas, como o aumento do tempo de viagem, o consumo excessivo de combustível, o desgaste dos veículos e, sobretudo, a elevação do número de acidentes de trânsito (Oliveira *et al.*, 2019).

De acordo com Oliveira *et al.* (2019), esses problemas impactam diretamente a produtividade do setor de transporte e aumentam o custo logístico do país, dificultando a competitividade brasileira frente a outros mercados.

Além disso, os elevados custos de conservação e reabilitação da infraestrutura rodoviária exigem planejamento técnico eficiente, fiscalização constante e alocação racional de recursos públicos. A ausência de uma política de gestão rodoviária de longo prazo acaba por gerar ciclos contínuos de degradação e reparos emergenciais,

que são financeiramente mais onerosos e menos eficazes. Investimentos consistentes e planejados em infraestrutura rodoviária não devem ser vistos apenas como despesas, mas como uma estratégia fundamental para o desenvolvimento nacional sustentável (BID, 2021).

Fica evidente, portanto, que a qualidade das rodovias brasileiras é um fator determinante para o progresso do país. Um sistema rodoviário moderno, seguro e funcional impulsiona o crescimento econômico, melhora a competitividade internacional, amplia a mobilidade da população e fortalece a coesão territorial. Portanto, é imprescindível que se adotem políticas públicas eficientes que priorizem a conservação preventiva, a modernização tecnológica das vias e o uso racional de recursos, com base em estudos técnicos, diagnósticos precisos e transparência na execução dos projetos (CNT, 2022).

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

O dimensionamento das estruturas de pavimentos flexíveis é uma etapa essencial da engenharia rodoviária, responsável por garantir que a estrutura suporte as cargas previstas ao longo de sua vida útil, mantendo funcionalidade e segurança para os usuários. No Brasil, o processo é comumente baseado em métodos mecanístico-empíricos, os quais associam modelos matemáticos à interpretação de ensaios laboratoriais e de campo. Esse tipo de abordagem permite projetar pavimentos com maior confiabilidade, considerando o comportamento real dos materiais sob carregamentos repetitivos (DNIT, 2010).

Um dos parâmetros mais importantes nesse processo é o Índice de Suporte Califórnia (CBR), que mede a capacidade de suporte do solo de fundação (subleito) ou de camadas granulares. Conforme descrito no IPR-DNIT (2006), solos com altos valores de CBR permitem estruturas mais delgadas, o que reduz o volume de materiais utilizados e os custos de implantação. Por outro lado, quando os solos naturais apresentam baixa resistência, torna-se necessário a substituição ou reforço do subleito ou até o uso de materiais mais resistentes nas camadas superiores do pavimento, encarecendo o projeto.

O tráfego é outro fator determinante no dimensionamento do pavimento. A estimativa do número N , conhecido como número de repetições de um eixo padrão de 80 kN, ao longo do período de projeto, é essencial para avaliar a fadiga dos

materiais e o acúmulo de deformações permanentes. Esse valor N representa a quantidade de repetições de um eixo padrão, cuja carga corresponde a 8,2 toneladas (ou 80 kN), atuando sobre o pavimento durante sua vida útil. O IPR-DNIT (2006), orienta que, para rodovias com tráfego intenso ou de cargas pesadas, como corredores de exportação ou vias industriais, sejam adotadas camadas estruturais mais espessas e materiais com alto módulo de resiliência. O erro na estimativa do tráfego pode comprometer seriamente a durabilidade do pavimento e aumentar os custos com manutenção precoce.

As condições climáticas também influenciam fortemente o desempenho do pavimento ao longo do tempo. De acordo com o IPR-DNIT (2003), em regiões tropicais com elevada pluviosidade ou com ocorrência de geadas, o dimensionamento deve considerar o efeito da variação de umidade e temperatura nos materiais. Essas variações podem levar a problemas como fissuras térmicas, perda de suporte do subleito, erosão lateral e danos por infiltração de água. A consideração de fatores ambientais no projeto permite maior durabilidade e menor necessidade de intervenções corretivas.

Além dos aspectos técnicos do projeto, é fundamental destacar a importância do controle tecnológico e da execução adequada das obras, conforme enfatizado por. Mesmo com um bom dimensionamento teórico, falhas na execução ou no controle de qualidade dos materiais podem comprometer o desempenho da estrutura. Por isso, a aplicação das diretrizes normativas e o uso de métodos confiáveis são imprescindíveis para garantir a qualidade do pavimento (Bernucci *et al.*, 2008)

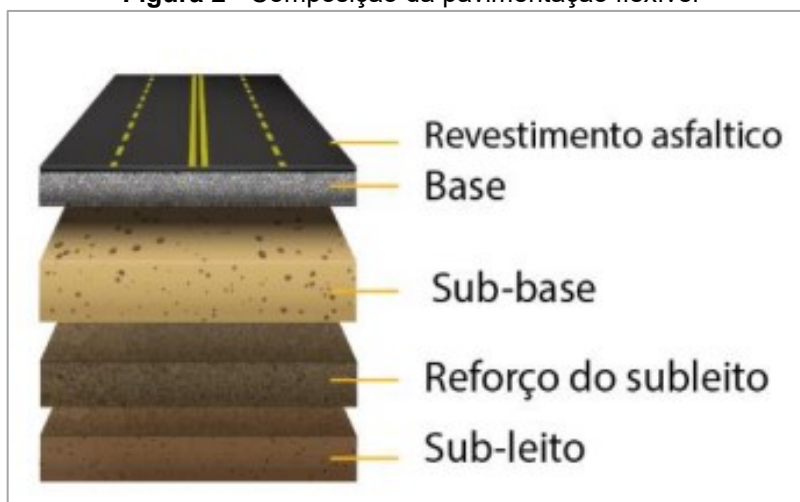
Portanto, o dimensionamento das estruturas do pavimento flexível é um processo multidisciplinar que depende de fatores geotécnicos, climáticos, logísticos e econômicos. Quando realizado de forma criteriosa, com base em normas e estudos técnicos atualizados, contribui diretamente para o aumento da vida útil da rodovia, a segurança dos usuários e a eficiência do transporte no país (DNIT, 2010)

A estrutura típica de um pavimento rodoviário (Figura 2), é composta por várias camadas sobrepostas, cada uma desempenhando funções específicas para garantir o desempenho e a durabilidade da via. Da superfície para as camadas mais profundas, destacam-se: o revestimento asfáltico, que é a camada superficial responsável por oferecer conforto e segurança ao usuário, além de proteger as camadas inferiores contra a ação da água; a base, que possui alta resistência e é responsável por distribuir os esforços gerados pelo tráfego; a sub-base, que atua

como uma camada complementar, contribuindo para a distribuição de tensões e proteção do subleito; o reforço do subleito, que é uma camada opcional utilizada quando o subleito apresenta características insatisfatórias; e, por fim, o subleito, que corresponde à camada natural de solo que serve de apoio para todas as demais (CNT, 2018).

Cada uma dessas camadas desempenha um papel fundamental no comportamento estrutural do pavimento, sendo projetadas de acordo com as solicitações de tráfego, clima e características do solo local. Segundo o DNIT (2006), o dimensionamento adequado dessas camadas é essencial para garantir a segurança, o conforto e a durabilidade da via.

Figura 2 - Composição da pavimentação flexível



Fonte: CNT, (2018)

4.3 AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

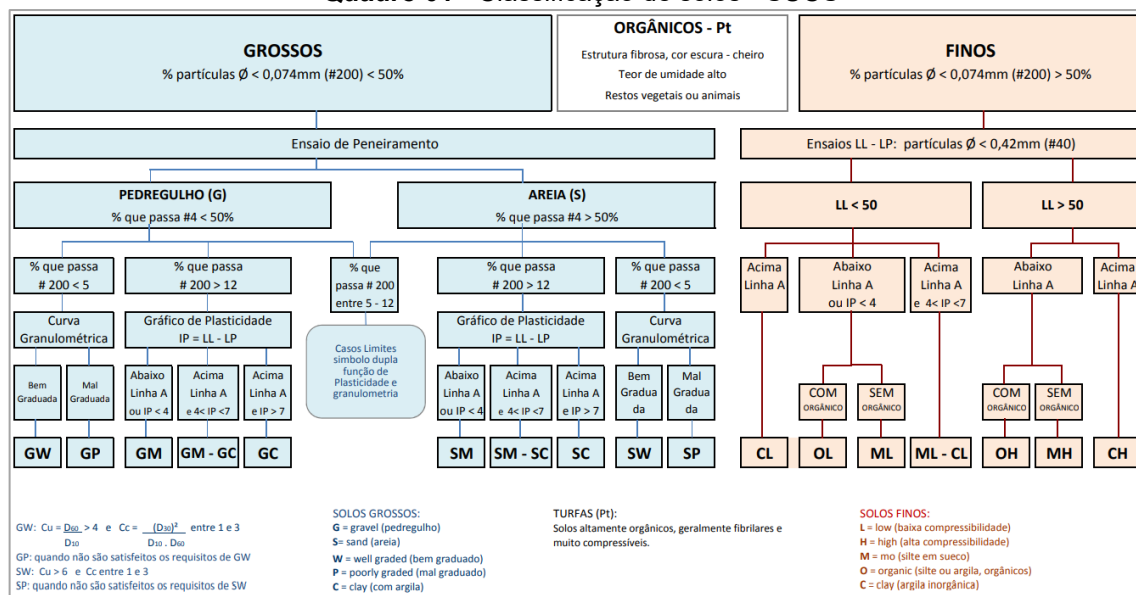
As características geotécnicas do solo exercem influência direta no desempenho estrutural dos pavimentos flexíveis, sendo um dos fatores mais críticos na fase de projeto. A resistência, a capacidade de suporte, a permeabilidade e a suscetibilidade às variações de umidade são propriedades que impactam diretamente a estabilidade e a durabilidade da estrutura viária. Solos de baixa resistência, alta plasticidade ou com comportamento expansivo podem comprometer significativamente o desempenho do pavimento, sendo necessário prever soluções específicas para mitigação desses efeitos. A inadequada caracterização ou a

negligência em tratar solos problemáticos pode levar a recalques, deformações e rupturas prematuras da estrutura (Bernucci *et al.*, 2008).

A classificação e identificação dos solos são etapas iniciais essenciais para a definição da solução de pavimentação. No Brasil, é comum a utilização de sistemas como a NBR 6502:1995, que define os tipos de solo com base em sua composição granulométrica e comportamento plástico (ABNT, 1995).

Dentre os principais sistemas de classificação empregados na engenharia de pavimentos, destacam-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (Quadro 1) e o sistema HRB (*Highway Research Board*) (Quadro 2). O SUCS classifica os solos com base em sua granulometria e plasticidade, sendo indicado para análises detalhadas do comportamento do solo. O HRB, por sua vez, utiliza parâmetros granulométricos e índices de plasticidade para gerar o índice de grupo (*Group Index*), que auxilia na avaliação da adequação do solo como subleito. Esses sistemas são amplamente empregados em estudos e projetos de pavimentação no Brasil (DNIT, 2006).

Quadro 01 - Classificação de solos - SUCS



Fonte: UDESC – Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, (2017).

Quadro 02 - Classificação Rodoviária - HRB - AASHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Processo de classificação: Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação.

O primeiro grupo da esquerda que satisfazer os dados será o grupo procurado.

SOLOS A-7: Se $IP \leq LL - 30$, será A-7-5; Se $IP > LL - 30$, será A-7-6.

Índice de Grupo (IG): $IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot b \cdot c + 0,01 \cdot d$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

$a = p - 35$ (se $p > 75\%$, adota-se 75 e se $p < 35\%$, adota-se 35) a varia de 0 a 40 e 0,2. a varia de 0 a 8.

$b = p - 15$ (se $p > 55\%$, adota-se 55 e se $p < 15\%$, adota-se 15) b varia de 0 a 40 e 0,01. $b \cdot d$ varia de 0 a 8.

$c = LL - 40$ (se $LL > 60\%$, adota-se 60 e se $LL < 40\%$, adota-se 40) c varia de 0 a 20 e 0,005. $a \cdot c$ varia de 0 a 4.

$d = IP - 10$ (se $IP > 30$, adota-se 30 e se $IP < 10$, adota-se 10) d varia de 0 a 20 e 0,01. $b \cdot d$ varia de 0 a 8.

$IG_{\min} = 0$ $IG_{\max} = 20$

IG - o resultado final obtido deve ser um nº inteiro - aproximação para o nº inteiro acima.

Fonte: Manual de Técnicas de Pavimentação (2006)

Além desses, o sistema TRB (*Transportation Research Board*) (Quadro 3), adaptado no Brasil como Sistema MCT (Miniatura, Compactação, Tropical), também é amplamente utilizado para compreender o comportamento dos solos tropicais. O sistema MCT é especialmente eficaz na identificação de solos lateríticos e não lateríticos, comuns em regiões de clima tropical, conforme diretrizes técnicas específicas (DNIT, 2010).

Quadro 3 - Classificação de solos TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: Estude Engenharia, (2024).

Solos com elevado teor de argila apresentam alta plasticidade e expansividade, o que os torna suscetíveis a variações volumétricas em função da umidade. Esse comportamento pode comprometer a estabilidade do pavimento, exigindo soluções como estabilização ou substituição do solo. A variação sazonal da umidade em solos argilosos pode provocar expansão e retração significativas, resultando em trincas e perda de suporte das camadas superiores do pavimento (Caputo; Nogami, 2002).

Outro parâmetro fundamental na avaliação da qualidade do solo para pavimentação é o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Esse índice mede a capacidade de suporte do solo e é essencial para o dimensionamento das camadas do pavimento. Solos com baixo CBR exigem reforço adicional, o que eleva os custos de execução. A compactação inadequada ou a umidade fora do ideal também comprometem o desempenho mecânico do solo (IPR-DNIT, 2006).

Nas regiões brasileiras com clima tropical, onde predominam solos lateríticos e há grande variação hídrica ao longo do ano, a compreensão das características geotécnicas locais torna-se ainda mais relevante. A falta de atenção às

particularidades dos solos tropicais e o uso de metodologias inadequadas estão entre as principais causas de falhas prematuras em rodovias (Teixeira *et al.*, 2013).

Portanto, a caracterização detalhada do solo, sua correta classificação e o entendimento de seu comportamento frente às ações do tráfego e das condições ambientais são indispensáveis para o sucesso dos projetos de pavimentação. O uso de sistemas de classificação adequados, métodos específicos para solos tropicais e práticas eficazes de controle tecnológico contribuem para a maior durabilidade dos pavimentos e a redução dos custos de manutenção ao longo do tempo (Bernucci *et al.*, 2008).

4.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um processo fundamental na engenharia civil, visando melhorar as propriedades geotécnicas de um solo para torná-lo adequado a diversas aplicações, principalmente em obras de infraestrutura como pavimentos, aterros e fundações. O objetivo principal é transformar solos com características indesejáveis – como baixa capacidade de suporte, alta compressibilidade ou sensibilidade à umidade – em materiais mais resistentes, estáveis e duráveis. No Brasil, o arcabouço normativo é robusto, com a ABNT NBR 7182 e a NBR 9895 sendo as referências primordiais, definindo os procedimentos de ensaio e as especificações para a estabilização, abrangendo desde a seleção dos materiais até a avaliação da mistura final (Santos e Silva, 2020).

