

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

**ANA LAURA GIANELLO DOS SANTOS**

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UMA AREIA RECICLADA DE**  
**FRESADO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS (RAP)**

São Carlos – SP  
2025

ANA LAURA GIANELLO DOS SANTOS

**COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UMA AREIA RECICLADA DE  
FRESADO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS (RAP)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Natália Correia

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Portelinha

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia

São Carlos – SP  
2025



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Ana Laura Gianello dos Santos, realizada em 25/07/2025.

### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia (UFSCar)

Prof. Dr. Paulo Cesar Lodi (UNESP)

Prof. Dr. Orencio Monje Vilar (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me amparado até aqui.

Aos meus companheiros de vida Felipe Benhur e Chico Bento, obrigada por dividir essa jornada comigo.

À vó Juraci, que sempre me colocou em suas orações e sempre me apoiou a seguir meus estudos.

Aos meus colegas de pós graduação: Karolina, Andréa, Ramon, Liza, Rayanne, Thiago, Matheus, Mauro, Laura, Samuel, Carolina, Matheus Pena e Fernando. Agradeço a ajuda, os conselhos e os bons momentos que tornaram esses anos mais leves.

Aos meus orientadores Profa. Natália Correia e Prof. Fernando Portelinha, pelos ensinamentos e paciência na orientação deste trabalho.

Aos parceiros: Owndec, Usina de Asfalto Bandeirantes e DR-04 Araraquara do DER-SP.

À Universidade Federal de São Carlos pela infraestrutura e por proporcionar ensino público de qualidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*Você não percebeu que você é o único  
representante do seu sonho na face da Terra? Se  
isso não fizer você correr, eu não sei o que vai.*

*Emicida*

## RESUMO

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) destaca-se como alternativa promissora na busca por soluções sustentáveis na engenharia, com potencial de aplicação além das misturas asfálticas, especialmente em obras geotécnicas. Diversos estudos têm demonstrado que o RAP pode ser utilizado como material de preenchimento, em estruturas de contenção e em camadas de suporte, desde que suas propriedades geotécnicas e ambientais sejam devidamente estudadas. A areia de RAP, composta por sua fração fina, pode ser usada como agregado geotécnico em diversas aplicações, especialmente em camadas de pavimentos e para melhorias do solo. O presente estudo tem como objetivo principal caracterizar uma areia reciclada de RAP e comparar seu comportamento geotécnico a uma areia natural convencional de granulometria equivalente. A pesquisa abrange a caracterização física, mecânica e hidráulica dos materiais, com ênfase em propriedades como resistência ao cisalhamento, módulo de resiliência, deformação permanente e condutividade hidráulica. Os resultados demonstraram que a areia reciclada de RAP apresenta comportamento distinto da areia natural, exigindo maior atenção quanto ao seu estado de compactação, principalmente em aplicações que sejam sensíveis à deformabilidade. A areia reciclada de RAP exibiu maior módulo de resiliência do que a areia natural e estabilizou as deformações ao longo do carregamento cíclico. A areia reciclada de RAP apresentou menor condutividade hidráulica que a areia natural, devido à presença de ligante asfáltico e maior porosidade. As curvas de retenção mostraram maior capacidade de retenção de água da areia de RAP sob altas sucções. O ensaio de lixiviação indicou estabilidade química e ausência de metais pesados em níveis críticos, confirmando o potencial da areia reciclada de RAP para uso seguro em aplicações geotécnicas e rodoviárias.

Palavras-chave: RAP; propriedades geotécnicas; módulo de resiliência; sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) stands out as a promising alternative in the pursuit of sustainable solutions in engineering, with potential applications beyond asphalt mixtures, particularly in geotechnical works. Several studies have demonstrated that RAP can be used as a fill material, in retaining structures, and in support layers, provided that its geotechnical and environmental properties are properly evaluated. The sand fraction of RAP, composed of its fine portion, can be used as a geotechnical aggregate in various applications, especially in pavement layers and soil improvement. The main objective of this study is to characterize a recycled RAP sand and compare its geotechnical behavior with that of a conventional natural sand of equivalent gradation. The research encompasses the physical, mechanical, and hydraulic characterization of the materials, with emphasis on properties such as shear strength, resilient modulus, permanent deformation, and hydraulic conductivity. The results demonstrated that the recycled RAP sand exhibits a distinct behavior compared to natural sand, requiring greater attention to its compaction state, particularly in applications sensitive to deformability. The recycled RAP sand showed a higher resilient modulus than the natural sand and stabilized deformations throughout cyclic loading. The recycled RAP sand presented lower hydraulic conductivity than the natural sand, due to the presence of asphalt binder and higher porosity. The soil-water retention curves indicated a greater water retention capacity of RAP sand under high suctions. The leaching test revealed chemical stability and the absence of heavy metals at critical levels, confirming the potential of recycled RAP sand for safe use in geotechnical and pavement applications.

**Keywords:** RAP; geotechnical properties; resilient modulus; sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Curvas granulométricas reportadas na literatura (Adaptado de Hubler et al., 2023). .....	20
Figura 2.2. Curvas de compactação do Distrito 6 e reportadas na literatura (Adaptado de Hubler et al., 2023). .....	24
Figura 2.3. Curvas de deformação: (a) agregado virgem e (b) RAP (Adaptado de Mousa et al., 2021). .....	26
Figura 2.4. Curvas de tensão-deformação do RAP para tensões normais de 35, 70 e 140 kPa (Adaptado de Soleimanbeigi et al., 2021). .....	26
Figura 2.5. Envoltória de resistência do RAP (Adaptado de Soleimanbeigi et al., 2021). .....	27
Figura 2.6. Resultados do ensaio de compressão triaxial de (a) material convencional de aterro e (b) RAP (Adaptado Rathje et al., 2002). .....	28
Figura 2.7. Relação tensão-deformação de cisalhamento para argila siltosa (Adaptado de Brown, 1996). .....	29
Figura 2.8 Módulo de resiliência <i>versus</i> o primeiro invariante de tensões para brita (Adaptado de Brown, 1996). .....	30
Figura 2.9. Curva Haversine de carregamento ensaio cíclico para frequência de 1 Hz (Adaptado de AASHTO T307, 2007). .....	31
Figura 2.10. Deslocamentos sofridos pelo corpo-de-prova (Adaptado Bernucci et al., 2006). .....	32
Figura 2.11. Deformação permanente em função do número de ciclos para o RAP (Carvalho e Motta, 2021). .....	34
Figura 2.12. Evolução da deformação permanente para o RAP (Silva et al., 2024). .....	34
Figura 2.13. Comportamento elástico e plástico sob tensão cíclica (Adaptado de Werkmeister et al. 2004). .....	35
Figura 2.14. Formatos de curvas dos níveis de <i>shakedown</i> (Adaptado de Wellner and Werkmeister, 2000 <i>apud</i> Werkmeister et al. 2004). .....	36
Figura 2.15. Classificação gráfica do comportamento dos materiais: (a) taxa de acréscimo de deformação permanente <i>versus</i> deformação permanente acumulada e (b) deformação permanente <i>versus</i> número de ciclos (Lima et al., 2023). .....	37
Figura 2.16. Análise segundo a teoria do <i>shakedown</i> do RAP (Carvalho e Motta, 2021). .....	39
Figura 2.17. Análise da ocorrência de <i>shakedown</i> (Santos et al., 2024). .....	40
Figura 2.18. Limites de granulometria das normativas FHWA-NHI-10-024 E NCMA.	

(Adaptado de Vieira e Pereira, 2015). .....	44
Figura 3.1. Aspecto do RAP coletado: (a) pilha de RAP local; (b) agregados do RAP.....	46
Figura 3.2. Curva granulométrica do RAP não processado.....	46
Figura 3.3. Curva granulométrica do RAP, da areia reciclada de RAP e da areia natural.....	47
Figura 3.4. Aspecto granulométrico dos materiais: (a) Areia natural e (b) areia reciclada de RAP. .....	48
Figura 3.5. Fluxograma da metodologia da presente pesquisa.....	48
Figura 3.6. Equipamento de compressão edométrica utilizado na pesquisa do Laboratório de Geotecnia da UFSCar. ....	50
Figura 3.7. Etapas do ensaio de cisalhamento direto: (a) material no anel de cisalhamento, (b) adição do <i>top cap</i> para (c) aplicação da tensão normal, (d) areia reciclada de RAP e (e) areia natural após ensaio realizado no Laboratório de Geotecnia da UFSCar. ....	51
Figura 3.8. Ensaio triaxial: (a) prensa de ensaio, (b) montagem, (c) durante ensaio de areia natural e (d) pós ensaio, realizado no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.....	52
Figura 3.9. Montagem de ensaio cíclico da areia reciclada de RAP e da areia natural no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.....	53
Figura 3.10. Ensaio para obtenção da curva de retenção: (a) funil de Haines, processo de saturação dos materiais: (b) areia reciclada de RAP e (c) areia natural. ....	58
Figura 3.11. Permeâmetro preenchido com areia reciclada de RAP: (a) em processo de saturação, (b) sistema de coleta. ....	60
Figura 4.1. Imagens obtidas em lupa óptica: (a) areia natural e (b) areia reciclada de RAP. ...	62
Figura 4.2. Propriedades de compactação da areia reciclada de RAP e da areia natural (a) Curvas de compactação, (b) índice de vazios <i>versus</i> teor de umidade. ....	65
Figura 4.3. Curva de compressão edométrica da areia reciclada de RAP com e sem betume e da areia natural. ....	67
Figura 4.4. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com compacidade relativa de 95% para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural. ....	68
Figura 4.5. Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com compacidade relativa de 95% para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural.....	69
Figura 4.6. Envoltórias de resistência, para corpos-de-prova com compacidade relativa de 95%, para a areia reciclada de RAP e areia natural. ....	70
Figura 4.7. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com 98% de grau de compactação e vibrado com 95% de grau de compactação para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural. ....	71

Figura 4.8. Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com 98% e vibrado com 95% de grau de compactação para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural. ....	71
Figura 4.9. Envoltórias de resistência, para corpos-de-prova com 98% de grau de compactação, para a areia reciclada de RAP e areia natural. ....	72
Figura 4.10. Curvas de tensão desvio em função da deformação específica para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia. ....	74
Figura 4.11. Curvas de variação volumétrica em função da deformação específica para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia. ....	74
Figura 4.12. Envoltórias de resistência para a areia reciclada de RAP e areia natural.....	75
Figura 4.13. Corpos-de-prova ao final do ensaio triaxial: (a) areia natural e (b) areia reciclada de RAP. ....	76
Figura 4.14. Módulo de resiliência da areia reciclada de RAP em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante e do (c) invariante de tensões.....	77
Figura 4.15. Superfície do modelo composto para a areia reciclada de RAP.....	78
Figura 4.16. Módulo de resiliência da areia natural em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante e do (c) invariante de tensões.....	79
Figura 4.17. Superfície do modelo composto para a areia natural. ....	80
Figura 4.18. Deformação permanente acumulada em função do número de ciclos para a areia reciclada de RAP.....	81
Figura 4.19. Avaliação do <i>shakedown</i> para a areia reciclada de RAP. ....	82
Figura 4.20. Variação do módulo de resiliência em função do número de ciclos para a areia reciclada de RAP.....	84
Figura 4.21. Variação da deformação permanente em função do número de ciclos para a areia natural. ....	84
Figura 4.22. Avaliação do <i>shakedown</i> para a areia natural.....	85
Figura 4.23. Variação do módulo de resiliência em função do número de ciclos para a areia natural. ....	86
Figura 4.24. Comportamento de repelência de água da areia reciclada de RAP com a água... 88	88
Figura 4.25. Coleta dos finos perdidos na lixiviação da areia reciclada de RAP: (a) filtro no instante da coleta, (b) filtro após a secagem. ....	89
Figura 4.26. Perda de massa com a lixiviação.....	89
Figura 4.27. Variação do coeficiente de permeabilidade saturado da areia reciclada de RAP com o tempo. ....	91

Figura 4.28. Curvas de retenção da areia natural e areia reciclada de RAP. ....	92
Figura 4.29. Função de condutividade hidráulica da areia natural e areia reciclada de RAP..	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Características granulométricas do RAP.....	21
Tabela 2.2. Valores de massa específica dos sólidos reportados na literatura. ....	22
Tabela 2.3. Valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade reportados na literatura.....	23
Tabela 2.4. Valores de coeficiente de permeabilidade do RAP reportados na literatura. ....	41
Tabela 3.1. Sequência de tensões para fase de condicionamento (Adaptado DNIT 134, 2018). .....	53
Tabela 3.2. Sequência de tensões para fase de ensaio (Adaptado DNIT 134, 2018).....	54
Tabela 3.3. Pares de tensões utilizados na deformação permanente (Adaptado DNIT 179, 2018). .....	56
Tabela 4.1. Parâmetros granulométricos do RAP, da areia reciclada de RAP e da areia.....	61
Tabela 4.2. Modelos e parâmetros de regressão de módulo de resiliência para a areia reciclada de RAP.....	77
Tabela 4.3. Modelos e parâmetros de regressão de módulo de resiliência para a areia natural. .....	79
Tabela 4.4. Parâmetros de regressão do modelo de deformação permanente para a areia reciclada de RAP.....	82
Tabela 4.5. Parâmetros de regressão do modelo de deformação permanente para a areia natural. .....	85
Tabela 4.6. Valores finais e taxa de acréscimo de deformação permanente para a areia reciclada de RAP e areia natural. ....	87
Tabela 4.7. Concentração de metais no lixiviado da areia reciclada de RAP e valores máximos permitidos. ....	90
Tabela 4.8. Parâmetros curva de retenção da areia reciclada de RAP e da areia natural.....	92

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Considerações iniciais .....	17
2.2. Propriedades do RAP .....	19
2.3. Características físicas do RAP.....	19
2.4. Propriedades geotécnicas.....	23
2.4.1. Compactação .....	23
2.4.2. Resistência ao cisalhamento .....	25
2.5. Comportamento cíclico.....	29
2.5.1. Módulo de Resiliência .....	29
2.5.2. Deformação permanente.....	33
2.5.3. Teoria do <i>Shakedown</i> .....	35
2.6. Propriedades hidráulicas e ambientais.....	40
2.6.1. Condutividade hidráulica.....	40
2.6.2. Lixiviação .....	42
2.7. Especificações para uso de materiais alternativos em obras .....	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	46
3.1. Materiais .....	46
3.2. Metodologia.....	48
3.2.1. Propriedades físicas .....	48
3.2.2. Propriedades mecânicas.....	50
3.2.3. Propriedades hidráulicas.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
4.1. Caracterização física.....	61
4.2. Ensaios de compactação .....	63
4.3. Ensaios de compressão edométrica .....	66
4.4. Ensaios de cisalhamento direto.....	67
4.5. Ensaios de compressão triaxial.....	73

4.6.	Ensaio de módulo de resiliência.....	76
4.7.	Ensaio de deformação permanente e avaliação de <i>shakedown</i> .....	81
4.8.	Lixiviação e análise química .....	88
4.9.	Ensaio hidráulico .....	91
5.	CONCLUSÕES .....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das demandas por infraestrutura, cresce também a pressão sobre o uso de recursos naturais, tornando imprescindível a adoção de soluções sustentáveis na engenharia geotécnica. Segundo o *Global Resources Outlook* (UNEP, 2024), a extração de recursos naturais triplicou nas últimas cinco décadas, sendo responsável por mais de 60% das emissões globais de gases poluentes. Nesse cenário, o reaproveitamento de resíduos da engenharia, como o asfalto fresado — conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) —, surge como alternativa promissora para minimizar os impactos ambientais, promover a economia circular e reduzir o consumo de materiais convencionais. Em obras de engenharia, o RAP surge como alternativa viável para reduzir a exploração de agregados naturais, especialmente em obras geotécnicas.

O RAP é gerado a partir da fresagem de pavimentos asfálticos e, após ser triturado e peneirado, pode ser reutilizado em diferentes aplicações. Enquanto seu uso em misturas asfálticas é amplamente difundido, crescem os estudos que apontam seu potencial em aplicações geotécnicas, como camadas de aterros, bases estabilizadas (Santos et al., 2024; Silva et al., 2024), acostamentos e estruturas de contenção, incluindo muros de solo reforçado (Guduru e Kuna, 2022; Antunes et al., 2019). Essa abordagem amplia as possibilidades de reaproveitamento de um material que, muitas vezes, permanece estocado sem destinação técnica adequada, especialmente no Brasil.

A viabilidade do uso geotécnico do RAP tem sido confirmada em diversos estudos. Estudos recentes têm revelado que a incorporação do RAP em misturas de solo pode melhorar parâmetros como resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência (Santos et al., 2024; Lima et al., 2023), possibilitando ganhos técnicos e econômicos. Particular atenção tem sido dada à fração fina do RAP, que ainda é pouco explorada na geotecnia, mas apresenta elevado potencial de aplicação em camadas de reforço, estruturas de contenção e elementos de suporte de aterros.

Soleimanbeigi et al. (2021) observaram bom desempenho mecânico e hidráulico do RAP em aterros reforçados, desde que as especificidades de projeto sejam consideradas. Ungureanu et al. (2020) demonstraram que o RAP estabilizado pode substituir total ou parcialmente agregados em estruturas rodoviárias, mantendo a eficiência estrutural. Além disso, o material apresenta condutividade hidráulica favorável em aplicações drenantes, embora seja necessário atentar para possíveis variações devido à presença do ligante, cimento asfáltico de petróleo (CAP), como destacado por Trzebiatowski e Benson (2005) e Mijic et al. (2020).

Do ponto de vista ambiental, ensaios de lixiviação indicam que o RAP libera concentrações de metais abaixo dos limites permitidos para a qualidade da água, sugerindo baixo risco de contaminação (Snyder e Bruinsma, 1996). No entanto, fatores como o teor de betume e a origem do material podem influenciar significativamente seu comportamento geotécnico, exigindo caracterizações específicas em cada caso (Dager et al., 2023; Cosentino et al., 2003; Wen et al., 2022).

Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo investigar as propriedades geotécnicas e hidráulicas de uma areia reciclada de RAP, podendo-se também entendê-la como a fração fina do RAP, e comparar seu desempenho ao de uma areia natural com granulometria similar. A caracterização detalhada busca fornecer subsídios técnicos para o reaproveitamento do RAP em obras de infraestrutura geotécnica e de transporte, contribuindo para a sustentabilidade no setor. Adicionalmente, esta pesquisa atende às diretrizes do chamamento público do DNIT (Ofício nº 94592/2025/CGIPT-IPR/DPP/DNIT), visando à ampliação do banco de dados do *software* MeDiNa, com informações sobre compactação, módulo de resiliência e deformação permanente de materiais alternativos.

## 1.1. Objetivos

A pesquisa apresentada tem como principal objetivo caracterizar a areia reciclada de RAP e compará-la a uma areia natural de granulometria similar, identificando suas propriedades mecânicas, hidráulicas e possíveis impactos ambientais, visando aplicações geotécnicas. Assim, tem-se como objetivos específicos:

- a) Determinar os parâmetros físicos dos materiais analisados (granulometria, massa específica, teor de ligante e índices de vazios);
- b) Avaliar a resistência ao cisalhamento, por meio de ensaios de cisalhamento direto sob dois métodos de compactação distintos;
- c) Determinar os parâmetros de resistência interna (ângulo de atrito e coesão) da areia reciclada de RAP e da areia por meio de ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial estática;
- d) Investigar a influência do ligante betuminoso no desempenho da areia reciclada de RAP;
- e) Avaliar o desempenho mecânico da areia reciclada de RAP sob ensaios de compressão cíclica de longa duração (módulo de resiliência e deformação permanente);
- f) Analisar as propriedades hidráulicas, o potencial de lixiviação de metais e o possível impacto ambiental decorrente da presença do ligante betuminoso.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações iniciais

A inserção de materiais reciclados e de reuso na engenharia civil tem se tornado cada vez mais importante. A extração de recursos naturais, além do impacto ambiental gerado, também emite porções consideráveis de gases de efeito estufa, corroborando para o aquecimento global. Couto et al. (2006) citam que uma das estratégias sugeridas para a reciclagem de materiais é usar materiais reciclados para que encoraje a indústria e governos a investigar novas tecnologias para reciclar e criar uma rede de suporte maior para futura reciclagem e reutilização.

Nesse contexto, o uso de materiais reciclados representa uma alternativa estratégica para o desenvolvimento sustentável, promovendo a redução do consumo de energia, dos recursos naturais e das emissões associadas às atividades de extração, produção e transporte de materiais convencionais. Em consonância, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) estabelecem a meta de assegurar padrões sustentáveis de produção e consumo, incluindo, até 2030, a diminuição significativa da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização de materiais.

A adoção de materiais reciclados e reutilizáveis na engenharia civil tem ganhado destaque como estratégia para reduzir o consumo de recursos naturais e as emissões de gases de efeito estufa associadas à extração e ao transporte de agregados convencionais (UNEP, 2024). Essa abordagem estimula o desenvolvimento de novas tecnologias e políticas de incentivo à reciclagem de materiais de construção, consolidando uma cadeia de reaproveitamento mais sustentável (EAPA, 2023).

Um dos materiais encontrados em abundância em áreas de descarte e com grande potencial de reuso, é o RAP, sigla em inglês para *Reclaimed Asphalt Pavement*, também conhecido como fresado de asfalto. Nos últimos anos, diversas pesquisas experimentais se concentraram em avaliar a reutilização do RAP em novas misturas asfálticas, com uma estimativa de reincorporação de 89,2 milhões de toneladas em 2019, nos EUA. Embora seja um valor expressivo, ainda restaram, ao final da temporada de construção de 2019, 138 milhões de toneladas de RAP em estoque (Hubler et al., 2023). A grande quantidade sem uso indica a necessidade de se desenvolver novas aplicações para o RAP.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2023), o reuso do

RAP refere-se à sua reincorporação em misturas asfálticas, enquanto a *reciclagem* envolve sua aplicação em fundações, aterros e camadas estruturais, onde o material atua em função secundária em relação ao uso original. A compreensão desses processos é essencial para o desenvolvimento de metodologias de reaproveitamento e para a ampliação das aplicações geotécnicas do RAP. Essas informações subsidiam o desenvolvimento de recomendações técnicas para o reaproveitamento do material (Zaumanis et al., 2021).

Nos Estados Unidos, estima-se que o uso do RAP evitou o consumo de aproximadamente 93 milhões de toneladas de agregados naturais, gerando uma economia superior a 4,6 bilhões de dólares e reduzindo em 2,7 milhões de toneladas as emissões de CO<sub>2</sub>, valor equivalente à emissão anual de 600 mil veículos de passeio (Williams et al., 2024). De acordo com a EAPA (2023), foram gerados cerca de 49 milhões de toneladas de RAP em países europeus. Na China, a produção anual de RAP é estimada em 220 milhões de toneladas, embora apenas 30% desse volume é reutilizado, percentual inferior à média de 80% observada em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Japão e nações europeias (Xiao et al., 2023).

No Brasil, apesar da reutilização do RAP ser regulamentada por documentos como a Especificação de Serviço DNIT 033/2021 – que consiste na produção de mistura asfáltica reciclada em usina a quente utilizando RAP –, ainda não há uma base de dados consolidada sobre os volumes gerados e os destinos desse material. Estimativas de Lopes et al. (2024) indicam que, entre 2019 e 2021, aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de RAP foram geradas anualmente em rodovias federais e concedidas à iniciativa privada. Contudo, apenas 0,7% desse volume foi reincorporado em novas misturas asfálticas, enquanto a maior parte do material permanece estocada ou é doada, sem rastreamento técnico ou planejamento sistemático de reaproveitamento. Esse cenário evidencia a necessidade de estudos que ampliem o entendimento sobre o comportamento geotécnico do RAP e suas possíveis aplicações estruturais, contribuindo para políticas mais eficazes de reaproveitamento.

Entre as vantagens do uso do RAP em aplicações geotécnicas destacam-se o baixo custo, a redução de impactos ambientais, a boa drenagem, e os parâmetros de resistência comparáveis aos de agregados naturais (Tutumluer e Qamhia, 2024). Desta forma, o presente capítulo reúne e discute estudos nacionais e internacionais sobre a caracterização geotécnica do agregado RAP e suas aplicações em diferentes tipos de obras.

## 2.2. Propriedades do RAP

As propriedades do RAP são influenciadas por uma variedade de fatores, como profundidade da fresagem, velocidade da fresadora e da rotação do tambor, tipo do equipamento, tipo do pavimento fresado e condições ambientais (West, 2015). Zaumanis et al. (2021) realizaram um experimento de fresamento em grande escala em quatro locais de trabalho diferentes, onde três parâmetros principais da máquina fresadora (velocidade de movimento, profundidade de fresagem e velocidade de rotação do tambor) foram variados com objetivo de investigar como os parâmetros da fresadora afetam as propriedades do RAP, durante o processo de fresagem. Amostras foram coletadas e ensaiadas para se obter as propriedades, como granulometria, propriedades do ligante e angularidade dos grãos. Este estudo revelou que os parâmetros variáveis da fresadora impactaram significativamente as propriedades do RAP. Velocidades mais altas de movimento em altas profundidades de fresagem resultam em pedaços de RAP maiores. A temperatura dos dentes cortantes não influencia no envelhecimento do ligante e angularidade dos grãos não se correlaciona com os parâmetros de fresamento. Por fim, Zaumanis et al. (2021) enfatizam a importância de entender como os parâmetros da máquina fresadora afetam as propriedades do RAP, para otimizar o processo de reciclagem e poder melhorar o desempenho de novas misturas de asfalto.

A normativa FHWA - *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* (RD-97-148, 2016), cujo objetivo é incentivar o uso amplo e adequado de materiais secundários (ou seja, resíduos e subprodutos), ressalta que as propriedades do RAP são amplamente dependentes das propriedades dos materiais constituintes e do tipo de mistura do concreto asfáltico, onde podem haver diferenças significativas entre as misturas de concreto asfáltico em qualidade, tamanho e consistência do agregado. Com moagem ou a britagem, pode-se degradar o agregado. A granulometria do RAP moído tende a ser mais fina e mais densa que de agregados naturais.

## 2.3. Características físicas do RAP

Estudos experimentais têm sido conduzidos a fim de medir e avaliar as propriedades geotécnicas do RAP. Entretanto, segundo Hubler et al. (2023), embora o RAP tenha sido amplamente pesquisado, as propriedades como granulometria, densidade máxima seca, condutividade hidráulica e lixiviação do RAP podem variar dependendo da localização da

extração, devido a misturas asfálticas diferentes, processo de fresagem e estocagem.

A granulometria é um dos principais ensaios a serem realizados, pois permite identificar os diâmetros dos grãos, porcentagem de finos, coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) e coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ). Assim, é possível classificar o material, obter uma indicação do desempenho e identificar similaridades e diferenças quando comparado aos materiais convencionais, como areia e pedregulho.

As curvas granulométricas do RAP encontradas na literatura são semelhantes e também possuem classificações similares. Segundo a FHWA (RD-97-148, 2016) o RAP produzido é moído ou triturado até 38 mm ou menos, com tamanho máximo permitido de 51 ou 63 mm. O RAP moído geralmente é mais fino que o RAP triturado. Em sua maioria, o RAP é definido como agregado grosso bem graduado que pode ser comparável a agregados naturais britados, entretanto possui maior variabilidade na granulometria.

Hubler et al. (2023) citam que parte dos trabalhos avaliados constataram que o RAP é um material não plástico e geralmente é classificado como areia (SW – *well-graded sand*) ou pedregulho bem graduado (GW – *well-graded gravel*), pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). As curvas granulométricas encontradas por Hubler et al. (2023) estão dispostas na Figura 2.1.

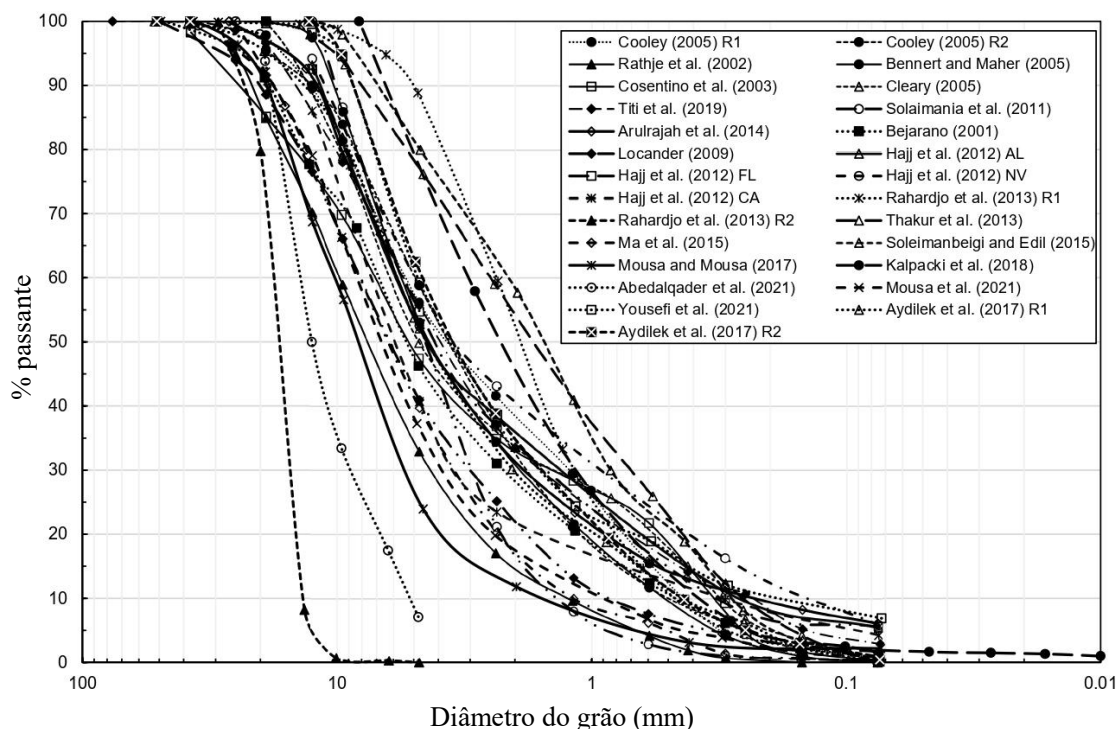


Figura 2.1. Curvas granulométricas reportadas na literatura (Adaptado de Hubler et al., 2023).

O maior diâmetro máximo reportado é de 37,5 mm, por Cosentino et al. (2003) e o menor diâmetro máximo utilizado em ensaios geotécnicos é de 9,52 mm, de acordo com Liu et al. (2023). Os valores encontrados de coeficiente de uniformidade, dispostos na Tabela 2.1, indicam, no geral, que o RAP é um material uniforme, ou seja, possui variabilidade no tamanho de grãos, sua curva granulométrica tende a ser menos vertical e quanto maior seu valor, mais bem graduado é o material. Já o coeficiente de curvatura detecta o melhor formato da curva e para valores entre 1 e 3, define que o material é bem graduado. Entretanto, estes trabalhos que têm como objetivo realizar a caracterização geotécnica avaliam apenas a fração total do RAP, ou seja, não foram encontrados registros de trabalhos que avaliaram apenas a parte fina e/ou apenas a parte grossa do RAP.

Tabela 2.1. Características granulométricas do RAP.

