



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

COMO DIFERENTES FATORES AFETAM O MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Helena Lunkes Strieder¹; Gabriel Grassioli Schreinert^{1,2}; Matheus Ferreira Matuella¹; William Fedrigo^{1,3}; Lucas Delongui^{1,4}; Douglas Rutzen¹ & Washington Peres Núñez¹

RESUMO

Este artigo avalia a influência de diferentes fatores no módulo de resiliência (MR) de resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados como camadas de pavimentos. Os efeitos avaliados foram o processo de umedecimento, o método de compactação, o tamanho do corpo de prova, o grau de compactação (GC), a estabilização química e a composição. Analisando cada fator individualmente, os maiores valores de MR foram observados para o processo de umedecimento identificado como úmido, para a compactação vibratória, para o corpo de prova de menor dimensão, para um GC de 100% e para uma composição com menor quantidade de cerâmica. Os resultados mostraram que o MR dos RCDs reciclados está relacionado à sua composição e as partículas cerâmicas apresentam uma maior tendência a se quebrar e, conseqüentemente, aumentar a deformabilidade. Outras características também afetam a rigidez, portanto, controlar os processos de construção pode garantir um bom desempenho em campo. Além disso, a estabilização química e a seleção da composição dos RCDs são técnicas sugeridas para se obter melhores respostas resilientes. No geral, todas as características físicas analisadas e os processos de construção influenciaram o MR dos RCDs e devem ser levados em consideração no projeto e na construção. Embora ainda haja muito a ser estudado, os resultados da pesquisa ajudam a compreender o comportamento resiliente dos RCDs e fornecem dados para dimensionamento e análise racional de pavimentos.

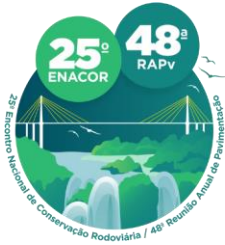
PALAVRAS-CHAVE: Processo de umedecimento; Compactação; Composição; Tamanho do corpo de prova; Estabilização química.

ABSTRACT

This article evaluates the influence of different factors on the resilient modulus (RM) of recycled construction and demolition waste (CDW) as pavement layers. The effects assessed were wetting process, compaction method, specimen scale, relative compaction, chemical stabilization, and composition. Analyzing each factor individually, the highest RM values were observed for the wetting process referred to as wet, vibratory compaction, the smallest specimen, a 100% relative compaction, and a composition with a lower ceramic content. The results showed that the RM of recycled CDW is related to its composition, and ceramic particles have a greater tendency to break and consequently increase the deformability. Other characteristics also affect the material stiffness, so controlling the construction processes can ensure good field performance. Additionally, chemical stabilization and the selection of the recycled construction and demolition waste composition are suggested techniques to achieve better resilient responses. Overall, all the analyzed physical characteristics and construction processes influenced the RM of the recycled CDW materials and should be taken into consideration in design and construction. Although there is still much to be studied, the research results help understand the resilient behavior of recycled CDW and provide data for rational pavement design and analysis.

KEY WORDS: Wetting process; Compaction; Composition; Specimen scale; Chemical stabilization.

¹ UFRGS, ² SIE-SC, ³ GRUPO CCR, ⁴ UFSM, e-mails: helena.strieder@ufrgs.br; gabrielgrassioli@sie.sc.gov.br; matheus.matuella@ufrgs.br; william.fedrigo@ufrgs.br; engdelongui@gmail.com; rutzen_douglas@hotmail.com; washington.nunez@ufrgs.br



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

O conceito de economia circular tem ganhado cada vez mais atenção da academia e da indústria, incluindo o setor da construção (Ghisellini et al., 2018; Esa et al., 2017; Pomponi and Moncaster, 2017). Apesar disso, há um longo caminho a percorrer para superar o problema da geração excessiva de resíduos de construção e demolição (RCD). Na União Europeia, 30% a 40% dos resíduos sólidos urbanos vêm da indústria da construção (União Europeia, 2018). No Brasil, esse número chega a quase 60% (ABRELPE, 2018). Ao mesmo tempo, há uma demanda crescente por agregados virgens e escassez de recursos naturais em muitos países, o que requer a consideração de materiais alternativos em projetos de engenharia (Tam, V. W.Y.; Mahfooz S.; Evangelista, 2018).