Existem diversas técnicas para a estabilização de solos, e a escolha do método ideal depende das características do solo, do tipo de obra e das condições ambientais. As principais abordagens incluem a estabilização mecânica, que envolve a mistura de solos de diferentes granulometrias para atingir uma distribuição de partículas mais adequada. Por exemplo, pode-se misturar um solo arenoso com um solo argiloso para obter uma granulometria mais uniforme, que melhora a compactação e a capacidade de suporte. O processo geralmente inclui a umidificação e a compactação do material misturado para alcançar a densidade e resistência desejadas (DNIT, 2010).

Outra abordagem é a estabilização química, onde são adicionados aglomerantes ou agentes químicos ao solo para induzir reações que alteram suas propriedades. Os ligantes mais comuns são o cimento, a cal e o asfalto. A adição de cimento ao solo cria uma matriz cimentícia que aumenta significativamente a

resistência à compressão, a durabilidade e a estabilidade dimensional do solo, tornando-o menos suscetível à umidade. Já a cal é particularmente eficaz para solos argilosos, pois reage com os minerais argílicos, promovendo a flocculação das partículas (melhorando a trabalhabilidade), a redução da plasticidade e o aumento da resistência e estabilidade. Para solos granulares, o asfalto é utilizado para ligar as partículas do solo, reduzindo a permeabilidade e aumentando a resistência à umidade e à erosão, sendo comum em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (DNIT, 2010).

Os benefícios da estabilização de solos são vastos. Ela permite o uso de solos locais que, de outra forma, seriam inadequados, reduzindo a necessidade de transporte de materiais de jazidas distantes e, conseqüentemente, os custos e o impacto ambiental. Solos estabilizados apresentam maior capacidade de suporte, o que leva a estruturas mais robustas e duráveis. Além disso, a resistência à umidade e a redução da plasticidade são cruciais para manter o desempenho do pavimento sob variações climáticas, minimizando a ocorrência de deformações e fissuras (DNIT, 2010).

4.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM RESÍDUOS

A estabilização de solos com resíduos industriais tem se consolidado como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para melhorar as propriedades mecânicas de solos empregados em pavimentação. Santos e Silva (2020) destacam que a adição de resíduos como cinzas volantes, escórias e resíduos de construção e demolição (RCD) pode aumentar a capacidade de suporte de solos, o que é fundamental para garantir a estabilidade e durabilidade das camadas de sub-base. A utilização de resíduos, como o *filler* basáltico, tem mostrado bons resultados em diversos estudos, incluindo o aumento do Índice de Suporte Califórnia (CBR), um dos principais parâmetros utilizados para o dimensionamento de pavimentos.

Lukiantchuki *et al.*, (2018) realizaram uma análise sobre o comportamento de misturas de solo-cimento com adição de pó de pedra, incluindo o *filler* basáltico, e observaram uma melhoria significativa na resistência à compressão e na durabilidade das misturas. A adição do *filler* basáltico proporcionou uma melhor distribuição das partículas do solo, o que aumentou a densificação e a resistência do material, evidenciando o potencial do *filler* basáltico como estabilizante de solos.

A utilização de resíduos para estabilização de solos não só melhora as propriedades mecânicas dos solos, mas também traz benefícios ambientais significativos. Fonseca (2020) argumenta que a adoção de materiais alternativos como o *filler* basáltico pode reduzir a dependência de insumos convencionais, como cimento e brita, cujos processos de produção têm um alto custo e impacto ambiental. Dessa forma, além de ser uma solução econômica, o uso de resíduos contribui para a sustentabilidade da construção civil.

No entanto, a aplicação de resíduos na estabilização de solos ainda enfrenta desafios relacionados à falta de normatização específica e à resistência à inovação por parte de alguns profissionais. Santos e Silva (2020) defendem que é crucial o incentivo à pesquisa e a divulgação de resultados para demonstrar a viabilidade técnica e econômica desses materiais.

4.6 NORMAS TÉCNICAS E DIRETRIZES PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um processo essencial na engenharia civil para garantir que os materiais utilizados no pavimento tenham propriedades mecânicas adequadas. No Brasil, a ABNT NBR 7182 e a NBR 9895 são as normas mais utilizadas para definir os procedimentos de ensaio e as especificações para estabilização de solos. Essas normas são fundamentais para garantir a qualidade dos materiais e a segurança das estruturas rodoviárias, já que descrevem métodos de ensaio rigorosos para avaliar a resistência e a durabilidade dos solos estabilizados (Santos e Silva, 2020).

A estabilização não é um processo aleatório; ela se baseia em um conjunto de diretrizes e normativas que visam a otimização do desempenho e a longevidade das estruturas. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio de suas publicações e manuais, como o DNIT (2010), desempenha um papel crucial na orientação dos profissionais.

Ao se considerar a utilização de materiais alternativos na estabilização de solos, o DNIT (2010) enfatiza a imperativa necessidade de um estudo prévio aprofundado. Esse estudo demanda a investigação de uma série de parâmetros do solo e do material a ser incorporado, como a granulometria, a plasticidade (medida pelos limites de Atterberg) e as propriedades de compactação (determinadas por ensaios como o Proctor). O objetivo principal desses estudos é evitar resultados

indesejados que possam comprometer a durabilidade do pavimento e a segurança da obra (DNIT, 2010).

Além disso, a pesquisa não deve se restringir apenas às características iniciais dos materiais. É vital que ela também abranja o comportamento desses materiais sob diversas condições climáticas e de tráfego, avaliando o impacto a longo prazo. Um solo estabilizado pode ter um excelente desempenho em condições de seca, mas pode se tornar instável quando exposto a ciclos de molhamento e secagem, ou congelamento e degelo. Da mesma forma, o tipo e a intensidade do tráfego rodoviário exercem pressões e deformações que podem comprometer a estrutura do pavimento a longo prazo (DNIT, 2010).

As normas técnicas, além de assegurar a qualidade e segurança das obras, são fundamentais para definir limites para a quantidade de material que pode ser adicionado ao solo. A incorporação excessiva de aditivos, mesmo aqueles com propriedades benéficas, pode ter um efeito contraproducente. A adição descontrolada de materiais pode alterar negativamente o comportamento do solo, resultando em problemas de compactação ou causando a fragilidade do pavimento, tornando-o mais suscetível a deformações e falhas sob carga (DNIT, 2010).

4.7 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE

A construção civil é historicamente reconhecida como uma das atividades que mais consome recursos naturais e gera resíduos sólidos. Estima-se que o setor seja responsável por cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos em países em desenvolvimento, sendo grande parte desses resíduos descartada de forma inadequada. Essa realidade contribui para impactos ambientais como o assoreamento de corpos d'água, a degradação de áreas verdes e a poluição visual (John; Agopyan, 2002).

De acordo com Pinto (1999), os resíduos da construção e demolição (RCD) podem representar até 70% do volume total de resíduos sólidos urbanos em centros urbanos, tornando essencial a implementação de políticas públicas eficazes para sua gestão.

Nos últimos anos, diversas iniciativas têm buscado integrar o conceito de economia circular ao setor da construção. A reciclagem de resíduos de concreto para uso como agregados reciclados, a reutilização de madeira em acabamentos e o

aproveitamento de resíduos cerâmicos para produção de blocos são exemplos de estratégias adotadas. Segundo Rodrigues *et al.* (2014), essas práticas não apenas reduzem os impactos ambientais, como também promovem economia nos custos de transporte, disposição final e aquisição de materiais.

Além dos resíduos gerados nos canteiros, destaca-se o uso de subprodutos industriais como insumos alternativos na construção civil. Materiais como escória de alto-forno, cinzas volantes e resíduos minerais têm sido incorporados em concretos e argamassas, com melhorias nas propriedades técnico-mecânicas. Angulo *et al.* (2009), demonstram que a utilização de escória de aciaria como agregado em concretos não estruturais e cinzas volantes como adições minerais em cimentos tem apresentado resultados positivos, contribuindo para a redução da extração de matérias-primas naturais.

Apesar dos avanços, persistem desafios que dificultam a consolidação de uma cadeia produtiva mais sustentável. Entre eles, destacam-se a resistência do setor à adoção de materiais reciclados, a escassez de normativas técnicas específicas e a ausência de incentivos fiscais para empresas que investem em práticas ambientalmente corretas. Conforme Oliveira *et al.* (2019), é imprescindível fortalecer a pesquisa aplicada, regulamentar o uso de resíduos na construção e capacitar os profissionais do setor, garantindo que a sustentabilidade seja efetivamente aplicada nas obras.

Nesse contexto, materiais com potencial de reaproveitamento, como o *filler* mineral, também têm sido estudados para aplicação em camadas de pavimentação. Embora sua contribuição ambiental seja mais localizada, o uso de *filler* proveniente de resíduos minerais pode melhorar o desempenho de misturas asfálticas e reduzir a demanda por materiais convencionais. Na indústria da nossa região, esse material costuma ser estocado por falta de destino, o que reforça a importância de desenvolver alternativas para seu reaproveitamento em obras de infraestrutura Oliveira *et al.* (2019).

Leite *et al.* (2018) ressaltam que, especialmente na produção de CBUQ, o *filler* basáltico pode representar uma solução técnica e ambientalmente adequada, quando aplicado com critérios.

4.8 FILLER BASÁLTICO E SUAS PROPRIEDADES

O *filler* basáltico, um subproduto gerado durante o processo de britagem de rochas basálticas, é um material particulado amplamente utilizado em misturas asfálticas, especialmente na produção de CBUQ. Sua aplicação em pavimentação tem se mostrado promissora, uma vez que apresenta uma série de propriedades físico-químicas favoráveis à melhoria do desempenho mecânico dos materiais. Lukiantchuki *et al.* (2018), destacam que o *filler* basáltico, devido à sua alta finura e grande área superficial, tem a capacidade de melhorar a compactação e a resistência mecânica de solos e misturas asfálticas. Essas características, combinadas com sua composição mineralógica rica em sílica e óxidos de ferro, são fatores essenciais para a estabilidade e durabilidade de pavimentos.

O estudo de Lukiantchuki *et al.*, (2018), sobre misturas de solo-cimento com adição de pó de pedra demonstrou que a incorporação de *filler* basáltico pode resultar em um aumento significativo da resistência à compressão e à durabilidade das misturas. Além disso, o *filler* basáltico atua como um excelente material de preenchimento, o que melhora a distribuição das partículas e contribui para a densificação do solo. A adoção desse material em pavimentações pode ser uma alternativa eficaz, especialmente em regiões onde a escassez de materiais convencionais representa um obstáculo para a construção e manutenção de infraestruturas de qualidade.

Leite *et al.*, (2018), também ressaltam que a presença de óxidos de ferro e sílica no *filler* basáltico confere ao material a capacidade de formar ligações químicas que aumentam sua resistência à deformação e ao desgaste, sendo uma vantagem significativa para o desempenho das pavimentações. A utilização desse material como estabilizante de solos pode contribuir para o aumento da coesão das partículas, resultando em solos mais resistentes e estáveis.

Apesar dessas vantagens, a aplicação do *filler* basáltico em pavimentação requer cuidados na dosagem e no controle das condições de compactação. Santos e Silva (2020) alertam que o uso excessivo de *filler* pode levar à diminuição da permeabilidade do solo, o que pode resultar na retenção de água e, eventualmente, na degradação do pavimento. Por isso, é essencial realizar ensaios laboratoriais para determinar a dosagem ideal de *filler* basáltico em diferentes tipos de solo e em diversas condições de compactação, estudando, inclusive, a hipótese de realizar

outros graus de compactação, de modo a avaliar o desempenho do material em diferentes níveis de energia aplicada.

4.9 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (CBR) é um parâmetro fundamental para avaliar a resistência de solos e materiais utilizados na pavimentação de rodovias. Ele é obtido a partir de ensaios de laboratório, nos quais um pistão penetra no solo ou material compactado, e a resistência à penetração é medida para calcular o CBR (Santos e Silva, 2020).

O resultado obtido é comparado com o esforço que o pistão exerce para penetrar em uma amostra padrão de brita graduada simples (BGS), permitindo assim estabelecer um índice relativo de suporte. Esse índice é essencial para determinar a espessura das camadas de pavimento, pois quanto maior o CBR, maior a capacidade de suporte do solo, o que pode reduzir a necessidade de materiais em camadas mais espessas (DNIT, 2010).

Um CBR elevado implica que o solo possui boa resistência ao tráfego, o que se traduz em maior durabilidade e menor manutenção ao longo do tempo. De acordo com Lukiantchuki *et al.* (2018), o CBR tem uma correlação direta com o desempenho do pavimento em termos de resistência à deformação, e solos com CBR alto são menos suscetíveis a danos estruturais. Este parâmetro é frequentemente utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, facilitando a escolha de materiais adequados e a otimização do projeto.

O CBR também é útil para a análise de solos modificados com aditivos, como o cimento e os *fillers* basálticos, que podem melhorar significativamente a resistência do solo. Fonseca (2020), destaca que a adição desses materiais pode resultar em um aumento considerável do CBR, o que é vantajoso para solos de baixa qualidade, como argilas e solos orgânicos, que naturalmente apresentam resistência inferior.

De acordo com os estudos de Lukiantchuki *et al.* (2018), a adição de *filler* basáltico a solos com baixa plasticidade aumentou o CBR, o que proporcionou melhorias nas características do solo para o uso em pavimentação. Isso ocorre devido à alteração da estrutura do solo e à redução dos vazios, o que contribui para maior coesão e resistência. Além disso, a utilização de *fillers* não apenas melhora a

capacidade de suporte do solo, mas também é uma forma de reutilizar resíduos, promovendo a sustentabilidade no setor de pavimentação.

A precisão dos ensaios de CBR é vital para garantir que o dimensionamento do pavimento seja adequado às condições reais do solo. A norma ABNT NBR 9895 descreve os procedimentos para a realização do ensaio, e a observância rigorosa desses procedimentos garante que os resultados sejam confiáveis e representem corretamente as condições de campo (Santos e Silva, 2020). A aplicação correta dos métodos de ensaio é um aspecto crucial para evitar falhas estruturais no pavimento, que podem resultar em custos elevados e desgaste precoce da infraestrutura.

No Brasil, o DNIT (2010), utiliza o CBR como um dos principais parâmetros para o dimensionamento de pavimentos rodoviários, devido à sua simplicidade e eficácia. Para solos com CBR superior a 10, é possível utilizar pavimentos de menor espessura, o que proporciona uma economia significativa no projeto. Esse fator é especialmente importante em regiões com grandes extensões de rodovias, onde a otimização dos custos e materiais é fundamental.

A variação do CBR em função das condições climáticas, como a umidade, também deve ser considerada. Solos com baixa capacidade de drenagem podem apresentar queda no CBR em períodos de chuva intensa, o que compromete a estabilidade do pavimento. Isso exige um planejamento adequado do sistema de drenagem e a utilização de materiais capazes de suportar variações de umidade sem comprometer a resistência estrutural (Da Silva *et al.*, 2019).

4.10 LACUNAS E POTENCIAIS DE USO DE *FILLER* BASÁLTICO

O *filler* basáltico tem ganhado atenção crescente na construção civil por seu potencial de melhorar propriedades físico-mecânicas de materiais utilizados na pavimentação, como a resistência e a durabilidade de misturas estabilizadas. No entanto, ainda existem lacunas relevantes no conhecimento técnico sobre seus efeitos em longo prazo, especialmente sob condições ambientais e de tráfego variadas (Fonseca, 2020).