	<b>Parâmetros granulométricos</b>			
	<b>SUCS</b>	<b>C<sub>u</sub></b>	<b>C<sub>c</sub></b>	<b>Diâmetro máximo (mm)</b>
Cosentino et al. (2003)	GW	17,7	2,4	19,1
Rahman et al. (2015)	GW	7,8	1,8	19,1
Mijic et al. (2020)	SW	14	1,79	9,52
	SW	10,6	1,26	9,52
	SW	5,6	1,03	9,52
	SW	8,28	1,58	9,52
	SW	11,7	1,36	9,52
	SW	11,2	1,32	9,52
	SW	6,87	1,26	9,52
Soleimanbeigi et al. (2021)	SP	12	2,25	9,52
Liu et al. (2023)	SW	7,84	1,28	9,52
Mousa et al. (2021)	-	9,4	1,8	25,4

A massa específica dos sólidos do RAP possui um intervalo típico de 1,94 a 2,30 g/cm<sup>3</sup>, de acordo com o RMRC (*Recycled Materials Resource Center*). Entretanto, é possível encontrar na literatura valores para a massa específica dos sólidos com valores de até 2,77 g/cm<sup>3</sup>, reportado por Titi et al. (2019). No geral, o RAP possui densidade levemente menor que os agregados naturais e isso pode ser atribuído pela capa de ligante que envolve os grãos do material (Liu et al., 2023). A Tabela 2.2 apresenta diferentes valores de massa específica dos sólidos reportados.

Tabela 2.2. Valores de massa específica dos sólidos reportados na literatura.

<b>Massa específica dos sólidos (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
Arulrajah et al. (2013)	2,34
Cooley (2005)	2,47
Cosentino et al. (2003)	2,19
Edil (2017)	2,38
Lima et al. (2023)	2,76
Liu et al. (2023)	2,42
Hoy et al. (2016)	2,70
Mousa et al. (2021)	2,24
Mijic et al. (2020)	2,43
Pasche et al. (2022)	2,57
Rahman et al. (2015)	2,30
Rathje et al. (2002)	2,33
Tahmoorian et al. (2017)	2,47
Soleimanbeigi et al. (2021)	2,39

Hubler et al. (2023), ao analisar RAPs de diferentes locais, relatam que os valores de massa específica dos sólidos foram bem semelhantes (2,47 a 2,62 g/cm<sup>3</sup>) e houve poucas variações. Essas diferenças, embora pequenas, podem ser justificadas pelo tipo de agregado graúdo e o teor de ligante utilizado no projeto de pavimento. Além disso, essas variações destacam a variabilidade do RAP. Entretanto, isso não tem impacto significativo na capacidade do RAP em ser utilizado em outros projetos, além da pavimentação.

Uma das características que diferenciam o RAP de outros materiais granulares é a presença de ligante asfáltico, sendo assim o teor de ligante um parâmetro importante na caracterização deste material. Em geral, o teor de ligante asfáltico (*binder content*) presente no RAP varia entre 4% e 6% em massa, dependendo da origem e da idade do pavimento original. Lima et al. (2023) obtiveram um teor de 6,03%, Abdalfattah et al. (2022), ao avaliarem dois RAPs de diferentes locais, encontraram 5,55% e 5,48% de teor de ligante, utilizando o método de ignição (ASTM D6307, 2019). Esse valor pode variar também conforme o método de extração e envelhecimento do ligante. Por isso, a determinação precisa do teor de ligante residual é fundamental quando se avalia o RAP para fins de reaproveitamento.

## 2.4. Propriedades geotécnicas

### 2.4.1. Compactação

Outro fator importante na classificação do RAP são os parâmetros obtidos pelo ensaio de compactação, sendo a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo. Os valores reportados na literatura são apresentados na Tabela 2.3. Nota-se que os valores de massa específica aparente seca têm intervalo de 1,17 g/cm<sup>3</sup> a 2,04 g/cm<sup>3</sup>, e o teor de umidade tem variação de 3 % a 8,30 %. A curva de compactação tem formato mais plano, conforme mostrado pela Figura 2.2, sendo muito comum em agregados grossos por conta da característica de drenagem livre. Embora seja indicado para materiais granulares, não foi possível encontrar na literatura um intervalo para os índices de vazios máximos e mínimos.

Tabela 2.3. Valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade reportados na literatura.

<b>Autor(es)</b>	<b><math>\rho_{d,m\acute{a}x}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
Arulrajah et al. (2013)	1,99	8,00
Cosentino et al. (2003)	1,89	8,00
Edil (2017)	2,04	7,00
Hoy et al. (2016)	1,75	4,10
Liu et al. (2023)	1,88	5,10
Mijic et al. (2020)	1,87	6,81
Mousa et al. (2017)	1,91	6,90
Mousa et al. (2021)	1,98	6,00
Rahman et al. (2015)	1,90	8,30
Rathje et al. (2002)	1,17	3,00
Soleimanbeigi et al. (2021)	1,86	4,00

Segundo Hubler et al. (2023), a massa específica aparente seca máxima é uma propriedade geotécnica crucial do RAP, já que influencia em seu desempenho e adequação em diversas aplicações. Ao comparar este valor de 5 diferentes RAPs (oriundos do Distrito 6, uma das subdivisões do estado da Pensilvânia nos EUA) a valores reportados na literatura ajuda a compreender a variabilidade nas propriedades do material e auxilia na identificação de possíveis aplicações de reutilização. Um fato observado pelos autores é que a correlação entre o coeficiente de uniformidade e as propriedades da compactação indicam uma correlação entre a distribuição do tamanho das partículas e a massa específica aparente seca máxima. Na Figura 2.2, há a comparação entre as curvas de compactação do Distrito 6 (*Malvern-Scalped, Highway*

*Materials, Erie-Scalped, Delaware Valley Asphalt-Scalped, Glasgow e Glen Mills*) obtidas por Hubler et al. (2023) e curvas reportadas na literatura.

Ao comparar as curvas de compactação na Figura 2.2, é possível observar que os RAPs do Distrito 6 apresentam maiores valores de massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ). Isto pode ser justificado pela variedade do RAP, como quantidades diferentes de finos, teor de ligante asfáltico e/ou granulometria do material. Quanto maior a quantidade de finos e a melhor graduação do material, maior será o valor de  $\rho_d$ . Ademais, os diferentes métodos de compactação podem justificar esta diferença.

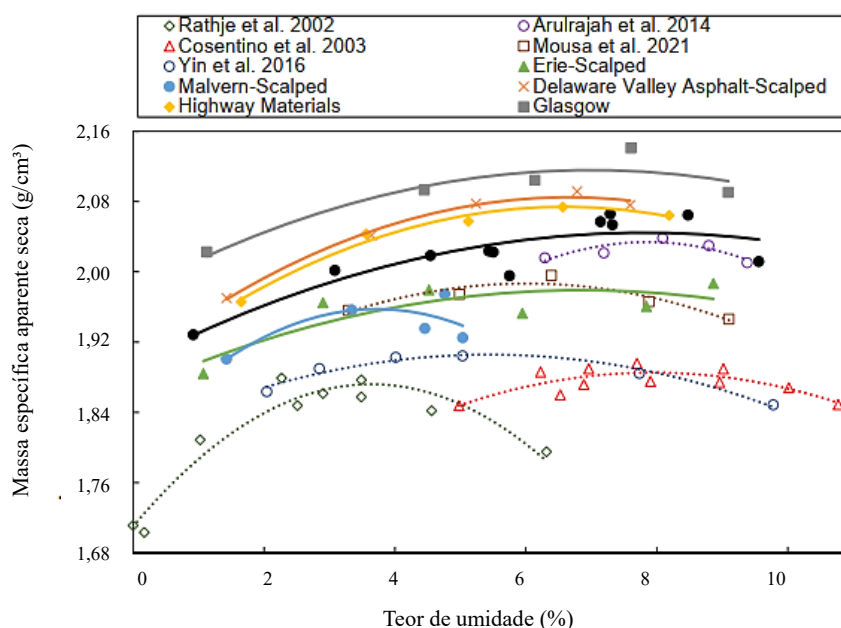


Figura 2.2. Curvas de compactação do Distrito 6 e reportadas na literatura (Adaptado de Hubler et al., 2023).

Mijic et al. (2020) e Wen et al. (2022) realizaram compactações com energia Proctor normal e obtiveram um intervalo de  $\rho_d$  de 1,754 g/cm<sup>3</sup> a 1,997 g/cm<sup>3</sup> e teores de umidade ótima variando de 6% a 9%. De acordo Hubler et al. (2023), em geral, a maioria dos estudos presentes na literatura utilizaram o método de Proctor modificado, contudo, diferentes moldes e diferentes técnicas de lançamento do soquete podem causar estas diferenças. Embora haja estas diferenças de  $\rho_d$ , estes valores já são esperados visto que agregados mais grosseiros apresentam valores elevados de  $\rho_d$  e essas diferenças enfatizam a variabilidade do RAP devido à sua fonte.

Para compactação em molde tripartido, seguindo a norma DNIT 443 (2023), Santos et al. (2024), para dois RAPs diferentes, obtiveram 2,146 g/cm<sup>3</sup> e 1,910 g/cm<sup>3</sup> de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo de 7,10 % e 7,00 %, respectivamente, utilizando

energia Proctor modificada. Já Silva et al. (2024), utilizando energia Proctor intermediária para uma amostra de RAP, obtiveram  $\rho_d$  de 1,76 g/cm<sup>3</sup> e 6,00 % de umidade ótima.

#### **2.4.2. Resistência ao cisalhamento**

Diversas pesquisas sobre o RAP caracterizam sua resistência mecânica, bem como outros parâmetros inerentes. Ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial são os mais indicados, entretanto, por se avaliar o RAP por completo, ou seja, sem que seja processado por meio de peneiramento ou trituração, e o material possuir granulometria grosseira, o ensaio triaxial tem sido mais utilizado para se obter a resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito.

Os resultados obtidos na literatura indicam que o RAP tem um alto ângulo de atrito e, conseqüentemente, alto valor de resistência ao cisalhamento. Arulrajah et al. (2013) com o objetivo de avaliar as propriedades geotécnicas e geoambientais de vários materiais residuais, incluindo o RAP, para aplicações em sub-bases de pavimentos. O RAP foi utilizado no estudo de Arulrajah et al. (2013) devido ao seu potencial de aplicações em obras rodoviárias, especialmente nas camadas de base e sub-base. Ensaios triaxiais (consolidados e drenados) foram conduzidos para avaliar as propriedades de resistência ao cisalhamento dos materiais, incluindo coesão e ângulo de atrito, essenciais para entender seu comportamento sob diferentes condições de tensão. Os resultados obtidos foram 53 kPa de coesão e 37° de ângulo de atrito para o RAP.

Mousa et al. (2021) em seu estudo para investigar o impacto da composição do RAP no módulo de resiliência e na permeabilidade das misturas com outros agregados, para uso em base e sub-base de pavimentos. O RAP, nas misturas, acrescenta parcela coesiva devido à presença de ligante asfáltico em suas partículas, a qual afeta a energia de interação partícula-partícula (por lubrificação parcial ou adesão). Para determinação do ângulo de atrito e coesão, foram realizados ensaios triaxiais não drenado e não consolidado, para se obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento em diferentes pressões de confinamento. Como resultado, para um agregado virgem, ou seja, uma mistura com 0% de RAP, o ângulo de atrito é de 56° e coesão de 45 kPa. Já para o RAP, ou seja, uma mistura com 100% RAP, obteve-se 98 kPa de coesão e 39° de ângulo de atrito. A Figura 2.3 apresenta as curvas tensão-deformação para o agregado e para o RAP.

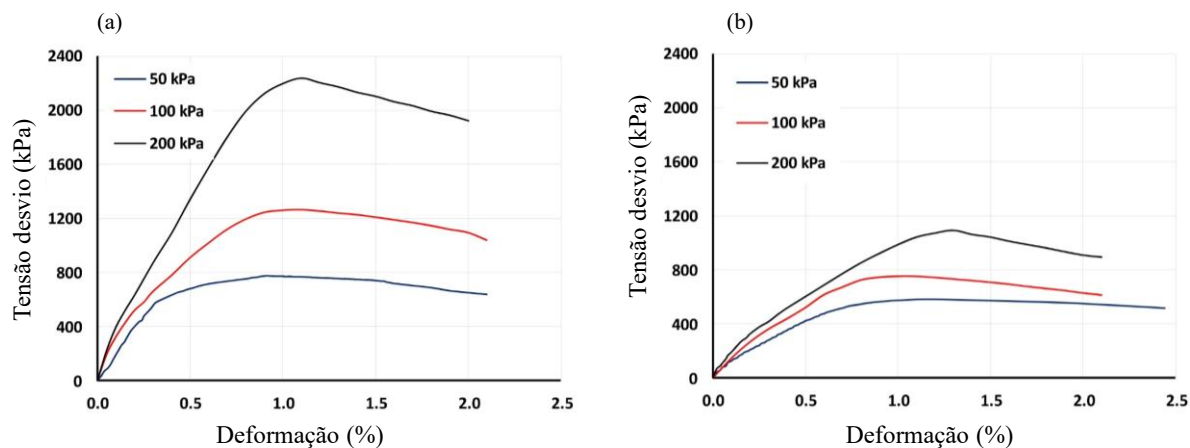


Figura 2.3. Curvas deformação: (a) agregado virgem e (b) RAP (Adaptado de Mousa et al., 2021).

Embora o RAP tenha menor resistência que o agregado virgem, apresentou bom comportamento e ao ser incluído nas misturas com o agregado, incrementou na coesão e módulo de resiliência, e é uma boa opção para substituição de agregados naturais (Mousa et al., 2021). A Figura 2.4 apresenta as curvas de tensão *versus* deformação obtidas por Soleimanbeigi et al. (2021) a partir do ensaio triaxial consolidado drenado (CD). A Figura 2.5 dispõe a envoltória de resistência do RAP, em que o material apresenta ângulo de atrito de  $39^\circ$  e coesão de 25 kPa. O valor de coesão pode ser atribuído à presença do ligante betuminoso ao redor das partículas, o qual promove adesão e aumenta a energia de interação partícula-partícula.

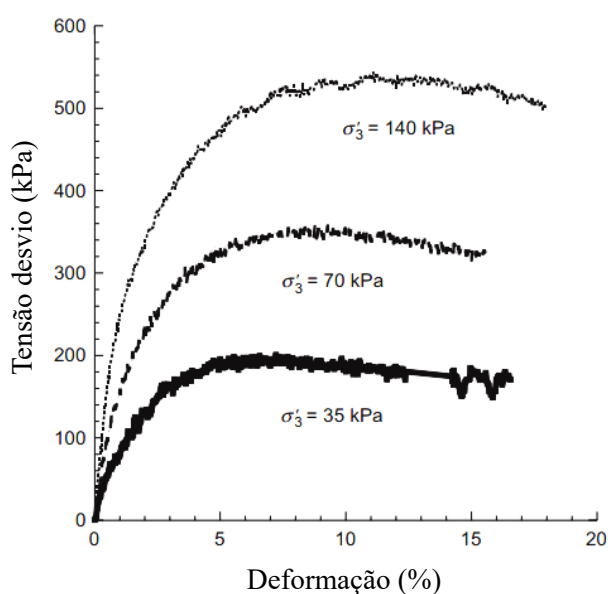


Figura 2.4. Curvas de tensão-deformação do RAP para tensões normais de 35, 70 e 140 kPa (Adaptado de Soleimanbeigi et al., 2021).

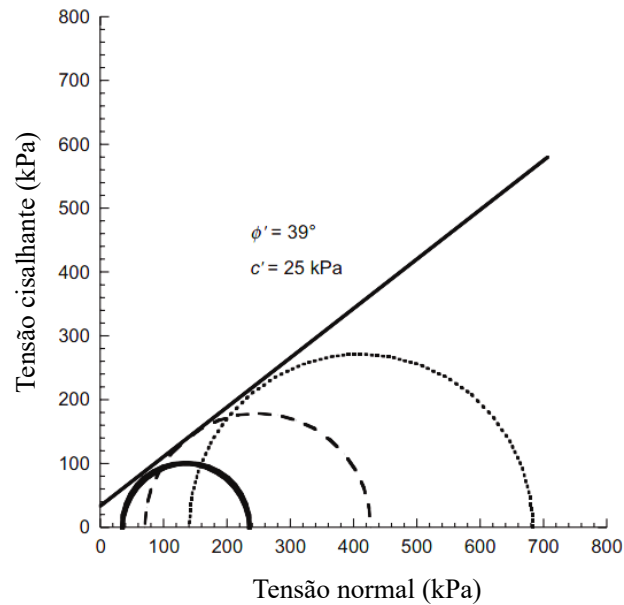


Figura 2.5. Envoltória de resistência do RAP (Adaptado de Soleimanbeigi et al., 2021).

Rathje et al. (2002) realizaram ensaio de compressão triaxial em RAP e em um material convencional de aterro, a fim de compará-los. As pressões confinantes foram de 83 a 276 kPa, o ângulo de atrito obtido é de  $55^\circ$  e coesão nula para o material convencional, onde a tensão desvio máxima foi obtida com aproximadamente 2% de deformação e depois decaiu para um valor residual. Já o RAP foi ensaiado com confinante de 83 a 310 kPa e as curvas apresentaram constância após os 2% de deformação. A variação volumétrica variou, inicialmente compressivas e em seguida com expansão, menores para tensões confinantes maiores. Este comportamento de compressão, diferente do material convencional, segundo Rathje et al. (2002) é devido à presença de betume que impede a densificação do RAP durante a compactação e indica que o RAP pode ser suscetível a recalques de compressão caso não seja compactado de maneira adequada. A Figura 2.6 exibe as curvas de tensão-deformação, variação volumétrica e envoltória de resistência avaliados por Rathje et al. (2002).

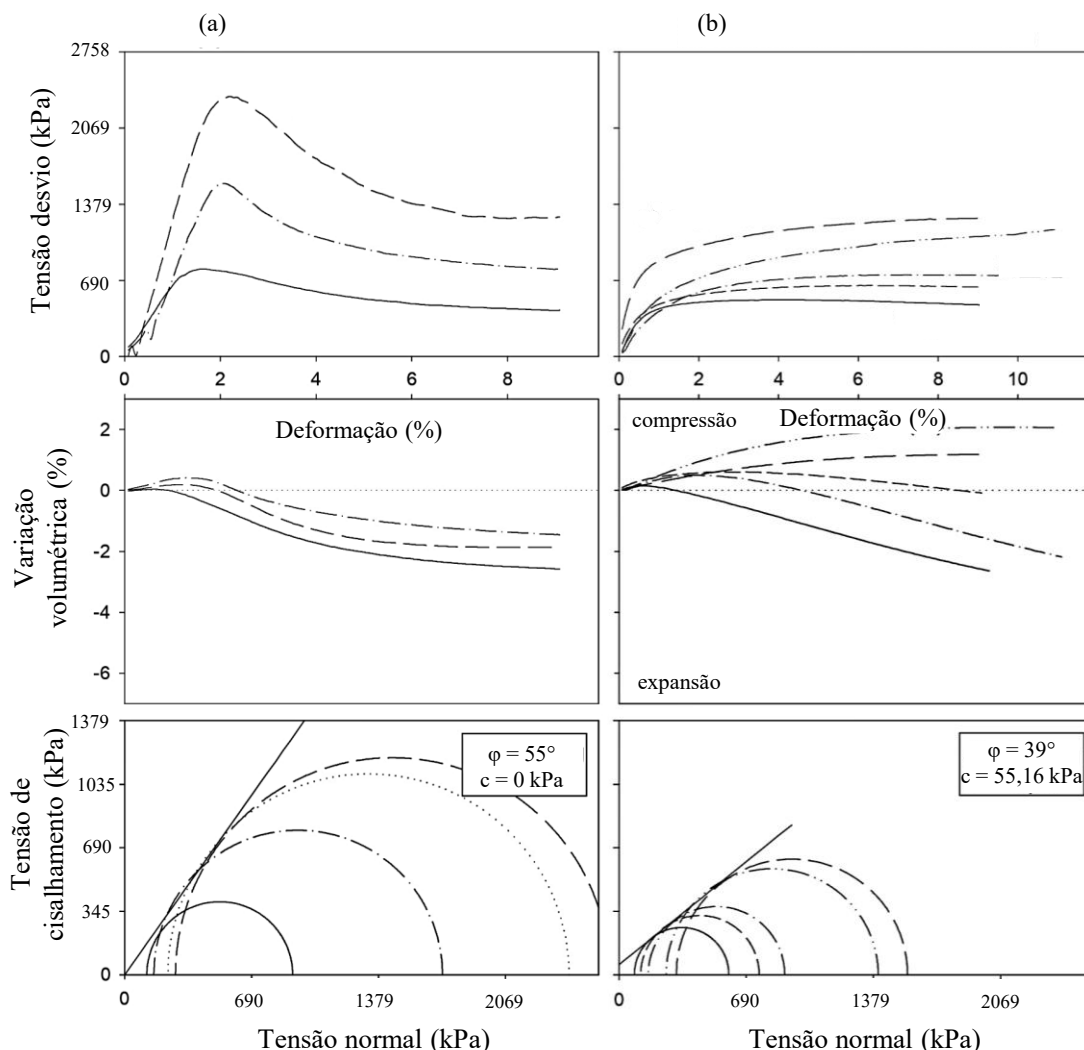


Figura 2.6. Resultados do ensaio de compressão triaxial de (a) material convencional de aterro e (b) RAP (Adaptado Rathje et al., 2002).

De acordo com os resultados de Rathje et al. (2002), o ângulo de atrito do RAP é de  $39^\circ$ , com coesão de 55 kPa devido ao betume residual que une as partículas, efeito também reportado por outros autores. Embora as resistências obtidas para o RAP sejam menores que do material convencional, o RAP apresenta adequação para ser utilizado como material de aterro. Ademais, os autores ressaltam que estudos adicionais são necessários para avaliar a estabilidade e determinar se o RAP é suscetível à falha por fluência quando submetido a grandes tensões.

## 2.5. Comportamento cíclico

### 2.5.1. Módulo de Resiliência

Em pavimentos reais, segundo Brown (1996), a carga aplicada é transitória e a fundação do pavimento, no caso as camadas de solo e materiais granulares, possuem relações tensão-deformação não lineares, influenciadas por diversas variáveis.

Brown e Bush (1972), a partir de experimentos com placas de carga dinâmica e medições em várias profundidades, obtiveram a relação tensão-deformação de uma argila siltosa compactada, em que se verifica a sua não linearidade, conforme apresentado na Figura 2.7. De maneira similar, também se verifica a não linearidade de uma camada de brita compactada, a partir do módulo de Young *versus* o primeiro invariante de tensão Figura 2.8.

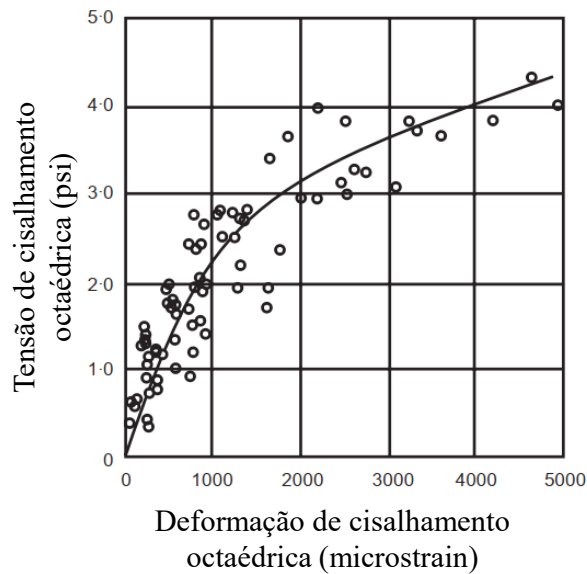


Figura 2.7. Relação tensão-deformação de cisalhamento para argila siltosa (Adaptado de Brown, 1996).

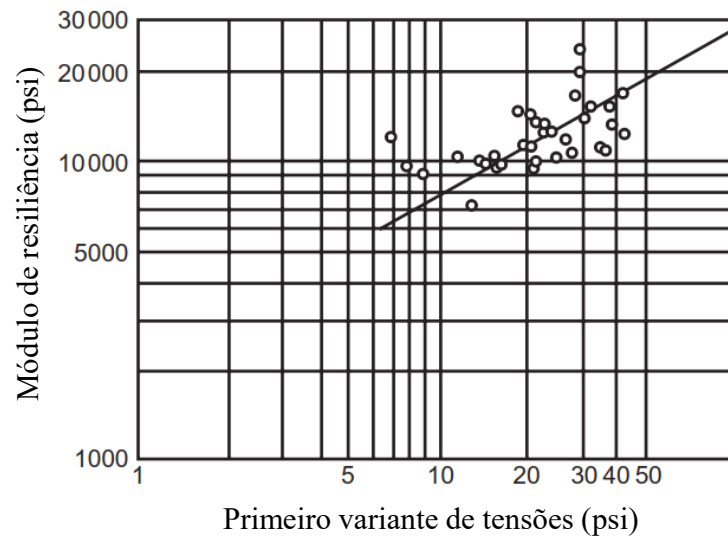


Figura 2.8 Módulo de resiliência *versus* o primeiro invariante de tensões para brita (Adaptado de Brown, 1996).

Segundo Brown (1996), anteriormente, realizavam-se análises estruturais elásticas lineares dos pavimentos pois, com a aplicação de uma única carga, os pavimentos têm comportamento resiliente e qualquer deformação permanente será muito pequena em relação à resiliente, sendo cada camada é caracterizada por um valor de módulo de Young e razão de Poisson. Com as diferenças notadas entre o comportamento real e o teórico dos materiais, durante a década de 1950, na Califórnia, surge o parâmetro resiliência. Francis Hveem foi o primeiro a reconhecer a importância das propriedades resilientes para as fundações de pavimentos e associá-la a incidência de trincas por fadiga na camada betuminosa. Segundo Hveem (1955), o termo resiliência é preferível ao invés de elasticidade, por exemplo, pois no caso dos pavimentos, os movimentos avaliados são muito maiores do que os desenvolvidos em sólidos elásticos. Prefere-se, para fins de projeto, associar o conceito de rigidez apenas à camada de asfalto e a estrutura de base. O caráter do solo de suporte terá uma variável, a resiliência.

Seed et al. (1955), realizaram ensaios triaxiais cíclicos em solos compactados e definiram o Módulo de Resiliência como sendo a tensão desvio aplicada dividida pela deformação axial resiliente, apresentada na Equação 2.1. A deformação resiliente é obtida pela Equação 2.2.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{L} \quad \text{Equação 2.2}$$

em que:  $M_R$  é o módulo de resiliência,  $\sigma_d$  a tensão desvio,  $\varepsilon_r$  deformação específica axial resiliente (recuperável),  $\delta_r$  deslocamento recuperável e  $L$  a altura do corpo-de-prova.

O módulo de resiliência no projeto de pavimentos é um parâmetro de grande importância. O método de dimensionamento de pavimentos estabelecido pela AASHTO, em 1986, segundo Bernucci et al. (2006), substituiu o valor de CBR (obtido pelo ensaio de CBR) para o módulo de resiliência no cálculo estrutural do pavimento. Uma das razões para esta mudança está no fato de que o ensaio de CBR não corresponde ao efeito da ação das cargas cíclicas sobre os materiais que compõem a estrutura do pavimento. Assim, o módulo de resiliência indica uma propriedade básica do material a ser utilizado e é incluída na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas.

A determinação do módulo de resiliência é feita a partir do ensaio triaxial cíclico, que consiste em se submeter um corpo-de-prova a uma tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e aplicar de maneira repetida uma tensão desvio ( $\sigma_d$ ). A repetição da tensão desvio é feita com frequência de 1 Hz, em que a aplicação ocorre em 0,1 segundo e os demais 0,9 segundos são de descanso, apenas com a aplicação da carga de contato. O formato da curva é do tipo Haversine  $(1-\cos\theta)/2$ , apresentado na Figura 2.9.

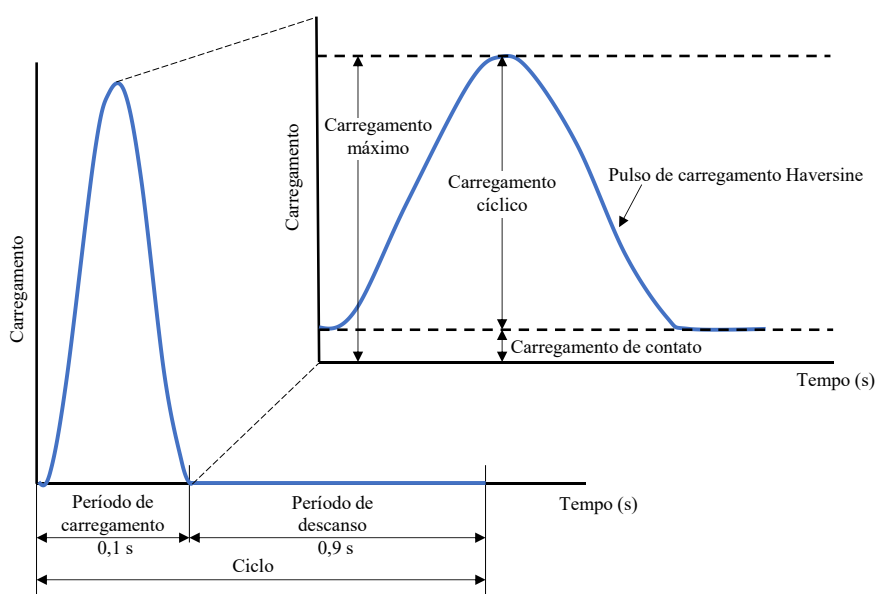


Figura 2.9. Curva Haversine de carregamento ensaio cíclico para frequência de 1 Hz  
(Adaptado de AASHTO T307, 2007).

A Figura 2.10 apresenta os dois tipos de deslocamento em que o corpo-de-prova, durante o ensaio cíclico, está sujeito, sendo eles o deslocamento plástico/permanente e resiliente/recuperável.

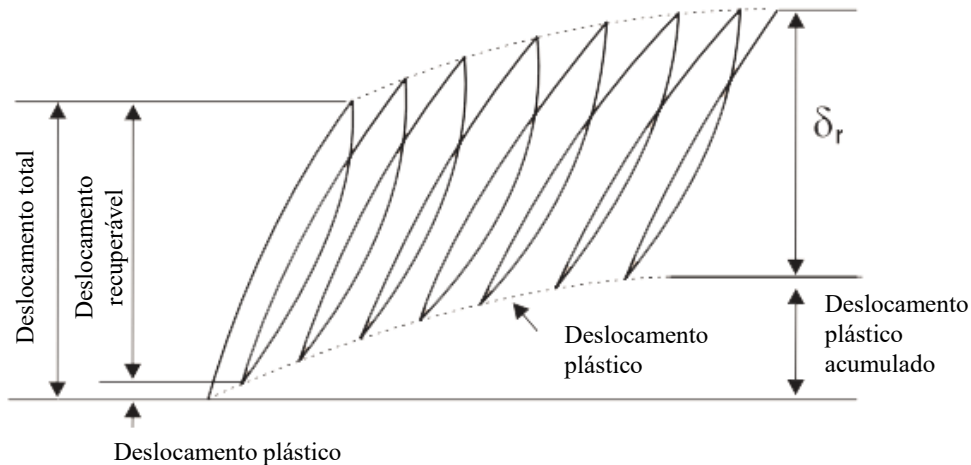


Figura 2.10. Deslocamentos sofridos pelo corpo-de-prova (Adaptado Bernucci et al., 2006).

No Brasil, o ensaio triaxial cíclico para obtenção do Módulo de Resiliência é normatizado pela DNIT 134 – ME (2018). A norma dispõe os pares de tensões para a fase de condicionamento e a fase de ensaio. No condicionamento do corpo-de-prova, são aplicados 1500 ciclos com 3 pares de tensão diferentes e fase de ensaio é composta por 18 pares de tensão. No caso de materiais de subleito, o condicionamento é reduzido para apenas um par de tensão, executando-se apenas 500 ciclos e a fase de ensaio é reduzida para 12 pares de tensão. O ensaio é interrompido se a deformação permanente acumulada atingir 5% da altura da amostra.