O potencial dos agregados de RCD é grande, uma vez que seus componentes apresentam alto valor de recursos. Os benefícios técnicos, econômicos e ambientais desses agregados para diferentes usos na construção têm sido amplamente discutidos (Tam, V. W.Y.; Mahfooz S.; Evangelista, 2018; Cardoso et al., 2016; Silva et al., 2014; Chen, Wei; Jin et al., 2019). Entre as possibilidades, aborda-se a aplicação como camadas de pavimentos, principalmente para tráfegos baixos/médios e os resultados mostram que o desempenho dos RCD é comparável ao dos agregados naturais.

Uma das principais limitações dos métodos tradicionais de projeto de pavimentos é que a maioria não considera materiais alternativos. A abordagem racional de dimensionamento de pavimentos exige propriedades mecânicas, como o módulo de resiliência (MR), como dados de entrada. Contudo, apesar dos avanços nesse tema de pesquisa, ainda é difícil prever o comportamento resiliente dos RCD devido à sua complexidade. Além da heterogeneidade intrínseca do material, existem variáveis associadas à construção que podem influenciar o desempenho em campo.

Considerando essa necessidade de pesquisa, o objetivo deste artigo foi avaliar vários fatores que afetam o módulo de resiliência dos RCDs: processo de umedecimento, método de compactação, tamanho do corpo de prova, grau de compactação, estabilização química e composição.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este artigo é resultado de um extenso projeto de pesquisa envolvendo diferentes estudos focados no comportamento mecânico e desempenho de RCD reciclados como camadas estruturais de pavimentos. Portanto, foram analisados múltiplos efeitos, considerando três fontes diferentes de RCD. A Tabela 1 relaciona os efeitos avaliados aos RCDs utilizados.

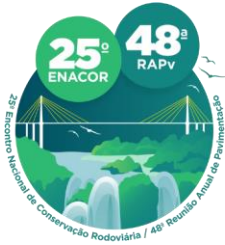
Tabela 1. Efeitos avaliados para cada RCD utilizado

Efeito avaliado	RCD
Processo de umedecimento	RCD1 / RCD2
Método de compactação	RCD2
Tamanho do corpo de prova	RCD2
Grau de compactação	RCD2
Estabilização química	RCD1
Composição	RCD3

Materiais

RCD

A Tabela 2 apresenta um resumo da caracterização dos RCDs e a Figura 1 apresenta as curvas granulométricas.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Caracterização dos RCDs

Propriedade	Norma de referência	Unidade	RCD1	RCD2	RCD3
Cerâmica	-	%	52	20	0
Argamassa	-	%	19	35	0
Concreto	-	%	13	26	100
Basalto	-	%	15	18	0
Outros	-	%	1	1	0
Pedregulho	ASTM C136 / D2487	%	62,15	44,33	72,91
Areia	ASTM C136 / D2487	%	34,94	52,77	26,41
Finos	ASTM C136 / D2487	%	2,91	2,90	0,68
Tamanho máximo da partícula	ASTM C136 / D2487	mm	50	50	25
Coefficiente de uniformidade (C_u)	ASTM C136 / D2487	-	86,7	20,3	10,9
Coefficiente de curvatura (C_c)	ASTM C136 / D2487	-	2,5	0,6	2,3
Classificação USCS	ASTM D2487	-	GW	SP	GW
Classificação AASHTO	AASHTO M 145	-	A-1-A	A-1-a	A-1-a
Massa específica seca máxima (*)	AASHTO T 180	g/cm ³	1,84	1,85	1,84
Teor ótimo de umidade (*)	AASHTO T 180	%	12,7	11,9	12,5
Perda por abrasão Los Angeles	AASHTO T 96	%	59,0	55,0	31,0