Segundo Fonseca (2020), muitos estudos apresentam limitações quanto à escalabilidade dos resultados e desconsideram variáveis de campo, como o desempenho em diferentes tipos de solo e climas extremos.

Um dos principais desafios na aplicação do *filler* basáltico está na ausência de uma metodologia padronizada para definição da dosagem ideal. De acordo com Silva e Lima (2019), essa dosagem depende diretamente do tipo de solo, das condições locais e da finalidade estrutural pretendida. Além disso, a interação do *filler* com outros aditivos ou materiais estabilizantes ainda não é completamente compreendida, sendo necessária uma abordagem integrada em futuras pesquisas, inclusive quanto aos impactos ambientais de sua produção e uso.

Apesar dessas limitações, estudos vêm demonstrando benefícios significativos do uso do *filler* quando sua aplicação é tecnicamente bem fundamentada. Lukiantchuki *et al.* (2018) destacam que a adição de *filler* basáltico em misturas solo-cimento pode aumentar significativamente a resistência à tração e à compressão, o que favorece a durabilidade de pavimentos submetidos a tráfego intenso ou variações climáticas severas. Ainda assim, o comportamento do material frente à umidade e temperatura ao longo do tempo precisa ser mais bem investigado.

Outro aspecto que limita a expansão do uso do *filler* basáltico é a ausência de normativas técnicas específicas que regulem sua aplicação. Essa falta de regulamentação resulta em diferentes práticas entre pesquisadores e profissionais, dificultando a comparação entre resultados e a adoção segura da técnica. Segundo Almeida *et al.* (2020), a criação de normas técnicas para esse material permitiria padronizar procedimentos, promover segurança técnica e reduzir incertezas durante a execução de obras.

Além dos benefícios técnicos, o uso do *filler* basáltico representa uma alternativa econômica e ambientalmente vantajosa, especialmente em países como o Brasil, onde há abundância de rochas basálticas. A utilização de um resíduo da britagem de agregados reduz custos de transporte e matéria-prima, além de minimizar impactos ambientais. Essa prática também se alinha aos princípios da economia circular e da sustentabilidade no setor de infraestrutura (Almeida *et al.*, 2020).

Por fim, ainda é necessário ampliar o entendimento sobre a interação do *filler* basáltico com diferentes tipos de solo, especialmente em condições reais de uso. Ensaio laboratoriais mais robustos, testes de campo e estudos de longa duração são fundamentais para avaliar o comportamento mecânico e a durabilidade do material ao longo do tempo. Assim, será possível consolidar sua aplicação como alternativa viável e sustentável em projetos de pavimentação (Fonseca, 2020).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 COLETA DOS MATERIAIS

Os materiais empregados nesta pesquisa foram dois: o solo natural e o *filler* basáltico. O solo natural foi coletado na área experimental da Faculdade UNIGUAÇU (Figura 3), localizada no município de São Miguel do Iguaçu, oeste do Paraná.

O *filler* basáltico utilizado nesta pesquisa foi fornecido por uma empresa localizada no município de Itaipulândia-PR. Esse material consiste no particulado fino retido nos filtros de manga de uma usina de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), sendo gerado durante o processo de produção de misturas asfálticas que utilizam agregados de origem basáltica.

Figura 3 - Local de coleta de material



Fonte - Google Earth Pro, (2026).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.2.1 Análise Granulométrica (ABNT 7181:2025)

A Análise Granulométrica foi realizada conforme a ABNT NBR 7181:2025, com o objetivo de caracterizar a distribuição de tamanho das partículas do solo e do *filler* basáltico. O procedimento adotado compreendeu o peneiramento convencional (a

seco) para avaliação das frações graúdas e finas, fornecendo os dados necessários para os estudos geotécnicos subsequentes.

- a) A amostra de solo foi seca em estufa a uma temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ pelo período de 24 horas, conforme a seção 6 da ABNT NBR 7181:2025.
- b) O material seco foi vertido em um conjunto de peneiras acopladas em ordem decrescente de abertura, incluindo as peneiras de malha #40 (0,425 mm), #100 (0,150 mm) e #200 (0,075 mm), com um fundo para a coleta do material passante na última peneira.
- c) Promoveu-se a agitação mecânica do conjunto de peneiras para garantir a passagem das partículas e a separação efetiva de cada fração do material.
- d) Após a agitação, determinou-se a massa do material retido em cada uma das peneiras e no fundo, utilizando uma balança de precisão.
- e) A partir das massas retidas, calcularam-se as porcentagens retidas simples e as porcentagens passantes acumuladas em relação à massa total da amostra ensaiada.
- f) A curva granulométrica foi construída em escala semilogarítmica, plotando-se a abertura nominal das peneiras no eixo logarítmico e a respectiva porcentagem passante acumulada no eixo aritmético.

5.2.1 Determinação da Massa Específica do Agregado Miúdo (Frasco Chapman)

O ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo foi realizado conforme a norma **DNER-ME 194/98**, utilizando o método do frasco de Chapman. Este procedimento é essencial para caracterizar as propriedades físicas do material e fornecer dados precisos para o cálculo de dosagens e controle de volume das misturas. O método baseia-se no deslocamento de volume de um fluido conhecido após a introdução de uma massa definida de agregado seco.

- a) A amostra de agregado miúdo foi previamente seca em estufa, a uma temperatura entre 105°C e 110°C , até atingir constância de massa, sendo posteriormente resfriada em dessecador.
- b) O frasco de Chapman foi preenchido com água até a marca de 200 cm^3 , sendo mantido em repouso para garantir o escoamento total da água aderida às paredes internas do gargalo.

- c) Uma massa de 500 g do agregado miúdo seco foi introduzida cuidadosamente no frasco, utilizando-se um funil para evitar a perda de material ou a adesão de grãos nas paredes superiores.
- d) O conjunto foi agitado manualmente de forma vigorosa para promover a expulsão de bolhas de ar ocultas entre os grãos do agregado.
- e) Após a estabilização do nível da água, realizou-se a leitura do volume final (L) no gargalo graduado do frasco, com precisão de 0,1 cm³.
- f) A massa específica (γ) foi calculada pela relação entre a massa do material seco (500 g) e o volume por ele deslocado ($L - 200$), conforme a expressão: $\gamma = 500/(L - 200)$.

Conforme preconizado pela norma, o ensaio foi realizado em duplicata. Os resultados obtidos para o agregado miúdo natural serviram como parâmetro de controle para a caracterização física dos materiais utilizados na pesquisa. A manutenção de um procedimento padronizado de ensaio garantiu que as variações observadas nos resultados subsequentes fossem atribuídas exclusivamente às características intrínsecas dos materiais e das proporções de mistura adotadas.

5.3 ENSAIOS NO SOLO NATURAL

5.3.1 Limite de Liquidez (LL) (ABNT NBR 6459:2018) – Método Casagrande

O Limite de Liquidez (LL) foi determinado pelo Método de Casagrande, conforme a ABNT NBR 6459:2018, sendo um dos parâmetros fundamentais para a caracterização do comportamento do solo fino estudado. O ensaio estabeleceu o teor de umidade no qual o solo passou do estado plástico para o líquido, sendo essencial para a classificação e avaliação de suas propriedades geotécnicas. O procedimento envolveu a preparação criteriosa de amostras em diferentes umidades, a execução padronizada do ensaio no aparelho de Casagrande (Figura 4) e a análise estatística dos resultados para garantir a precisão na determinação do LL.

Figura 4 - Ensaio Limite de Liquidez



Fonte - Autor, (2026).

- a) Foram preparadas um mínimo de cinco amostras de solo com diferentes teores de umidade, abrangendo a faixa na qual o solo passou do estado plástico para o líquido, conforme a seção 6 da ABNT NBR 6459:2018.
- b) Cada amostra foi homogeneizada completamente em uma cápsula de porcelana utilizando uma espátula por um período mínimo de 15 minutos, para garantir a distribuição uniforme da água.
- c) A pasta de solo foi colocada no copo do aparelho de Casagrande, pressionada para eliminar bolhas de ar e nivelada na superfície superior com uma régua de aço, conforme o item 7.2 da ABNT NBR 6459:2018.
- d) Foi aberta uma ranhura na amostra de solo com o cinzel padrão do aparelho de Casagrande, garantindo as dimensões especificadas na norma (largura superior: 11 mm, largura inferior: 2 mm, profundidade: 8 mm), conforme o item 7.3 da ABNT NBR 6459:2018.
- e) A manivela do aparelho foi acionada a uma velocidade de aproximadamente 2 golpes por segundo até que as bordas da ranhura se encontrassem em um comprimento de exatamente 12,7 mm (1/2 polegada) na parte inferior, conforme o item 7.4 da ABNT NBR 6459:2018.
- f) Imediatamente após o fechamento da ranhura, foram coletadas três pequenas porções de solo próximas à região de fechamento para a determinação do teor de umidade.

- g) O teor de umidade de cada porção foi determinado seguindo a ABNT NBR 6457:2016, com a pesagem da cápsula tarada, da cápsula com solo úmido, secagem em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por no mínimo 24 horas, pesagem após resfriamento em dessecador e posterior cálculo do teor de umidade.
- h) A curva de fluidez foi construída em gráfico semilogarítmico, com o número de golpes (N) no eixo logarítmico e o teor de umidade (w) no eixo aritmético, plotando os pontos obtidos para cada amostra.
- i) O Limite de Liquidez (LL) foi determinado graficamente como o teor de umidade correspondente a 25 golpes na curva de fluidez, conforme o item 8 da ABNT NBR 6459:2018.

5.3.2 Limite de Plasticidade (LP) (ABNT NBR 7180:2016)

O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado conforme a ABNT NBR 7180:2016, constituindo um parâmetro essencial para a caracterização do comportamento do solo fino. O ensaio definiu o teor de umidade no qual o solo deixou de ser plástico e passou a se comportar como material quebradiço. Em conjunto com o Limite de Liquidez (LL) e o Índice de Plasticidade (IP), o LP permitiu a classificação do solo e a avaliação de suas propriedades geotécnicas.

O método consistiu na moldagem manual de cilindros de solo (Figura 5) e na determinação precisa do teor de umidade no momento em que o material se rompeu sob condições controladas de rolagem.



Fonte - Autor, (2026).

- a) Foram preparadas no mínimo três amostras de solo com teor de umidade próximo ao Limite de Plasticidade estimado, obtidas a partir do material utilizado no ensaio de Limite de Liquidez, conforme a seção 6 da ABNT NBR 7180:2016.
- b) Cada amostra foi moldada manualmente em cilindro com diâmetro de $3,18 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, utilizando os dedos sobre uma placa de vidro fosco.
- c) O processo de rolagem dos cilindros foi realizado sobre a placa de vidro esmerilhado, com velocidade entre 80 e 90 golpes por minuto e pressão manual equivalente a uma força entre 800 e 900 gramas.
- d) O processo de rolagem foi interrompido no momento em que o cilindro se rompeu ou fissurou ao atingir o diâmetro de aproximadamente 3,18 mm.
- e) Foram coletadas imediatamente três pequenas porções do cilindro rompido para a determinação do teor de umidade, seguindo a ABNT NBR 6457:2016.
- f) Os resultados foram validados verificando que a diferença máxima entre os teores de umidade das três determinações não excedeu 5% do menor valor obtido, conforme o item 7.4 da ABNT NBR 7180:2016.

5.4 ENSAIO CBR (ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA) (ABNT NBR 9895:2016)

5.4.1 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi uma etapa fundamental para a avaliação das propriedades geotécnicas do solo natural e de suas misturas com *filler*. O procedimento foi realizado conforme metodologia padronizada, visando garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos ensaios subsequentes. A técnica de compactação em diferentes teores de umidade permitiu estabelecer a curva de compactação e determinar as condições ótimas para cada mistura, essenciais para as análises de capacidade de suporte e comportamento mecânico.

- a) Foram preparados no mínimo cinco corpos de prova para cada condição de ensaio (solo natural e misturas com *filler*), cada um compactado em um teor de umidade diferente.
- b) O solo foi compactado em molde cilíndrico padrão, em cinco camadas de aproximadamente igual espessura, aplicando 12 golpes com soquete padrão do ensaio CBR.

- c) Após a compactação, o colar do molde foi removido e a superfície do corpo de prova nivelada com uma régua de aço.
- d) A altura do corpo de prova compactado foi medida com precisão em pelo menos três pontos para determinar a altura média.

5.4.2 Processo de Imersão

O processo de imersão (Figura 6) foi uma etapa crítica na avaliação do comportamento expansivo dos solos compactados, simulando condições de saturação que ocorrem em campo. O procedimento foi realizado conforme a ABNT NBR 9895:2016, permitindo quantificar a expansão vertical do material quando submetido à ação da água.

A metodologia padronizada incluiu a aplicação de sobrecarga representativa de pavimentos e o monitoramento sistemático das deformações ao longo de 96 horas de saturação.

Figura 6 - Processo de imersão



Fonte - Autor, (2026).

- a) Um disco poroso foi colocado sobre a superfície superior do corpo de prova compactado e foi aplicada uma sobrecarga anular com massa de 4,54 kg (equivalente à pressão de um pavimento).
- b) O molde contendo o corpo de prova foi imerso em um tanque com água (Figura 7), mantendo o nível d'água aproximadamente 25 mm acima da superfície superior da

amostra, pelo período de 96 horas (4 dias), conforme especificado na ABNT NBR 9895:2016.

c) As leituras da expansão vertical do corpo de prova (Figura 8) foram realizadas utilizando micrômetro com precisão de 0,01 mm nos seguintes tempos após o início da imersão: 0h, 24h, 48h, 72h e 96h.

d) A expansão percentual foi calculada para cada corpo de prova.

5.4.3 Ensaio de Penetração

O Ensaio de Penetração foi realizado conforme a ABNT NBR 9895:2016, sendo um procedimento fundamental para avaliar a resistência dos solos compactados à penetração e determinar o Índice de Suporte Califórnia (CBR). O ensaio simulou as condições de solicitação mecânica que o solo sofrerá em campo.

O método consistiu na aplicação de carga crescente sobre o corpo de prova previamente saturado, permitindo a obtenção de parâmetros indicativos da capacidade de suporte do material.

a) O corpo de prova foi removido do tanque de imersão após 96 horas e o excesso de água foi drenado por aproximadamente 15 minutos.

b) O corpo de prova foi posicionado na prensa CBR (Figura 9) e foi aplicada a mesma sobrecarga utilizada durante o período de imersão (4,54 kg).

c) Uma carga foi aplicada sobre o pistão de penetração (diâmetro de 49,6 mm) a uma velocidade constante de $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,05 \text{ mm/min}$, conforme o item 7.3 da ABNT NBR 9895:2016.

d) Os valores de carga foram registrados nos seguintes tempos: 30 segundos, 1 minuto, 1 minuto e 30 segundos, 2 minutos, 3 minutos, 4 minutos e 6 minutos.

e) A curva carga-penetração foi construída em gráfico cartesiano (Figura 10), com a penetração no eixo das abscissas e a carga no eixo das ordenadas.

f) O Índice de Suporte Califórnia (CBR) foi calculado para as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm.

Os resultados obtidos neste ensaio, em especial a umidade ótima de compactação determinada para o solo natural, serviram de referência para a etapa subsequente da pesquisa, na qual foram moldadas as misturas de solo com *filler* basáltico nos teores de 3%, 6%, 9% e 12%. A adoção da umidade ótima do solo

natural como parâmetro de moldagem das misturas garantiu padronização experimental e isolou o efeito do *filler* como única variável sob investigação.