Silva et al. (2024) avaliaram o módulo de resiliência para o RAP e para misturas de solo-RAP. Para as misturas com 100% de RAP, foi realizado o ensaio completo (18 pares de tensão) e o módulo de resiliência médio obtido foi de 276,42 MPa. Também foram obtidos os parâmetros de regressão utilizando o modelo composto (Macêdo, 1996), com  $R^2$  de 0,974 e 0,986, mostrando boa adequação do material ao modelo. Santos et al. (2024) ao avaliarem diferentes misturas de materiais granulares convencionais com adição de RAP, notaram que houve aumento significativo nos módulos de resiliência e resposta elástica superior das misturas com adição de fresado. Os RAPs utilizados possuem Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) de 12 e 6,55, e Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ) de 1,47 e 1,46. Além disso, o valor de massa específica aparente seca máxima foi de 2,146 g/cm<sup>3</sup> e 1,910 g/cm<sup>3</sup> com umidade ótima de 7,10% e 7,00%, respectivamente. Os estudos indicam que o RAP apresenta valores de módulo de resiliência

comparáveis aos de materiais granulares naturais, o que reforça sua viabilidade para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos.

### 2.5.2. Deformação permanente

A deformação permanente ocorre em materiais submetidos a cargas repetidas e corresponde à parcela da deformação total que não se recupera após a remoção da carga. Segundo a norma DNIT 179 (2018), o ensaio de deformação permanente consiste na aplicação de pares de tensões por no mínimo 150.000 ciclos, utilizando-se, para análise, ao menos seis corpos-de-prova. A norma adota o modelo de Guimarães (2009) para representar o comportamento de deformação permanente, permitindo prever a contribuição do material para a resposta do pavimento e identificar tendências de ruptura ou acomodação.

O modelo de previsão proposto por Guimarães (2009), que correlaciona a deformação permanente com a tensão confinante, a tensão desvio e ao número N de aplicação de carga, está apresentada na Equação 2.3. Este modelo foi desenvolvido a partir de materiais brasileiros que se adequaram ao modelo com resultados estatisticamente bons, que se mostrou adequado para a previsão de deformação plástica do material e permite a avaliação da ocorrência do *shakedown*.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad \text{Equação 2.3}$$

em que:  $\varepsilon_p$  (%) é a deformação permanente específica,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$  e  $\psi_4$  constantes de regressão do modelo,  $\sigma_3$  a tensão confinante (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_d$  a tensão desvio (kgf/cm<sup>2</sup>) e N o número de ciclos de aplicação de carga.

Para materiais reciclados, também é possível se obter a evolução da deformação permanente. Carvalho e Motta (2021), a partir do ensaio de deformação permanente, obtiveram as curvas de deformação permanente em função do número de ciclos para o RAP, dispostas na Figura 2.11, para 4 diferentes relações de tensão.

Carvalho e Motta (2021) notaram que houve uma certa deformação permanente inicial nos primeiros estágios, típica de materiais granulares. Após esta acomodação, o material apresentou uma tendência de estabilização da deformação, considerando um ensaio de 200.000 ciclos. Outro ponto notado é que a deformação permanente será tanto maior quanto menor for

a sua tensão confinante e maior a sua tensão desviadora, ou seja, a tensão de confinamento tende a restringir a deformação permanente e o acréscimo da tensão desvio tende a aumentar o aparecimento de deformações permanentes. Silva et al. (2024) também avaliaram o RAP na deformação permanente, e obtiveram as curvas da Figura 2.12, para um total de 150.000 ciclos. O mesmo comportamento observado por Carvalho e Motta (2021) foi observado neste caso.

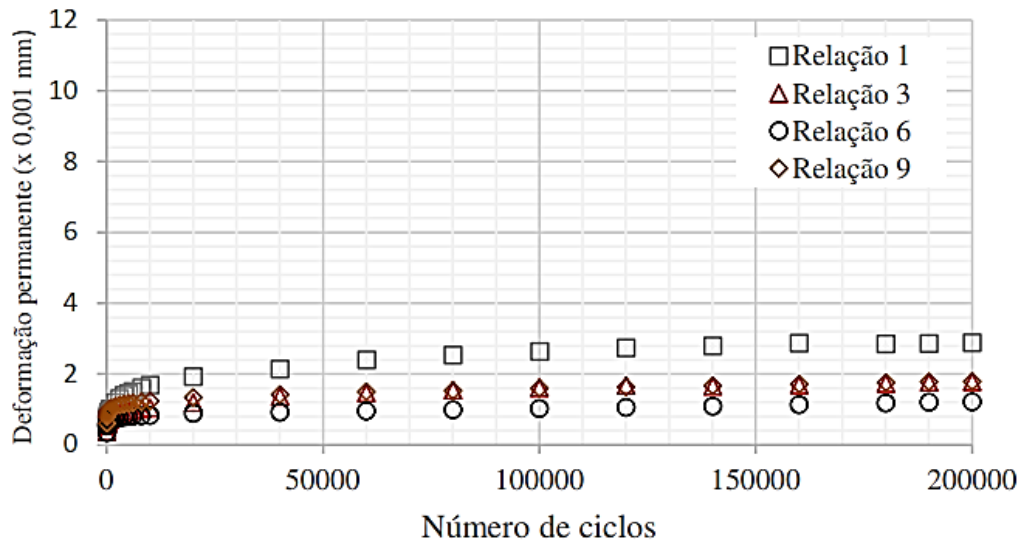


Figura 2.11. Deformação permanente em função do número de ciclos para o RAP (Carvalho e Motta, 2021).

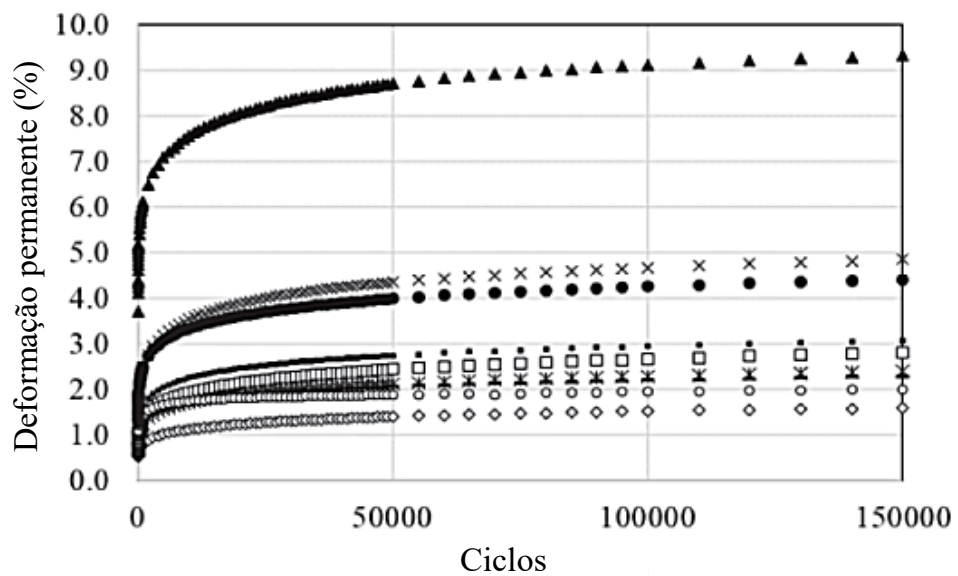


Figura 2.12. Evolução da deformação permanente para o RAP (Silva et al., 2024).

### 2.5.3. Teoria do *Shakedown*

Segundo Soliman e Shalaby (2015), o comportamento de deformação de materiais granulares deve ser avaliado com base na deformação permanente e nas respostas de deformação elástica. Deve-se utilizar em conjunto para avaliar este comportamento a forma da deformação permanente acumulada, a alteração da taxa de deformação permanente e a alteração na deformação elástica. A teoria do *Shakedown* é frequentemente utilizada para analisar o comportamento plástico do material sujeito a cargas variáveis e uma maneira eficaz de se prever a carga máxima em que poderá ocorrer uma deformação permanente excessiva.

Segundo Werkmeister et al. (2004), no conceito do *shakedown* há quatro respostas do material submetido a cargas repetidas, sendo puramente elástico (estágio 0 na Figura 2.13), *shakedown* elástico (estágio 1), *shakedown* plástico (estágio 2) e o colapso incremental (estágio 3). No estágio 0, o carregamento é mínimo para que nenhum elemento do material escoe e as deformações são elásticas. Já no estágio 1, o carregamento aplicado é um pouco menor que o necessário para produzir o segundo estágio, embora o material apresenta deformações permanentes que se estabilizam após certo número de ciclos. No caso do *shakedown* plástico (estágio 2) o carregamento aplicado é menor que o necessário para ocorrer o colapso, e o material está em acomodamento plástico e as deformações crescem rapidamente até atingir o equilíbrio. Por fim, no colapso incremental, o carregamento é maior e parte do material está escoando até atingir a ruptura (Santos, 2021).

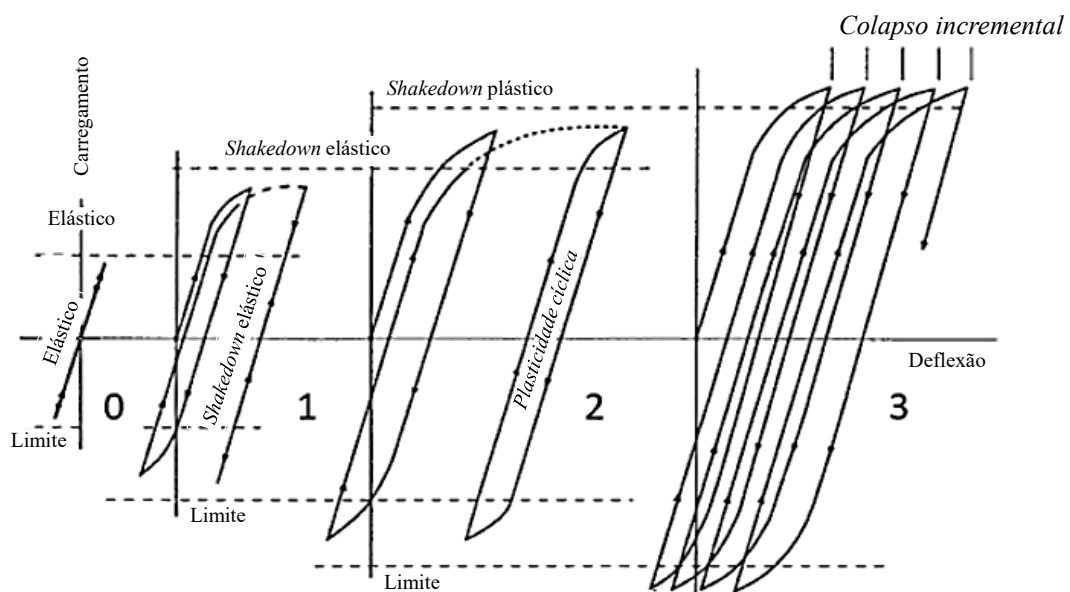


Figura 2.13. Comportamento elástico e plástico sob tensão cíclica (Adaptado de Werkmeister et al. 2004).

Para materiais granulares, Wellner and Werkmeister (2000) apresentaram vários resultados de ensaios de deformação permanente em diferentes níveis de tensão. Os autores observaram que há três tipos ou níveis de comportamento quanto à deformação permanente, nomeados de níveis A, B e C (Figura 2.14). No nível A, segundo Guimarães (2009), o material apresenta deformações elásticas e plásticas até um número finito de ciclos e, a partir daí, apresenta apenas deformações elásticas, tendo assim um acomodamento das deformações plásticas. Na Figura 2.14, nota-se que no nível A as curvas tendem a serem paralelas ao eixo vertical. Para o material entrar definitivamente em *shakedown*, a taxa de acréscimo da deformação permanente por ciclo deve ser da ordem de  $10^{-7}$ .

No nível C, os incrementos de deformação permanente são sucessivos e a resposta do material é sempre plástica. O material pode romper por cisalhamento ou atingir grandes deformações. Por fim, o nível B é uma resposta intermediária. Neste caso não se pode afirmar que o material irá entrar em colapso ou que ele já entrou em *shakedown*. A taxa de acréscimo de deformação permanente nos ciclos iniciais é muito elevada, embora decresce e se torna constante.

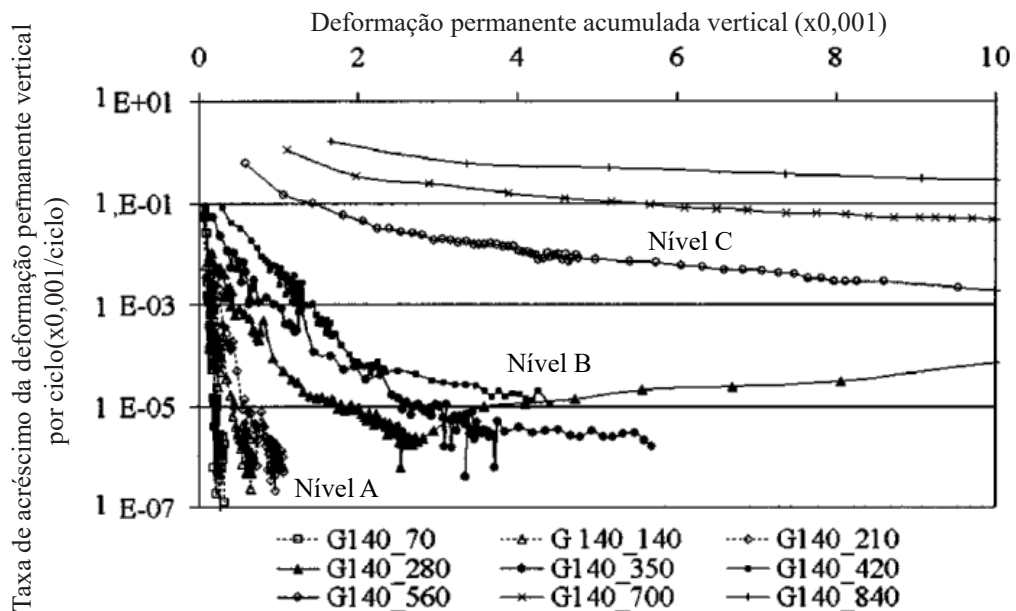


Figura 2.14. Formatos de curvas dos níveis de *shakedown* (Adaptado de Wellner and Werkmeister, 2000 *apud* Werkmeister et al. 2004).

Em resumo, segundo Lima (2020), os materiais podem ser classificados de acordo com as formas indicadas na Figura 2.15. O comportamento AB foi observado por Guimarães (2009) ao se avaliar o comportamento de solos brasileiros, que representa o material atingindo o

comportamento do tipo *shakedown* plástico, porém com maior magnitude inicial de acúmulo de deformação permanente.

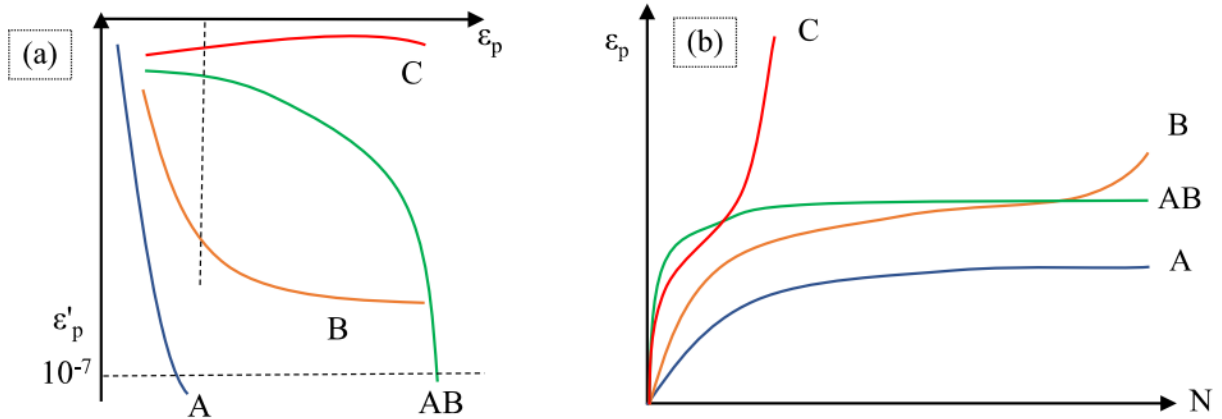


Figura 2.15. Classificação gráfica do comportamento dos materiais: (a) taxa de acréscimo de deformação permanente *versus* deformação permanente acumulada e (b) deformação permanente *versus* número de ciclos (Lima et al., 2023).

Werkmeister (2003) propôs limites de cada comportamento, utilizando inequações que são derivadas da expressão dada pela Equação 2.4.

$$\epsilon_{p_{5000}}^I - \epsilon_{p_{3000}}^I \quad \text{Equação 2.4}$$

Em que:

$\epsilon_{p_{5000}}^I$ : deformação permanente acumulada à 5000 ciclos de carga;

$\epsilon_{p_{3000}}^I$ : deformação permanente acumulada à 3000 ciclos de carga;

Para obter as regiões de comportamento (A, B ou C), segundo Lima (2020), pode-se utilizar de inequações derivadas da Equação 2.4. Para o comportamento A, graficamente, gera curvas paralelas ao eixo da taxa de deformação permanente e as taxas devem ser da ordem de  $10^{-7}$  metros por ciclo de aplicação de carga. Ademais, verifica-se

$$\epsilon_{p_{5000}}^I - \epsilon_{p_{3000}}^I < 0,045 \times 10^{-3} \quad \text{Equação 2.5}$$

No caso do comportamento B, observando o gráfico da Figura 2.15, nota-se que a taxa de acréscimo reduz, embora não da mesma forma que no comportamento A. Em certo momento, essas taxas tendem a ser constantes. O comportamento também é verificado a partir da Equação 2.6.

$$0,045x10^{-3} < \varepsilon_{p_{5000}}^I - \varepsilon_{p_{3000}}^I < 0,4x10^{-3} \quad \text{Equação 2.6}$$

Por fim, o comportamento C é mais crítico e graficamente (Figura 2.15) observa-se uma alta taxa de acréscimo de deformação permanente que leva o material ao colapso, onde pode ser verificado pela Equação 2.7.

$$\varepsilon_{p_{5000}}^I - \varepsilon_{p_{3000}}^I > 0,4x10^{-3} \quad \text{Equação 2.7}$$

Segundo Lima (2020), ensaios com mais de 150.000 ciclos facilitam a visualização do comportamento do material quanto ao *shakedown*. Para o comportamento nível B é importante realizar ensaios com maior número de ciclos e/ou extrapolar o comportamento para se avaliar ao longo do prazo. Ademais, a autora também notou que os intervalos propostos por Werkemeister (2003) classificou os materiais estudados com comportamento do tipo C, entretanto, visualmente, eram identificados como B ou AB, e materiais classificados como B e graficamente identificados como A ou AB. Percebe-se que os limites em certos casos são a favor da segurança e em outros não identificam as altas deformações permanentes acumuladas antes ainda de 3 mil ciclos.

Assim, Lima (2020) propôs um método para classificação do *shakedown*, que consiste em avaliar os seguintes pontos:

- Os resultados dos ensaios de deformação permanente são plotados em dois formatos de gráficos: Deformação permanente acumulada (%) *versus* Número de ciclos e Taxa de acréscimo da deformação permanente (x0,001/ciclo) *versus* a deformação permanente (x0,001);
- O valor para os eixos das abscissas do gráfico de taxa de acréscimo da deformação permanente (0,001/ciclo) *versus* a deformação permanente (x0,001) (Dawson e Wellner, 1999) deve ter valor máximo de 50;
- Os resultados são analisados e classificados de acordo com formato e deformação permanente acumulada nos dois tipos de gráficos plotados;
- Os formatos das curvas são analisados baseados nas descrições comportamentais das classificações A, B, C e AB (Figura 2.15);
- Se a deformação permanente acumulada em 150 mil ciclos ultrapassar 1% da altura do corpo de prova e formato de curva de comportamento AB atingindo a taxa de acréscimo

de  $10^{-6}$  (x0,001), o ensaio será classificado como do tipo AB;

- Se a curva do ensaio no gráfico de análise *shakedown* tende a se tornar paralela ao eixo de deformação permanente, como previsto para comportamento do tipo A, e não atinge a taxa de acréscimo de  $10^{-6}$  (x0,001), o ensaio será classificado como do tipo B;
- O ensaio será classificado como do tipo A caso a curva seja paralela ao eixo das ordenadas e atinja a taxa de acréscimo de  $10^{-6}$  (x0,001);
- O ensaio será classificado como do tipo C caso a curva tenha tendência a ser paralela ao eixo das abscissas e não atinja a taxa de acréscimo de  $10^{-4}$  (x0,001), vindo a apresentar taxas de acréscimos e deformações permanentes elevadas ao longo dos milhares de ciclos aplicados no ensaio.

Embora haja diferenças na classificação, o modelo anteriormente proposto por Werkmeister (2003) não tem muita distancia ao comportamento real dos materiais, embora pode ser aprimorado com o aumento de conhecimento dos comportamentos dos materiais (Lima, 2020).

Carvalho e Motta (2021) avaliaram o *shakedown* de materiais reciclados, como resíduo de construção e demolição (RCD) e RAP. Os resultados mostraram que o RCD estabilizado com cimento e o RAP são adequados para uso em reaterro de valas em diferentes tipos de tráfego. O RAP foi submetido a 4 pares de tensões para o ensaio de deformação permanente de 200.000 ciclos, com razão de tensão de 1, 3, 6 e 9. Apenas para a relação 6 ( $\sigma_d$  de 0,12 MPa e  $\sigma_3$  0,02 MPa) o RAP apresentou comportamento do tipo A – *plastic shakedown*. As demais apresentaram comportamento do tipo *plastic creep*, nível B, conforme ilustra a Figura 2.16.

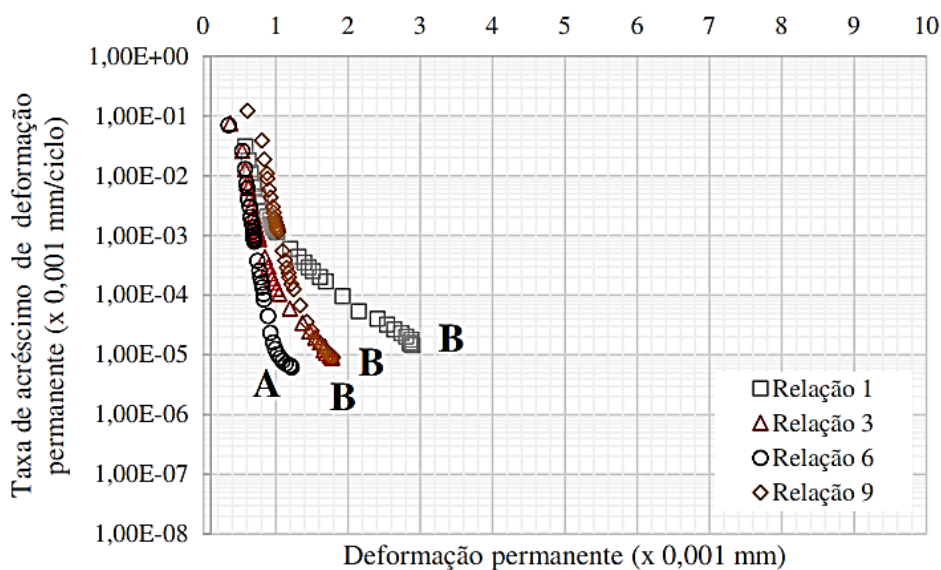


Figura 2.16. Análise segundo a teoria do *shakedown* do RAP (Carvalho e Motta, 2021).

O comportamento do tipo B em RAP também foi observado por Santos et al. (2024), ao avaliarem a teoria do *shakedown*, apresentada na Figura 2.17, para agregado virgem (M0-100%AV), uma mistura de agregado virgem e RAP (M3-30%RAP), e RAP puro (M1-100%RAP). Com a adição do RAP, os autores notaram que houveram efeitos diferentes para cada nível de tensão aplicado. Em níveis menores de tensão, houve um aumento de deformações com o aumento do teor de RAP. Já o nível intermediário de tensões fez com que este comportamento fosse contrário.

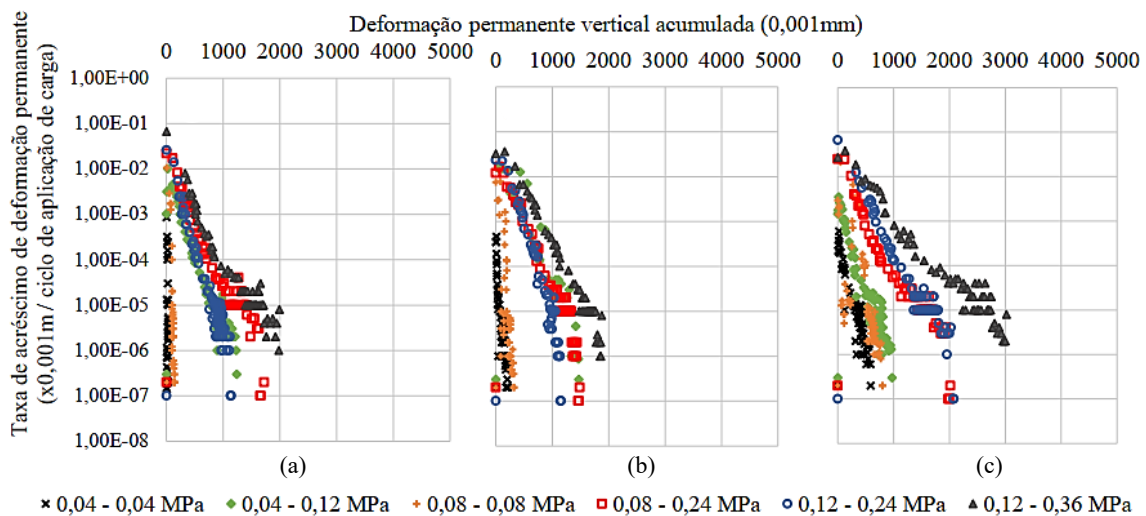


Figura 2.17. Análise da ocorrência de *shakedown* (Santos et al., 2024).

O número de ciclos de carregamento, no caso de Santos et al. (2024), foi de 150.000, entretanto, os autores notaram que pode não ter sido suficiente já que algumas curvas não atingiram taxas menores que  $10^{-7}$ , mesmo apresentando uma tendência de acomodamento plástico.

## 2.6. Propriedades hidráulicas e ambientais

### 2.6.1. Condutividade hidráulica

Um material de livre drenagem, segundo Casagrande e Fadum (1940), permite a passagem rápida e fácil de água e possuem permeabilidade maiores que  $10^{-6}$  m/s. Materiais como este são utilizados em obras da engenharia pois dissipam rapidamente as poropressões e mantêm sua estabilidade. Hubler et al. (2023) avaliaram a condutividade hidráulica de 6

localidades diferentes, onde obtiveram um valor médio de  $3 \times 10^{-5}$  m/s e todos eles foram considerados materiais de livre drenagem. Entretanto, parâmetros como teor de betume, granulometria, local de coleta do material e energia de compactação faz com que as características hidráulicas do RAP variem (Trzebiatowski e Benson, 2005).

Para avaliar a correlação dos parâmetros do RAP com seu comportamento hidráulico e ambiental, Mijic et al. (2020), desenvolveram um programa experimental que consiste em comparar o RAP a três materiais comumente utilizados em valas de drenagem de rodovias. As sete amostras de RAP foram classificadas como areia bem graduada (SW). Os outros materiais são um agregado de base graduado, pedra nº 57 (equivalente a Brita 1), e dois solos superficiais. Ademais, as características químicas destes materiais podem afetar suas condutividades hidráulicas, durante o processo de percolação.

Inicialmente, os sete diferentes RAPs foram caracterizados. A Tabela 2.4 apresenta os coeficientes de permeabilidade médios. Estes materiais foram classificados como materiais de boa drenagem e sua condutividade hidráulica é comparável à de agregados naturais convencionais. Ademais, os resultados obtidos por Mijic et al. (2020) foram condizentes com os valores obtidos por outros autores na literatura que também são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Valores de coeficiente de permeabilidade do RAP reportados na literatura.

<b>Coeficiente de permeabilidade (m/s)</b>	
Bennert and Maher (2005)	6,00E-05
Cosentino et al. (2003)	2,00E-06
	6,90E-05
	7,60E-05
Hubler et al. (2023)	5,70E-06
	8,90E-06
	2,20E-06
	1,70E-05
	9,80E-05
	5,70E-04
Mijic et al. (2020)	1,10E-03
	2,50E-04
	2,00E-04
	5,30E-04
Mousa et al. (2021)	3,30E-04
Soleimanbeigi et al. (2021)	4,58E-03
	3,80E-05
Shedivy et al. (2012)	8,30E-05
	2,20E-05
	3,70E-04

Mijic et al. (2020) notaram que a condutividade aumentou com a diminuição do teor de finos, da proporção areia-cascalho e do coeficiente de uniformidade da amostra. Em geral, para teores mais altos de cal livre (CaO) presentes no material e um teor mais alto de betume dentro do RAP, resultaram em uma menor massa unitária seco e maior condutividade hidráulica. No entanto, Mijic et al. (2020), sugerem que um estudo futuro usando materiais com uma gama mais ampla de betume pode fornecer uma melhor compreensão do efeito do betume hidrofóbico na condutividade hidráulica.

### 2.6.2. Lixiviação

Além de se avaliar a permeabilidade do RAP, é necessário avaliar o líquido percolado. Existem certas preocupações ambientais em relação a presença de contaminantes no lixiviado do RAP. Os componentes encontrados são variáveis pois dependem diretamente da fabricação do pavimento originário, exposição durante sua vida útil e tempo de armazenamento do RAP (Hubler et al., 2023). Mijic et al. (2020) realizaram testes de lixiviação do RAP e constataram que o pH do lixiviado variou de 6,69 a 8,50. A lixiviação de Boro (B), Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) produziram um padrão de primeira lavagem com concentrações diminuindo significativamente após os primeiros períodos de lixiviação. Os limites utilizados para verificação são descritos pelo *Water Quality Limits (WQL)* do *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*.

Herrera (2019) avaliou dados de 8 diferentes RAP, coletados em diferentes países, que fizeram testes de lixiviação. Apenas 4 dos 8 resultados avaliados apontaram concentrações acima dos limites permitidos, neste caso estabelecidos pelo padrão de qualidade de águas subterrâneas de Washington. Foram encontradas substâncias excederam os limites (como arsênio, manganês, ferro e selênio), entretanto, essas excedências ocorrem apenas na primeira passagem de água pelo RAP. Isso significa que, segundo Herrera (2019), o impacto ao meio ambiente pode não ser significativo se o lixiviado de RAP fosse diluído e ocorresse a atenuação pelo solo.

Embora ocorra a lixiviação de metais, as concentrações encontradas geralmente são menores que os padrões de *Maximum Contaminant Level (MCL-EPA)* (Cosentino et al. 2003; Herrera 2019; Kang et al. 2011; Legret et al. 2005; Mehta et al. 2017; Mijic et al. 2020; Seybou-Insa et al. 2021; Shedivy et al. 2012; Yang et al. 2020). E mesmo que esses padrões sejam excedidos, Mijic et al. (2020) notaram que após alguns volumes de fluxo percolarem o RAP, as

concentrações de metais reduziram. Ademais, quando o lixiviado do RAP é permeado em solos naturais, ocorre a atenuação e as concentrações de metais reduziram a níveis dentro dos limites (Mijic et al., 2020; Yang et al. 2020). Logo, o RAP não apresenta um potencial de contaminação e pode ser utilizado em aplicações não pavimentadas, por exemplo, e distante de fontes de água. Solos naturais também podem ser utilizados ao longo do caminho de percolação do lixiviado para se atenuar suas concentrações.

## **2.7. Especificações para uso de materiais alternativos em obras**

A Administração Federal de Rodovias americana (FHWA – *Federal Highway Administration*) tem criado diretrizes aos usuários de resíduos e materiais alternativos em que há o fornecimento de informações para o uso de RAP nos EUA. Ademais, a FHWA (RD-97-148, 2016) afirma que o RAP pode ser utilizado como substituto de agregados em novas misturas asfálticas, base granular ou sub-base, agregado de base estabilizado, material de aterro ou preenchimento.