(*) Energia intermediária

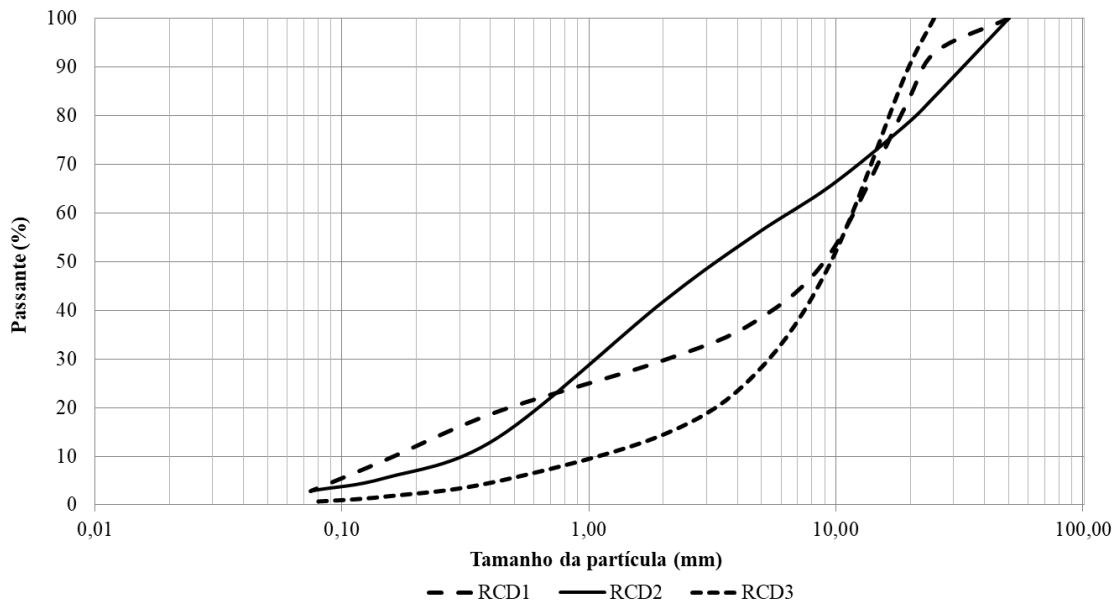


Figura 1. Curvas granulométricas dos RCDs

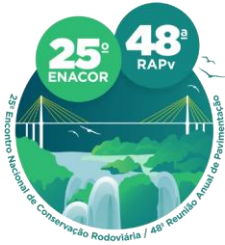
Estabilizadores químicos

Para avaliar os efeitos de estabilização, foram utilizados dois agentes químicos estabilizadores:

- Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V;
- Cal dolomítica (45,96% em massa de CaO e 26,08% em massa de MgO).

Ensaio de módulo de resiliência

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) em duas escalas diferentes, designadas como "pequena" e "grande", conforme resumido na Tabela 3. A referência normativa foi



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



o protocolo de ensaio AASHTO T 307. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas. A Equação 1 foi usada para analisar os resultados de módulo de resiliência.

$$M_R = k_1 \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{k_2} \quad (1)$$

Na Equação 1, k_1 e k_2 são coeficientes de regressão, P_{atm} é a pressão atmosférica, θ é a soma das tensões principais ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais maior, intermediária e menor, respectivamente.

Tabela 3. Resumo das características dos ensaios de MR

	Característica	Pequeno porte	Grande porte
Corpo de prova (CP)	RCDs estudados	RCD1, RCD2, RCD3	RCD2
	Tamanho máximo da partícula	25 mm (1/4 do diâmetro do CP)	50 mm (1/5 do diâmetro do CP)
	Dimensão dos corpos de prova (D × A)	100 × 200 mm	250 × 500 mm
	Método de compactação	Conforme efeito avaliado (*)	Vibratório
	Número de camadas	5	10
	Tempo de homogeneização	Conforme efeito avaliado (**)	24 h
Equipamento	Pressão de confinamento		Estática
	Tensão desviadora		Cíclica
	Fluído de confinamento		Ar
	Sistema de carregamento		Pneumático
	Posição da célula de carga		Externa
	Medidas de deslocamentos	LVDTs (2 internos)	LVDTs (2 internos e 1 externo)
Procedimento de ensaio	Condição de drenagem		Aberta
	Frequência de carregamento		1 Hz
	Duração do pulso de carregamento		0.1 s (descanso 0.9 s)
	Formato do pulso de carregamento		Haversine
	Número de estágios		18
	Ciclos por estágio (mínimo)		200 (***)
	Faixa de tensões (σ_3 , σ_d) (kPa)		(20-140, 20-420)

(*) O método de compactação foi um dos efeitos avaliados, comparando dois métodos.

(**) O processo de umedecimento foi um dos efeitos avaliados, comparando três processos.