5.5 ENSAIO CBR DAS MISTURAS SOLO-*FILLER*

5.5.1 Adaptações Metodológicas

As adaptações metodológicas descritas a seguir tiveram como objetivo assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos ensaios realizados nas misturas solo-*filler*, seguindo normas técnicas estabelecidas. Esses procedimentos incluíram a moldagem dos corpos de prova com energia de compactação equivalente à do ensaio CBR, o controle preciso do teor de umidade e o monitoramento sistemático da expansão vertical durante o período de imersão.

Os corpos de prova das misturas solo-*filler* foram moldados com a mesma energia de compactação utilizada no ensaio CBR do solo natural (12 golpes por camada), conforme a ABNT NBR 9895:2016. Como parâmetro de moldagem, adotou-se o teor de umidade ótima determinado para o solo in natura, obtido no Ensaio de Penetração, sem adição de *filler*. Essa decisão metodológica garantiu que todas as misturas fossem compactadas em condição equivalente à do solo de referência, permitindo isolar o efeito do *filler* como única variável independente.

O teor de umidade das misturas foi controlado durante a moldagem dentro de uma tolerância de $\pm 0,5\%$ em relação ao valor estabelecido, com verificação em amostras aleatórias conforme a ABNT NBR 6457:2016. Esse procedimento de aferição foi adotado para mensurar a umidade real do solo no momento da moldagem, descontando a parcela de umidade higroscópica retida pela amostra em equilíbrio com a atmosfera do laboratório. Tal correção é essencial porque a omissão da umidade higroscópica pode introduzir erros sistemáticos no cálculo da água de molhagem necessária, comprometendo a representatividade do ponto ótimo de compactação reproduzido nos corpos de prova.

As leituras de expansão vertical dos corpos de prova imersos em água foram realizadas a cada 24 horas durante o período de imersão de 96 horas.

5.5.2 Parâmetros Avaliados

Os parâmetros avaliados neste estudo buscam compreender a influência da adição de *filler* basáltico nas propriedades geotécnicas do solo, com enfoque na capacidade de suporte e no potencial expansivo das misturas. A análise desses aspectos permitiu determinar a dosagem ideal de *filler* para aplicações práticas em sub-bases de pavimentação, sob o ponto de vista do desempenho mecânico.

- a) Variação do valor de CBR das misturas solo-*filler* em função do teor de *filler* basáltico adicionado, comparando com o CBR do solo natural.
- b) Comportamento expansivo das misturas em diferentes teores de *filler* durante o ensaio de imersão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios geotécnicos foram conduzidos no laboratório da Faculdade UNIGUAÇU, em São Miguel do Iguaçu/PR, segundo as normas brasileiras vigentes: ABNT NBR 6459:2018 (Limite de Liquidez), NBR 7180:2016 (Limite de Plasticidade), NBR 7181:2016 (Análise Granulométrica), NBR 7182:2016 (Ensaio de Compactação) e NBR 9895:2016 (Índice de Suporte Califórnia). Para o *filler* basáltico, a determinação da massa específica real dos grãos foi feita conforme DNER ME 194/98.

Foram avaliadas as seguintes dosagens: solo natural (0% de *filler*) e a incorporação de *filler* basáltico nas proporções de 3%, 6%, 9% e 12% em massa. Os resultados consolidados estão resumidos no Quadro 4 e serão discutidos nas seções subsequentes. Os dados detalhados estão disponíveis nos apêndices.

Quadro 4 - Resumo dos resultados

Parâmetro	0%	3%	6%	9%	12%
Limite de Liquidez (%)	28,58	27,31	26,14	25,23	24,49
Limite de Plasticidade (%)	22,01	21,75	21,43	21,07	20,84
Índice de Plasticidade (%)	6,57	5,56	4,71	4,16	3,65
Classificação HRB/AASHTO	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4
Umidade Ótima (%)	29,08	29,12	29,15	29,20	29,25
pd máx (g/cm ³)	1,5117	1,5184	1,5225	1,5260	1,5180
Grau de Saturação (%)	97,6	98,2	98,8	99,5	99,7
CBR (%)	9,57	12,85	16,94	21,41	19,04
Expansão (%)	0,409	0,348	0,313	0,261	0,243
Atende DNIT?	Não	Não	Não	Sim	Não

Fonte: Autor, (2026).

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO *FILLER* BASÁLTICO

A densidade real dos grãos do *filler* basáltico foi determinada pelo método do picnômetro, conforme DNER ME 194/98, com três amostras independentes. Os resultados obtidos foram 2,9035, 2,9093 e 2,9163 g/cm³, com média de 2,9097 g/cm³ e desvio padrão de 0,0064 g/cm³ apresentados na Apêndice A. A variação entre o maior e o menor valor foi de 0,0128 g/cm³, situando-se confortavelmente abaixo do limite normativo de 0,05 g/cm³ estabelecido pelo item 7.2 da DNER 194/98.

O valor obtido é compatível com a litologia regional. Basaltos da Formação Serra Geral, predominantes na Bacia do Paraná, apresentam densidade real entre 2,85 e 3,00 g/cm³ (LEINZ; AMARAL, 2001).

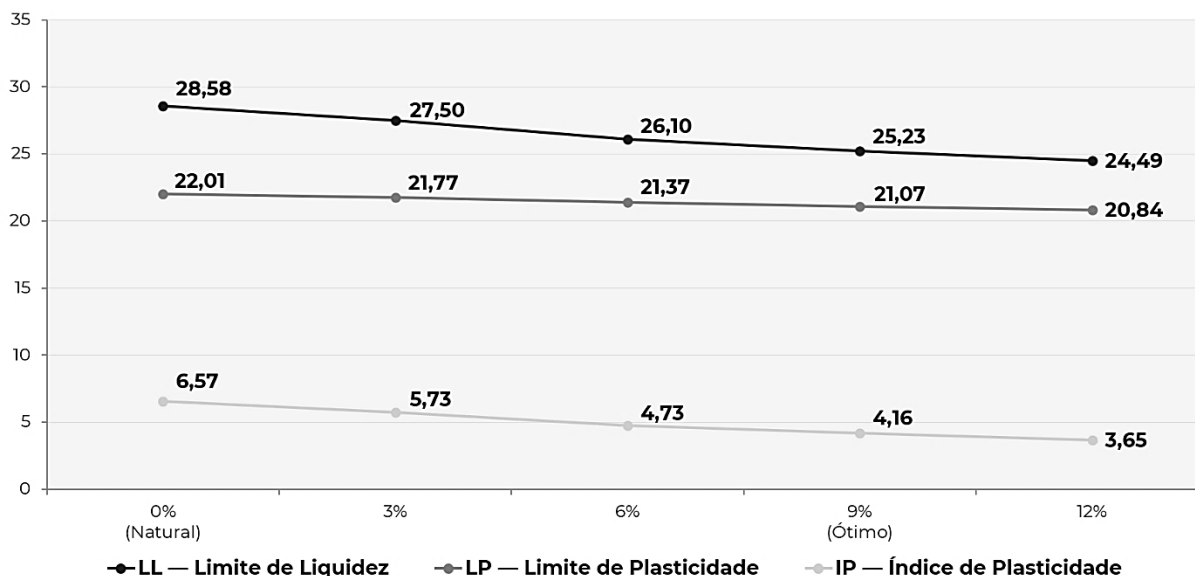
Por se tratar de um resíduo de britagem, o *filler* preserva a composição mineralógica e a densidade do basalto de origem, diferenciando-se nitidamente das argilas lateríticas do solo natural ($G_s \approx 2,75$ g/cm³). Essa diferença mineralógica é o ponto de partida para compreender o comportamento mecânico e plástico das misturas analisadas.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO-*FILLER* BASÁLTICO

Os limites de Atterberg apresentaram comportamento decrescente sistemático com o aumento do teor de *filler* basáltico. O Limite de Liquidez (LL) reduziu-se de 28,58% no solo natural para 24,49% na mistura com 12% de *filler* — uma queda de 4,09 pontos percentuais (-14,3%). O Limite de Plasticidade (LP) acompanhou a tendência, porém em menor magnitude, decrescendo de 22,01% para 20,84% (queda de 1,17 ponto, -5,3%). Como consequência direta, o Índice de Plasticidade (IP) caiu de 6,57% para 3,65%, representando uma redução de 44,4%.

A redução observada nos limites de Atterberg merece análise mineralógica detalhada. À primeira vista, poderia parecer contraintuitivo: o *filler* basáltico é um material extremamente fino (passa praticamente 100% na peneira #200, 0,075 mm), e o senso comum sugeriria que a adição de mais finos a um solo deveria aumentar sua plasticidade. Os resultados, no entanto, mostram exatamente o oposto. A explicação está na natureza mineralógica das partículas adicionadas. A Figura 7 demonstra os resultados dos Limites de Atterberg.

Figura 7 – Limites de Atterberg



Fonte: Autor, (2026).

A plasticidade de um solo não é função da quantidade absoluta de partículas finas, mas da quantidade de argilominerais ativos presentes na matriz. Argilominerais como caulinita, illita e montmorilonita possuem estrutura lamelar, elevada área superficial específica (10 a 800 m²/g, dependendo da espécie) e carga elétrica negativa em suas superfícies. Essas características conferem aos argilominerais a capacidade de adsorver moléculas de água em camadas estruturadas ao redor de suas partículas fenômeno conhecido como água adsorvida (Mitchell; Soga, 2005).

O *filler* basáltico, embora granulometricamente fino, é mineralogicamente um pó de rocha: partículas angulares e irregulares de basalto britado, sem estrutura lamelar, com área superficial específica baixa (estimada em 1 a 3 m²/g) e praticamente sem carga superficial. Diferentemente das argilas, o *filler* é quimicamente inerte e não hidrata.

Ao ser incorporado ao solo, ele atua como um diluidor da fração argilosa ativa: ocupa espaço e contribui com massa, mas não adiciona plasticidade ao conjunto. O resultado, em termos práticos, é que cada quilograma de mistura passa a conter menos argila ativa por unidade de massa, e o comportamento plástico do conjunto diminui proporcionalmente.

De acordo com Mitchell; Soga (2005, p. 47.).

A plasticidade dos solos depende não apenas da quantidade de finos presentes, mas, sobretudo, da natureza mineralógica desses finos. Partículas de granulometria fina, porém quimicamente inertes — como pós de rocha, fileres calcários e cinzas inertes — comportam-se como diluidores da fração ativa, reduzindo o índice de plasticidade do solo sem necessidade de qualquer reação química.

Os dados experimentais revelam que o LL caiu em magnitude maior (–4,09 pp) do que o LP (–1,17 pp). Essa assimetria não é fortuita e tem fundamentação física precisa. O LL e o LP medem estados distintos do solo, governados por mecanismos de retenção de água diferentes.

O Limite de Liquidez corresponde ao teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado de fluido viscoso. Nesse estado, a água presente é majoritariamente água livre intersticial, que preenche os macrovazios entre as partículas e permite o escoamento. O LL é, portanto, sensível à estrutura porosa do solo: quanto maior a fração de macrovazios entre os argilominerais, maior a umidade necessária para atingir esse estado fluido. Quando se adiciona *filler* basáltico, suas partículas finas angulares preenchem parte desses macrovazios, reduzindo o espaço disponível para a água livre e, conseqüentemente, baixando o LL de forma acentuada.

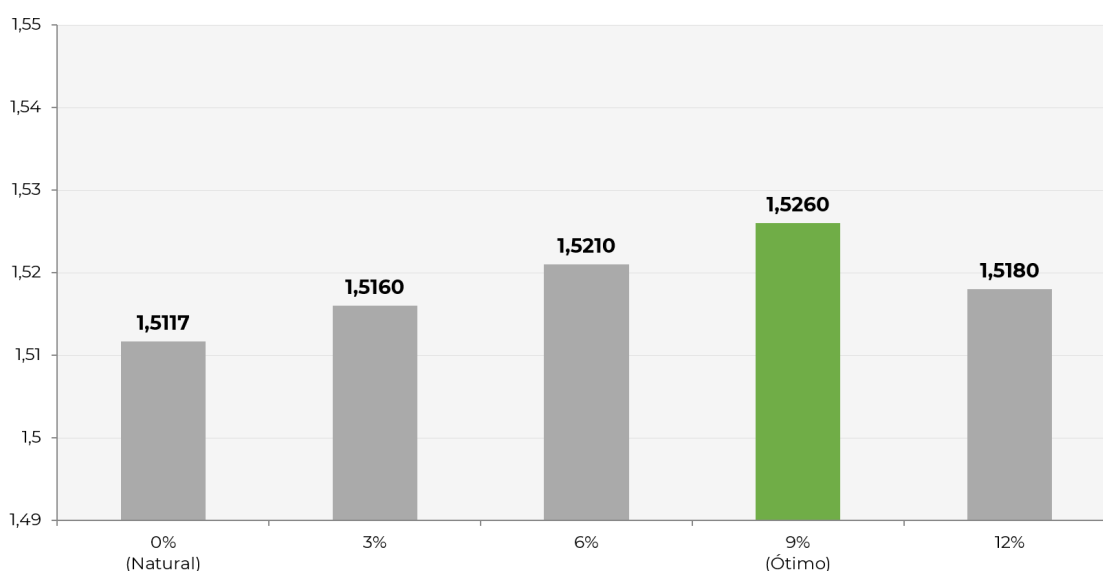
Já o Limite de Plasticidade corresponde ao teor de umidade no qual o solo perde a capacidade de ser moldado sem ruptura — fragmenta-se quando rolado em cilindros de 3 mm. Nesse estado, a água presente é predominantemente água adsorvida nas superfícies dos argilominerais, ligada por forças elétricas e capilares de curto alcance. O LP é, portanto, função quase exclusiva da quantidade e da natureza dos argilominerais presentes, e pouco sensível à estrutura porosa macroscópica. Como o *filler* basáltico não substitui as argilas (apenas dilui sua proporção mássica), o LP diminui de forma mais discreta, refletindo proporcionalmente apenas a redução da fração argilosa.

Dessa diferença de sensibilidade resulta a queda mais acentuada do Índice de Plasticidade ($IP = LL - LP$), que caiu 44,4% entre o solo natural e a mistura com 12% de *filler*. Em termos práticos, isso significa que o *filler* basáltico é um estabilizante físico-mecânico eficaz: reduz a sensibilidade do solo à umidade sem necessidade de reação química, sem tempo de cura e a custo praticamente nulo, diferentemente da cal hidratada ou do cimento Portland.

6.3 COMPACTAÇÃO – PROCTOR NORMAL

Os ensaios de compactação revelaram um comportamento característico dos solos lateríticos do oeste do Paraná: umidades ótimas elevadas (próximas de 29%) e massas específicas aparentes secas moderadas (entre 1,51 e 1,53 g/cm³). A adição de *filler* basáltico provocou, contudo, uma modificação estrutural sutil, porém tecnicamente significativa. A Figura 8 apresenta a variação da umidade ótima e da massa específica seca máxima em função do teor de *filler* basáltico.

Figura 7 – ρ_d máxima seca



Fonte: Autor, (2026).