Os requisitos de materiais de preenchimento podem ser adotados a partir das recomendações da FHWA (*Federal Highway Administration*), AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e NCMA (*National Concrete Masonry Association*). O material de aterro a ser utilizado em encontro de pontes, pilares e muros de contenção, segundo a AASHTO, deve ser um material de drenagem livre, que atenda o intervalo de graduação especificado, com pH entre 4,5 e 9, sem a presença de material orgânico (menor que 1%). Já a NCMA, o solo deve ser inorgânico, com classificação SUCS como GP, GW, SW, SP ou SM, dentro do intervalo de graduação e com pH de 3 a 9. Por fim, a FHWA recomenda que o material seja livre de materiais orgânicos ou prejudiciais, com diâmetro máximo de 19 mm, com granulometria dentro da faixa granulométrica especificada e pH entre 5 a 10. Três intervalos de graduação dos materiais estão dispostos na Figura 2.18, sendo referentes as recomendações máximas e mínimas da FHWA para muros de solo mecanicamente estabilizado e taludes de solo reforçado (*Mechanically Stabilized Earth walls - MSE walls e Reinforced Soil Slopes – RSS*) e da NCMA.

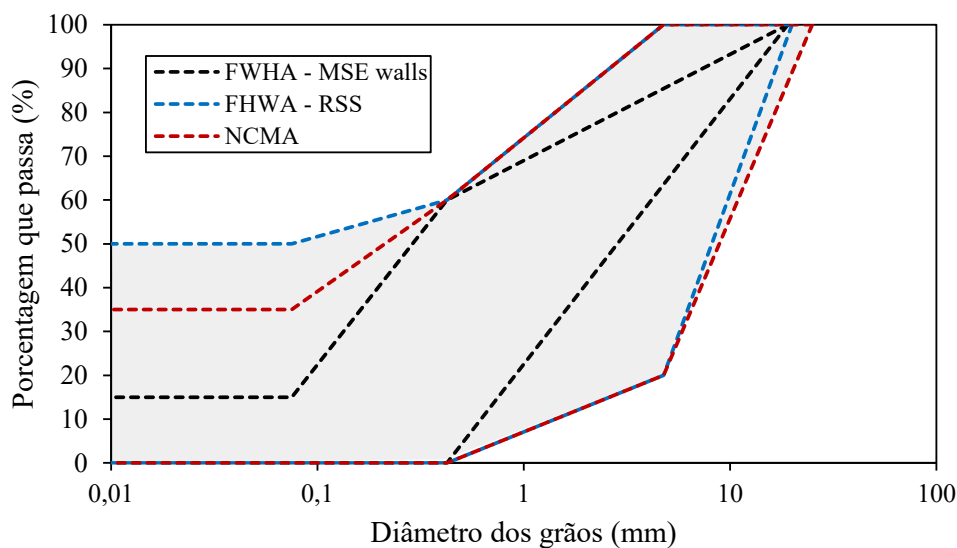


Figura 2.18. Limites de granulometria das normativas FHWA-NHI-10-024 E NCMA. (Adaptado de Vieira e Pereira, 2015).

Por fim, a FHWA (RD-97-148, 2016) dá diretrizes para o uso de materiais alternativos em construção de aterros ou material de preenchimento. Os requisitos de projeto para RAP na construção de aterros são os mesmos que para misturas de agregados de solo de tamanho similar e agregados convencionais. O projeto deve levar em consideração a estabilidade do talude, recalque ou consolidação e preocupações com a capacidade de suporte. Se o aterro for construído usando uma mistura de RAP com solo e/ou agregado britado, uma amostra representativa do material misturado deve ser testada, se possível, para compressão triaxial e *California Bearing Ratio* (CBR). O tamanho máximo de grão para o teste triaxial é de 5 mm e para CBR é de 19 mm.

De acordo com a FHWA-HIF-24-002 (2023), *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls*, aterros alternativos (ou seja, agregados leves, concreto celular, subprodutos industriais ou materiais reciclados) são às vezes utilizados como aterro reforçado. O uso de materiais recuperados, como agregado de concreto reciclado e RAP, não é recomendado. O agregado de RAP é propenso à fluência, resultando tanto na deformação da parede quanto no arrancamento da armadura.

Dessa forma, observa-se que o uso de materiais reciclados, como o RAP, tem sido amplamente considerado por agências como a FHWA, AASHTO e NCMA, com recomendações específicas para aplicação em bases, sub-bases, aterros e materiais de preenchimento. Embora algumas diretrizes mais recentes apontem restrições ao uso do RAP em estruturas mecanicamente estabilizadas devido à possibilidade de fluência, essa limitação não

descarta o seu potencial em outras aplicações geotécnicas. Desde que devidamente caracterizado quanto à sua granulometria, pH, presença de materiais orgânicos, capacidade de suporte, possibilidade de fluência e comportamento sob carregamentos repetitivos, o RAP pode representar uma alternativa sustentável e tecnicamente viável à substituição de agregados naturais. A adoção consciente e tecnicamente embasada desse material contribui para a redução de impactos ambientais e para o avanço de práticas de engenharia mais sustentáveis, alinhadas com os princípios da economia circular e da conservação de recursos naturais.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais

Na presente pesquisa, o RAP utilizado é oriundo de obras de recuperação do pavimento da vicinal Clito Bastia no distrito Bueno de Andrada, pertencente a cidade de Araraquara-SP. A Figura 3.1 apresenta o aspecto do fresado no local de coleta, gerenciado pelo Departamento de Estradas e Rodagem - DER. O RAP encontrava-se na condição não processada ou bruta, conforme apresentado na Figura 3.1. Esta amostra foi cedida pelo DER-SP, regional de Araraquara.



Figura 3.1. Aspecto do RAP coletado: (a) pilha de RAP local; (b) agregados do RAP.

Após a coleta, realizou-se o ensaio de granulometria do material de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), com curva granulométrica apresentada na Figura 3.2.

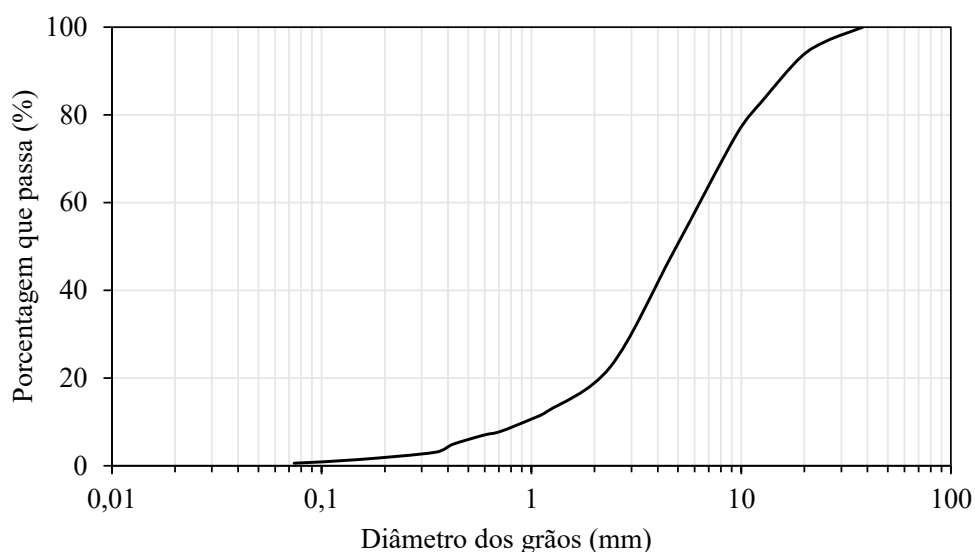


Figura 3.2. Curva granulométrica do RAP não processado.

O material foi processado e separado por meio de peneiramento. A fração utilizada na presente pesquisa é a fração areia (ou fração fina), passante na peneira #10 (2,0 mm). Como referência de comportamento de material arenoso, utilizou-se uma areia limpa de construção. A composição granulométrica da areia natural foi alterada para alcançar a mesma distribuição granulométrica do RAP. A Figura 3.3 apresenta as curvas granulométricas da areia reciclada de RAP e da areia natural. Neste caso, nota-se que o objetivo foi atingido e ambas as curvas ficaram próximas.

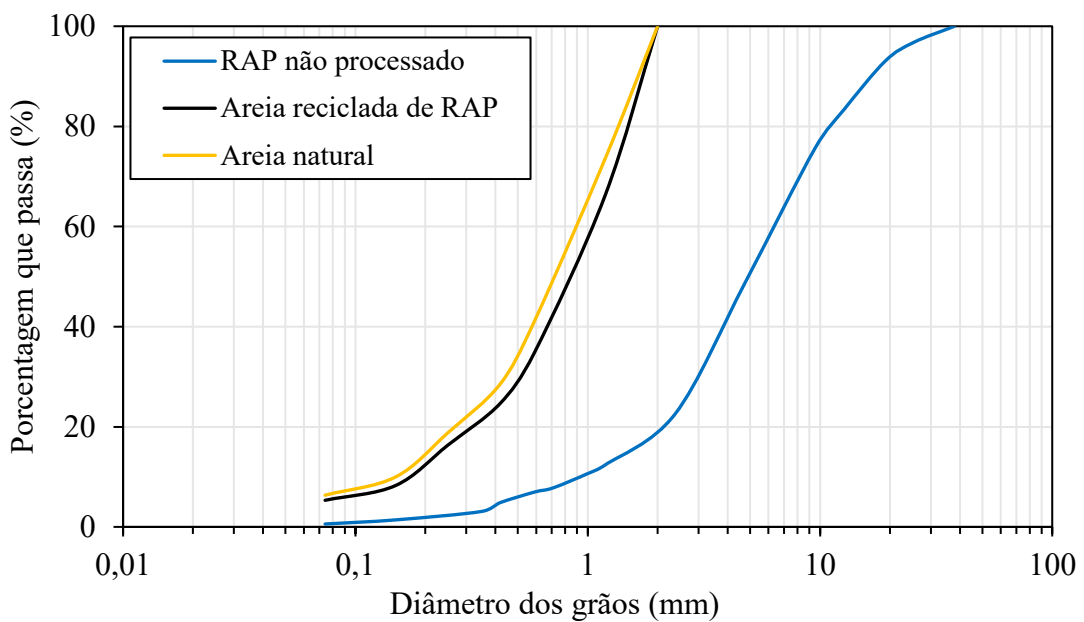


Figura 3.3. Curva granulométrica do RAP, da areia reciclada de RAP e da areia natural.

A partir das curvas, foi possível definir a porcentagem de cada fração granulométrica da areia reciclada de RAP, a classificação granulométrica, bem como Coeficiente de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura.

A Figura 3.4 apresenta as imagens da areia reciclada de RAP e da areia natural. As amostras utilizadas para os ensaios geotécnicos foram homogeneizadas manualmente e secas ao ar antes de qualquer ensaio realizado e mantidas em ambiente com temperatura controlada. O RAP não pode em nenhum momento ser seco em estufa pois a temperatura causa aglutinação dos grãos devido à presença de ligante.

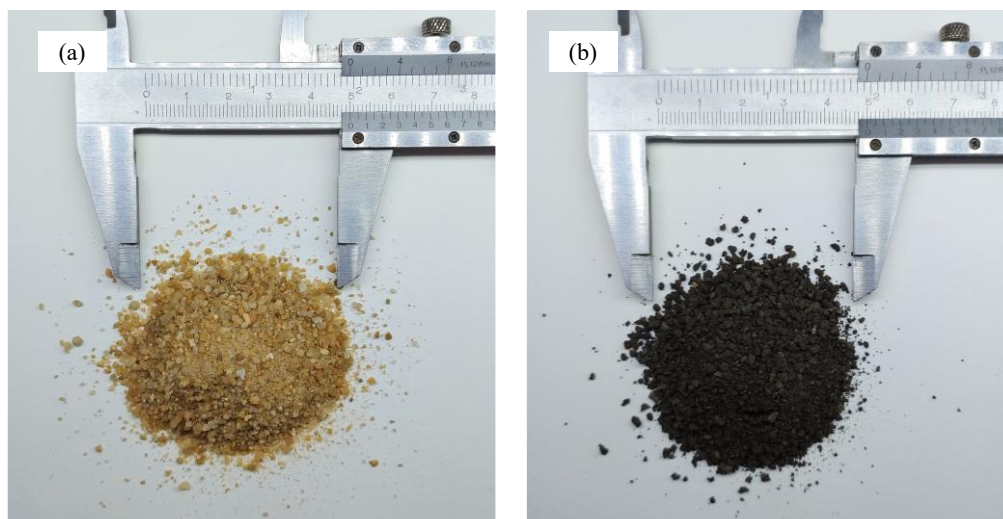


Figura 3.4. Aspecto granulométrico dos materiais: (a) Areia natural e (b) areia reciclada de RAP.

### 3.2. Metodologia

A metodologia da presente pesquisa foi separada em 5 grandes etapas, conforme indicado na Figura 3.5.

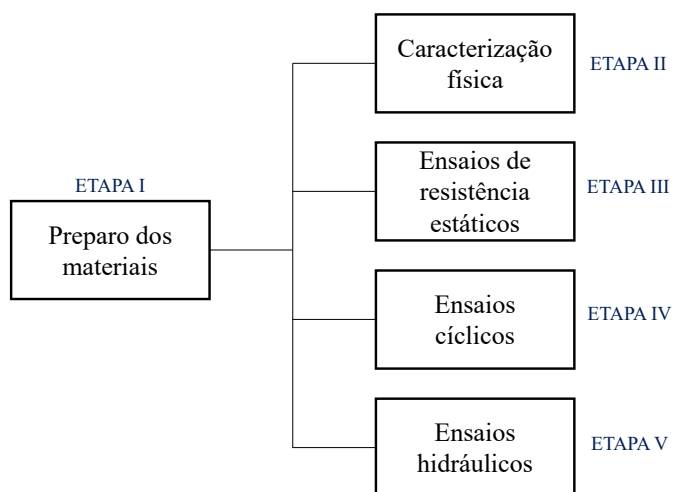


Figura 3.5. Fluxograma da metodologia da presente pesquisa.

#### 3.2.1. Propriedades físicas

A primeira etapa consistiu na coleta e preparo dos materiais, conforme descrito no item anterior (3.1 Materiais).

Na etapa II, os ensaios de caracterização da areia reciclada de RAP foram feitos juntamente com os ensaios da areia natural, a fim de ter para comparação um material similar

(mesma granulometria). Para a obtenção da curva granulométrica dos materiais, realizou-se o ensaio de peneiramento seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2018). Em posse da areia natural e da areia reciclada de RAP, foram realizados os ensaios de massa específica dos sólidos, pelo método presente no anexo B da NBR 6458 (ABNT, 2016b).

O método de ensaio consiste na determinação da massa específica dos sólidos por meio de um picnômetro devidamente calibrado. Inicialmente, os materiais são submetidos a um processo de dispersão e, em seguida, introduzidos no picnômetro e submetidos a aplicação de vácuo de modo que não haja volume preenchido apenas por ar. Utilizando-se as curvas de calibração previamente obtidas, que relacionam a massa e o volume do picnômetro preenchido apenas com água, é possível, a partir da medição da massa e temperatura do picnômetro contendo o material e a água, calcular a massa específica dos sólidos do material em análise.

Para o RAP não processado e para a areia reciclada de RAP, realizou-se o ensaio de teor de ligante pelo método de extração por ignição em forno mufla, seguindo a normativa ASTM D6307 (2019). Este ensaio foi realizado pela equipe de laboratório da Usina de Asfalto Bandeirantes. No ensaio é realizado a queima controlada das amostras de RAP, em alta temperatura, em que ocorre a queima do ligante asfáltico. Durante o processo, o sistema realiza a medição contínua da perda de massa da amostra. Ao final da queima, a diferença entre a massa inicial da amostra e a massa final dos agregados minerais permite calcular o teor de ligante asfáltico presente na mistura. Este ensaio é fundamental para quantificar a proporção de betume ainda presente nos agregados reciclados, o que influencia diretamente nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material.

Por se tratar de materiais granulares, foi possível determinar o valor de índice de vazios máximo, pelo método B da NBR 16840 (ABNT, 2020) e mínimo, segundo o método B da NBR 16843 (ABNT, 2020b). Os ensaios são realizados utilizando-se o cilindro de Proctor, com volume de 1.000 cm<sup>3</sup>. Para o índice de vazios máximo, o material foi depositado dentro do molde pela extração de um tubo preenchido com o mesmo. Já para a obtenção do índice de vazios mínimo, o cilindro de Proctor foi preenchido e vibrado com a adição de uma sobrecarga suficiente para aplicação de 13,8 kPa. O peso e volume conjunto cilindro mais material são obtidos e assim calculou-se os valores de cada índice.

Ademais, a fim de se observar as diferenças entre os formatos dos grãos, já que a areia é um material natural, composto apenas por um mineral (quartzo) e a areia reciclada de RAP é composto pelo material natural do agregado utilizado (basalto ou diabásio, por exemplo) envolto de ligante asfáltico, foram obtidas imagens com lupa óptica digital. A análise qualitativa

das imagens permitiu observar aspectos como angulosidade, rugosidade superficial e a presença de ligante residual aderido aos grãos de RAP, fatores estes relevantes para o entendimento do comportamento mecânico do material.

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016c), utilizando a energia do Proctor Normal ( $600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ). Para cada material, foi traçada a curva de compactação relacionando o teor de umidade ao peso específico seco, a fim de identificar o teor ótimo de umidade ( $w_{ót}$ ) e a massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dmáx}$ ). Estes parâmetros são essenciais para a definição das condições de moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios de resistência e permeabilidade, garantindo a comparabilidade entre as amostras.

### 3.2.2. Propriedades mecânicas

Na terceira etapa da pesquisa, após obtidos os resultados dos ensaios anteriores, como massa específica dos sólidos e índice de vazios, calculou-se a massa necessária de cada material considerando a compacidade relativa de 95%. Foram realizados ensaios de compressão edométrica, seguindo a NBR 16853 (ABNT, 2020c), para a areia natural, para a areia reciclada de RAP e também para a areia reciclada de RAP sem betume, que foi utilizado para se avaliar a influência do ligante asfáltico. Os corpos-de-prova foram moldados com 7,15 cm de diâmetro e 2 cm de altura, com tensões aplicadas de 12,5 kPa à 1600 kPa, utilizando a aquisição automática da prensa, apresentada na Figura 3.6.



Figura 3.6. Equipamento de compressão edométrica utilizado na pesquisa do Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

Um primeiro ensaio de compressão moldado utilizando método de compactação a seco por vibração, com compacidade relativa de 95%, foi realizado com o RAP para obtenção dos parâmetros de compressibilidade. Notou-se que o RAP não estabilizava sua deformação indicando uma elevada compressão secundária e para baixas tensões seriam necessários mais de 30 dias para que houvesse estabilização. Assim, padronizou-se o incremento de carga a cada 72 horas.

Os ensaios de cisalhamento direto (ASTM D3080, 2011) foram realizados com tensões normais de 25 kPa à 200 kPa. Corpos-de-prova de ambos os materiais foram moldados em anéis redondos com 6,31 cm de diâmetro com 2,84 cm de altura e cisalhados com velocidade constante de 0,75 mm/s. Foi utilizado dois métodos de compactação: o primeiro sendo o método de compactação a seco por vibração considerando a compacidade relativa de 95% e o método de compactação em teores ótimos com grau de compactação de 98%.

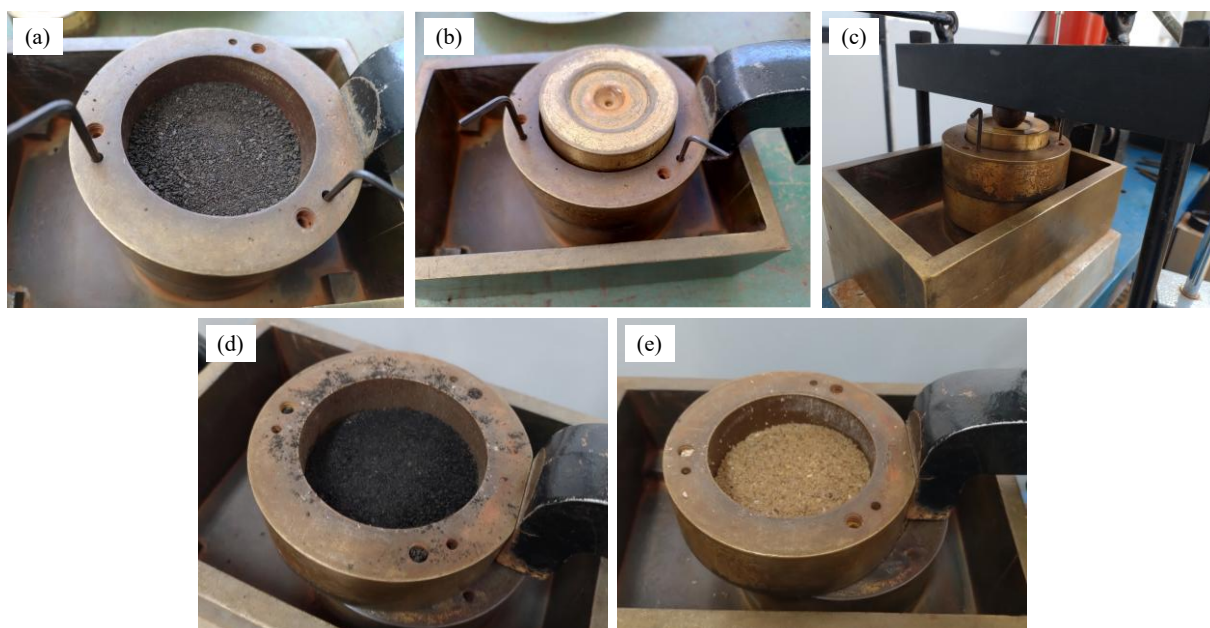


Figura 3.7. Etapas do ensaio de cisalhamento direto: (a) material no anel de cisalhamento, (b) adição do *top cap* para (c) aplicação da tensão normal, (d) areia reciclada de RAP e (e) areia natural após ensaio realizado no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

Os ensaios de compressão triaxial consolidado drenado (CD), saturados por contrapressão, seguindo a norma D7181 (ASTM, 2020), foram realizados para a areia natural e para a areia reciclada de RAP com corpos-de-prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e ensaiados com velocidade constante de 0,2 mm/min e tensões de confinamento de 25 kPa a 200 kPa. Os corpos-de-prova foram compactados a seco por vibração, almejando 95% de compacidade relativa. A Figura 3.8 apresenta a câmara e a prensa triaxial utilizada nos ensaios

e o corpo-de-prova de areia natural durante a montagem, ensaio e pós-ensaio.

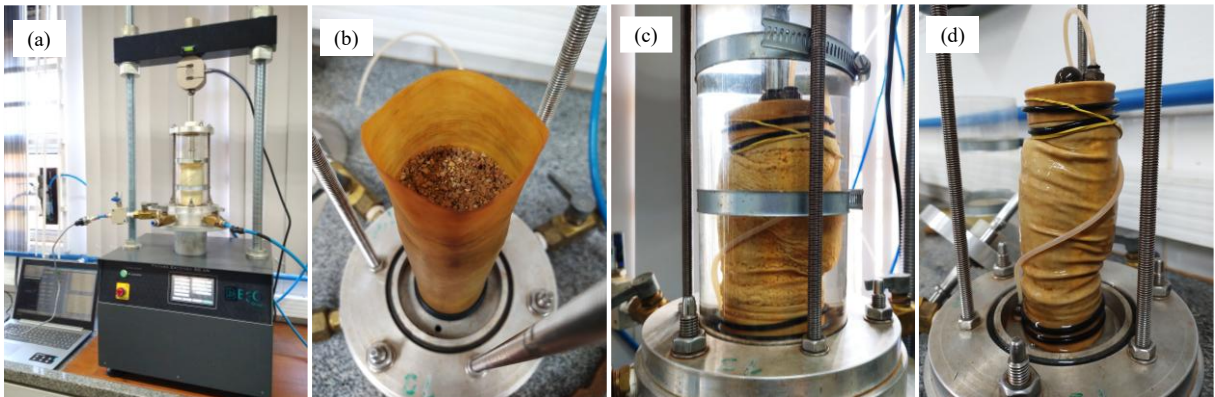


Figura 3.8. Ensaio triaxial: (a) prensa de ensaio, (b) montagem, (c) durante ensaio de areia natural e (d) pós ensaio, realizado no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

Na etapa IV, os corpos-de-prova foram compactados na energia de Proctor Normal, seguindo a norma DNIT 134-ME (2018) utilizando parâmetros ótimos obtidos pelo ensaio de compactação, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com 98% de grau de compactação. O ensaio foi realizado em uma prensa triaxial dinâmica (MS151 – Owntec), com capacidade de 1000 kgf. A Figura 3.9 apresenta o processo de montagem de um corpo-de-prova para ensaio. Tanto o ensaio para obtenção do Módulo de Resiliência quanto o ensaio de Deformação Permanente seguiram o mesmo processo de confecção de corpo-de-prova e montagem do ensaio.



Figura 3.9. Montagem de ensaio cíclico da areia reciclada de RAP e da areia natural no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados conforme a norma do DNIT 134-ME (2018), onde foram aplicados 500 ciclos para os 3 pares de tensões de condicionamento da Tabela 3.1, seguido dos 18 pares de tensões do ensaio, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Sequência de tensões para fase de condicionamento (Adaptado DNIT 134, 2018).

<b>Tensão confinante <math>\sigma_3</math></b>	<b>Tensão desvio <math>\sigma_d</math></b>	<b>Razão de tensões</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b><math>\sigma_1 / \sigma_3</math></b>
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Tabela 3.2. Sequência de tensões para fase de ensaio (Adaptado DNIT 134, 2018).

<b>Tensão confinante <math>\sigma_3</math></b> <b>(MPa)</b>	<b>Tensão desvio <math>\sigma_d</math></b> <b>(MPa)</b>	<b>Razão de tensões</b> <b><math>\sigma_1 / \sigma_3</math></b>
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Os valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência variam de acordo com as tensões desvio aplicadas e tendem a diminuir para maiores tensões. No caso de solos granulares, o módulo de resiliência aumenta com o aumento da tensão de confinamento e há pouca redução com as mudanças da tensão desvio (Bernucci et al., 2006). Assim, o módulo de resiliência possui fatores que interferem em seu valor e por isso é representado na forma de modelos matemáticos. Hicks e Monismith (1971), ao testar materiais granulares compactados, obtiveram o Modelo ( $k-\sigma_3$ ), em que é descrito a relação entre o módulo de resiliência e a tensão confinante, descrito pela Equação 3.1.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad \text{Equação 3.1}$$

em que:  $M_R$  é o módulo de resiliência,  $k_1$  e  $k_2$  constantes de regressão do modelo e  $\sigma_3$  a tensão de confinamento.

No caso de solos coesivos, para representar a variação do módulo de resiliência com a tensão desvio, tem-se o Modelo ( $k$ - $\sigma_d$ ). Para este modelo, Motta et al. (1990) reportaram um bom resultado na previsão do comportamento resiliente de solos pedregulhosos lateríticos. A Equação 3.2 descreve o modelo.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad \text{Equação 3.2}$$

em que:  $M_R$  é o módulo de resiliência,  $k_1$  e  $k_2$  constantes de regressão do modelo e  $\sigma_d$  a tensão desvio.

Já no caso dos solos arenosos, ou granulares, a tensão confinante ou a soma das tensões ( $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ ) principais influencia diretamente no valor do módulo de resiliência, conforme verificado por Bernucci (1995). A Equação 3.3 apresenta o modelo.

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad \text{Equação 3.3}$$

em que:  $M_R$  é o módulo de resiliência,  $k_1$  e  $k_2$  constantes de regressão do modelo e  $\theta$  o primeiro invariante de tensão.

Proposto por Macêdo (1996), o Modelo Composto ( $k$ - $\sigma_d$ - $\sigma_3$ ), em que o módulo de resiliência é obtido em função de todas as tensões aplicadas. Pode ser utilizado para qualquer tipo de solo ou material não tratado quimicamente.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 3.4}$$

em que:  $M_R$  é o módulo de resiliência,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  constantes de regressão do modelo,  $\sigma_3$  a tensão confinante e  $\sigma_d$  a tensão desvio.

Ferreira e Motta (2002) verificaram que este modelo é o mais adequado para o cálculo de módulo de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente utilizados no Brasil. Ademais, este modelo se demonstrou capaz de ter maior precisão no cálculo do módulo de resiliência, quando comparado aos demais modelos de cálculo.

Conforme orienta o DNIT (2020), foram analisados quatro modelos de previsão de módulo de resiliência diferentes, sendo eles o modelo em função da tensão desvio ( $k - \sigma_d$ ), o modelo em função da tensão de confinamento ( $k - \sigma_3$ ), o modelo em função do invariante de tensões ( $k - \theta$ ) e, por fim, o modelo composto ( $k - \sigma_d - \sigma_3$ ).

Para obtenção da deformação permanente do material, foi realizado ensaio conforme a norma DNIT 179 (2018). Este ensaio foi realizado com o objetivo de observar, além do comportamento (em função de deformações plásticas e resilientes) dos materiais sob carregamento cíclicos, ou seja, sua resposta quando submetidos a um ensaio de carga repetida de longa duração. Além disso, o ensaio permite identificar a tendência a estabilização de deformações ou ao acúmulo lento de deformações. Os corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com grau de compactação de 98%, foram submetidos a 300.000 ciclos, com frequência de 5 Hz, sendo 50 ciclos iniciais para garantir total contato entre o pistão e o *top cap*. Nesta etapa inicial, a deformação não é considerada. Foram realizados apenas para os 6 primeiros pares de tensões dados pela norma DNIT 179 (2018), isto porque a areia natural apresentou deformações excessivas no sexto par de tensões, o ensaio foi paralisado e descartado. Os pares de tensões utilizados estão dispostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Pares de tensões utilizados na deformação permanente (Adaptado DNIT 179, 2018).

<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Tensão confinante, <math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b>Tensão desvio, <math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b>Razão de tensões, <math>\sigma_1 / \sigma_3</math></b>
CP 1		0,040	2
CP 2	0,040	0,080	3
CP 3		0,120	4
CP 4		0,080	2
CP 5	0,080	0,160	3
CP 6		0,240	4

A deformação permanente dos materiais está diretamente relacionada ao histórico de tensões, originado devido as cargas repetidas que geram uma deformação total, que pode ser

dividida em duas parcelas: deformação resiliente ou deformação plástica/permanente (Lima, 2016). Com os resultados obtidos, é possível avaliar a adequação com o modelo proposto por Guimarães (2009) e também avaliar a ocorrência do *shakedown*.

### 3.2.3. Propriedades hidráulicas

Na etapa V, o ensaio de permeabilidade a carga constante foi conduzido de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 13292 (ABNT, 2021), aplicando-se tanto à areia reciclada de RAP quanto à areia natural, ambas compactadas com compactidade relativa de 95%. O ensaio consistiu na percolação de água sob diferentes níveis de carga hidráulica, com o registro do tempo, volume escoado e temperatura da água. A partir desses dados, foi possível determinar o coeficiente de permeabilidade em regime saturado ( $k_{sat}$ ) para cada material.

Os parâmetros de retenção de água podem ser obtidos por meio da curva característica de retenção de água no solo, sendo essencial para a caracterização dos materiais em condição não saturada, condição na qual estão com frequência em obras geotécnicas. A curva de retenção permite avaliar o comportamento do material em diferentes níveis de sucção, fornecendo subsídios como a condutividade hidráulica não saturada e a capacidade de retenção de água. No caso de materiais alternativos, como a areia reciclada de RAP, a curva de retenção é uma ferramenta importante para a comparação do desempenho hidráulico em relação a materiais naturais.