A umidade ótima (w_{ot}) manteve-se praticamente constante em todos os teores, variando apenas de 29,08% (natural) para 29,25% (12% *filler*) — uma variação de apenas 0,17 ponto percentual, dentro da dispersão típica do próprio ensaio. Esse comportamento é consequência direta do já elevado grau de saturação do solo natural no ponto ótimo ($S = 97,6\%$), característica documentada em solos lateríticos com microagregação caulinita–óxidos de ferro (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

A massa específica aparente seca máxima (ρ_d máx), por sua vez, apresentou crescimento monotônico até o teor de 9% (de 1,5117 para 1,5260 g/cm³, ganho de 0,95%), com posterior queda no teor de 12% (1,5180 g/cm³). Esse aumento é compatível com dois mecanismos físicos atuantes simultaneamente: primeiro, a maior densidade real do *filler* ($G_s = 2,9097$) em relação ao solo natural ($G_s = 2,75$) aumenta a massa específica média da mistura; segundo, as partículas finas angulares do *filler*

preenchem macrovazios da matriz solo, contribuindo para o intertravamento mecânico e a redução do índice de vazios global.

O ponto de inversão observado em 12%, onde a densidade volta a diminuir, indica que, a partir desse teor, há excesso de finos não-plásticos no sistema. Esse excesso prejudica o contato direto grão-a-grão e o intertravamento, configurando uma saturação estrutural da matriz. Esse comportamento é consistente com observações de Lukiantchuki et al. (2018) em misturas similares com pó de pedra e finos de britagem.

6.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA – CBR

Os resultados do Índice de Suporte Califórnia (CBR) demonstraram influência significativa da incorporação de *filler* basáltico no comportamento mecânico do solo estudado. O solo natural apresentou CBR de 9,84%, valor insuficiente para enquadramento como material de sub-base segundo os critérios estabelecidos pelo DNIT (2006). Com a adição progressiva de *filler* basáltico, observou-se aumento contínuo da capacidade de suporte até o teor de 9%, quando foi alcançado o valor máximo de 21,41%.

Comparando-se o solo natural com a mistura contendo 9% de *filler*, verifica-se um aumento de 117,6% no CBR, evidenciando a eficácia da adição como técnica de estabilização físico-mecânica. Os teores intermediários de 3% e 6% apresentaram valores de 12,85% e 16,94%, respectivamente, indicando ganho gradual de resistência à medida que a proporção de *filler* foi elevada. Entretanto, ao aumentar o teor para 12%, observou-se redução do CBR para 19,04%, sugerindo a existência de um limite ótimo de incorporação.

Observa-se uma curva típica de otimização, com crescimento progressivo da resistência até o teor de 9% e posterior redução. Esse comportamento também foi observado por Lukiantchuki et al. (2018), que verificaram a existência de teores ótimos de finos de britagem em misturas estabilizadas, associando o fenômeno ao preenchimento dos vazios e à reorganização estrutural da matriz granular.

Um aspecto particularmente interessante destes resultados é que o aumento do CBR não pode ser atribuído exclusivamente ao incremento da densidade da mistura. A massa específica aparente seca máxima aumentou apenas 0,95% entre o solo natural e a mistura ótima de 9%, enquanto o CBR apresentou incremento superior

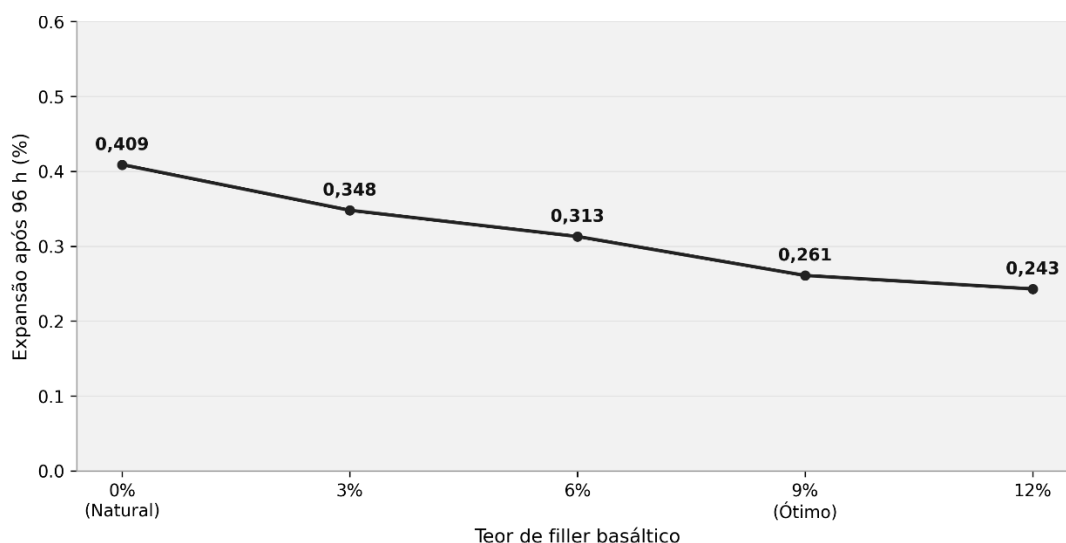
a 117%. Tal diferença evidencia que o ganho de capacidade de suporte possui natureza predominantemente estrutural, e não densimétrica.

Três mecanismos físicos explicam esse comportamento: (i) o intertravamento mecânico promovido pelas partículas angulares do *filler* basáltico, que oferecem maior resistência ao escorregamento entre os grãos durante o carregamento; (ii) a redução da plasticidade da matriz do solo, discutida anteriormente, que diminui a sensibilidade do material à variação de umidade e aumenta sua resistência sob condições de saturação; e (iii) o preenchimento dos macrovazios pela fração fina do *filler*, favorecendo a transferência de tensões e reduzindo o caminho livre médio entre partículas resistentes.

Esse padrão de ganho de CBR predominantemente estrutural é característico de solos lateríticos tratados com adições inertes, conforme reportado por Nogami e Villibor (1995) e Lukiantchuki et al. (2018), diferenciando-se do comportamento frequentemente observado em solos não lateríticos, nos quais o aumento da densidade aparente seca costuma ser o principal responsável pelos ganhos de resistência.

A expansão axial após imersão por 96 horas apresentou comportamento inverso ao observado para o CBR, reduzindo progressivamente com o aumento do teor de *filler*. O solo natural apresentou expansão de 0,409%, enquanto a mistura com 12% de *filler* atingiu 0,243%, correspondendo a uma redução de 40,6%. Todos os teores avaliados apresentaram valores muito inferiores ao limite máximo de 1,0% estabelecido pelo DNIT (2006) para utilização em sub-bases de pavimentos flexíveis, indicando elevada estabilidade volumétrica das misturas.

A Figura 9 apresenta a variação da expansão em função do teor de *filler* basáltico.

Figura 9 - Expansão Axial (96h de imersão)

Fonte: Autor, (2026).

A redução do potencial expansivo é coerente com a diminuição do Índice de Plasticidade observada anteriormente. Como a expansão hidráulica está diretamente relacionada à presença de argilominerais ativos capazes de adsorver água, a diluição da fração argilosa promovida pelo *filler* reduz proporcionalmente a capacidade de absorção hídrica do material e, consequentemente, sua tendência expansiva.

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de *filler* basáltico representa uma alternativa tecnicamente viável para melhoria da capacidade de suporte de solos lateríticos destinados a camadas de sub-base. Além de proporcionar ganhos expressivos de resistência, o material contribui para o controle volumétrico das misturas, atributo particularmente relevante para a região oeste do Paraná, onde os ciclos de molhagem e secagem são frequentes. Dessa forma, o *filler* basáltico permite que um solo originalmente inadequado passe a atender aos requisitos mínimos exigidos pelas especificações rodoviárias vigentes.

6.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE *FILLER*

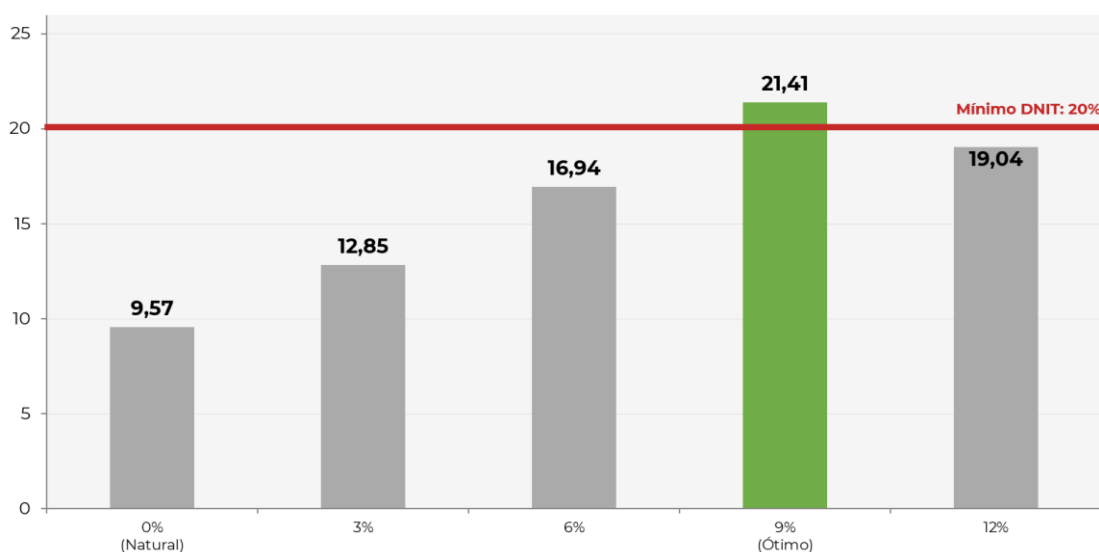
A determinação do teor ótimo de *filler* basáltico foi realizada com base nos critérios de desempenho estabelecidos pelo DNIT (2006) para materiais destinados a camadas de sub-base de pavimentos flexíveis. Foram considerados simultaneamente os parâmetros de capacidade de suporte, representados pelo Índice de Suporte

Califórnia (CBR), e de estabilidade volumétrica, representada pela expansão após imersão.

Cruzando os critérios normativos de $\text{CBR} \geq 20\%$ e $\text{expansão} \leq 1,0\%$, verificou-se que, dentre os cinco teores avaliados, apenas a mistura contendo 9% de *filler* basáltico atendeu simultaneamente aos requisitos estabelecidos. Os teores de 3% e 6% apresentaram valores de CBR inferiores ao mínimo exigido, atingindo 12,85% e 16,94%, respectivamente. Por outro lado, embora o teor de 12% tenha mantido baixa expansão, o CBR reduziu para 19,04%, permanecendo abaixo do valor mínimo requerido.

A Figura 10 apresenta a relação entre o teor de *filler* basáltico e os parâmetros de desempenho avaliados, evidenciando o ponto ótimo de incorporação.

Figura 10 - Índice de Suporte Califórnia (CBR)



Fonte: Autor, (2026).

O teor de 9% apresentou CBR de 21,41% e expansão de apenas 0,261%, atendendo integralmente às exigências normativas. Além disso, quando comparado ao solo natural, esse teor proporcionou aumento de 117,6% na capacidade de suporte e redução de aproximadamente 36,2% na expansão, demonstrando ganhos simultâneos de resistência mecânica e estabilidade volumétrica.

Do ponto de vista físico, esse teor representa o equilíbrio entre dois mecanismos antagônicos. Em baixos teores, o *filler* atua preenchendo vazios, reduzindo a plasticidade e promovendo maior intertravamento entre as partículas do

solo, resultando em aumento progressivo da resistência. Entretanto, quando incorporado em excesso, o material passa a ocupar parcela significativa da estrutura granular, reduzindo o contato efetivo entre partículas resistentes e comprometendo a eficiência do intertravamento mecânico.

O comportamento observado caracteriza uma curva típica de otimização, na qual existe uma faixa de incorporação capaz de maximizar o desempenho geotécnico da mistura. Dessa forma, para as condições de solo e material estudadas, o teor de 9% de *filler* basáltico é considerado o teor ótimo para aplicação em camadas de sub-base, conciliando elevado desempenho mecânico, baixa expansão e atendimento integral às especificações rodoviárias vigentes.

6.6 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E APLICABILIDADE

Os resultados demonstraram que a incorporação de 9% de *filler* basáltico foi suficiente para elevar o CBR do solo de 9,84% para 21,41%, permitindo que o material atendesse aos requisitos mínimos do DNIT (2006) para utilização em camadas de sub-base. Simultaneamente, observou-se redução da expansão de 0,409% para 0,261%, indicando melhoria da estabilidade volumétrica da mistura.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que o *filler* basáltico pode ser utilizado como alternativa para melhoria geotécnica de solos lateríticos da região oeste do Paraná, contribuindo para o aproveitamento de materiais locais e reduzindo a necessidade de substituição de solos ou utilização de estabilizantes convencionais.

Além dos benefícios técnicos, a utilização do *filler* representa uma alternativa de reaproveitamento para um resíduo gerado durante os processos de britagem e produção de misturas asfálticas, agregando valor a um material que normalmente possui baixa destinação comercial.

Dessa forma, para as condições estudadas, conclui-se que o *filler* basáltico apresenta potencial de aplicação em obras de pavimentação, especialmente em camadas de sub-base, desde que utilizado em teores próximos ao teor ótimo identificado nesta pesquisa.

7 CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou experimentalmente o desempenho mecânico de sub-bases de solo estabilizado com o *filler* basáltico específico deste estudo resíduo da usinagem de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com agregado basáltico da região oeste do Paraná, tendo como referência o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e parâmetros complementares (limites de Atterberg, granulometria, compactação e expansão). Cinco teores foram avaliados (0%, 3%, 6%, 9% e 12% em massa), permitindo a determinação experimental do teor ótimo de estabilização.

Ressalta-se que os resultados obtidos refletem o comportamento específico dos materiais coletados nesta pesquisa, não sendo diretamente transponíveis a outros contextos sem análise complementar. Fatores como profundidade da jazida exploradora do agregado basáltico, tipo litológico do basalto (toleítico, andesítico, vesicular ou maciço), grau de alteração mineralógica e processo de britagem podem alterar as características finais do *filler* finura, angularidade, densidade real e reatividade e, por consequência, o comportamento mecânico das misturas. As conclusões principais do trabalho são apresentadas a seguir.

A adição de *filler* basáltico produziu redução sistemática e monotônica dos limites de Atterberg. O LL caiu 4,3% (de 28,58% para 24,49%), o LP caiu 5,3% e o IP reduziu-se em 44,4% (de 6,57% para 3,65%). Esse comportamento é compatível com o mecanismo de diluição da fração argilosa ativa pelo *filler* inerte, conforme discutido no Capítulo 4. A queda mais acentuada do LL em relação ao LP reflete a diferença entre os mecanismos físicos que controlam cada limite água intersticial macroporosa, no caso do LL; água adsorvida nas argilas, no caso do LP.

A umidade ótima manteve-se praticamente constante (29,08–29,25%), comportamento característico de solos lateríticos com elevado grau de saturação no ponto ótimo. A massa específica aparente seca máxima cresceu de 1,5117 para 1,5260 g/cm³ até o teor de 9% (ganho de 0,95%), com posterior queda em 12%. A pequena magnitude do incremento de p_d máx indica que o efeito do *filler* sobre o solo é predominantemente estrutural preenchimento de macroporos e intertravamento e não densimétrico.

O CBR mostrou-se o parâmetro mais sensível à adição de *filler*. Atingiu pico de 21,41% no teor de 9% incremento de 123,7% em relação ao solo natural e recuou para 19,04% em 12%, evidenciando ponto de saturação estrutural. O ganho

expressivo de capacidade de suporte com variação modesta da densidade comprova que o mecanismo de estabilização é dominado por rearranjo estrutural e por redução de plasticidade, e não por densificação.

A expansão axial após 96 horas de imersão decresceu progressivamente de 0,409% (solo natural) para 0,243% (12% *filler*), redução de 40,6%. Todos os teores apresentaram expansão muito inferior ao limite normativo de 1,0% do DNIT, indicando boa estabilidade volumétrica das misturas. A redução do potencial expansivo é coerente com a diluição da fração argilosa hidrofílica.

Entre os cinco teores avaliados, apenas a mistura com 9% de *filler* basáltico atende simultaneamente aos dois critérios normativos do DNIT (2006) para sub-base de pavimento flexível: $\text{CBR} \geq 20\%$ e $\text{expansão} \leq 1,0\%$. Esse é, portanto, o teor recomendado para essa finalidade específica.

Os demais teores (3%, 6% e 12%), embora não atinjam o limite de CBR exigido para sub-base, apresentam ganhos relevantes de resistência e estabilidade quando comparados ao solo natural, mostrando-se aplicáveis como reforço do subleito. Essa função permite o aproveitamento das misturas em situações em que a camada de sub-base pode ser reduzida em espessura ou, eventualmente, eliminada, resultando em economia de materiais e simplificação do processo construtivo.

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica do uso do *filler* basáltico como estabilizante de sub-bases em rodovias da região oeste do Paraná. Mais que isso, eles demonstram que esse resíduo industrial quando empregado no teor adequado pode oferecer estabilização de qualidade comparável a estabilizantes químicos convencionais, com a vantagem adicional de dispensar tempo de cura, possuir um baixo custo e contribuir ativamente para a redução de passivos ambientais da indústria de pavimentação. A pesquisa, por fim, agrega conhecimento técnico aplicado à realidade geológica regional, fornecendo subsídios para a engenharia rodoviária local e abrindo caminho para o aproveitamento racional de um material atualmente subaproveitado.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6457:2016. **Amostragem de solos e preparo das amostras para ensaios de compactação e caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR 6459:2018. **Solo — Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. NBR 7180:2016. **Solo — Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR 7181:2016. **Solo — Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR 7182:2016. **Solo — Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR 9895:2016. **Solo — Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ALMEIDA, J. R. et al. **Normatização e aplicação de resíduos minerais em pavimentação**. Revista Engenharia Sustentável, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2020.
- ANGULO, S. C. et al. **Reaproveitamento de escória de aciaria em concretos não estruturais**. Revista Materiais & Construção, v. 18, n. 2, p. 30-42, 2009.
- BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID). **Infraestrutura e desenvolvimento sustentável na América Latina: relatório de políticas públicas**. Washington, D.C.: BID, 2021. Disponível em: <https://www.iadb.org>. Acesso em: 20 abril 2025.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação: fundamentos e técnicas**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- CAPUTO, H. P.; NOGAMI, J. S. **Estudos de solos tropicais com comportamento expansivo em obras de infraestrutura**. São Carlos: UFSCar, 2002.
- CARDOSO, Fabrício Bueno da Fonseca. **Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro**. 2002. xxvi, 357 f., il. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- CAVALCANTI, A. L.; PRADO, R. M. **Aproveitamento de resíduos na construção civil: estudo do uso de *filler* basáltico em camadas de pavimento**. Revista de Engenharia Civil, v. 28, n. 2, p. 110-122, 2018.
- CNT. **Manual de pavimentação flexível**. Brasília: CNT, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: 20 abril 2025.

DA SILVA, J. L. et al. **Comportamento do CBR de solos tropicais sob diferentes teores de umidade**. Revista Transportes, v. 27, n. 1, p. 63-70, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Brasília: DNIT, 2010.

DNIT. **IPR 722 — Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**. Brasília: DNIT, 2006.

ESTUDE ENGENHARIA. **Guia prático de ensaios de solos: limites e CBR**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.estudeengenharia.com.br>. Acesso em: 19 maio 2025. Acesso em: 19 maio 2025.

FERREIRA, J. R.; COSTA, E. A. **Influência do filler basáltico na resistência de sub-bases rodoviárias**. Revista Engenharia Aplicada, v. 21, n. 3, p. 55-63, 2016.

FONSECA, R. M. G. **Gestão de resíduos na construção civil e reaproveitamento de materiais em pavimentação**. Revista Construindo, v. 19, n. 4, p. 23-35, 2020.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Gestão de resíduos na construção civil: uma abordagem para países em desenvolvimento**. Revista Ambiente Construído, v. 2, n. 2, p. 7-18, 2002.

LEINZ, Viktor; AMARAL, Sérgio Estanislau do. **Geologia geral**. 14. ed. São Paulo: Nacional, 2001. 397p. (Biblioteca universitaria. Serie 3, Ciencias Puras ; v. 1). ISBN (Broch.).

LEITE, L. C. et al. **Estudo de filler basáltico na produção de CBUQ com enfoque sustentável**. Revista Materiais & Construção, v. 23, n. 1, p. 42-50, 2018.

LUKANTCHUKI, J. A. et al. **Avaliação de misturas solo-cimento com adição de pó de pedra**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 36, n. 1, p. 73-84, 2018.

MITCHEL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. ACADEMIA, 2005. Disponível em:

https://www.academia.edu/38275793/Kupdf_net_fundamentals_of_soil_behavior_jk_mitchell_amp_k_soga NOGAMI, Job Shuji e VILLIBOR, Douglas Fadul.

Pavimentacao de baixo custo com solos lateriticos. 1995. São Paulo: Vilibor. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/6a2a9cc1-8df7-4583-8528-9b4f98a64e35/Nogami-1995-pavimentacao.pdf>. Acesso em: 18 maio 2026.

OLIVEIRA, D. S. et al. **Infraestrutura viária e desenvolvimento regional: desafios e estratégias**. Revista Transporte & Mobilidade, v. 14, n. 3, p. 15-29, 2019.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)— Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RODRIGUES, M. P. et al. **Reaproveitamento de resíduos em argamassas e concretos: contribuições ambientais e econômicas**. Revista Concreto & Construção, v. 11, n. 2, p. 38-47, 2014.

SANTOS, L. B. et al. **Reaproveitamento de resíduos na pavimentação: estudo de caso com *filler* basáltico**. Revista Infraestrutura, v. 15, n. 1, p. 19-28, 2020.

SANTOS, L. B.; SILVA, R. C. **Normas técnicas aplicadas à estabilização de solos com resíduos minerais**. Revista Engenharia Verde, v. 6, n. 1, p. 60-72, 2020.

SILVA, D. P.; LIMA, R. M. **Estudo da dosagem ideal de *filler* em misturas estabilizadas para rodovias**. Revista de Pavimentação e Solo, v. 10, n. 2, p. 33-45, 2019.

TEIXEIRA, S. R. et al. **Comportamento de solos tropicais em obras rodoviárias: desafios e soluções**. Revista Geotecnia Tropical, v. 5, n. 2, p. 41-58, 2013.

UDESC. **Classificação SUCS de solos**. Florianópolis: UDESC, 2023. Disponível em: <https://www.udesc.br/engenharia/sucs>. Acesso em: 15 maio 2025.

UFBA. **Laboratório de Geotecnia — Imagens ilustrativas de ensaios LL e LP**. Salvador, 2024. Disponível em: <https://www.eng.ufba.br/geotecnia>. Acesso em: 19 maio 2025. Acesso em: 19 abril 2025.

APÊNDICE A

DENSIDADE - *FILLER*

DNER 194/98

	MASSA	ÁGUA	LEITURA	DENSIDADE
AMOSTRA 01	249,7	300	386	2,9035
AMOSTRA 02	250,2	300	386	2,9093
AMOSTRA 03	250,8	300	386	2,9163
			MÉDIA	2,9097

O QUE A NORMA DIZ DNER 194/98 - ITEM 7.2
7.2 Duas determinações consecutivas, feitas com amostras do mesmo agregado miúdo, não devem diferir entre si de mais de 0,05 g/cm ³ .

VALORES OBTIDOS
DENSIDADE MÉDIA 2,9097 g/cm ³
DESVIO PADRÃO 0,0064 g/cm ³
INTERVALO DE CONFIANÇA PARA 95% 2,8938 g/cm ³ - 2,9256 g/cm ³
INTERVALO DE CONFIANÇA PARA 99% 2,8730 g/cm ³ - 2,9464 g/cm ³
O teste está dentro do limite de variação estabelecido pela DNER 194/98 que é de 0,05 g/cm ³ , onde a variação foi de 0,01 g/cm ³ . O nível de confiança é superior a 99%. Isso indica alta precisão e conformidade com a norma.

APÊNDICE B

RESUMO — Desempenho Mecânico Solo + Filler Basáltico						
#	Parâmetro	Natural (0%)	3% Filler	6% Filler	9% Filler	12% Filler
A. ATTERBERG						
A.1	LL — Limite de Liquidez (%)	28,58	27,50	26,10	25,23	24,49
A.2	LP — Limite de Plasticidade (%)	22,01	21,77	21,37	21,07	20,84
A.3	IP — Índice de Plasticidade (%)	6,57	5,73	4,73	4,16	3,65
A.4	Classificação HRB	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4
B. PROCTOR						
B.1	w _{ot} — Umidade Ótima (%)	29,10	29,12	29,14	29,20	29,26
B.2	pd máx (g/cm³)	1,5121	1,5154	1,5217	1,5247	1,5160
B.3	Grau de Saturação no Ótimo (%)	97,8	98,1	98,9	99,3	98,0
C. CBR / EXPANSÃO						
C.1	Expansão final 96h (%)	0,409	0,348	0,313	0,261	0,243
C.2	CBR Adotado (%)	9,57	12,84	16,94	21,41	19,04
VARIAÇÕES EM RELAÇÃO AO SOLO NATURAL						
	Δ vs Natural	Natural	3% Filler	6% Filler	9% Filler	12% Filler
—	Δ CBR (pontos %)	—	+3,27	+7,37	+11,84	+9,47
—	Ganho CBR (%)	—	+34,2 %	+77,0 %	+123,7 %	+99,0 %

APÊNDICE C

INDICES FISICOS GRANULOMETRIA - SOLO NATURAL										
DETERMINAÇÃO UMIDADE					MASSA DA AMOSTRA ÚMIDA			1000,00		
CAPSULA		B1	B2	B3	MASSA DA AMOSTRA SECA			999,97		
PESO DO SOLO ÚMIDO + PESO DA CÁPSULA (G)		28,9	31,00	33,00	PESO DO SOLO SECO RETIDO NA # 10			55,23		
PESO DO SOLO SECO + PESO DA CÁPSULA (G)		28,5	30,30	32,40	SOLO UMIDO PASSADO NA # 10			944,74		
PESO DA ÁGUA		0,40	0,70	0,60	SOLO SECO PASSADO NA # 10			944,74		
PESO DA CÁPSULA		11,7	12,2	10,1	PESO TOTAL DA AMOSTRA SECA			1000,00		
PESO DO SOLO SECO		16,80	18,10	22,30						
TEOR DE UMIDADE		2,38%	3,87%	2,69%	PORCELANA Nº		PESO DA AMOSTRA SECA	PORCENTAG EM PASSADA		
UMIDADE MÉDIA		2,98%			PENEIRA #	(mm)	RETIDO	PASSADO	(%)	
AMOSTRA TOTAL UMIDA					2"	50	0,00	1000,00	100,0%	
AMOSTRA TOTAL SECA				300,00	1 1/2"	38	0,00	1000,00	100,0%	
PENEIRAMENTO FINO (PESO EM GRAMAS)				299,97	1"	25	0,00	1000,00	100,0%	
PENEIRAS		PESO DA AMOSTRA SECA		PORCENTAG EM PARCIAL	PORCENTAG EM PASSADA	3/4"	19	0,00	1000,00	100,0%
#	(mm)	RETIDO	PASSADO			3/8"	9,5	23,80	976,20	97,6%
Nº 16	1,2	63,8	236,20	78,7%	78,73%	Nº 4	4,8	123,80	852,40	85,2%
Nº 30	0,6	15	221,2	73,7%	73,73%	Nº 10	2,0	174,00	678,40	67,8%
Nº 40	0,42	35,6	185,6	61,9%	61,87%	DENSIDADE APARENTE DOS GRÃOS				
Nº 60	0,25	29,8	155,8	51,9%	51,93%	DENSÍMETRO Nº				
Nº 100	0,15	51,8	104	34,7%	34,67%	CORREÇÃO DO MENISCO				
Nº 200	0,075	48,7	55,3	18,4%	18,43%	% MATERIAL PASSADO NA # 10				
INDICES FISICOS GRANULOMETRIA - FILLER BASÁLTICO										
DETERMINAÇÃO UMIDADE					AMOSTRA TOTAL SECA					500,00
CAPSULA		B1	B2	B3	PENEIRAMENTO FINO (PESO EM GRAMAS)					499,89
PESO DO SOLO ÚMIDO + PESO DA CÁPSULA (G)		19,1	18,90	19,30	PENEIRAS		PESO DA AMOSTRA SECA		PORCENTAG EM PARCIAL	PORCENTAG EM PASSADA
PESO DO SOLO SECO + PESO DA CÁPSULA (G)		18,9	18,50	19,00	#	(mm)	RETIDO	PASSADO		
PESO DA ÁGUA		0,20	0,40	0,30	Nº 16	1,2	0	500,00	100,0%	166,63%
PESO DA CÁPSULA		12,8	13,1	11,9	Nº 30	0,6	0	500,00	100,0%	166,63%
PESO DO SOLO SECO		6,10	5,40	7,10	Nº 40	0,42	0	500,00	100,0%	166,63%
TEOR DE UMIDADE		3,28%	7,41%	4,23%	Nº 60	0,25	0	500,00	100,0%	166,63%
UMIDADE MÉDIA		22,54%			Nº 100	0,15	0	500,00	100,0%	166,63%
					Nº 200	0,075	45	455,00	91,0%	151,63%

APÊNDICE D

ÍNDICES FÍSICOS — LL e LP | SOLO NATURAL (0% Filler)

ABNT NBR 6459:2018 (LL) | NBR 7180:2016 (LP) | NBR 7181:2016 (Granulometria)

LOCAL:	Área Experimental – UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR	MATERIAL:	Subleito
ACAD.:	Eduardo Rannow Brandt	ORIENT.:	Carla Caroline Facchi

LIMITE DE LIQUIDEZ — Método de Casagrande

Cáp.	Cáps+Solo Úmido (g)	Cáps+Solo Seco (g)	TARA (g)	P. Água (g)	P.Solo Seco (g)	Umidade w (%)	Nº Golpes	log ₁₀ (N)	Aux
1	38,38	35,62	25,54	2,76	10,08	27,38	38	1,5798	
2	40,01	36,62	24,64	3,39	11,98	28,30	31	1,4914	
3	41,23	37,54	24,63	3,69	12,91	28,58	25	1,3979	
4	38,88	35,84	25,51	3,04	10,33	29,43	19	1,2788	
5	40,21	36,81	25,43	3,40	11,38	29,88	13	1,1139	
Equação curva fluidez: $w = a + b \cdot \log_{10}(N)$							b =	-5,231	
Intercepto:							a =	35,893	
► LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) =							28,58 %		