Os dados de retenção de água da areia natural e a areia reciclada de RAP foram obtidas por meio de ensaio com o método do funil de Haines, conforme descrito por Cássaro et al. (2008). A amostra de cada material, em contato com uma pedra porosa, foi compactada com compactidade relativa (CR) de 95%, saturada e mantida na mesma altura que uma mangueira flexível preenchida de água, até que se obtenha equilíbrio. Em seguida, a mangueira flexível é abaixada, impondo a sucção, de forma que seu menisco esteja na altura desejada e com o desnível, a amostra entrará em equilíbrio novamente com o nível de água e, assim, deixará de estar saturada. Em equilíbrio, a sucção matricial será igual a sucção total em qualquer ponto da amostra. Assim, para cada variação do nível da mangueira flexível, obteve-se o teor de umidade da amostra. A Figura 3.10 apresenta o equipamento do funil de Haines e o processo de saturação da areia reciclada de RAP e areia natural. Na amostra de areia reciclada de RAP, na Figura 3.10b, nota-se a presença da água superficial em parte dos grãos e parte deles apresenta ar que ainda não foi expulso.

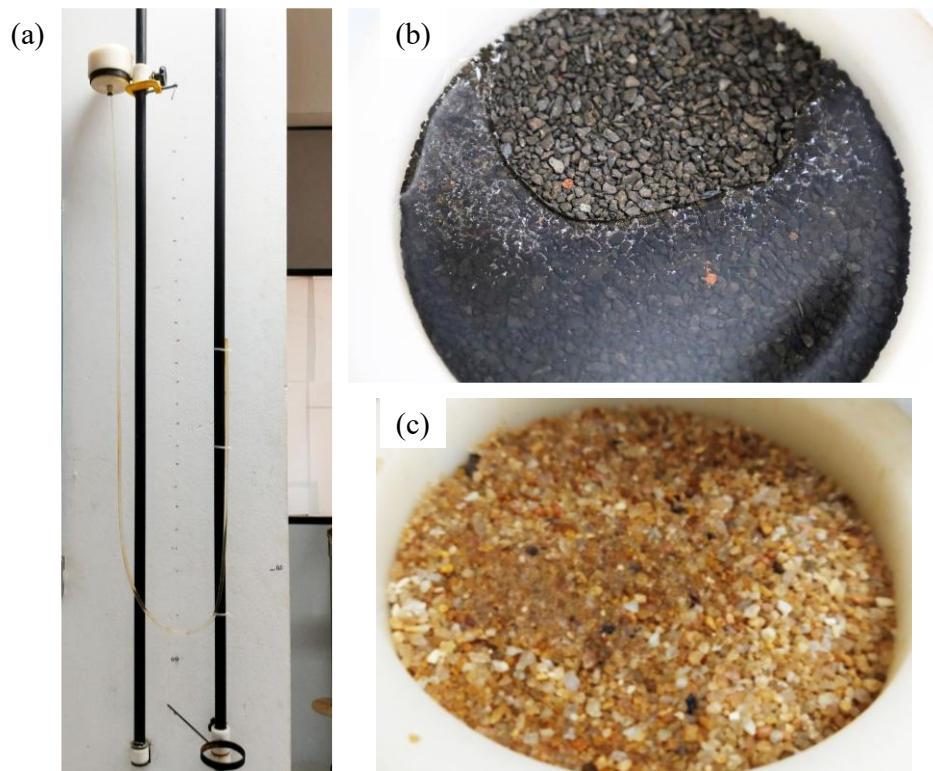


Figura 3.10. Ensaio para obtenção da curva de retenção: (a) funil de Haines, processo de saturação dos materiais: (b) areia reciclada de RAP e (c) areia natural.

Ademais, para a obtenção da curva de retenção, foi utilizado o modelo de Van Genuchten (1980), em que se descreve matematicamente uma relação funcional entre o teor e sucção de água no solo. A equação é descrita como:

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} + \theta_r \quad \text{Equação 3.5}$$

onde  $\theta$  e  $\theta_s$  é a umidade e a umidade de saturação,  $h$  o desnível imposto,  $\theta_r$  a umidade residual e  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros empíricos do modelo.

A partir dos parâmetros obtidos no ensaio de retenção e o coeficiente de condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) do material, utilizando a função de condutividade hidráulica de van Genuchten, apresentada na Equação 3.6, é possível obter a condutividade hidráulica não saturada.

$$k = k_s \left( \theta^{1/2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \theta^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{Equação 3.6}$$

onde

k                      coeficiente de condutividade hidráulica não saturada

$k_s$                     coeficiente de condutividade hidráulica saturada

$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$       umidade volumétrica normalizada

m                      constante obtida pela curva de retenção

Para se identificar a qualidade do lixiviado e seu impacto ao meio ambiente, a concentração de substâncias que se separam/soltam do material durante percolação foram obtidas por meio do ensaio de lixiviação em coluna. O ensaio consistiu em preencher o permeâmetro de carga constante, com areia reciclada de RAP, na condição de 95% de compactação relativa, avaliar a perda de massa por percolação e a qualidade da água percolada. O permeâmetro possui 11,40 cm de diâmetro e altura de 44,0 cm.

A Figura 3.11 apresenta o processo de saturação da areia reciclada de RAP no ensaio de lixiviação. A entrada de água foi pela parte inferior do permeâmetro (de baixo para cima), a fim de que não se perdesse nenhuma massa de material ao percolar a água. Após a saturação, a entrada de água foi colocada no topo do permeâmetro e, na saída de água inferior, foi colocado um funil com papel filtro, para que toda água que saísse do permeâmetro fosse filtrada e assim pudesse ser observado o processo de lixiviação da areia reciclada de RAP pela água.

A permeação foi constante, durante 24 horas por dia, havendo apenas as trocas dos filtros para avaliar a perda de massa. O ensaio durou cerca de 145 dias, até a estabilização das leituras. A perda de massa de RAP durante a percolação foi avaliada a partir da troca de filtros, inicialmente ocorrendo todos os dias e, ao se notar a redução da quantidade de finos no papel filtro, essa troca passou a ocorrer de maneira mais espaçada. Os filtros foram secos em ambiente controlando, evitando utilizar estufa, mesmo que com baixa temperatura.

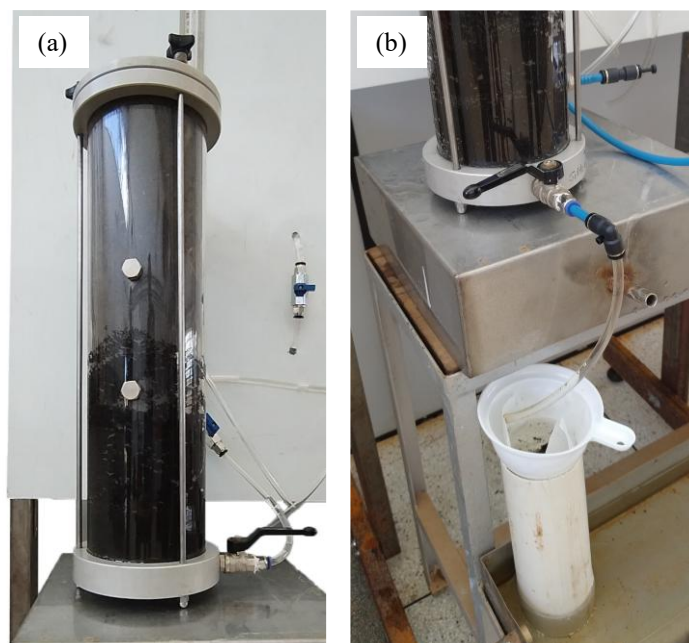


Figura 3.11. Permeâmetro preenchido com areia reciclada de RAP: (a) em processo de saturação, (b) sistema de coleta.

Com relação a qualidade da água que percolou pelo RAP, durante o processo de percolação na areia reciclada de RAP, o líquido lixiviado foi coletado e, no 40º dia de percolação, uma amostra foi levada para análise, no intuito de compreender se houve contaminação com metais pesados e também foi medido o pH da água antes e depois de percolar pelo RAP, com um peagômetro. A amostra do lixiviado coletada avaliada a partir dos métodos da 24ª edição do SMWW (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*) no Laboratório de Saneamento da EESC-USP. O objetivo deste ensaio - neste caso foi utilizado a Espectrometria de Absorção Atômica - é poder avaliar a potabilidade da água percolada a partir de verificação do Valor Máximo Permitido de substâncias inorgânicas presentes na tabela padrão de potabilidade para substâncias químicas que apresentam risco à saúde (Anexo VII, Portaria 2.914 – “Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade”, do Ministério da Saúde) e também da possibilidade de uso deste lixiviado para outros fins, como dessedentação de animais, irrigação ou recreação, com parâmetros limitados pela resolução CONAMA 396, de 2008.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Caracterização física

Os parâmetros granulométricos foram obtidos para o RAP, para a areia reciclada de RAP e para areia, e os resultados são apresentados na Tabela 4.1. A areia e a areia reciclada de RAP apresentaram valores de coeficientes de uniformidade e curvatura próximos, já que possuem a mesma granulometria.

Tabela 4.1. Parâmetros granulométricos do RAP, da areia reciclada de RAP e da areia.

Parâmetro	RAP	Areia reciclada	
		de RAP	Areia
Classificação SUCS	GW	SW	SW
D <sub>10</sub>	0,90	0,18	0,15
D <sub>30</sub>	3,00	0,50	0,42
D <sub>60</sub>	5,50	1,00	0,90
Coefficiente de Uniformidade (C <sub>u</sub> )	6,11	5,56	6,00
Coefficiente de Curvatura (C <sub>c</sub> )	1,82	1,39	1,31
Fração areia fina (%)	2,0	12,0	14,0
Fração areia média (%)	5,0	24,0	26,0
Fração areia grossa (%)	12,0	64,0	60,0
Fração pedregulho fino (%)	40,0	-	-
Fração pedregulho médio (%)	35,0	-	-
Fração pedregulho grosso (%)	6,0	-	-

A análise dos parâmetros granulométricos mostra que o RAP não processado possui uma distribuição mais grossa, com significativa presença de pedregulhos, sendo classificado como GW, enquanto a areia reciclada de RAP e a areia natural são classificadas como SW, com predomínio de partículas na faixa arenosa. Todos os materiais apresentam coeficientes de uniformidade (C<sub>u</sub>) superiores a 5, indicando boa graduação. Os valores de coeficiente de curvatura (C<sub>c</sub>) também estão dentro da faixa considerada ideal (entre 1 e 3), o que sugere curvas bem conformadas. Hubler et al. (2023) analisaram duas amostras de RAP após a remoção, por peneiramento, dos grãos maiores que 12,7 mm. Os valores de coeficiente de uniformidade (C<sub>u</sub>

= 7,00 e 7,50) e de curvatura ( $C_c = 1,40$  e 1,10) dessas amostras foram semelhantes aos encontrados nesta pesquisa para o RAP bruto.

Os valores de índices de vazios máximos e mínimos observados foram diferentes. Os resultados dos ensaios demonstraram valores de índice de vazios máximo de 0,63 para a areia e 0,93 para a areia reciclada de RAP, enquanto os valores de índice de vazios mínimo foram, respectivamente, de 0,43 e 0,67. Isto pode ser explicado pela diferença no formato, textura dos grãos e densidade. A areia reciclada de RAP, por se tratar de um agregado envolto de ligante, apresenta maior textura e irregularidades em sua superfície corroborando para a formação de maiores vazios, o que pode ser notado pela Figura 4.1. Ainda, pode-se notar o menor peso específico dos sólidos da areia reciclada de RAP, o que contribui para a alteração do índice de vazios.

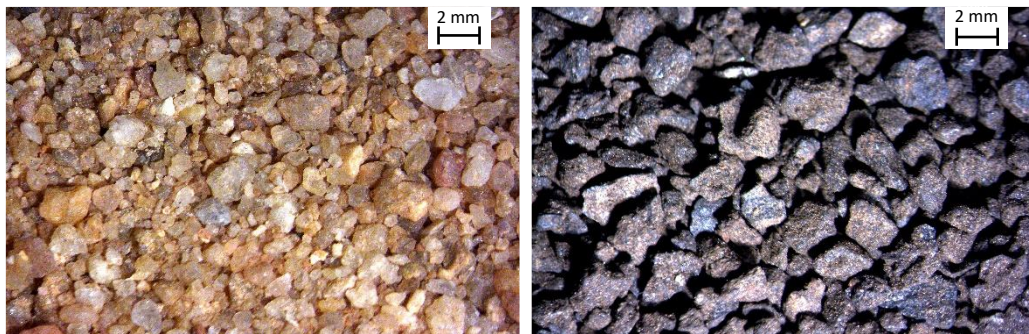


Figura 4.1. Imagens obtidas em lupa óptica: (a) areia natural e (b) areia reciclada de RAP.

Os resultados de massa específica dos sólidos foram de  $2,64 \text{ g/cm}^3$  para a areia natural e  $2,57 \text{ g/cm}^3$  para a areia reciclada de RAP. O valor para a areia reciclada de RAP está dentro do intervalo encontrado na literatura por Hubler et al. (2023) para amostras de RAP, que é de  $2,25$  a  $2,77 \text{ g/cm}^3$ . Este valor é mais baixo quando comparado a agregados típicos, como é o caso da areia ensaiada nesta pesquisa. Esta diferença pode ser justificada pela presença de ligante no entorno do agregado, uma vez que o ligante é mais leve que o agregado. Esta diferença também foi notada por Viyanant (2006), em que ao se comparar o valor da massa específica dos sólidos com outros agregados reciclados, obteve-se um valor menor, onde justifica-se pela presença de betume ao redor do agregado que cria um volume impermeável maior de sólidos. Entretanto, esta diferença, segundo Dager et al. (2023), não tem impacto significativo no uso do RAP em aterros e/ou material de preenchimento.

Sobre os ensaios para determinação do teor de ligante, foram verificados teores de ligante diferentes para o RAP não processado e para a areia reciclada de RAP sendo de 4,99%

e 9,05%, respectivamente. Essa diferença se dá pois, quanto menor os grãos, maior a superfície específica, ou seja, a proporção de ligante comparado a própria massa do grão é maior, que é o caso da areia reciclada de RAP (grãos menores que 2 mm). Ainda se espera que aglomerados de ligante, ao ser submetido a tensões de compactação e/ou tensões possa formar grãos de diâmetros de areia, compondo a estrutura do RAP, evidenciando sua compressibilidade excessiva.

O teor de betume é uma propriedade que difere o RAP dos demais agregados utilizados na engenharia, e este valor pode ser usado para fornecer uma indicação das propriedades da resistência ao cisalhamento sem a necessidade de executar extensivos ensaios de laboratório. Como exemplo, o Dager et al. (2023) sugerem que há uma forte relação linear entre o teor de betume e o ângulo de atrito, onde dados da literatura mostra uma tendência positiva, quanto maior o teor de ligante, maior será o ângulo de atrito (Cosentino et al., 2003; Morro, 2021; Wen et al., 2022 e Gomez, 2003). Esta tendência é causada pelo formato da partícula com o ligante, em que se cria partículas mais angulares. Ademais, Aydilek et al. (2017) notaram que o teor de betume influencia na condutividade hidráulica a partir de um aumento geral em ambos os parâmetros.

Em geral, a caracterização da areia reciclada de RAP demonstrou que, apesar de apresentar distribuição granulométrica semelhante à da areia natural, possui propriedades físicas distintas, como maior índice de vazios e menor massa específica dos sólidos, atribuídas à presença de ligante betuminoso e à forma irregular das partículas. O elevado teor de ligante encontrado na areia reciclada de RAP (9,05%) contribui para essas diferenças e pode influenciar positivamente parâmetros mecânicos, como o ângulo de atrito, conforme indicado na literatura. Esses resultados reforçam a importância de considerar as particularidades do material reciclado para seu uso eficiente e seguro em aplicações geotécnicas.

#### **4.2. Ensaio de compactação**

Com a realização dos ensaios de compactação na energia Proctor normal, realizado sem reuso de material, obteve-se as curvas de compactação da areia reciclada de RAP e da areia, apresentadas na Figura 4.2. Ambos os materiais apresentaram valor de teor ótimo de umidade menores que 10%, sendo 7,80% para a areia e de 5,40% para a areia reciclada de RAP e as curvas são mais “achatadas”, ou seja, apresenta menor variação da densidade com a umidade, sendo um formato esperado para materiais granulares, já que possuem baixa capacidade de

retenção de água por forças capilares.

Devido à presença de betume, a areia reciclada de RAP apresenta um comportamento inicial de hidrorrepelência. A areia apresentou maior valor de massa específica aparente seca máxima ( $1,86 \text{ g/cm}^3$ ), quando comparada à areia reciclada de RAP ( $1,67 \text{ g/cm}^3$ ). Isto porque os valores de índice de vazios mínimos são inversamente proporcionais ao valor da massa específica aparente seca máxima. Neste caso, o índice de vazios mínimo da areia é menor do que o valor para a areia reciclada de RAP. O valor de massa específica aparente seca máxima da areia natural é maior que a observada na areia reciclada de RAP, como esperado, já que sua massa específica dos sólidos também é maior. No entanto, como a areia reciclada de RAP tem menor massa específica dos sólidos, a comparação direta entre os materiais por meio da compactidade relativa pode mascarar diferenças estruturais reais.

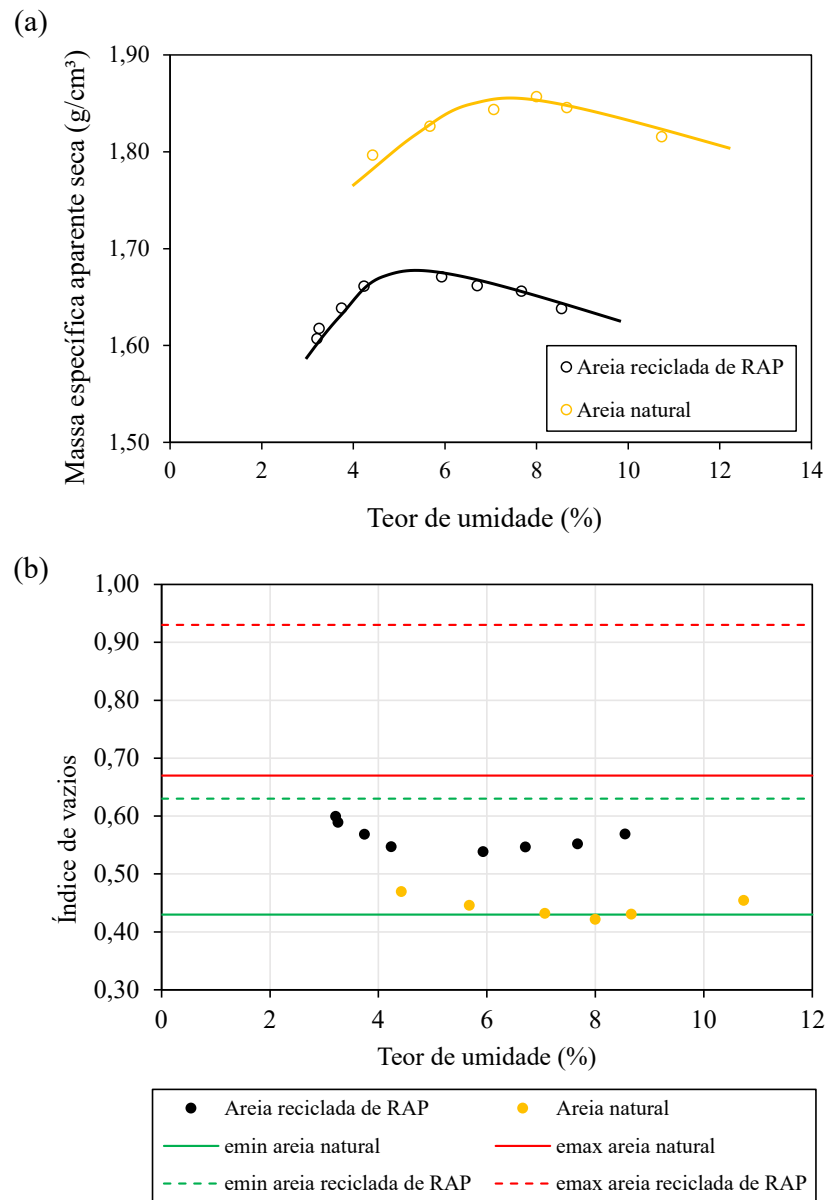


Figura 4.2. Propriedades de compactação da areia reciclada de RAP e da areia natural (a) Curvas de compactação, (b) índice de vazios *versus* teor de umidade.

É importante também salientar que a massa específica dos grãos de areia reciclada de RAP se mostraram inferiores à da areia natural. Embora tenha ocorrido a alteração na massa específica seca máxima, não foi notada nenhuma alteração significativa com relação a umidade ótima da areia reciclada de RAP em relação a areia natural. Os valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade obtidos estão dentro do intervalo reportado na literatura por Soleimanbeigi et al. (2021) para amostras de RAP, sendo de 1,39-1,96 g/cm³ para a massa específica aparente seca máxima e 5,2-8,8% de teor de umidade ótimo. Ressalta-se que estes valores são para RAPs com maiores granulometrias, com intervalo de  $D_{60}$  de 4,5-7,8 mm,

sendo superiores ao  $D_{60}$  da areia reciclada de RAP usada nesta pesquisa.

Ao se avaliar a areia reciclada de RAP após compactação, nota-se que o teor de finos se manteve próximo dos 3%, o que indica que não houve quebra significativa de grãos após a compactação. Rathje et al. (2002) observaram um aumento de apenas 0,6% de teor de finos após a compactação, comparado a materiais agregados grossos comuns usados em aplicações geotécnicas, que tiveram um aumento de 3,6% no teor de finos após a compactação.

### **4.3. Ensaio de compressão edométrica**

O ensaio de compressão edométrica foi realizado para a areia, a areia reciclada de RAP e também para a areia reciclada de RAP sem betume, para se avaliar a interferência do ligante na consolidação do material. A Figura 4.3 apresenta as curvas de índice de vazios em função da tensão normal aplicada.

A areia apresentou menor variação de índice de vazios, com índice de compressão ( $C_c$ ) de 0,06. Em seguida, a areia reciclada de RAP sem betume, com  $C_c$  de 0,14. E por fim, a areia reciclada de RAP com betume com  $C_c$  de 0,21, o que fez com que este material tivesse a maior variação de índice de vazios. Embora a areia reciclada de RAP seja um material granular, ao ser submetida a um aumento de carga, sua variação volumétrica é maior devido à presença do ligante residual. Este é um comportamento comum de solos argilosos moles, solos orgânicos ou solos com alto índice de plasticidade.

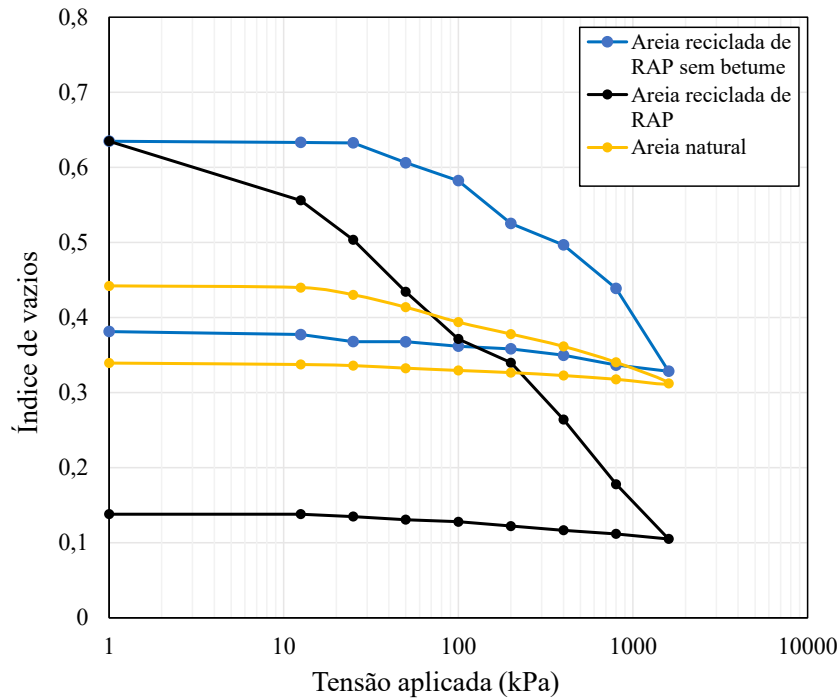


Figura 4.3. Curva de compressão edométrica da areia reciclada de RAP com e sem betume e da areia natural.

Embora os corpos-de-prova tenham sido preparados com compacidade relativa equivalente ( $CR \approx 95\%$ ), é importante destacar que essa grandeza depende diretamente da densidade dos grãos do material. Como a areia reciclada de RAP apresenta densidade de sólidos significativamente menor que a da areia natural, a comparação baseada apenas na compacidade relativa pode não refletir adequadamente o estado real de adensamento estrutural dos materiais.

#### 4.4. Ensaio de cisalhamento direto

Realizados os ensaios de cisalhamento direto, foi possível obter as curvas de tensão cisalhante, em kPa, em função do deslocamento e também a variação volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) pelo deslocamento. A Figura 4.4 apresenta as curvas para a areia reciclada de RAP e para a areia, para os corpos-de-prova com compacidade relativa de 95%. Ao comparar os materiais, nota-se que, para a areia, as curvas apresentaram um pico evidente (Figura 4.4b), comportamento já esperado para uma areia altamente compacta. Isso foi observado para todos os níveis de tensões aplicados no confinamento. A areia reciclada de RAP (Figura 4.4a), no entanto, apresentou curvas do tipo plástico ou fofo, porém com uma tensão cisalhante de pico não muito evidente, demonstrando um comportamento de uma areia pouco compacta. Embora

os materiais apresentem a mesma distribuição granulométrica e terem sido compactados com compactidade relativa de 95%, as diferenças nas curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento podem ser atribuídas à natureza dos materiais, como o fato de que a areia reciclada de RAP possui grãos com características físicas e químicas diferentes da areia natural. A areia reciclada de RAP apresenta partículas com superfícies mais rugosas e formas irregulares, além da presença de ligante asfáltico residual, o que favorece maior intertravamento entre os grãos e contribui para um comportamento mais dúctil, com aumento contínuo ou estabilização da tensão cisalhante mesmo com o avanço do deslocamento. Por outro lado, a areia natural, composta predominantemente por grãos mais arredondados e mineralogicamente inertes, tende a exibir um comportamento pseudo-frágil, com ocorrência de pico de tensão cisalhante seguido de redução da resistência, característica de materiais granulares não coesivos. Adicionalmente, ainda que a compactidade relativa seja equivalente, os índices de vazios absolutos diferem entre os materiais, uma vez que o RAP apresenta densidade de grãos inferior, o que resulta em maiores vazios e, conseqüentemente, maior capacidade de deformação antes da ruptura. Nesse contexto, o índice de vazios inicial absoluto ( $e_0$ ) constitui um parâmetro mais representativo para a comparação entre materiais de naturezas distintas, pois expressa a proporção efetiva de volume de vazios em relação ao volume de sólidos, independentemente da densidade dos grãos. Assim, mesmo que ambos os materiais apresentem a mesma compactidade relativa, a areia reciclada de RAP tende a possuir valores absolutos de  $e_0$  mais elevados, indicando uma estrutura interna mais aberta e, conseqüentemente, maior capacidade de deformação sob carregamento.

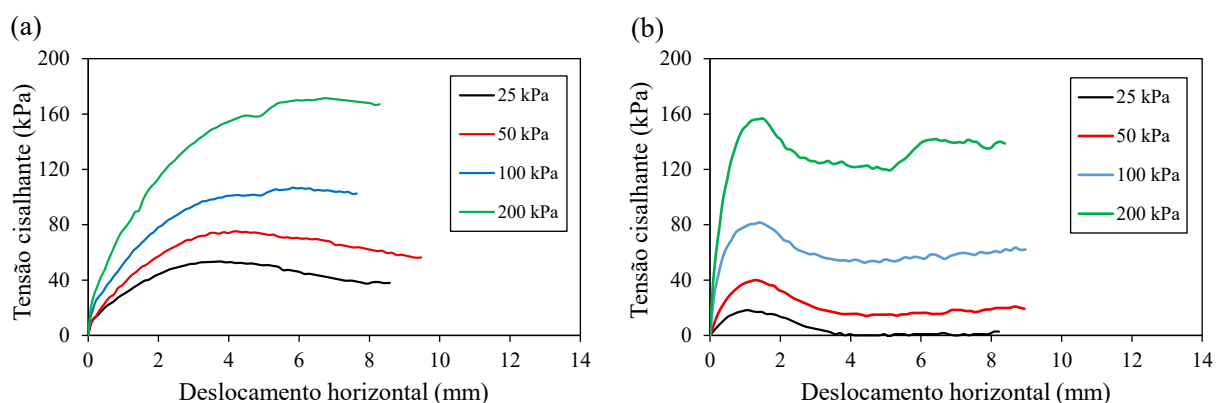


Figura 4.4. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com compactidade relativa de 95% para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural

Já para a variação volumétrica durante o cisalhamento, apresentada na Figura 4.5, nota-se que ambos os materiais apresentam comportamento dilatante para maiores deslocamentos.

No entanto, a areia reciclada de RAP apresenta inicialmente um comportamento compressivo, em baixos deslocamentos, o que pode ser atribuído à dificuldade de rearranjo de suas partículas, devido à presença de ligante residual e à maior rugosidade superficial. Esse comportamento inicial não foi observado para a areia natural, que apresentou dilatação desde o início dos deslocamentos. Além disso, mesmo apresentando um índice de vazios superior ao da areia, os valores máximos de variação volumétrica da areia reciclada de RAP foram significativamente mais elevados. Esse comportamento pode ser explicado pela maior angularidade e irregularidade dos grãos da areia reciclada de RAP, que favorecem o intertravamento mecânico e contribuem para a dilatação volumétrica em estágios mais avançados do cisalhamento. De forma geral, os resultados indicam que, embora ambos os materiais tenham sido compactados com compactação relativa de 95%, a areia reciclada de RAP encontra-se em um estado estrutural mais solto em relação à areia natural, o que se reflete no maior potencial de dilatação. Este fato destaca a influência dos índices de vazios absolutos e as características morfológicas dos grãos na interpretação do comportamento mecânico dos materiais.

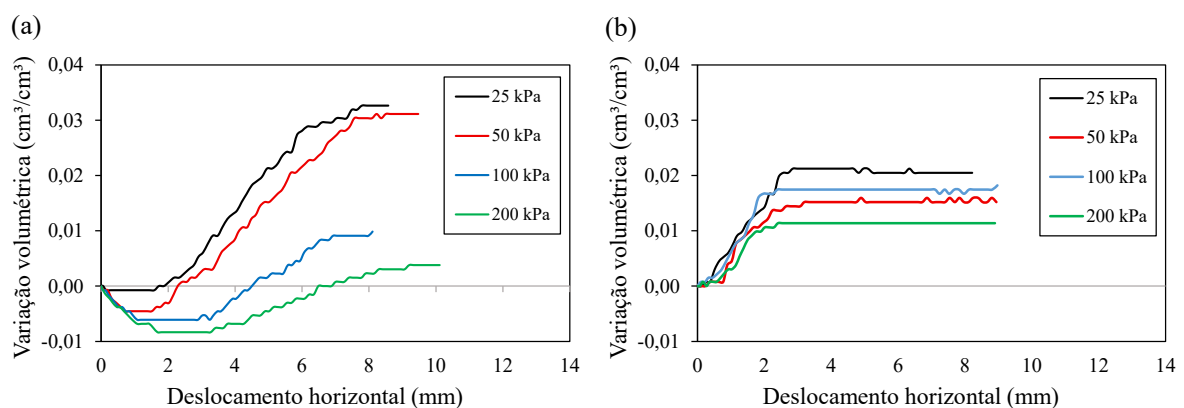


Figura 4.5. Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com compactação relativa de 95% para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural.

Como esperado, com base em resultados da literatura que indicam a presença de coesão no RAP (Arulrajah et al. 2013; Rathje et al. 2002; Rahardjo et al. 2013; Soleimanbeigi et al., 2021) e alguns comportamentos visíveis do material durante os ensaios, a areia reciclada de RAP possui cerca 40,2 kPa de coesão, diferindo da areia que, com mesma granulometria, possui coesão nula. A presença de coesão pode ser explicada pela presença de ligante asfáltico na areia reciclada de RAP, que interage entre as partículas e gerando melhor entrosamento entre si.

O ângulo de atrito para areia reciclada de RAP foi de 33,5° e para a areia de 38,3°, obtidos pela inclinação das retas das envoltórias de resistência, presentes na Figura 4.6 . Nota-

se também que os valores máximos de resistência ao cisalhamento foram maiores para a areia reciclada de RAP.

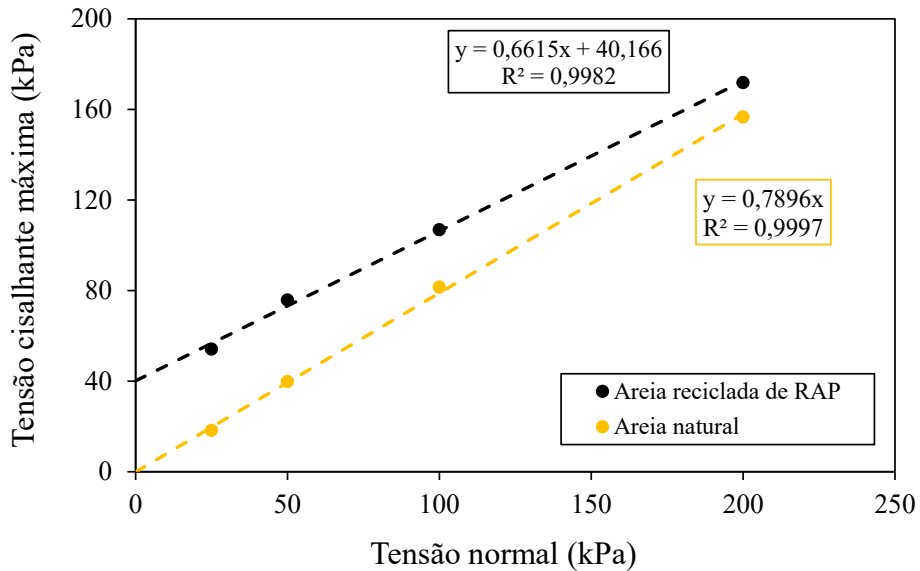


Figura 4.6. Envoltórias de resistência, para corpos-de-prova com compactidade relativa de 95%, para a areia reciclada de RAP e areia natural.

No ensaio de cisalhamento direto realizado com 98% de grau de compactação, observou-se, nas curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento apresentadas na Figura 4.7, que a areia reciclada de RAP exibiu maior curvatura, caracterizada por maiores valores de tensão cisalhante para deslocamentos reduzidos, resultado de um arranjo mais eficiente dos grãos proporcionado pela compactação. No caso da areia natural, o material também apresentou curvas de tensão cisalhante com pico bem definido e comportamento dilatante.

Em relação a variação volumétrica, presente na Figura 4.8, a areia reciclada de RAP apresentou variação volumétrica semelhante ao padrão previamente observado, com comportamento inicialmente compressivo, seguido de dilatância. Para a areia natural, nos deslocamentos iniciais, verifica-se um comportamento análogo ao da areia reciclada de RAP, apresentando um pequeno trecho de compressão, seguido pelo comportamento dilatante em maiores deslocamentos.

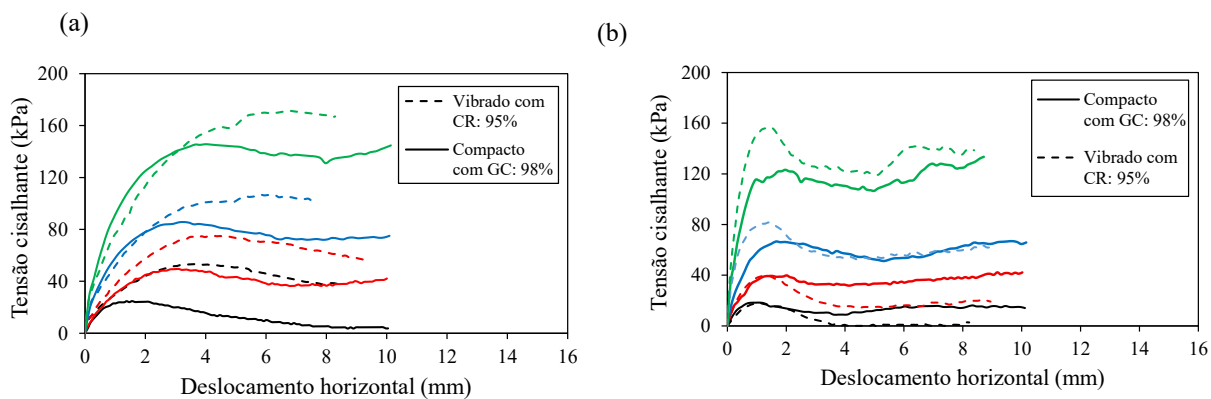


Figura 4.7. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com 98% de grau de compactação e vibrado com 95% de grau de compactação para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural.

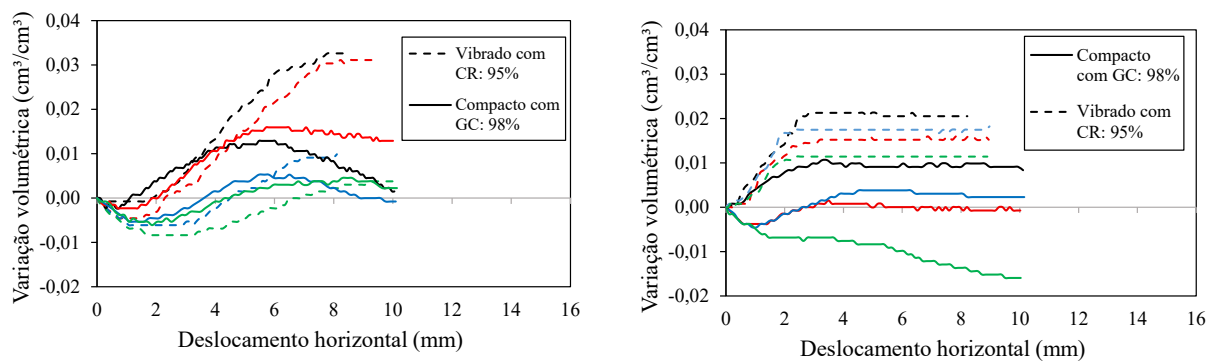


Figura 4.8. Variação volumétrica em função do deslocamento horizontal para corpos-de-prova com 98% e vibrado com 95% de grau de compactação para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia natural.

A partir das tensões cisalhantes máximas e das tensões normais aplicadas, foi possível obter as envoltórias de resistência para a areia reciclada de RAP e para a areia, apresentadas na Figura 4.9, juntamente com as envoltórias para corpos-de-prova com compacidade relativa de 95%. Assim como no caso anterior, a areia reciclada de RAP apresentou maiores valores de resistência; entretanto, o valor de coesão foi inferior, correspondendo a apenas 7,64 kPa. Por outro lado, o ângulo de atrito foi superior, sendo de 38,1°. Para a areia, a coesão permaneceu nula, enquanto o ângulo de atrito foi de 35,5°.

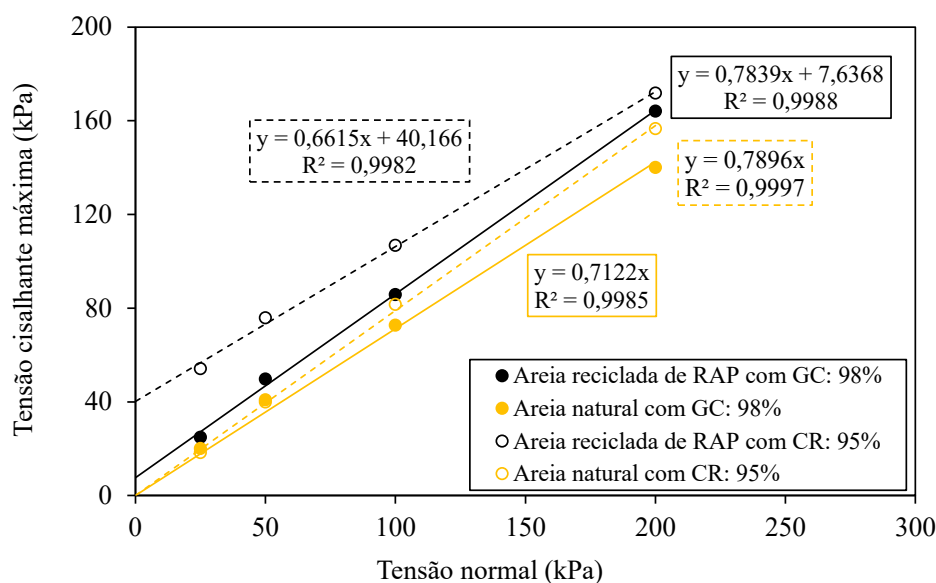


Figura 4.9. Envoltórias de resistência, para corpos-de-prova com 98% de grau de compactação, para a areia reciclada de RAP e areia natural.

Comparando os dois modos de compactação dos corpos-de-prova, é possível observar a influência direta do método utilizado e o teor de umidade no comportamento mecânico dos materiais. A diferença entre os valores obtidos para a areia pode ser atribuída à forma como os grãos interagem durante o processo de compactação. No método a seco por vibração, não há presença de água entre as partículas, o que favorece o contato direto e o intertravamento entre os grãos, promovendo maior resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, ângulos de atrito mais elevados. Por outro lado, a compactação realizada com a incorporação de água nos teores ótimos proporciona uma melhor acomodação das partículas e um aumento da densidade do material, entretanto, a presença de filmes de água ao redor dos grãos atua como agente lubrificante, reduzindo o atrito interno entre as partículas e, por conseguinte, o ângulo de atrito. Este comportamento é coerente com o esperado para solos granulares, nos quais a resistência ao cisalhamento é predominantemente controlada pelo atrito entre os grãos e pela forma como estes se rearranjam durante a compactação, sendo o teor de umidade um fator determinante nesse processo.

Em contrapartida, a areia reciclada de RAP apresentou resultados diferentes do esperado, como foi o caso da areia, em que o ângulo de atrito obtido para a areia reciclada de RAP compactada nos teores ótimos de umidade foi superior ao valor verificado na compactação a seco por vibração. Tal fenômeno pode ser atribuído ao rearranjo mais eficiente das partículas promovido pela presença controlada de água, que favoreceu o intertravamento entre os grãos e otimizou os pontos de contato, resultando em ângulo de atrito elevado. Já na compactação a

seco, embora tradicionalmente associada a maiores ângulos de atrito, não proporcionou um arranjo tão eficiente das partículas, o que explica a resistência inferior obtida nesta condição. Ademais, observou-se a redução dos valores de coesão nos corpos-de-prova compactados com umidade ótima, o que pode ser explicado pela possível mobilização e dispersão do ligante residual ou das partículas finas presentes no material, as quais, em condição seca, contribuíram para uma coesão aparente que não se manteve na presença de água. Esses resultados demonstram o efeito combinado da umidade e da estrutura interna do material no comportamento mecânico.

#### **4.5. Ensaio de compressão triaxial**

A partir dos ensaios de compressão triaxial consolidado-drenado (CD), foram obtidas as curvas de tensão desvio, em kPa, em função da deformação vertical específica para o RAP e para a areia. Na Figura 4.10, observa-se a diferença no formato das curvas. As curvas referentes ao RAP (Figura 4.10a) não apresentaram um pico de resistência bem definido, ao contrário do que se verificou para a areia (Figura 4.10b), cujas tensões máximas foram atingidas com deformações específicas inferiores, em comparação ao RAP. Este comportamento do RAP também foi notado nos ensaios de cisalhamento direto e também na literatura (Rathje et al., 2006; Soleimanbeigi e Edil, 2015; Soleimanbeigi et al., 2021), em que os valores máximos foram atingidos em deformações axiais relativamente elevadas (maiores que 5%), sendo típico para materiais soltos ou compressíveis sob carga triaxial drenada. A deformabilidade do ligante asfáltico na superfície dos grãos de RAP faz com que haja maior deformação axial na ruptura, aumentando a deformação por cisalhamento sob uma tensão cisalhante aplicada (Rathje et al., 2006; Vyanant et al., 2007; Soleimanbeigi et al., 2021; Yin et al., 2018). É possível observar que há uma tendência do residual igual para os dois materiais, diferente do que foi obtido nos ensaios de cisalhamento direto. Isso indica que as mudanças de comportamento ocorrem apenas para as deformações iniciais dos materiais e, com maiores deslocamentos, tendem a ter comportamentos semelhantes.

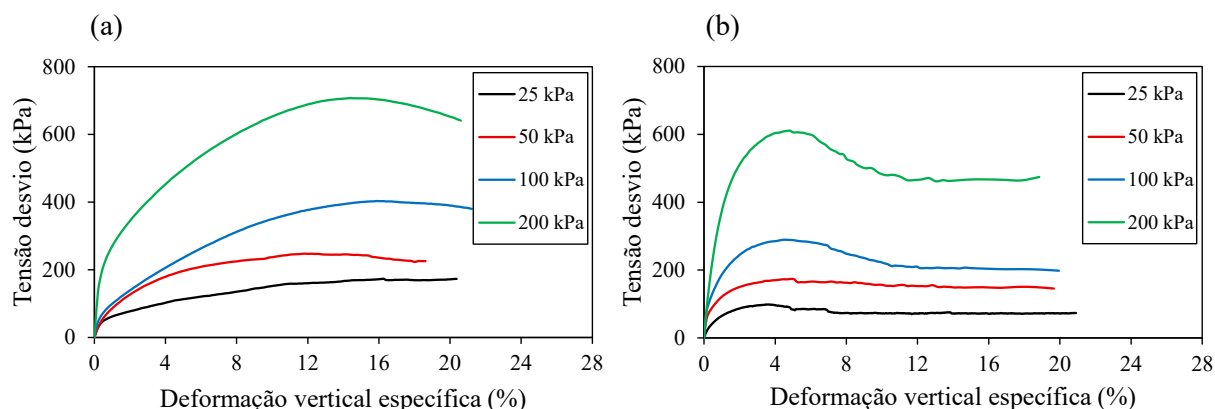


Figura 4.10. Curvas de tensão desvio em função da deformação específica para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia.

Também foi possível notar diferenças na variação volumétrica, em  $\text{mm}^3/\text{mm}^3$ , apresentadas na Figura 4.11. Para a areia reciclada de RAP, houve um comportamento compressivo, seguido de um comportamento dilatante. Para uma menor tensão confinante, como por exemplo de 25 kPa, o comportamento dilatante se inicia com menor deformação específica. Já para uma confinante de 200 kPa, nota-se que a dilatância se inicia com uma maior deformação. Ao avaliar o formato das curvas de tensão desvio versus deslocamento e também a variação volumétrica dos materiais, nota-se que a areia reciclada do RAP apresenta um comportamento típico de material fofo. Já para a areia natural, o formato das curvas indica um material medianamente compacto.

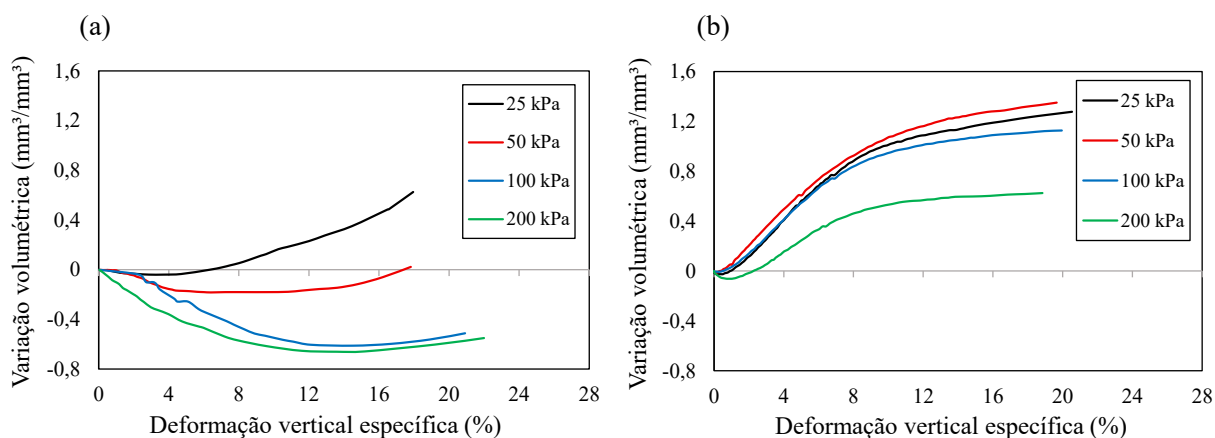


Figura 4.11. Curvas de variação volumétrica em função da deformação específica para (a) areia reciclada de RAP e (b) areia.

Os valores de ângulo de atrito e coesão para a areia reciclada de RAP e para areia foram obtidos a partir das envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb apresentadas na Figura 4.12, sendo  $37,2^\circ$  de ângulo de atrito para a areia reciclada de RAP e  $33,2^\circ$  para a areia. Já a coesão

foi nula para a areia e de 19 kPa para o RAP. Os parâmetros obtidos estão dentro da faixa relatada para o RAP na literatura, sendo de 37° à 44° para o ângulo de atrito e 17,2 kPa à 55,2 kPa para coesão (Cosentino et al., 2003; Bennert e Maher, 2005; Shedivy et al., 2012; Arulrajah, et al., 2013).

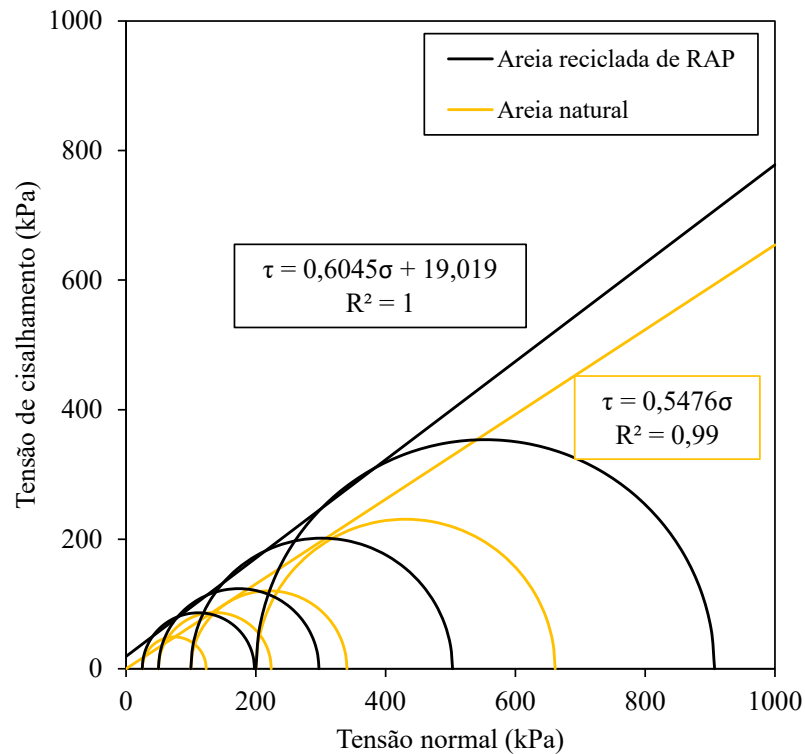


Figura 4.12. Envoltórias de resistência para a areia reciclada de RAP e areia natural.

Durante os ensaios triaxiais foi possível observar que a areia reciclada de RAP não apresentou um plano de ruptura nítido, apenas um abaulamento do corpo-de-prova típico de material em condição fofa. A Figura 4.13 apresenta os corpos-de-prova ao final do ensaio. Nota-se que, para a areia (Figura 4.13a), é visível o plano de ruptura por cisalhamento, o que não ocorre para o RAP (Figura 4.13b) corroborando a conclusão de que esse material se apresentava em estado compacto. Este comportamento também foi reportado na literatura por Rathje et al. (2006) e Soleimanbeigi et al. (2021).

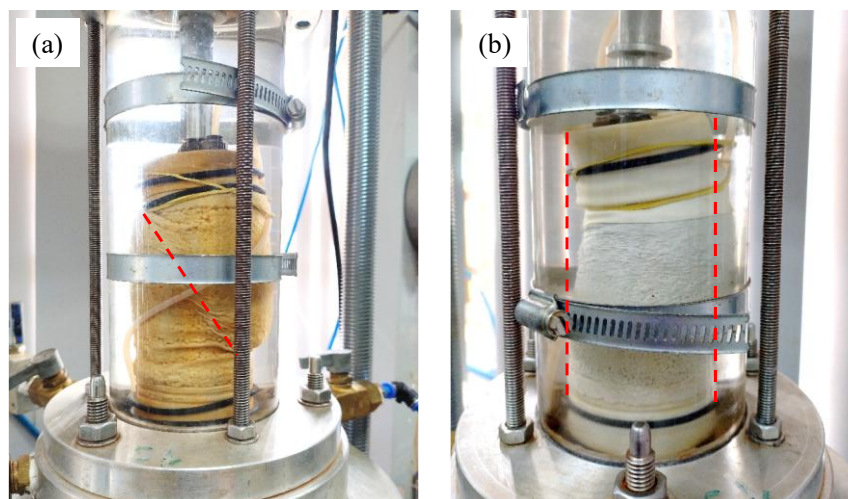


Figura 4.13. Corpos-de-prova ao final do ensaio triaxial: (a) areia natural e (b) areia reciclada de RAP.

#### 4.6. Ensaio de módulo de resiliência

Os valores de módulo de resiliência obtidos nos ensaios laboratoriais da areia reciclada de RAP variaram entre 170 MPa e 325 MPa, com média aproximada de 235 MPa. Para solos granulares, observa-se que o módulo de resiliência tende a aumentar com o incremento da tensão de confinamento, apresentando pouca sensibilidade à variação da tensão desvio (Bernucci et al., 2006). Dessa forma, por depender de múltiplos fatores, o módulo de resiliência é comumente representado por modelos matemáticos, como o modelo potencial em função da tensão desvio, aplicado a solos coesivos, e o modelo potencial em função do primeiro invariante de tensão, aplicado a solos granulares. A sensibilidade do módulo de resiliência da areia reciclada de RAP a esses fatores pode ser analisada por meio de gráficos relacionando os valores de módulo de resiliência às variáveis tensão desvio, tensão de confinamento e invariante de tensões. Conforme ilustrado na Figura 4.14, os resultados apresentam melhor correlação com a tensão de confinamento, comportamento característico de materiais granulares.

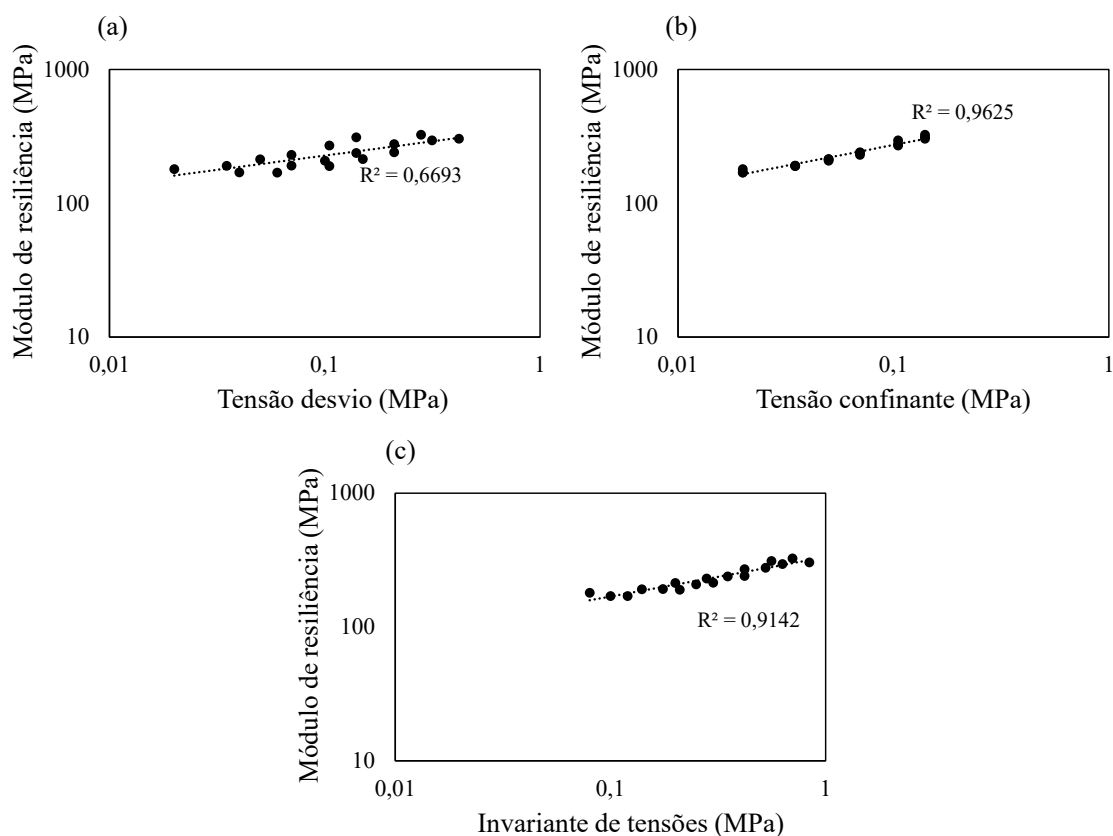


Figura 4.14. Módulo de resiliência da areia reciclada de RAP em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante e do (c) invariante de tensões.

Conforme orienta o DNIT (2020), foram analisados quatro modelos de previsão de módulo de resiliência diferentes. Os coeficientes de regressão para 4 modelos diferentes para obtenção do Módulo de Resiliência da areia reciclada de RAP estão dispostos na Tabela 4.2. Nota-se que o modelo em função da tensão desvio aplicada ( $k-\sigma_d$ ) não é adequado para a areia reciclada de RAP, uma vez que materiais granulares são mais sensíveis à tensão de confinamento. Isto é verificado para o caso do modelo em função da tensão confinante ( $k-\sigma_3$ ) e do modelo em função do invariante de tensões ( $k-\theta$ ). O modelo composto apresentou o melhor desempenho na representação do comportamento da areia reciclada de RAP em relação ao módulo de resiliência.

Tabela 4.2. Modelos e parâmetros de regressão de módulo de resiliência para a areia reciclada de RAP.

Modelo	Equação	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
$k-\sigma_d$	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	381,59	0,2221	-	0,6698
$k-\sigma_3$	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	588,81	0,3303	-	0,9640
$k-\theta$	$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	339,26	0,3097	-	0,9153
Composto	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	583,49	0,3148	0,0155	0,9652

A partir do modelo composto, é possível obter a superfície que correlaciona a tensão confinante, a tensão desvio aplicada e o módulo de resiliência. A Figura 4.15 apresenta o módulo de resiliência em função das tensões, juntamente com os pontos obtidos para a areia reciclada de RAP.

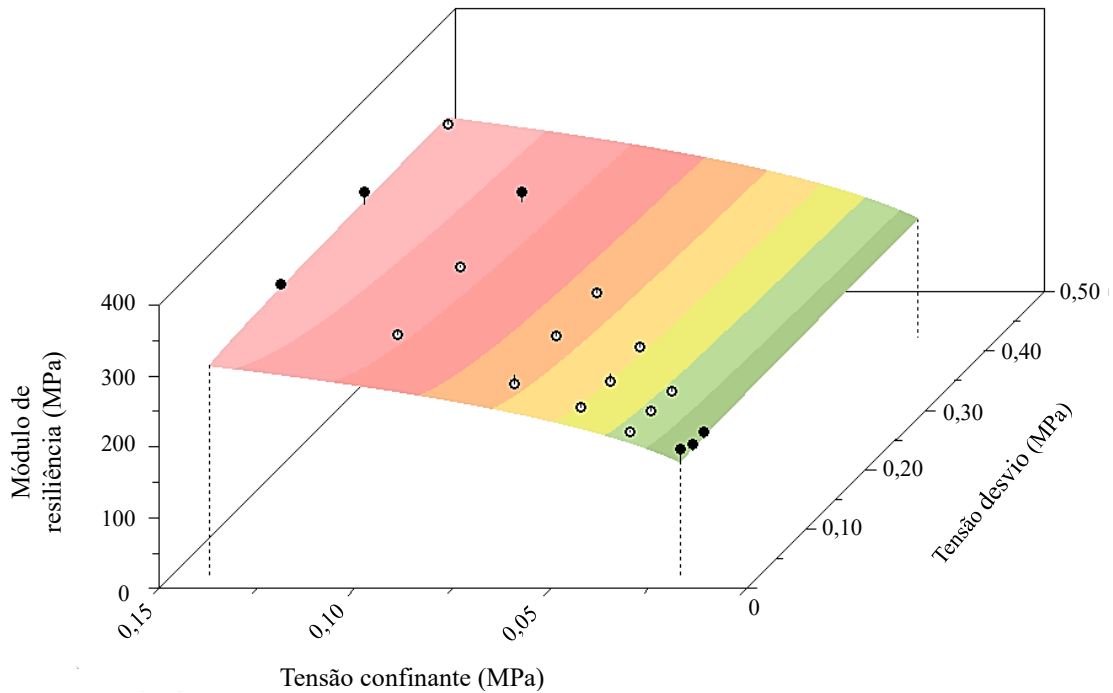


Figura 4.15. Superfície do modelo composto para a areia reciclada de RAP.

Para a areia natural, os valores de módulo de resiliência variam de 84 MPa a 247 MPa, com valor médio de 156 MPa. De maneira similar a areia reciclada de RAP, a areia apresentou maior sensibilidade a tensão confinante, conforme verificado pela Figura 4.16. Ademais, o modelo que mais se adequou foi o modelo composto, conforme apresenta a Tabela 4.3, com  $R^2$  de 0,9861.

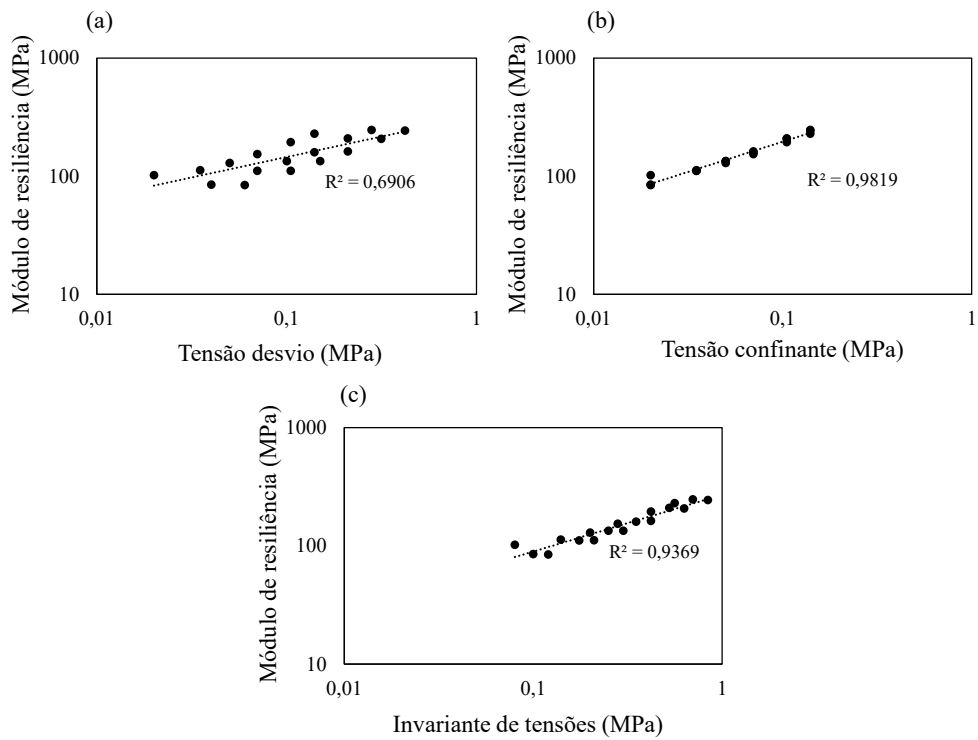


Figura 4.16. Módulo de resiliência da areia natural em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante e do (c) invariante de tensões.