LIMITE DE PLASTICIDADE

Cáp.	Cáps+Solo Úmido (g)	Cáps+Solo Seco (g)	TARA (g)	P. Água (g)	P.Solo Seco (g)	Umidade w (%)	—	% < #200:	12,51 %
1	33,02	32,06	27,64	0,96	4,42	21,72	—		
2	35,12	33,90	28,50	1,22	5,40	22,59	—		
3	33,58	32,26	26,28	1,32	5,98	22,07	—		
4	33,34	32,17	26,75	1,17	5,42	21,59	—		
5	35,29	33,89	27,55	1,40	6,34	22,08	—		
► LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) =							22,01 %		

RESUMO DOS RESULTADOS

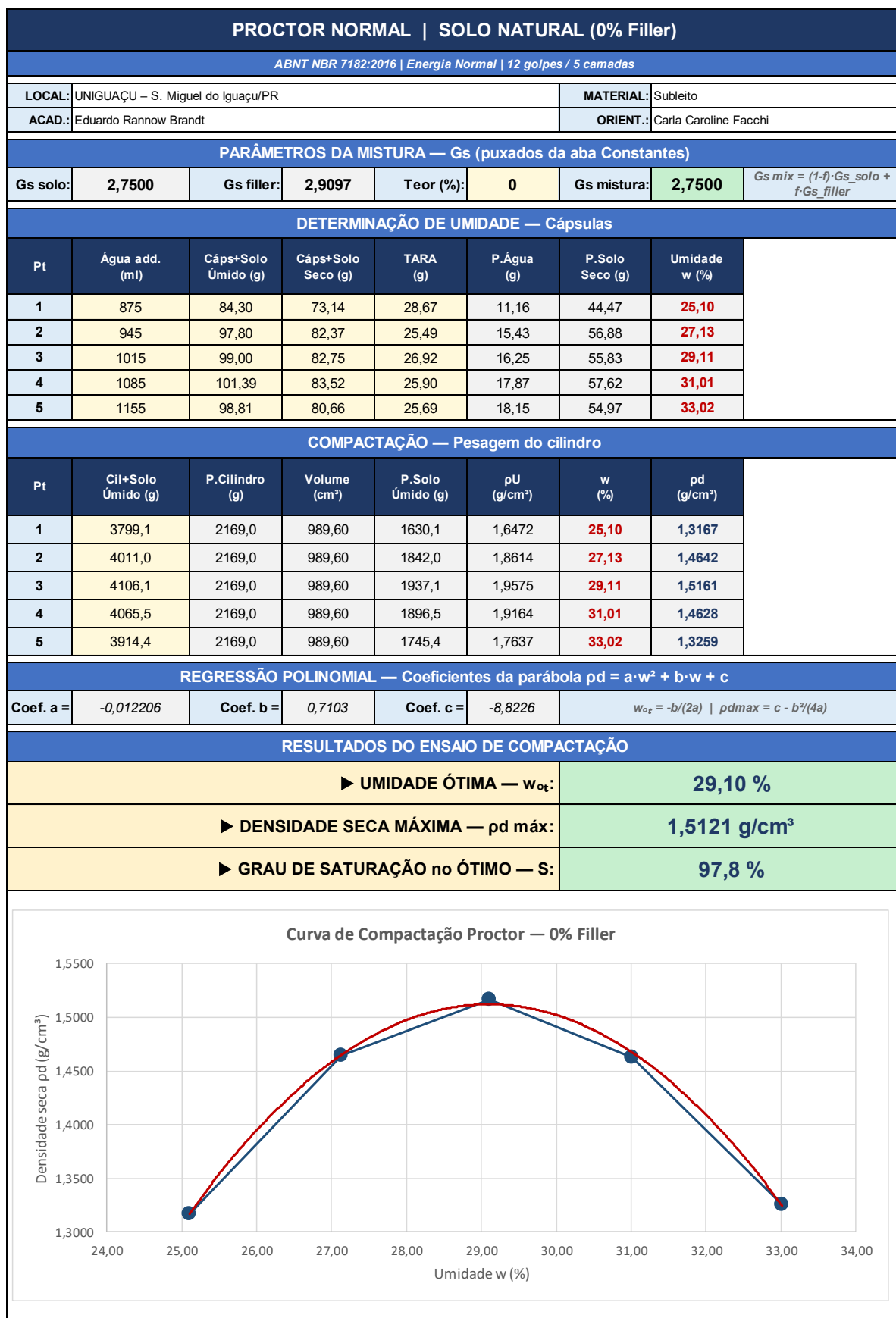
LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação HRB / AASHTO
28,58 %	22,01 %	6,57 %	A-2-4

GRANULOMETRIA — PORCENTAGEM PASSANTE

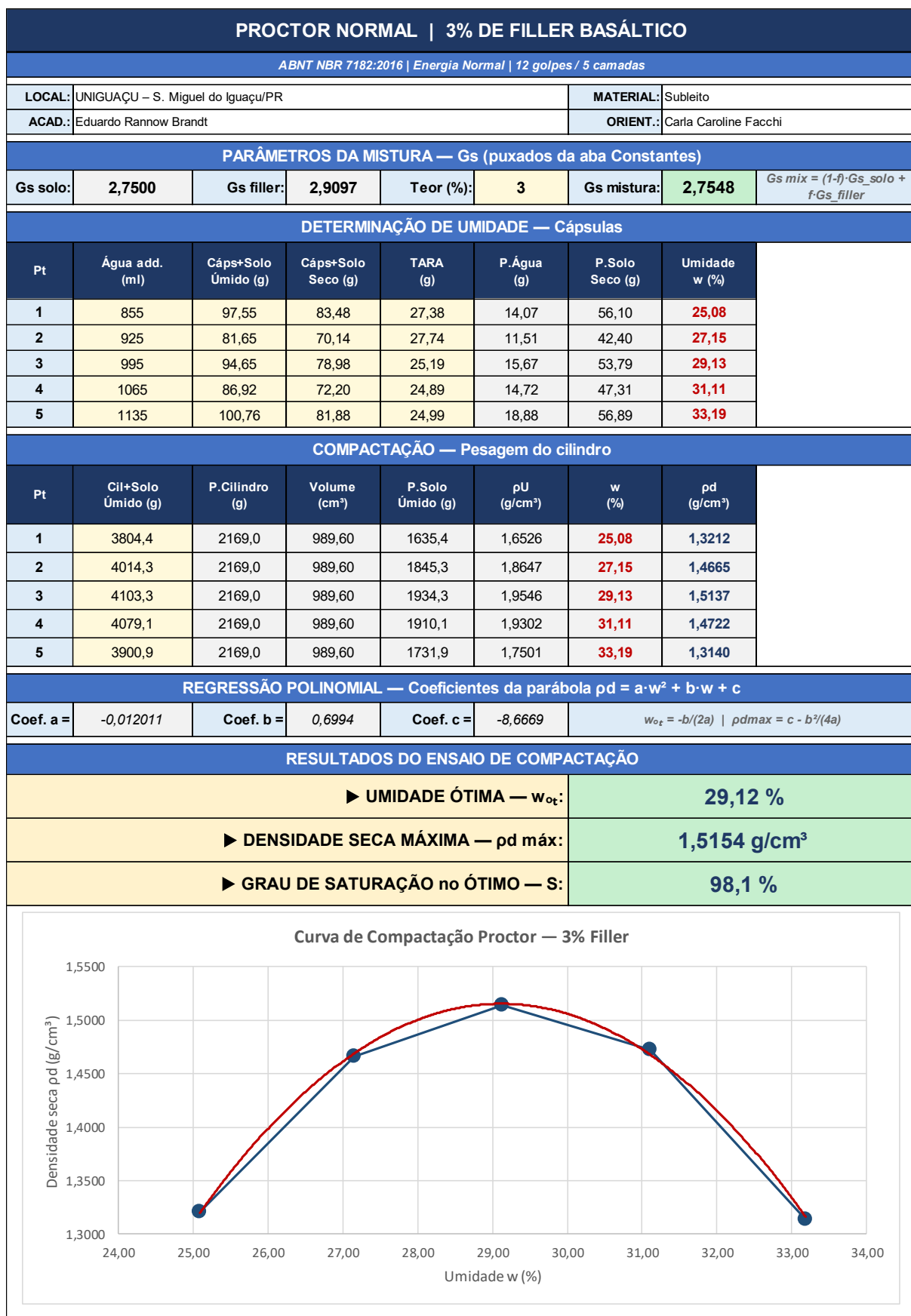
Peneira	#10 (2,0mm)	#40 (0,42mm)	#200 (0,075mm)	Faixa granulométrica
% Passante	67,84 %	41,97 %	12,51 %	Granular (A-1, A-2 ou A-3)

Curva de Fluidez — LL (0% Filler)

Nº de golpes (escala log)	Umidade w (%)
13	29,88
19	29,43
25	28,58
31	28,30
38	27,38



ENSAIO CBR (ISC) SOLO NATURAL (0% Filler)							
ABNT NBR 9895:2016 DNER ME 172/2006							
LOCAL:	UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR				MATERIAL:	Subleito	
ACAD.:	Eduardo Rannow Brandt				ORIENT.:	Carla Caroline Facchi	
DADOS DOS 5 MOLDES CBR							
Parâmetro	Unidade	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
Cil+Solo Úmido (PSM)	g	9181,4	8804,8	9028,3	9042,9	8392,1	
Peso do Cilindro (PM)	g	5161,1	4771,4	4942,7	4947,4	4363,4	
Peso de Solo Úmido (PSU)	g	4020,3	4033,4	4085,6	4095,5	4028,7	
Volume do Cilindro (VM)	cm³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	
Densidade Úmida (pU)	g/cm³	1,9369	1,9432	1,9684	1,9732	1,9410	
Umidade w	%	25,10	27,13	29,11	31,02	33,02	
Densidade Seca (pd)	g/cm³	1,5483	1,5285	1,5246	1,5060	1,4592	
EXPANSÃO — Imersão 96 horas							
Período	t (h)	M1 Leitura (0,01mm)	M2 Leitura (0,01mm)	M3 Leitura (0,01mm)	M4 Leitura (0,01mm)	M5 Leitura (0,01mm)	—
Início	0	0	0	0	0	0	
Dia 1	24	70	55	28	22	15	
Dia 2	48	82	68	36	28	20	
Dia 3	72	90	78	43	33	25	
Dia 4	96	94	82	47	37	29	
Expansão final	%	0,817	0,713	0,409	0,322	0,252	
PENETRAÇÃO — Leituras do extensômetro							
t (min)	Penet. (mm)	M1 Leit.	M2 Leit.	M3 Leit.	M4 Leit.	M5 Leit.	—
0,5	0,63	5	20	23	20	10	
1	1,27	15	25	61	55	20	
1,5	1,90	20	35	90	80	40	
2	2,54	30	40	105	95	55	
3	3,81	39	55	110	100	70	
4	5,08	41	70	130	110	80	
6	7,62	50	75	145	130	90	
CÁLCULO DO CBR (ISC) POR MOLDE							
Parâmetro	Fórmula	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
PC (2,54mm)	$L \cdot K$	1,9216	2,5621	6,7255	6,0849	3,5229	
PC' (5,08mm)	$L \cdot K$	2,6261	4,4836	8,3268	7,0457	5,1242	
ISC (2,54mm)	$PC/0,7031 \cdot 100$	2,73	3,64	9,57	8,65	5,01	
ISC' (5,08mm)	$PC'/1,0546 \cdot 100$	2,49	4,25	7,90	6,68	4,86	
CBR ADOTADO	MAX	2,73	4,25	9,57	8,65	5,01	
RESULTADO FINAL — CBR ADOTADO DO ENSAIO							
CBR adotado (molde de referência – Molde 3):					9,57 %		
Expansão final (96h):					0,409 %		
Apto para sub-base (CBR≥20% e Exp≤1%)?					NÃO atende		
Expansão				ISC (%)			



ENSAIO CBR (ISC) 3% DE FILLER BASÁLTICO							
ABNT NBR 9895:2016 DNER ME 172/2006							
LOCAL: UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR				MATERIAL: Subleito			
ACAD.: Eduardo Rannow Brandt				ORIENT.: Carla Caroline Facchi			
DADOS DOS 5 MOLDES CBR							
Parâmetro	Unidade	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
Cil+Solo Úmido (PSM)	g	9237,8	8824,5	9052,5	9013,9	8469,2	
Peso do Cilindro (PM)	g	5161,1	4771,4	4942,7	4947,4	4363,4	
Peso de Solo Úmido (PSU)	g	4076,7	4053,1	4109,8	4066,5	4105,8	
Volume do Cilindro (VM)	cm³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	
Densidade Úmida (pU)	g/cm³	1,9641	1,9527	1,9800	1,9592	1,9781	
Umidade w	%	25,08	27,15	29,14	31,12	33,18	
Densidade Seca (pd)	g/cm³	1,5703	1,5357	1,5332	1,4942	1,4853	
EXPANSÃO — Imersão 96 horas							
Período	t (h)	M1 Leitura (0,01mm)	M2 Leitura (0,01mm)	M3 Leitura (0,01mm)	M4 Leitura (0,01mm)	M5 Leitura (0,01mm)	—
Início	0	0	0	0	0	0	
Dia 1	24	60	47	24	19	13	
Dia 2	48	70	58	31	24	17	
Dia 3	72	78	67	37	29	21	
Dia 4	96	81	73	40	32	25	
Expansão final	%	0,704	0,635	0,348	0,278	0,217	
PENETRAÇÃO — Leituras do extensômetro							
t (min)	Penet. (mm)	M1 Leit.	M2 Leit.	M3 Leit.	M4 Leit.	M5 Leit.	—
0,5	0,63	7	27	31	27	14	
1	1,27	20	34	82	74	27	
1,5	1,90	27	47	121	107	54	
2	2,54	40	53	141	128	74	
3	3,81	52	74	148	134	94	
4	5,08	56	94	175	148	108	
6	7,62	67	100	195	175	121	
CÁLCULO DO CBR (ISC) POR MOLDE							
Parâmetro	Fórmula	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
PC (2,54mm)	$L \cdot K$	2,5621	3,3948	9,0313	8,1987	4,7398	
PC* (5,08mm)	$L \cdot K$	3,5869	6,0209	11,2091	9,4797	6,9176	
ISC (2,54mm)	$PC/0,7031 \cdot 100$	3,64	4,83	12,84	11,66	6,74	
ISC* (5,08mm)	$PC^*/1,0546 \cdot 100$	3,40	5,71	10,63	8,99	6,56	
CBR ADOTADO	MAX	3,64	5,71	12,84	11,66	6,74	
RESULTADO FINAL — CBR ADOTADO DO ENSAIO							
CBR adotado (molde de referência – Molde 3):				12,84 %			
Expansão final (96h):				0,348 %			
Apto para sub-base (CBR≥20% e Exp≤1%)?				NÃO atende			
Expansão				ISC (%)			

APÊNDICE F

ÍNDICES FÍSICOS — LL e LP | 6% DE FILLER BASÁLTICO

ABNT NBR 6459:2018 (LL) | NBR 7180:2016 (LP) | NBR 7181:2016 (Granulometria)

LOCAL:	UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguauçu/PR	MATERIAL:	Subleito
ACAD.:	Eduardo Rannow Brandt	ORIENT.:	Carla Caroline Facchi