Tabela 4.3. Modelos e parâmetros de regressão de módulo de resiliência para a areia natural.

Modelo	Equação	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
k- $\sigma_d$	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	338,12	0,3594	-	0,6910
k- $\sigma_3$	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	684,07	0,5381	-	0,9831
k- $\theta$	$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	278,52	0,5031	-	0,9377
Composto	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	669,60	0,5005	0,0383	0,9861

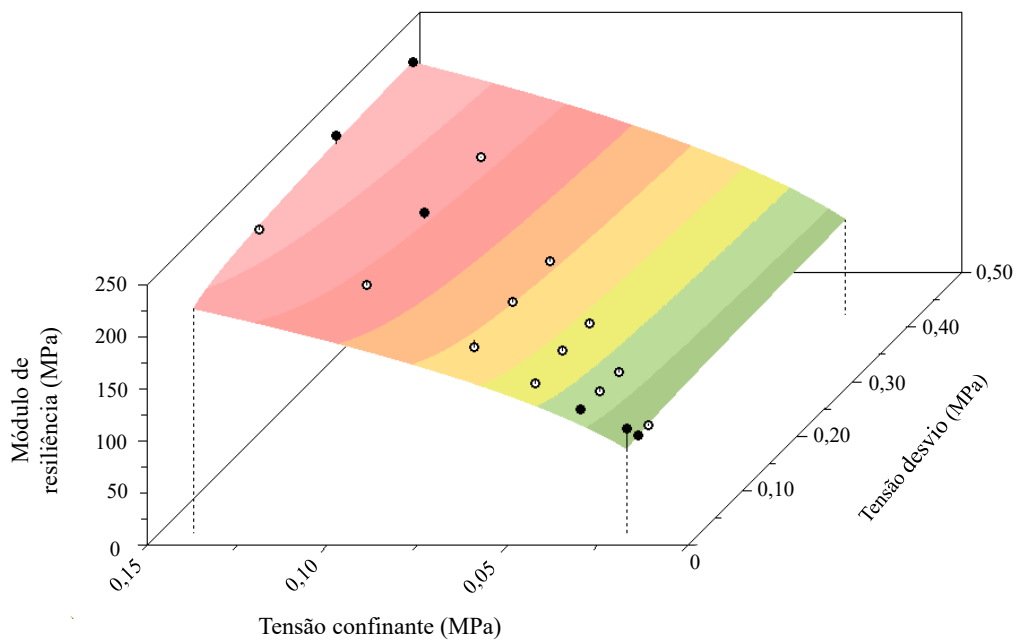


Figura 4.17. Superfície do modelo composto para a areia natural.

Comparando-se os dois materiais, o módulo de resiliência da areia reciclada de RAP aumentou ao longo dos ciclos, o que revela processo de compactação interna e ganho de rigidez progressivo, típico de materiais coesivos com ligação interpartículas. Já a areia natural apresentou valores absolutos menores de módulo de resiliência e menor crescimento com os ciclos, o que reforça sua resposta puramente elástica, porém sem ganho significativo de rigidez estrutural com o tempo.

A comparação entre os valores de módulo de resiliência obtidos para a areia reciclada de RAP e a areia natural evidencia diferenças fundamentais de comportamento mecânico associadas à estrutura interna e à natureza das partículas. Embora ambos os materiais apresentem comportamento típico de materiais granulares, com forte dependência da tensão confinante e boa correlação com o modelo composto, o RAP reciclado manifesta características adicionais que o aproximam de um material granular coesivo, devido à presença de ligantes betuminosos residuais.

A maior média de módulo de resiliência obtida para a areia reciclada de RAP ( $\approx 235$  MPa) em relação à areia natural ( $\approx 156$  MPa) pode ser atribuída à rugosidade superficial elevada, à presença de microfilmes betuminosos e à maior distribuição angular das partículas, fatores que aumentam o atrito intergranular e a resistência ao deslizamento. Além disso, a heterogeneidade granulométrica e o preenchimento parcial dos vazios por finos e ligante contribuem para um contato mais estável entre partículas, o que se reflete em um módulo de

resiliência mais elevado.

Por fim, ressalta-se que o desempenho resiliente da areia reciclada de RAP depende fortemente de sua história de processamento e teor residual de ligante, sendo recomendável que futuros estudos explorem a influência desses fatores, bem como o efeito da temperatura e do envelhecimento sobre a resposta resiliente do material.

#### 4.7. Ensaio de deformação permanente e avaliação de *shakedown*

Para a deformação permanente, a Figura 4.18 apresenta os resultados da evolução da deformação permanente da areia reciclada de RAP em função do número de ciclos. Os ensaios apresentaram maiores deformações permanentes (acomodação inicial) e, após isso, uma tendência de acomodação. Este comportamento também foi observado por Carvalho e Motta (2021), sendo um comportamento de caráter granular. O corpo-de-prova 3 apresentou maior deformação quando comparado ao corpo-de-prova 4. Isso se dá por conta da razão de tensão, uma vez que o corpo-de-prova 3 ( $\sigma_3$  de 0,04 MPa e  $\sigma_d$  0,12 MPa) tem razão duas vezes maior que o corpo-de-prova 4 ( $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  de 0,08 MPa). Segundo Delongui et al. (2018), por se tratar de um material granular, a deformação permanente será maior quanto menor for sua tensão confinante e maior sua tensão desvio, isto é, a tensão de confinamento restringe as deformações permanentes e o acréscimo de tensão desvio tende a aumentar seu aparecimento.

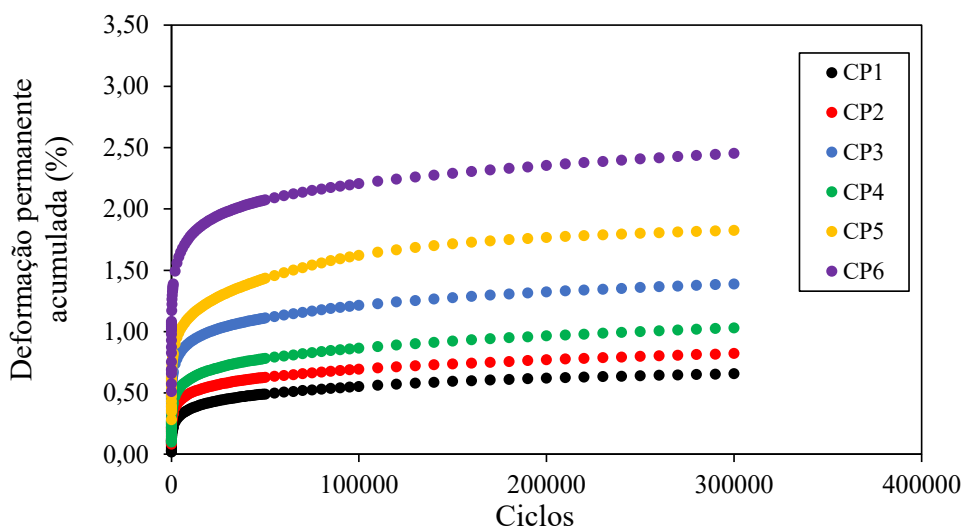


Figura 4.18. Deformação permanente acumulada em função do número de ciclos para a areia reciclada de RAP.

A partir dos resultados obtidos, foi possível obter os parâmetros de regressão a partir do

modelo de Guimarães (2009) e estão dispostos na Tabela 4.4. O valor  $R^2$  foi de 0,9831, o que sugere boa adequação do modelo, sendo similar ao valor encontrado por Santos et al. (2024), de 0,983, para uma mistura contendo 100% de RAP. Ressalta-se que neste caso, a amostra de RAP utilizada por Santos et al. (2024) contém grãos maiores, sendo o máximo de 19 mm. No presente estudo, nota-se que o parâmetro  $\Psi_2$  é o menor valor obtido e indica que a tensão de confinamento exerce uma influência negativa na resistência à deformação permanente. Já o maior valor obtido de parâmetro é para  $\Psi_3$ , ou seja, este valor indica que a tensão desvio é mais influente no comportamento plástico do RAP. Os valores são condizentes com a hipótese anterior.

Tabela 4.4. Parâmetros de regressão do modelo de deformação permanente para a areia reciclada de RAP.

Modelo de Guimarães (2009)	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	$R^2$
$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$	0,2426	0,0696	0,8973	0,1252	0,9831

É possível avaliar a deformação permanente pela teoria do *Shakedown*. Segundo Werkmeister et al. (2001), a teoria pode ser avaliada pelas curvas da taxa de deformação permanente vertical por ciclo em função da deformação permanente vertical. Os formatos das curvas podem ser definidos como nível A, B, C ou AB (Figura 2.15). A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos para a areia reciclada de RAP.

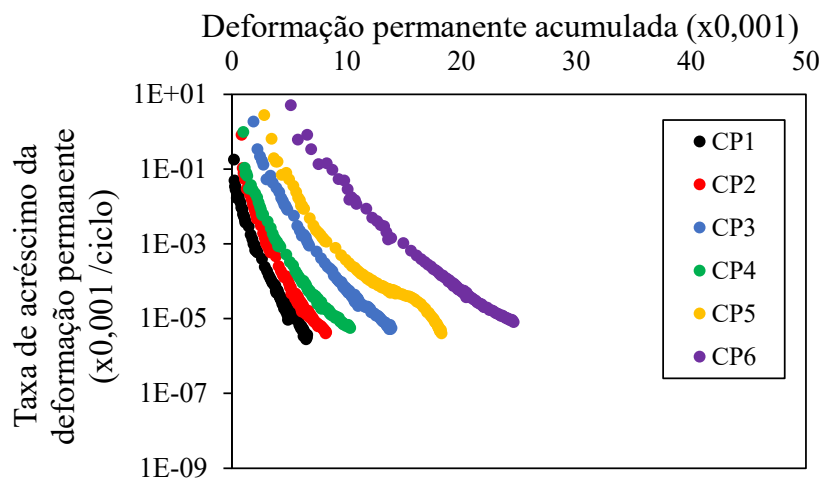


Figura 4.19. Avaliação do *shakedown* para a areia reciclada de RAP.

A partir das análises realizadas, dos valores das taxas finais obtidas e da deformação

permanente acumulada ao término do ensaio, apresentados na Figura 4.19, verifica-se que as curvas não atingiram taxas inferiores a  $10^{-7} \times 0,001/\text{ciclo}$ , condição que caracterizaria a entrada do material em regime de *shakedown*. Isso pode ter ocorrido porque o número de ciclos aplicados – neste caso, 300.000 – possivelmente não foi suficiente para atingir o patamar de *shakedown*, conforme também observado por Santos et al. (2024). Ao analisar as curvas, observa-se que elas apresentam formato do tipo B (*plastic shakedown* ou *plastic creep*), caracterizado por uma elevada taxa de acréscimo da deformação permanente no início do ensaio, seguida por uma redução gradual e tendência à estabilização. Não é possível afirmar se a areia reciclada de RAP entrará em colapso ou se já atingiu o regime de *shakedown*. Tal comportamento pode ser atribuído à presença do ligante asfáltico no RAP, o qual retarda o processo de estabilização do material.

Utilizando as inequações propostas por Werkmeister (2003), todos os seis corpos-de-prova foram classificados como tipo C (*incremental collapse*). Entretanto, as curvas obtidas graficamente não apresentam o formato característico desse tipo de comportamento. Lima (2020) também identificou divergências na classificação, as quais podem estar associadas às maiores deformações observadas nos ciclos iniciais, possivelmente relacionadas à acomodação do material. Por outro lado, ao se adotar o método proposto por Lima (2020), os corpos de prova podem ser classificados como tipo B (*plastic creep*), uma vez que não atendem aos critérios visuais e numéricos estabelecidos para os tipos A, C ou AB.

Durante o ensaio de deformação permanente, foi possível também avaliar a variação do módulo de resiliência ao longo dos ciclos. Esta variação é apresentada na Figura 4.20. Observa-se que o módulo de resiliência aumentou progressivamente ao longo do ensaio, sendo mais elevado nos corpos-de-prova submetidos a maiores razões de tensão. A areia reciclada de RAP avaliada demonstrou bom desempenho resiliente com o aumento do número de ciclos, indicando consolidação progressiva do corpo-de-prova ao longo do ensaio.

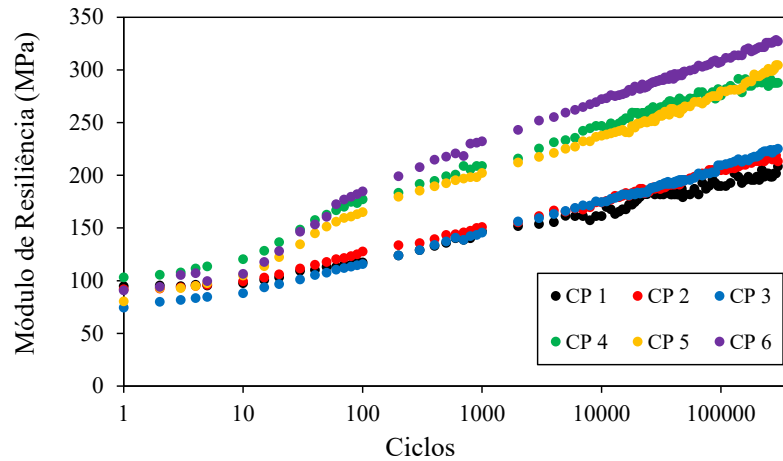


Figura 4.20. Variação do módulo de resiliência em função do número de ciclos para a areia reciclada de RAP.

A evolução da deformação permanente em função do número de ciclos para areia natural também foi obtida, com exceção do CP6 ( $\sigma_3 = 0,08$  MPa e  $\sigma_d = 0,24$  MPa), em que a deformação permanente excedeu 10%. Dessa forma, os demais pares de tensão ensaiados são apresentados na Figura 4.21. Assim como observado para a areia reciclada de RAP, a areia natural também apresentou maiores deformações nos ciclos iniciais, que pode ser associada ao processo de acomodação do material e as deformações máximas foram maiores para maiores relações de tensões.

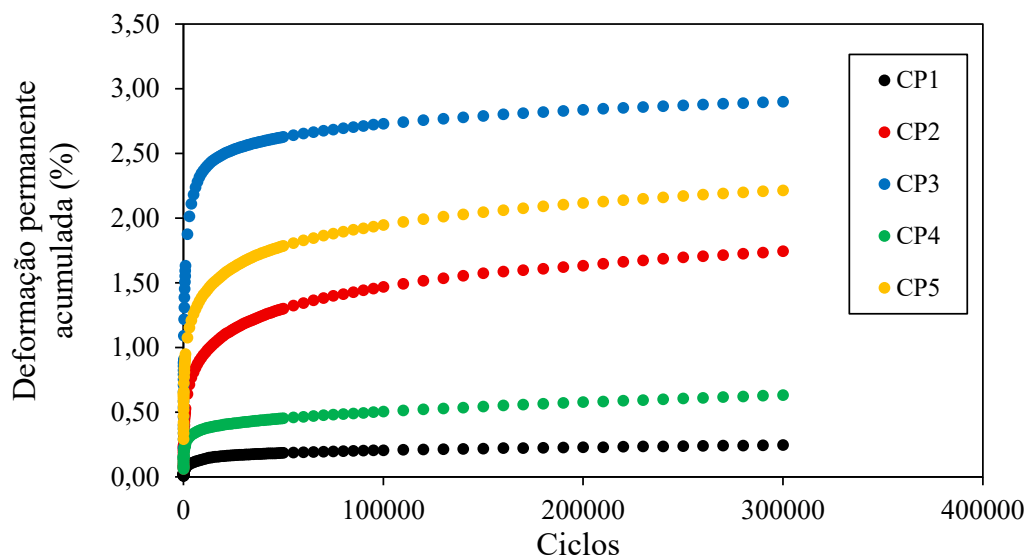


Figura 4.21. Variação da deformação permanente em função do número de ciclos para a areia natural.

Com base nos resultados obtidos para a areia natural, foram determinados os parâmetros de regressão do modelo proposto por Guimarães (2009), apresentados na Tabela 4.5. O valor

de  $R^2$  foi de 0,9783, indicando uma boa aderência do material ao modelo.

Tabela 4.5. Parâmetros de regressão do modelo de deformação permanente para a areia natural.

Modelo de Guimarães (2009)	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	$R^2$
$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$	0,1098	-1,3670	1,9434	0,1426	0,9783

A teoria de *shakedown* foi avaliada para a areia natural, com curvas apresentadas na Figura 4.22. Os resultados foram distintos daqueles obtidos para a areia reciclada de RAP. Todas as curvas apresentaram formato do tipo A (*elastic shakedown*), ou seja, baixos valores de deformação permanente e baixas taxas de incremento dessa deformação. Com base no método proposto por Werkmeister (2003), os cinco corpos de prova foram classificados como tipo C (*incremental collapse*). Entretanto, essa classificação diverge do comportamento observado nas curvas obtidas. Neste caso, optou-se pela aplicação do método de Lima (2020), com a padronização do eixo de deformação permanente fixado em um valor máximo de 5, visando melhor visualização dos resultados. Todas as curvas apresentaram-se paralelas ao eixo das ordenadas e atingiram a taxa de acréscimo de  $10^{-6}$  x0,001/ciclo, sendo, portanto, classificadas como tipo A. Adicionalmente, as curvas atingiram uma taxa de acréscimo inferior a  $10^{-7}$  x0,001/ciclo, indicando que o material atingiu o regime de *shakedown*, caracterizado pela estabilização e pela ausência de aumento progressivo da deformação permanente.

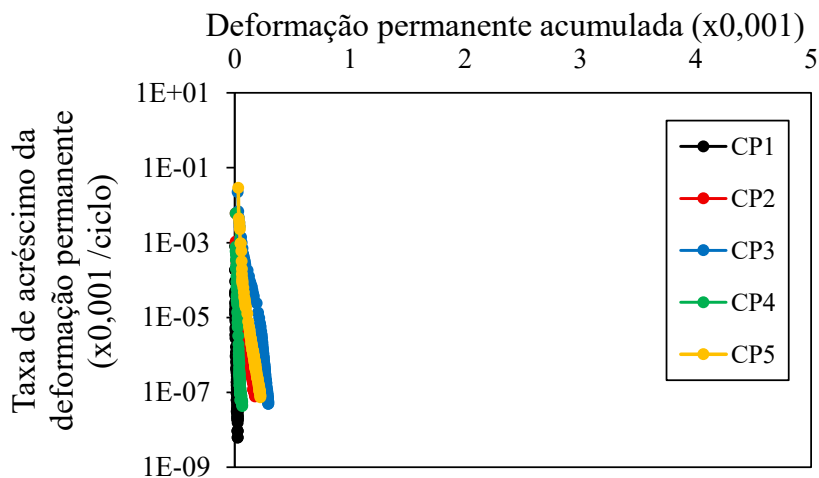


Figura 4.22. Avaliação do *shakedown* para a areia natural.

Com base no ensaio de deformação permanente, também foi possível determinar, para

a areia natural, a variação do módulo de resiliência ao longo dos 300.000 ciclos, apresentada na Figura 4.23. Os valores obtidos foram inferiores quando comparados aos da areia reciclada de RAP e também apresentaram uma menor taxa de crescimento com o aumento do número de ciclos. Embora os materiais possuam granulometria semelhante, a presença do ligante asfáltico proporciona à areia reciclada de RAP desempenho elástico superior.

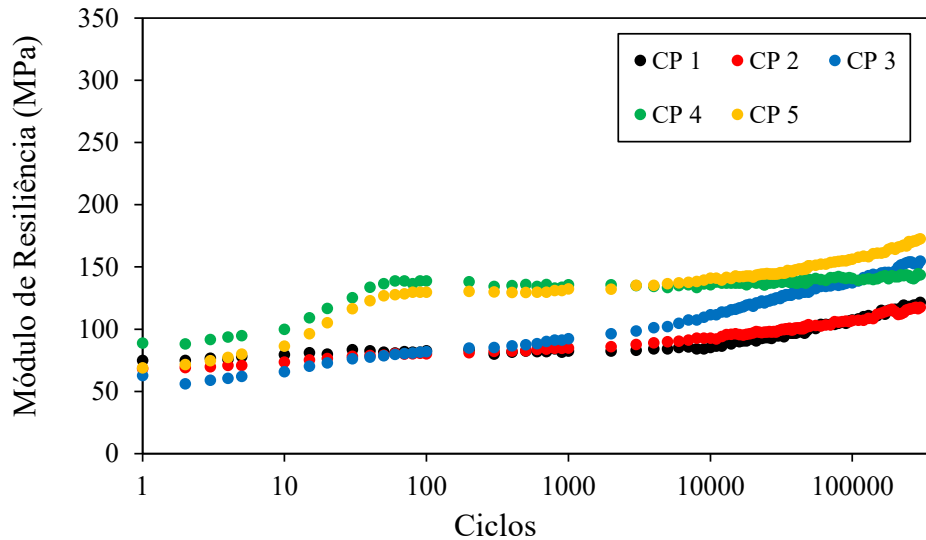


Figura 4.23. Variação do módulo de resiliência em função do número de ciclos para a areia natural.

Por fim, a partir dos valores de deformação permanente final e taxa de acréscimo de deformação permanente apresentados na Tabela 4.6, observa-se que os corpos-de-prova de areia reciclada de RAP apresentaram, de modo geral, valores superiores de deformação permanente acumulada final e de taxa final de acréscimo da deformação permanente, quando comparados aos de areia natural. Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, à presença do ligante asfáltico residual presente na areia reciclada de RAP. O ligante asfáltico atua como um agente aglutinante entre as partículas, conferindo coesão ao material e influenciando significativamente seu comportamento mecânico. No caso da areia reciclada de RAP, essa coesão adicional tende a reduzir a rigidez inicial do material, o que resulta em uma resposta mais deformável sob carregamento cíclico, como evidenciado pelas maiores deformações permanentes observadas nos ciclos iniciais. No entanto, esse mesmo ligante pode proporcionar uma resposta elástica mais favorável ao longo dos ciclos, como observado na variação do módulo de resiliência ao longo dos ensaios.

Tabela 4.6. Valores finais e taxa de acréscimo de deformação permanente para a areia reciclada de RAP e areia natural.

Corpo-de-prova	Deformação permanente acumulada final (%)		Taxa final de acréscimo da deformação permanente (x0,001/ciclo)	
	Areia reciclada de RAP	Areia natural	Areia reciclada de RAP	Areia natural
CP1	0,66	0,25	3,75E-06	2,19E-08
CP2	0,82	1,74	4,37E-06	1,00E-07
CP3	1,39	2,90	5,63E-06	5,00E-08
CP4	1,03	0,63	5,63E-06	4,37E-08
CP5	1,83	2,21	4,06E-06	7,50E-08
CP6	2,45	-	8,13E-06	-

Por outro lado, a areia natural apresenta um comportamento mecanicamente mais estável sob carregamentos cíclicos, com menores valores de deformação permanente acumulada e menores taxas de acréscimo dessas deformações. Essa estabilidade pode ser atribuída à ausência de um ligante, o que favorece a reorganização das partículas e permite que o material atinja mais rapidamente o regime de acomodação (*shakedown*). O corpo-de-prova 3 foi o único em que a areia natural apresentou deformação superior à da areia reciclada de RAP, comportamento que pode ser atribuído à maior razão de tensão aplicada, a qual resultou em melhor desempenho da areia reciclada de RAP frente às deformações. Situação semelhante foi observada no último par de tensões aplicado, em que a areia natural apresentou deformações excessivas, inviabilizando a continuidade do ensaio, enquanto a areia reciclada de RAP suportou os 300.000 ciclos.

Comparando-se os dois materiais avaliados neste estudo, o ligante asfáltico atuou como agente coesivo e dissipador de energia, modificando a interação interpartículas e contribuindo para o retardo da estabilização inicial quanto a melhoria do desempenho resiliente ao longo dos ciclos. Apesar de apresentar maiores deformações permanentes iniciais, a areia reciclada de RAP manteve desempenho estável até o final dos 300.000 ciclos, o que indica resistência à ruptura progressiva mesmo sob carregamento cíclico elevado, especialmente nas condições de maior razão de tensão. Já a areia natural apresentou valores menores de deformação permanente acumulada e baixas taxas de acréscimo, o que é indicativo de comportamento mais elástico e estável sob carregamento cíclico. A ausência de ligante na areia natural facilitou a reorganização interna das partículas, permitindo acomodação mais eficiente.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente

evidenciam que a areia reciclada de RAP apresenta comportamento mecânico diferenciado em relação à areia natural, resultado direto da presença do ligante asfáltico residual e da menor densidade de grãos do material. Apesar de apresentar maiores deformações iniciais sob carregamento cíclico, a areia reciclada de RAP demonstrou capacidade de acomodação e ganho progressivo de rigidez ao longo dos ciclos, atingindo desempenho resiliente superior e comportamento estável após elevado número de repetições.

#### 4.8. Lixiviação e análise química

Durante este estudo, foi possível notar o comportamento da areia reciclada de RAP com a água. Diferentemente da areia natural, ao entrar em contato com a água, ela não é absorvida de imediato. Cria-se bolhas e a água tem certa dificuldade para se adentrar nos poros do material, sem que haja algum esforço externo, para que quebre esta tensão superficial. Este comportamento é apresentado na Figura 4.24. Este comportamento influencia diretamente nas características hidráulicas e mecânicas do material o que permite que a água flua com maior facilidade entre os vazios (Viyanant, 2006).



Figura 4.24. Comportamento de repelência de água da areia reciclada de RAP com a água.

Para avaliar a perda de finos e qualidade da água percolada pela areia reciclada de RAP, foi realizado o ensaio de lixiviação, onde os finos que se perderam da massa total de RAP foram coletados utilizando filtros. A Figura 4.25 apresenta um dos filtros coletados neste processo.

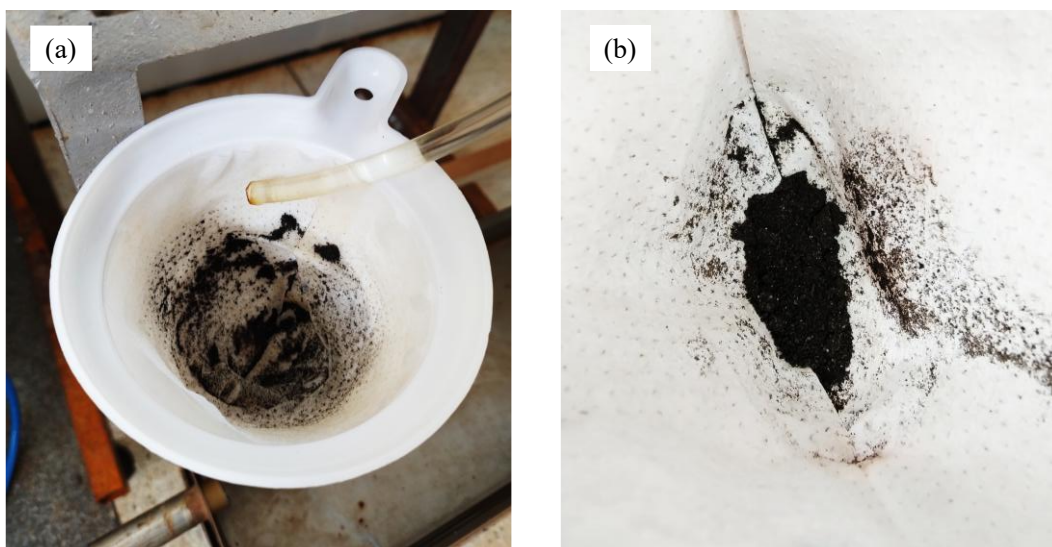


Figura 4.25. Coleta dos finos perdidos na lixiviação da areia reciclada de RAP: (a) filtro no instante da coleta, (b) filtro após a secagem.

Após o processo de coleta e pesagem dos filtros durante 5.000 horas, foi possível obter a curva da perda de massa do material ao longo do tempo, apresentada na Figura 4.26. Importante notar que a perda de massa não chegou a 0,1% do total, sendo um valor insignificante, e também se estabilizou com o tempo, o que confere a areia reciclada de RAP um ótimo comportamento hidráulico.

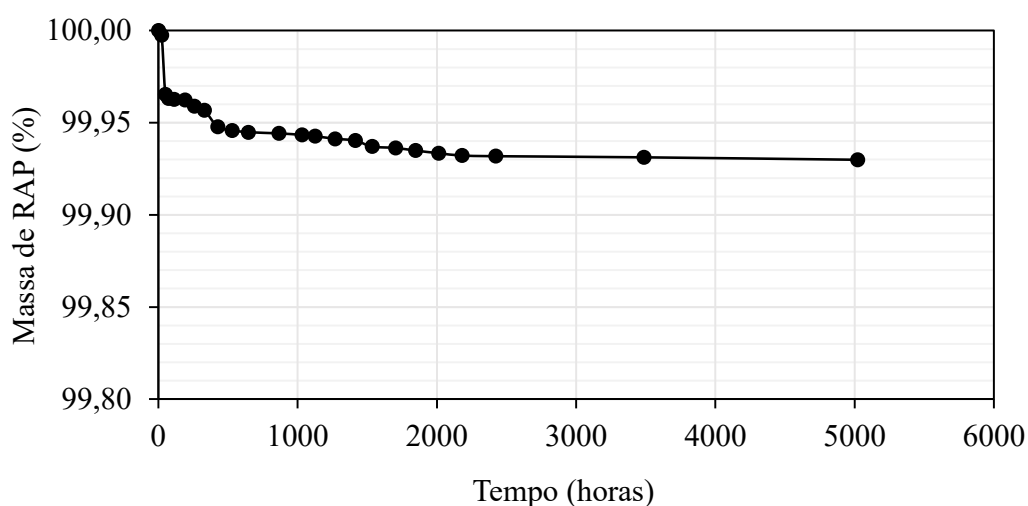


Figura 4.26. Perda de massa com a lixiviação.

O pH da água antes da percolação foi de 8,10 a uma temperatura de 17,2°C e o lixiviado com pH de 8,11 a uma temperatura de 16,7°C. O resultado está próximo ao encontrado por Mijic et al. (2020) de um pH médio de 7,96 e intervalo de 6,69 a 8,50 no lixiviado oriundo do

ensaio de lixiviação em coluna. Após 40 dias de lixiviação, o efluente foi coletado para análise e o resultado da concentração de metais é apresentado na Tabela 4.7. Foram analisados 9 elementos químicos em que 7 deles têm concentração muito baixa, ficando abaixo do limite de detecção do ensaio. O único elemento acima do limite de qualidade da água para o consumo humano e recreação, segundo limites máximos atribuídos pelo Ministério da Saúde e CONAMA, é o cádmio (Cd). Entretanto, ainda está abaixo do permitido quando se trata dos limites para dessedentação de animais e irrigação. Segundo Mijic et al. (2020), pode ocorrer a diminuição da concentração de metais da água percolada pelo RAP ao percorrer trechos horizontais de percolação, com a atenuação que o solo exerce, antes mesmo de entrar em contato com águas superficiais.

Tabela 4.7. Concentração de metais no lixiviado da areia reciclada de RAP e valores máximos permitidos.

Elementos	Lixiviado	Quantidades (mg/L)			
		Consumo humano <sup>a</sup>	Dessedentação de animais <sup>b</sup>	Irrigação <sup>b</sup>	Recreação <sup>b</sup>
Antimônio	< 0,005 <sup>c</sup>	0,005	-	-	-
Cádmio	<b>0,009</b>	0,005	0,05	0,01	0,005
Chumbo	< 0,01 <sup>c</sup>	0,01	0,1	5	0,01
Cianeto	< 0,001 <sup>c</sup>	0,07	-	-	0,1
Cobre total	< 0,003 <sup>c</sup>	2	0,5	0,2	1
Cromo total	< 0,005 <sup>c</sup>	0,05	1	0,1	0,05
Fluoreto	0,10	1,5	2	1	-
Níquel	< 0,008 <sup>c</sup>	0,07	1	0,2	0,1
Urânio	< 0,002 <sup>c</sup>	0,03	0,2	0,01	-

<sup>a</sup> Anexo VII, Portaria 2.914, Ministério da Saúde.

<sup>b</sup> CONAMA 396, 2008.

<sup>c</sup> Valores abaixo do limite de detecção.

Assim, a areia reciclada de RAP pode ser considerada ambientalmente estável e segura para reaplicações em obras geotécnicas e rodoviárias, desde que respeitados os critérios de manejo e confinamento adequados ao tipo de projeto e à legislação ambiental vigente.

#### 4.9. Ensaios hidráulicos

Para a areia reciclada de RAP e para a areia natural foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica a carga constante. Os valores de condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) para a areia reciclada de RAP foi de  $2,84 \times 10^{-3}$  m/s e para areia natural foi de  $8,76 \times 10^{-4}$  m/s. Na literatura o intervalo encontrado para o RAP foi de  $2,00 \times 10^{-6}$  a  $4,58 \times 10^{-3}$  m/s (Bennert and Maher, 2005; Cosentino et al. 2003; Hubler et al. 2023; Mijic et al, 2020; Mousa et al. 2021; Shedivy et al. 2012; Soleimanbeigi et al. 2021). Segundo Hubler et al. (2023) este intervalo amplo encontrada nos valores de  $k_{sat}$  pode ser devido as diferenças nos métodos de ensaio de laboratório e também a variabilidade na granulometria do RAP. Ademais, todos os valores encontrados na literatura são classificados como de livre drenagem segundo Casagrande e Fadum (1940).

No ensaio de condutividade hidráulica da areia reciclada do RAP, foram coletadas medidas para diferentes intervalos de tempo de percolação. A apresenta a variação de  $k_{sat}$  em relação ao tempo. Isso pode ser justificado pela presença de betume e sua atividade superficial, apresentando comportamento de hidrorrepelência e a água percola livremente nos vazios (Mijic et al., 2020; Shedivy et al. 2012; Viyanant, 2006). Observa-se também que o valor de  $k_{sat}$  tende a se estabilizar ao decorrer do tempo, resultando no valor de  $8,15 \times 10^{-4}$  m/s. Este comportamento não ocorreu para a areia natural, que não apresentou variações nos coeficientes medidos, sendo de  $8,84 \times 10^{-4}$  m/s. Embora o betume faça com que o processo de saturação da areia reciclada de RAP seja mais lento, os valores obtidos de coeficiente de permeabilidade são muito próximos, devido ambos materiais possuírem a mesma granulometria.

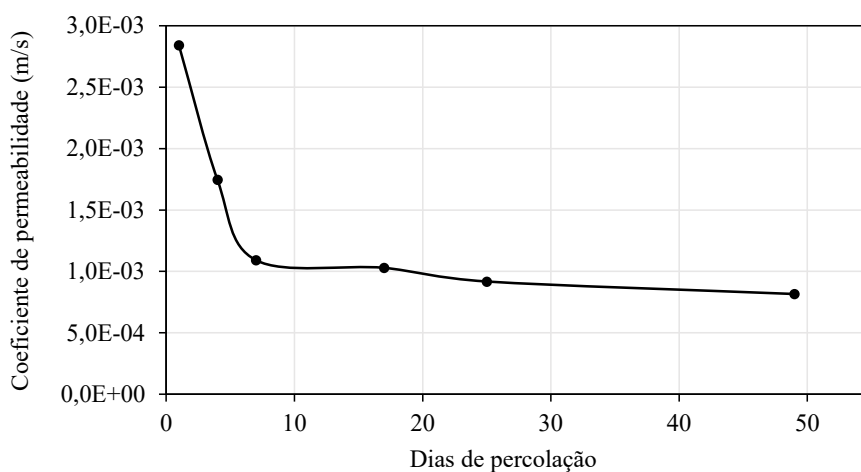


Figura 4.27. Variação do coeficiente de permeabilidade saturado da areia reciclada de RAP com o tempo.

A partir dos ensaios de retenção de água, pode-se obter os parâmetros da curva de retenção de água no solo, que representa a relação de teor de umidade no material em função da sucção. Para a areia reciclada de RAP e para a areia natural foi possível obter os parâmetros do modelo de Van Genuchten, que são apresentados na Tabela 4.8. O valor de  $R^2$  obtido para a areia reciclada de RAP é de 0,98 e para a areia natural de 0,99, o que demonstra boa adequação dos materiais ao modelo. As curvas são apresentadas na Figura 4.28.

Tabela 4.8. Parâmetros curva de retenção da areia reciclada de RAP e da areia natural.

Parâmetro	Areia reciclada de	
	RAP	Areia natural
Umidade volumétrica saturada ( $\theta_s$ )	33,62	13,78
Umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ )	4,21	0
Parâmetros do modelo	$\alpha$	1,64
	m	3,21
	n	0,69

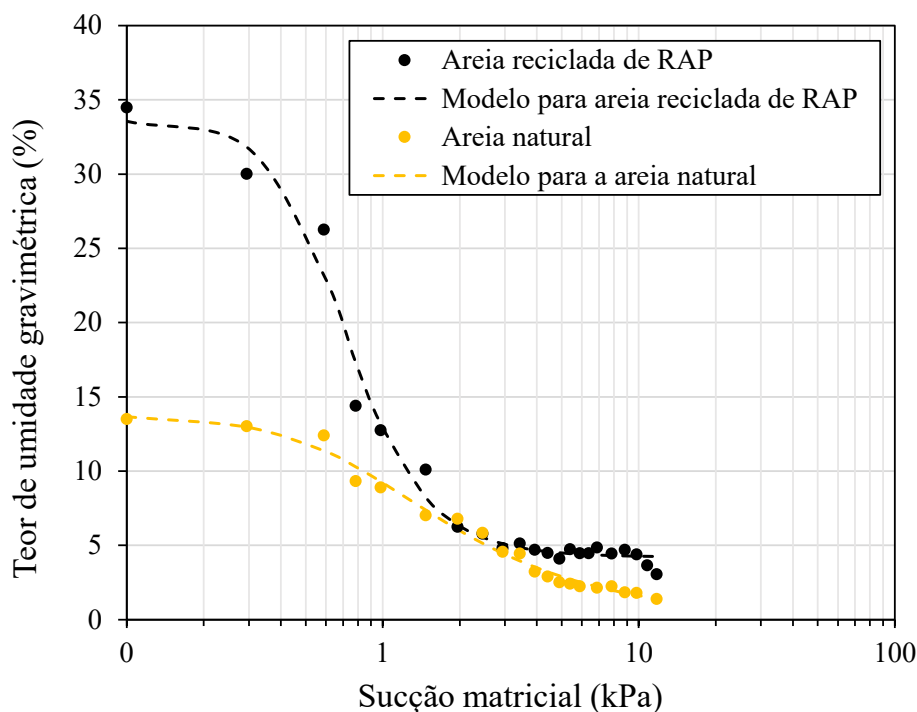


Figura 4.28. Curvas de retenção da areia natural e areia reciclada de RAP.

A presença do ligante asfáltico e as características estruturais da areia reciclada de RAP influenciam diretamente seu comportamento hidráulico. Apesar de ambos os materiais

apresentarem a mesma compactidade relativa, a areia reciclada de RAP possui maior valor de índice de vazios mínimo, o que indica um estado mais fofo do que a areia natural. Como consequência, a areia reciclada de RAP apresenta maior capacidade de retenção de água, refletida em valores mais elevados de sucção matricial para o mesmo teor de umidade. Isso se explica pelo fato da areia reciclada de RAP ser um material mais poroso e à presença de microporos formados entre as partículas recobertas por ligante, que dificultam o escoamento da água e reduzem a condutividade hidráulica não saturada do material.

A partir dos parâmetros obtidos pela curva de saturação e a condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ), obteve-se para ambos os materiais, a função de condutividade hidráulica de Van Genuchten, apresentada na Figura 4.29.

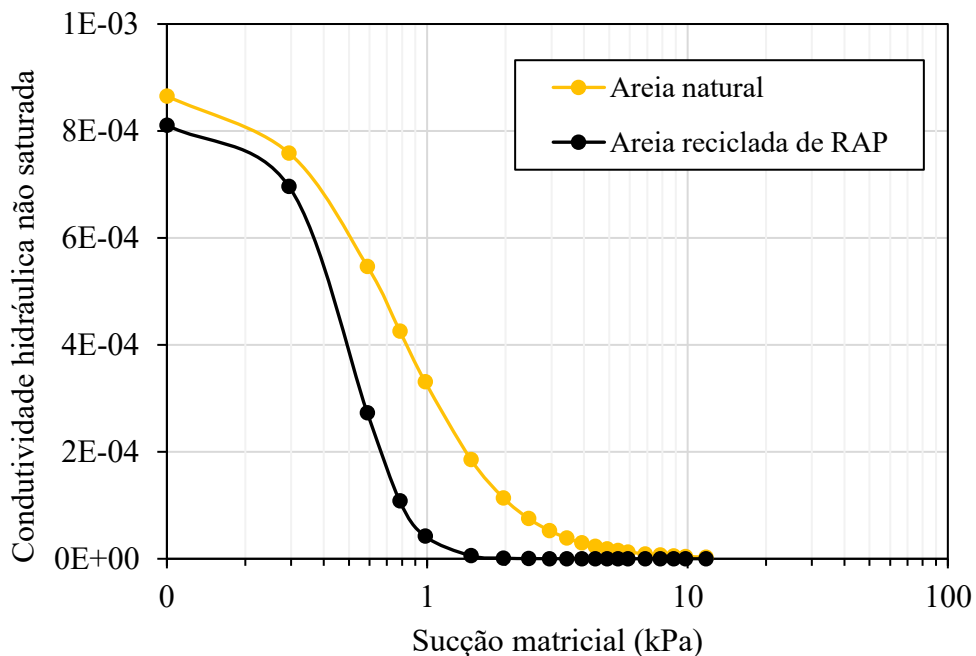


Figura 4.29. Função de condutividade hidráulica da areia natural e areia reciclada de RAP.

A partir das curvas de condutividade hidráulica não saturada (Figura 4.29), observa-se que a areia natural apresenta condutividade hidráulica superior à da areia reciclada de RAP em toda a faixa de sucção matricial analisada. Esse comportamento indica que a areia natural mantém maior continuidade dos caminhos de fluxo à medida que o material seca, o que está associado à sua menor retenção de água e à presença de poros interconectados de maior diâmetro.

Por outro lado, a areia reciclada de RAP apresenta redução mais acentuada da condutividade hidráulica com o aumento da sucção. Tal comportamento pode ser atribuído à

presença do ligante asfáltico residual, que recobre parcialmente os grãos, reduz a conectividade entre os poros e aumenta a capacidade de retenção de umidade do material. Assim, para sucções mais elevadas, o fluxo de água através da areia reciclada de RAP torna-se mais restrito, resultando em menores valores de condutividade hidráulica não saturada.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram comparar de forma abrangente o comportamento geotécnico da areia reciclada de RAP com o da areia natural, evidenciando as diferenças estruturais e funcionais entre os dois materiais. Embora os materiais apresentem granulometrias semelhantes e tenham sido compactados com a mesma compactação relativa, constatou-se que a areia reciclada de RAP apresenta estrutura interna mais aberta, refletindo a menor densidade dos grãos e a presença do ligante asfáltico residual. Esse estado mais solto influencia diretamente seu comportamento mecânico e hidráulico, favorecendo maior compressibilidade e retenção de umidade em comparação à areia natural.

A caracterização física indicou que a presença de 9,05 % de ligante asfáltico na areia reciclada de RAP contribuiu para a maior angularidade e rugosidade superficial das partículas em relação à areia. Como consequência, a resposta do material à compactação difere substancialmente da areia natural. Os ensaios de compactação indicaram que, sob energia Proctor Normal, a areia reciclada de RAP não atinge estados densos, sugerindo que o ligante atua como lubrificante e limita o rearranjo eficiente das partículas. Mesmo com compactação por vibração, observou-se dificuldade em reduzir o índice de vazios para níveis equivalentes aos da areia natural, indicando a necessidade de ajustes metodológicos. Por fim, verificou-se que a igualdade granulométrica entre os materiais não implica equivalência no estado de compactação, uma vez que a densidade de grãos, a presença de ligante e a natureza das interações partícula-partícula exercem papel determinante no comportamento obtido.

Nos ensaios edométricos, a areia reciclada de RAP apresentou índice de compressão superior ao da areia natural, comportamento associado à sua maior porosidade inicial, menor densidade de grãos e à presença do ligante asfáltico residual, que atua reduzindo o atrito interpartículas e facilitando a acomodação estrutural sob carregamento. Por outro lado, os ensaios de cisalhamento direto e triaxial consolidado-drenado revelaram que, embora a areia reciclada de RAP apresente coesão aparente decorrente da adesão promovida pelo ligante residual, seu comportamento global é mais dúctil e caracterizado por maiores deformações até a ruptura. Essa resposta é típica de materiais com estrutura mais solta, em que o ligante atua localmente como agente adesivo, mas não é suficiente para conferir comportamento frágil ou ruptura bem definida. Já a areia, sem coesão aparente, mostrou resposta mais rígida e comportamento de ruptura bem definido, condizente com um material medianamente compacto com mobilização rápida do atrito entre partículas.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente demonstram diferenças estruturais marcantes entre a areia reciclada de RAP e a areia natural, evidenciando a influência significativa do ligante asfáltico residual e das características intrínsecas do material reciclado na resposta mecânica sob carregamento cíclico. A areia reciclada de RAP apresentou módulos de resiliência mais elevados e tendência de aumento progressivo ao longo dos ciclos, indicando processos de densificação interna e melhoria da rigidez estrutural durante o carregamento. Além disso, a maior deformabilidade inicial observada pode ser interpretada como um estágio transitório de rearranjo, seguido por estabilização mecânica e resistência à degradação cíclica sob níveis elevados de tensão.

A análise da curva de retenção de água evidenciou que a areia reciclada de RAP apresenta maior capacidade de retenção de água em comparação à areia natural, devido a sua maior porosidade, irregularidade geométrica e textura superficial dos grãos recoberta por ligante asfáltico. A presença desse ligante, além de aumentar a rugosidade e a área de contato entre as partículas, cria microambientes hidrofóbicos, o que retarda a drenagem da água retida por tensão capilar. Como consequência, a areia reciclada de RAP apresentou menor condutividade hidráulica não saturada, evidenciando redução na capacidade de fluxo sob baixos graus de saturação, enquanto os valores de condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) permaneceram numa faixa típica de solos granulares com livre drenagem.

A avaliação ambiental realizada por meio do ensaio de lixiviação demonstrou que a areia reciclada de RAP apresenta baixíssima perda de massa e valores de pH estáveis e próximos à neutralidade, indicando ausência de reações significativas de dissolução ou liberação de compostos alcalinos, além da não detecção de metais pesados em concentrações críticas. Os resultados mostraram concentrações de metais pesados abaixo dos limites críticos estabelecidos para disposição e reaproveitamento de materiais, com exceção do cádmio (Cd), que, apesar de valores ligeiramente superiores ao limite de potabilidade para consumo humano, mas dentro das faixas permitidas para usos alternativos, como irrigação e dessedentação de animais, conforme parâmetros de qualidade ambiental previstos em normas brasileiras e internacionais. Portanto, a areia reciclada de RAP demonstrou comportamento ambientalmente estável e pode ser utilizada de forma segura em aplicações geotécnicas e rodoviárias, desde que sejam observadas as práticas adequadas de manejo e confinamento previstas nas normas e legislações ambientais aplicáveis.

Por fim, conclui-se que a areia reciclada de RAP, para a granulometria avaliada neste estudo, apresenta comportamento geotécnico distinto de uma areia natural de mesma

granulometria, exigindo cuidados específicos quanto ao seu estado de compactação, especialmente em aplicações nas quais o risco de liquefação ou deformação excessiva seja crítico. Ainda assim, os resultados demonstram que a areia reciclada de RAP possui potencial técnico e ambientalmente viável para uso em obras de engenharia, desde que sejam consideradas suas particularidades estruturais, hidráulicas e mecânicas. A determinação precisa do estado crítico da areia reciclada de RAP, neste caso, é um aspecto fundamental para melhor entendimento do comportamento do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO ASSOCIATION. T307 - Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. 2007.
- ABDALFATTAH, I. A.; MOGAWER, W. S.; STUART, K. The effect of reclaimed asphalt pavement (RAP) content and source on the return on investment (ROI), *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2022.2152025. 2022.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Disponível em: [https:// www.standardmethods.org/](https://www.standardmethods.org/). Acesso em: 29 abr. 2025.
- ANTUNES, V.; FREIRE, A. C.; NEVES, J. A. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and Building Materials*, 30 jun. 2019.
- ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M.M.; BO, M.W. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013, 25, 1077–1088.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292. Solo — Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16840. Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16843. Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2020b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16853. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de águas. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016c.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3080/D3080M: Standard test method for direct shear test

- of soils under consolidated drained conditions. 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6307: Standard test method for asphalt content of asphalt mixture by ignition method. 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D7181: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. 2020.
- AYDILEK, A. H.; MIJIC, Z.; SEYBOU-INSA, O. Hydraulic and Environmental Behavior of Recycled Asphalt Pavement in Highway Shoulder Applications. Maryland Department of Transportation State Highway Administration. Research Report, 2017.
- BENNERT, T.; MAHER, A. The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material. New Jersey Department of Transportation: Ewing Township, NJ, USA, 2005.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.
- BERNUCCI, L. L. B. Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. São Paulo. 237p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1995.
- BROWN, S. F. Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, v. 46, n. 3, p. 383-426, 1996.
- BROWN, S. F.; BUSH, D. I. Dynamic response of model pavement structure. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, v. 98, n. 4, p. 1005-1022, 1972.
- CARVALHO, J. P. B.; MOTTA, R. S. Estudo laboratorial do comportamento mecânico de agregados reciclados para aplicação em reaterro de valas. *Transportes*, v. 29, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i1.2228>
- CASAGRANDE, A.; FADUM, R. E. Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. Harvard Soil Mechanics, Series No. 8; Harvard University: Cambridge MA, USA, 1940.
- CÁSSARO, F. A. M. PIRES, L; F; SANTOS, R. A.; GUIMENEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 32, p. 2555-2562, 2008.
- COOLEY, D.A. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials, M.S. Thesis, Civil Engineering, Brigham Young. 2005.
- COSENTINO, P. J.; KALAJIAN, P. E. E.; HORHOTA, D.; STATE, P. E.; MATERIALS, G. Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II Final Report. Florida Institute of Technology Civil

- Engineering Department, 2003.
- COUTO, A. B.; COUTO, J. P.; TEIXEIRA, J. C. Desconstrução – Uma ferramenta para sustentabilidade da construção. Seminário Brasileiro da Gestão do Processo de Projecto na Construção de Edifícios. São Paulo, Brasil, 2006.
- DAGER, C. H.; MORRO, R. H.; HUBLER, J. F.; SAMPLE-LORD, K. M. Review of geotechnical properties of reclaimed asphalt pavement for reuse in infrastructure. *Geotechnics*, v. 3, n. 1, p. 21–42, 2023.
- DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Plastic behavior of granular materials. Final Report ARC Project, v. 933, p. 147–156, 1999.
- DELONGUI, L. M.; et al. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. *Construction and Building Materials*, v. 168, p. 105–112, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.086>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Chamamento público para ampliação do banco de dados do software Medina. Ofício nº 94592/2025. Brasília: DNIT, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/consulta-publica>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecânico-empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos, 033/2021. Manual de Utilização do Programa MeDiNa. Brasília: DNIT, 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 179/2018-IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 443/2023-ME. Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.
- EDIL, T. B. A Review of Recycled Aggregates (RAP and RCA) as Unbound Base Course Material for Sustainable Highway Construction. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017.
- EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – EAPA. Asphalt in figures 2023.

- Disponível em: <https://epa.org/asphalt-in-figures/>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Volume I and II. Reports no. FHWA-NHI-10-024, FHWA-NHI-10-025. U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls. Report No. FHWA-HIF-24-002. 2023.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Publication No. FHWA-RD-97-148. 2016.
- FERREIRA, J. G. H. M.; MOTTA, L. M. G. (2002). Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., Natal, RN, 2002. Anais. Natal, ANPET. v.1, p.109-20.
- FERREIRA, J. G. H. M.; MOTTA, L. M. G. Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 16. Natal, RN, 2002.
- GOMEZ, F.A. Strength and Drainage Characteristics of RAP-Soil Mixtures in Highway Applications. Master's Thesis, Civil Engineering, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL, USA, 2003.
- GUDURU, G.; KUNA, K. K. Classification of reclaimed asphalt pavement (RAP) material using simple indicative tests. *Construction and Building Materials*, v. 328, 2022. Elsevier Ltd. 2022.
- GUIMARÃES, A. C. R. Método mecanístico-empírico para previsão de deformação em solos tropicais constituintes de pavimentos. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, INC. Contaminant leaching from recycled asphalt pavement. Thurston County Community Planning and Economic Development, Olympia, Washington, 2019.
- HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. (1971). Factors influencing the resilient response of granular materials. *Transportation Research Record*, n.354, p.15-31.
- HOY, M.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R; A. CHINKULKIJNIWAT; ARULRAJAH, A. Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations, *Sci. Total Environ.* 573 19–26,

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.078>. 2016.
- HUBLER, J.; SAMPLE-LORD, K.; DAGER, C. Beneficial reuse of reclaimed asphalt pavement in geotechnical infrastructure. Commonwealth of Pennsylvania Department of Transportation, 2023.
- HVEEM, F.N. Pavement deflections and fatigue failures. In: ANNUAL MEETING, 34., 1955. Bulletin, n. 114, p. 43-73, 1955.
- KANG, D. H.; GUPTA, S. C.; RANAIVOSON, A. Z.; ROBERSON, R.; SIEKMEIER, J. Recycled materials as substitutes for virgin aggregates in road construction: II. Inorganic contaminant leaching. *Soil Science Society of America Journal*, v. 75, p. 1276–1284, 2011.
- KUTARA, K.; KUDOH, M. H.; NAKAMURA, K.; MINAMI, K.; IWASAKI, T.; NISHIMURA, K.; FUKIIDA, J.; TAKI, N. M. Experimental study on prototype polymer grid reinforced retaining wall. In: Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, Netherlands, 1990.
- LEGRET, M.; ODIE, L.; DEMARE, D.; JULLIEN, A. Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Research*, v. 39, p. 3675–4685, 2005.
- LIMA, C. D. A. Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- LIMA, L. B. F.; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Geotechnics*, 2023.
- LIU, L.; ZHANG, Z.; ZHANG, L.; TANG, Y.; YIN, J. Effect of temperature on interface characteristics between compacted recycled asphalt pavement and geogrid. *Advances in Civil Engineering*, 2023.
- LOPES, A. F. B.; et al. Geração de RAP no Brasil: mapeamento e diagnóstico. *Revista Eninfra*, v. 3, n. 3, p. 1–232, 2024. Disponível em: <https://revistaeninfra.dnit.gov.br/index.php/inicio/article/view/140>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis – A experiência com o FWD no Brasil. 456 f. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de

- Janeiro, 1996.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- MEHTA, Y. M.; AYMAN, A.; YAN, B.; MCELROY, A. E.; HUIMING, Y. Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement (RAP). FHWA-NJ-2017-008, 2017.
- MIJIC, Z.; DAYIOGLU, A. Y.; HATIPOGLU, M.; AYDILEK, A. H. Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders. *Construction and Building Materials*, v. 234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117365>
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria n° 2.914, de 12 de dezembro de 2011: procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011. [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)
- MONTEIRO, A. M. C.; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado. *Transportes*, v. 31, n. 1, p. 2771, 2023. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.
- MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J.; MATOS, M. V. M.; VIANNA, A. A. D. Resiliência de solos pedregulhosos lateríticos. In: *Reunião Anual de Pavimentação*, 24., 1990.
- MOUSA, E.; EL-BADAWY, S.; AZAM, A. Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt. *Transportation Geotechnics*, v. 26, 2021.
- MOUSA, R. M.; MOUSA, M. R. Viability Assessment of Using Reclaimed Asphalt Pavement-Sand Blend in Road Construction: A Case Study in Egypt. *The 96th Transportation Research Board Annual Meeting January 8-12, 2017*.
- NCMA. *Design Manual for Segmental Retaining Walls*. 3. ed. National Concrete Masonry Association, VA, USA, 2010. 206 p.
- PASCHE, E.; BRUSCHI, G. J.; SPECHT, L. P.; ARAGÃO, F. T. S.; CONSOLI, N. C. Fiber-reinforcement effect on the mechanical behavior of reclaimed asphalt pavement-powdered rock-Portland cement mixtures. *Transportation Engineering*, 9. 2022.
- RAHMAN, M.A; IMTEAZ, M.A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M.M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics, *J. Cleaner Prod.* 90 (2015) 183– 194, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>
- RATHJE, E. M.; RAUCH, A. F.; FOLLIARD, K. J. Recycled asphalt pavement and crushed

- concrete backfill: results from initial durability and geotechnical tests (FHWA/TX-02/4177-2). 2002.
- RATHJE, E.; RAUCH, A.; TREJO, D.; FOLLIARD, K.; VIYANANT, C.; ESFELLAR, M.; JAIN, A.; OGALLA, M. Evaluation of crushed concrete and recycled asphalt pavement as backfill for mechanically stabilized earth walls. Federal Highways Transportation Agency, Texas Department of Transportation, Austin, TX, USA, CTR Technical Report 0-4177-3, 2006.
- SANTOS, E. F. Reciclagem de materiais fresados de diferentes fontes em misturas estabilizadas para uso em camadas granulares de pavimentos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2021.
- SANTOS, E. F.; SPECHT, L. P.; BARONI, M.; VIEIRA, J. S. Avaliação da adição de materiais fresados em camadas granulares para bases de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. 32, n. 3, e2989, 2024. <https://doi.org/10.58922/transportes.v32i3.2989>
- SEED, H. B.; CHAN, C. K.; MONISMITH, C. L. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay. In: Annual Meeting Highway Research Board, 34., 1955. p. 541-558.
- SEYBOU-INSA, O.; DAYIOGLU, A. Y.; HOULIHAN, M.; AYDILEK, A. H. Stat testing and geochemical modeling of inorganic compounds in recycled asphalt pavement used in highway shoulders. *Construction and Building Materials*, v. 313, 2021.
- SHEDIVY, R.; MEIER, A.; MA, J.; TINJUM, J. M.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; CHEN, J.; BRADSHAW, S. Leaching characteristics of recycled asphalt pavement used as unbound road base. University of Wisconsin System Solid Waste Research Program, Madison, WI, 2012.
- SILVA, P. A.; ALMEIDA, M. S. S.; PEREIRA, I. M. M.; ACHY, A. R. A.; COSTA, W. S. S.; LIMA, C. D. A.; BRITO, J; A. Mechanistic-empirical evaluation of soil-RAP mixtures for use as unbound granular layers of asphalt pavements. *Transportation Geotechnics*, v. 47, 2024.
- SNYDER, M.B.; BRUINSMA, J.E. Review of studies concerning effects of unbound crushed concrete bases on PCC pavement drainage, *Transp. Res. Re.: J. Transp. Res. Board* 1519, 1996.
- SOLEIMANBEIGI, A.; EDIL, T. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 141,

- n. 5, 04015011, 2015.
- SOLEIMANBEIGI, A.; OZOCACK, A.; LI, B.; AKMAZ, E.; DAYIOGLU, A. Y.; TANYU, B. F.; AYDILEK, A. H.; LIKOS, W. J. Mechanical and hydraulic compatibility of RAP with geosynthetics used in MSE walls. *Geosynthetics International*, v. 29, n. 1, p. 1–18, 2021.
- SOLIMAN, H.; SHALABY, A. Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content. *Transportation Geotechnics*, v. 37, n. 4, p. 1–12, 2015.
- TAHMOORIAN, F.; SAMALI, B.; TAM, V. W. Y.; YEAMAN, J. Evaluation of Mechanical Properties of Recycled Material for Utilization in Asphalt Mixtures. *Appl. Sci.* 2017.
- TITI, H. H.; TABATABAI, H.; RAMIREZ, J.; SOOMAN, M. Evaluation of recycled base aggregates. Wisconsin Department of Transportation, Madison, WI, USA, 2019.
- TRZEBIATOWSKI, B. D.; BENSON, C. H. Saturated hydraulic conductivity of compacted recycled asphalt pavement. *Geotechnical Testing Journal*, v. 28, n. 5, 2005.
- TUTUMLUER, E.; QAMHIA, I. A. Alternative Backfills for Highway Applications: State of the Practice. Report No. FHWA-HRT-23-110. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration. 2024.
- UNGUREANU, D.; TARANU, N.; HOHA, D.; ZGHIBARCEA, S.; ISOPESCU, D. N.; BOBOC, V.; OPRISAN, G.; SCUTARU, M. C.; BOBOC, A.; HUDISTEANU, I. Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material. *Construction and Building Materials*, v. 262, 2020.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global resources outlook 2024: bend the trend – pathways to a liveable planet as resource use spikes. International Resource Panel. Nairobi, 2024. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892–898, 1980.
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015.
- VIYANANT, C. Potential use of recycled asphalt pavement and crushed concrete as backfill for mechanically stabilized earth walls. 2006. Tese (Doutorado) – University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 2006.
- VIYANANT, C.; RATHJE, E. M.; RAUCH, A. F. Creep of compacted recycled asphalt pavement. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 44, n. 6, p. 687–697, 2007.

<https://doi.org/10.1139/t07-022>

- WELLNER, F.; WERKMEISTER, S. Beitrag zur Untersuchung de Verformungsverhaltens ungebundener Gesteinskornungen mit Hilfe der Shakedown-Theorie. Strasse + AutoBahn, 2000.
- WEN, H.; BARZEGAR, M.; MIVEHCHI, M.; AKIN, I.; EDIL, T.; MUHUNTHAN, B. Utilization and limitations of recycled asphalt pavement (RAP) as roadway embankment material. Draft Final Report. Illinois State Toll Highway Authority, Downers Grove, IL, USA, 2022.
- WERKMEISTER, S. Permanent deformation behavior of unbound granular materials. PhD thesis, Dresden Univ. of Technology Dresden, Germany. 2003.
- WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Pavement Design for Unbound Granular Materials. Journal of Transportation Engineering, ©ASCE, September/October, 2004.
- WERKMEISTER, S.; DAWSON, A.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. Transportation Research Record, n. 1757, p. 75–81, 2001. <https://doi.org/10.3141/1757-09>
- WEST, R. C. Best practices for RAP and RAS management. FHWA-HIAP-20. National Asphalt Pavement Association, 2015.
- WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2022, 13th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland, 2024.
- XIAO, F.; XU, L.; ZHAO, Z.; HOU, X. Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021. Sustainable Materials and Technologies, set. 2023. Elsevier B.V.
- YANG, Q.; YIN, H.; HE, X.; CHEN, F.; ALI, A.; MEHTA, Y.; YAN, B. Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 85, 2020.
- YIN, J.; SOLEIMANBEIGI, A.; LIKOS, W. J.; EDIL, T. Creep response of compacted waste foundry sand for use as roadway embankment fill. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 144, n. 2, 04017115, 2018.
- ZAUMANIS, M.; LOETSCHER, D.; MAZOR, S.; STÖCKLI, F.; POULIKAKOS, L. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. Construction and Building Materials, v. 307, 2021.