LIMITE DE LIQUIDEZ — Método de Casagrande

Cáp.	Cáps+Solo Úmido (g)	Cáps+Solo Seco (g)	TARA (g)	P. Água (g)	P. Solo Seco (g)	Umidade w (%)	Nº Golpes	log ₁₀ (N)	Aux	
1	39,27	36,40	24,95	2,87	11,45	25,07	37			1,5682
2	40,65	37,90	27,19	2,75	10,71	25,68	30			1,4771
3	45,33	41,79	28,27	3,54	13,52	26,18	24			1,3802
4	43,02	39,45	26,20	3,57	13,25	26,94	18			1,2553
5	40,46	37,74	28,02	2,72	9,72	27,98	12			1,0792
Equação curva fluidez: $w = a + b \cdot \log_{10}(N)$						b =	-5,900			
Intercepto:						a =	34,346			
► LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) =						26,10 %				

LIMITE DE PLASTICIDADE

Cáp.	Cáps+Solo Úmido (g)	Cáps+Solo Seco (g)	TARA (g)	P. Água (g)	P. Solo Seco (g)	Umidade w (%)	—	% < #200:	17,11 %
1	31,67	30,47	24,93	1,20	5,54	21,66	—		
2	32,25	31,09	25,68	1,16	5,41	21,44	—		
3	33,52	32,10	25,48	1,42	6,62	21,45	—		
4	32,58	31,34	25,47	1,24	5,87	21,12	—		
5	33,97	32,96	28,19	1,01	4,77	21,17	—		
► LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) =						21,37 %			

RESUMO DOS RESULTADOS

LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação HRB / AASHTO
26,10 %	21,37 %	4,73 %	A-2-4

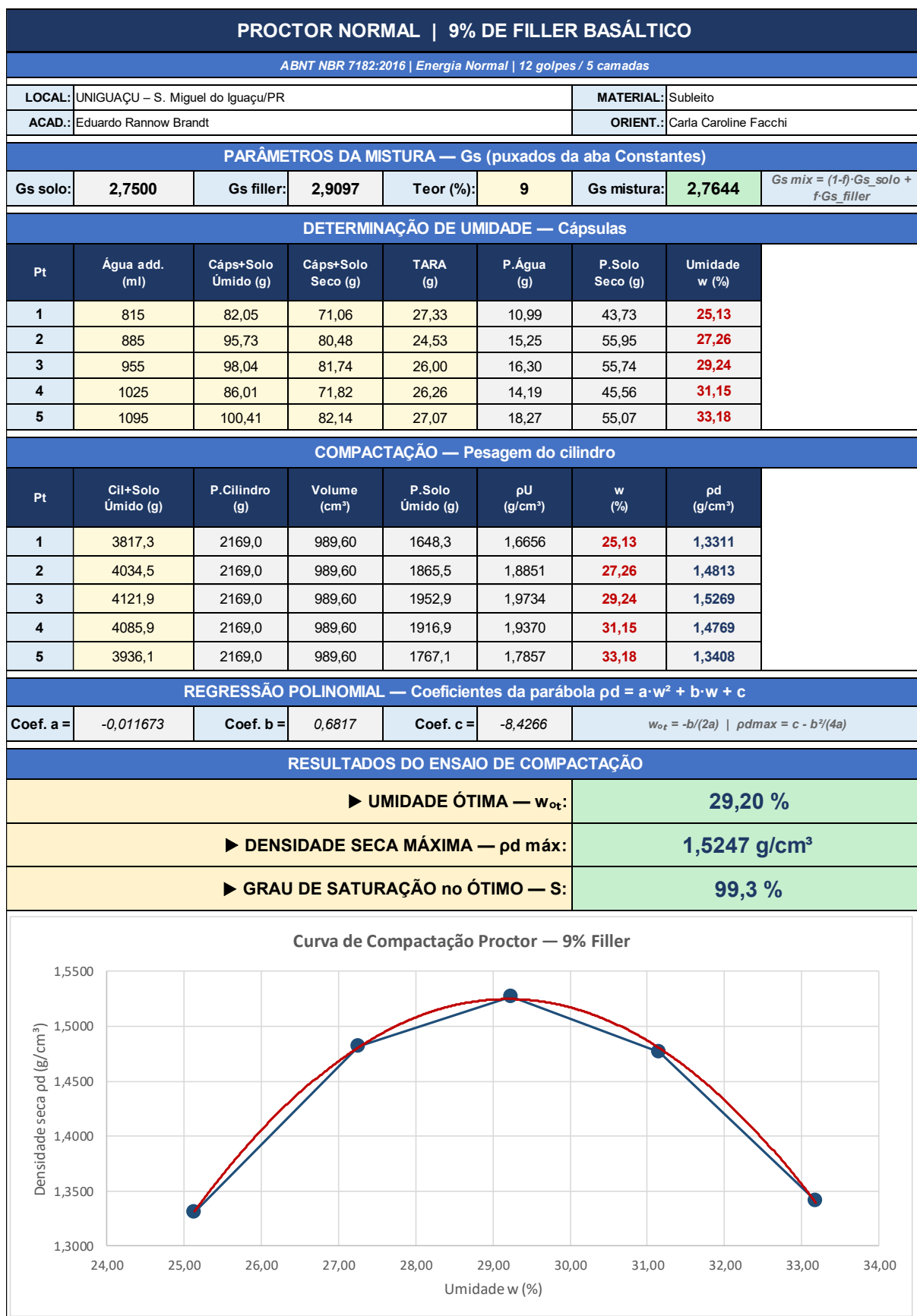
GRANULOMETRIA — PORCENTAGEM PASSANTE

Peneira	#10 (2,0mm)	#40 (0,42mm)	#200 (0,075mm)	Faixa granulométrica
% Passante	65,20 %	39,93 %	17,11 %	Granular (A-1, A-2 ou A-3)

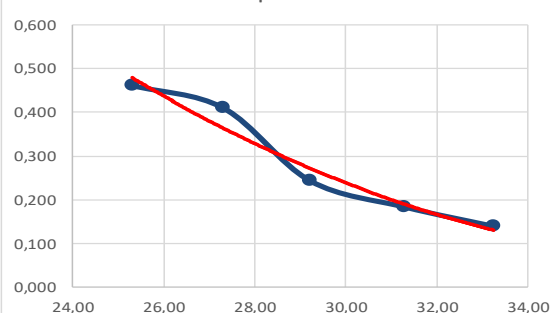
Curva de Fluidez — LL (6% Filler)

Nº de golpes (escala log)	Umidade w (%)
12	27,98
18	26,94
24	26,18
30	25,68
37	25,07

ENSAIO CBR (ISC) 6% DE FILLER BASÁLTICO							
ABNT NBR 9895:2016 DNER ME 172/2006							
LOCAL: UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR					MATERIAL: Subleito		
ACAD.: Eduardo Rannow Brandt					ORIENT.: Carla Caroline Facchi		
DADOS DOS 5 MOLDES CBR							
Parâmetro	Unidade	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
Cil+Solo Úmido (PSM)	g	9201,0	8895,0	8988,8	9070,2	8418,0	
Peso do Cilindro (PM)	g	5161,1	4771,4	4942,7	4947,4	4363,4	
Peso de Solo Úmido (PSU)	g	4039,9	4123,6	4046,1	4122,8	4054,6	
Volume do Cilindro (VM)	cm³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	
Densidade Úmida (pU)	g/cm³	1,9464	1,9867	1,9494	1,9863	1,9534	
Umidade w	%	25,15	27,08	29,18	31,20	33,15	
Densidade Seca (pd)	g/cm³	1,5553	1,5633	1,5091	1,5139	1,4671	
EXPANSÃO — Imersão 96 horas							
Período	t (h)	M1 Leitura (0,01mm)	M2 Leitura (0,01mm)	M3 Leitura (0,01mm)	M4 Leitura (0,01mm)	M5 Leitura (0,01mm)	—
Início	0	0	0	0	0	0	
Dia 1	24	51	40	21	16	11	
Dia 2	48	60	49	26	21	14	
Dia 3	72	67	57	31	25	18	
Dia 4	96	70	62	36	28	21	
Expansão final	%	0,609	0,539	0,313	0,243	0,183	
PENETRAÇÃO — Leituras do extensômetro							
t (min)	Penet. (mm)	M1 Leit.	M2 Leit.	M3 Leit.	M4 Leit.	M5 Leit.	—
0,5	0,63	10	35	41	35	18	
1	1,27	26	45	108	97	36	
1,5	1,90	36	62	160	141	71	
2	2,54	53	70	186	168	97	
3	3,81	68	97	195	176	124	
4	5,08	74	124	230	195	142	
6	7,62	88	132	257	230	160	
CÁLCULO DO CBR (ISC) POR MOLDE							
Parâmetro	Fórmula	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
PC (2,54mm)	$L \cdot K$	3,3948	4,4836	11,9137	10,7607	6,2130	
PC' (5,08mm)	$L \cdot K$	4,7398	7,9424	14,7320	12,4901	9,0954	
ISC (2,54mm)	$PC/0,7031 \cdot 100$	4,83	6,38	16,94	15,30	8,84	
ISC' (5,08mm)	$PC'/1,0546 \cdot 100$	4,49	7,53	13,97	11,84	8,62	
CBR ADOTADO	MAX	4,83	7,53	16,94	15,30	8,84	
RESULTADO FINAL — CBR ADOTADO DO ENSAIO							
CBR adotado (molde de referência – Molde 3):					16,94 %		
Expansão final (96h):					0,313 %		
Apto para sub-base (CBR≥20% e Exp≤1%)?					NÃO atende		
Expansão				ISC (%)			



ENSAIO CBR (ISC) 9% DE FILLER BASÁLTICO							
ABNT NBR 9895:2016 DNER ME 172/2006							
LOCAL: UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR				MATERIAL: Subleito + 9% filler			
ACAD.: Eduardo Rannow Brandt				ORIENT.: Carla Caroline Facchi			
DADOS DOS 5 MOLDES CBR							
Parâmetro	Unidade	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
Cil+Solo Úmido (PSM)	g	9214,9	8857,2	9057,4	9021,4	8466,1	
Peso do Cilindro (PM)	g	5161,1	4771,4	4942,7	4947,4	4363,4	
Peso de Solo Úmido (PSU)	g	4053,8	4085,8	4114,7	4074,0	4102,7	
Volume do Cilindro (VM)	cm³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	
Densidade Úmida (pU)	g/cm³	1,9531	1,9685	1,9824	1,9628	1,9766	
Umidade w	%	25,13	27,26	29,25	31,14	33,17	
Densidade Seca (pd)	g/cm³	1,5609	1,5468	1,5338	1,4967	1,4843	
EXPANSÃO — Imersão 96 horas							
Período	t (h)	M1 Leitura (0,01mm)	M2 Leitura (0,01mm)	M3 Leitura (0,01mm)	M4 Leitura (0,01mm)	M5 Leitura (0,01mm)	—
Início	0	0	0	0	0	0	
Dia 1	24	43	33	17	13	9	
Dia 2	48	50	41	22	17	12	
Dia 3	72	56	48	26	20	15	
Dia 4	96	59	52	30	23	18	
Expansão final	%	0,513	0,452	0,261	0,200	0,157	
PENETRAÇÃO — Leituras do extensômetro							
t (min)	Penet. (mm)	M1 Leit.	M2 Leit.	M3 Leit.	M4 Leit.	M5 Leit.	—
0,5	0,63	13	44	52	44	23	
1	1,27	33	57	136	122	45	
1,5	1,90	45	78	202	178	89	
2	2,54	67	88	235	212	122	
3	3,81	86	122	246	222	157	
4	5,08	93	157	290	246	179	
6	7,62	110	167	324	290	202	
CÁLCULO DO CBR (ISC) POR MOLDE							
Parâmetro	Fórmula	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
PC (2,54mm)	$L \cdot K$	4,2915	5,6366	15,0522	13,5790	7,8143	
PC' (5,08mm)	$L \cdot K$	5,9568	10,0562	18,5751	15,7568	11,4653	
ISC (2,54mm)	$PC/0,7031 \cdot 100$	6,10	8,02	21,41	19,31	11,11	
ISC' (5,08mm)	$PC'/1,0546 \cdot 100$	5,65	9,54	17,61	14,94	10,87	
CBR ADOTADO	MAX	6,10	9,54	21,41	19,31	11,11	
RESULTADO FINAL — CBR ADOTADO DO ENSAIO							
CBR adotado (molde de referência – Molde 3):				21,41 %			
Expansão final (96h):				0,261 %			
Apto para sub-base (CBR≥20% e Exp≤1%)?				SIM — APTO			
Expansão				ISC (%)			

ENSAIO CBR (ISC) 12% DE FILLER BASÁLTICO							
ABNT NBR 9895:2016 DNER ME 172/2006							
LOCAL: UNIGUAÇU – S. Miguel do Iguaçu/PR				MATERIAL: Subleito + 12% filler			
ACAD.: Eduardo Rannow Brandt				ORIENT.: Carla Caroline Facchi			
DADOS DOS 5 MOLDES CBR							
Parâmetro	Unidade	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
Cil+Solo Úmido (PSM)	g	9234,6	8832,6	9022,6	8995,8	8456,2	
Peso do Cilindro (PM)	g	5161,1	4771,4	4942,7	4947,4	4363,4	
Peso de Solo Úmido (PSU)	g	4073,5	4061,2	4079,9	4048,4	4092,8	
Volume do Cilindro (VM)	cm³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	
Densidade Úmida (pU)	g/cm³	1,9626	1,9566	1,9656	1,9505	1,9719	
Umidade w	%	25,30	27,31	29,21	31,29	33,24	
Densidade Seca (pd)	g/cm³	1,5663	1,5369	1,5212	1,4856	1,4800	
EXPANSÃO — Imersão 96 horas							
Período	t (h)	M1 Leitura (0,04mm)	M2 Leitura (0,04mm)	M3 Leitura (0,04mm)	M4 Leitura (0,04mm)	M5 Leitura (0,04mm)	—
Início	0	0	0	0	0	0	
Dia 1	24	38	30	15	12	8	
Dia 2	48	44	36	20	15	11	
Dia 3	72	49	42	23	18	13	
Dia 4	96	53	47	28	21	16	
Expansão final	%	0,461	0,409	0,243	0,183	0,139	
PENETRAÇÃO — Leituras do extensômetro							
t (min)	Penet. (mm)	M1 Leit.	M2 Leit.	M3 Leit.	M4 Leit.	M5 Leit.	—
0,5	0,63	11	39	46	39	20	
1	1,27	29	50	121	108	40	
1,5	1,90	40	69	179	158	79	
2	2,54	59	78	209	188	108	
3	3,81	76	108	218	197	139	
4	5,08	82	139	258	218	158	
6	7,62	97	148	288	258	179	
CÁLCULO DO CBR (ISC) POR MOLDE							
Parâmetro	Fórmula	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	—
PC (2,54mm)	$L \cdot K$	3,7791	4,9961	13,3869	12,0418	6,9176	
PC' (5,08mm)	$L \cdot K$	5,2523	8,9032	16,5254	13,9633	10,1202	
ISC (2,54mm)	$PC/0,7031 \cdot 100$	5,37	7,11	19,04	17,13	9,84	
ISC' (5,08mm)	$PC'/1,0546 \cdot 100$	4,98	8,44	15,67	13,24	9,60	
CBR ADOTADO	MAX	5,37	8,44	19,04	17,13	9,84	
RESULTADO FINAL — CBR ADOTADO DO ENSAIO							
CBR adotado (molde de referência – Molde 3):				19,04 %			
Expansão final (96h):				0,243 %			
Apto para sub-base (CBR≥20% e Exp≤1%)?				NÃO atende			
Expansão 				ISC (%) 