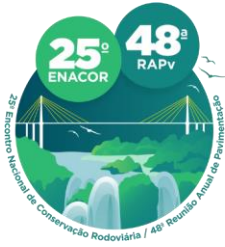
(***) O MR é calculado usando os valores médios obtidos nos últimos 5 ciclos de cada estágio.

Efeitos avaliados

Processo de umedecimento

A fim de estudar o efeito de diferentes processos de umedecimento no comportamento mecânico dos RCDs, três condições que geralmente ocorrem em campo foram reproduzidas em laboratório:

- **Seco:** *Condição de campo:* regiões/épocas secas, com baixa precipitação e/ou altas temperaturas, onde o material apresenta apenas umidade higroscópica até que a água seja adicionada imediatamente antes da compactação. *Condição de laboratório:* agregados secos em estufa por 24 horas a 60 °C, expostos ao ar até atingirem temperatura ambiente e umedecidos (teor ótimo de umidade), imediatamente antes da compactação e dos ensaios;



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- **Úmido:** *Condição de campo:* regiões/épocas úmidas, com alta precipitação e/ou baixas temperaturas, onde os montes ficam encharcados e alguns componentes do RCD absorvem grandes quantidades de água. *Condição de laboratório:* agregados primeiramente umedecidos (teor ótimo de umidade), armazenados por 24 horas em sacos plásticos selados para permitir absorção/homogeneização da água e submetidos à compactação e aos ensaios;
- **Imerso-seco ao ar:** *Condição de campo:* regiões/épocas com precipitação média a alta, mas altas taxas de evaporação, onde as partículas finas secam mais rápido, enquanto as partículas grossas estão sujeitas à evaporação da água superficial, mantendo o interior úmido. *Condição de laboratório:* fração grosseira (retida na peneira de 4,75 mm) imersa em água por 24 horas, seca ao ar por 10 minutos e misturada com a fração fina e água (teor ótimo de umidade).

Os fatores fixos foram o tamanho do corpo de prova (pequeno) e o método de compactação (soquete).

Método de compactação

Para estudar o efeito de diferentes métodos de compactação no MR do RCD, dois equipamentos foram adotados e comparados em laboratório: soquete e martelo vibratório. Os fatores fixos foram o tamanho do corpo de prova (pequeno) e o processo de umedecimento (úmido).

Tamanho do corpo de prova

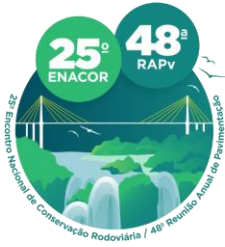
Para analisar o efeito de diferentes tamanhos de corpos de prova no MR dos RCDs, foram adotados e comparados dois tamanhos: pequeno (100 × 200 mm) e grande (250 × 500 mm). Os fatores fixos foram o método de compactação (martelo vibratório) e o processo de umedecimento (úmido).

Grau de compactação

Para simular diferentes situações que ocorrem em campo, foram testados cinco níveis de grau de compactação (GC): 91%, 94%, 97%, 100% e 103%. Para os diferentes GC, o teor de umidade foi mantido constante no ótimo, enquanto a quantidade de material e o número de golpes em cada camada foram ajustados para atingir as densidades unitárias. Os fatores fixos foram o processo de umedecimento (úmido), o método de compactação (soquete) e o tamanho do corpo de prova (pequeno).

Estabilização química

O efeito da estabilização química foi avaliado utilizando 3% de cimento Portland e 5% de cal hidratada (em massa de RCD). Para avaliar as reações de hidratação ao longo do tempo, os ensaios foram realizados após diferentes períodos de cura, sendo estes de 0, 3, 7 e 14 dias para o cimento e de 0, 7, 14, 28, 56 e 112 dias para a cal. Os fatores fixos foram o método de compactação (soquete) e o tamanho do corpo de prova (pequeno).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Composição

Foi avaliada a influência de teores crescentes de agregados cerâmicos em uma mistura de agregados de concreto. O agregado cerâmico apresentou perda de abrasão de 45% e foi obtido a partir da trituração de tijolos sólidos. A distribuição granulométrica do RCD3 (concreto, C) foi mantida constante, substituindo-se agregados de concreto por tijolos (T) da mesma fração. Os fatores fixos foram o processo de umedecimento (úmido), o método de compactação (soquete) e o tamanho do corpo de prova (pequeno). A Tabela 4 resume as propriedades de cada composição.

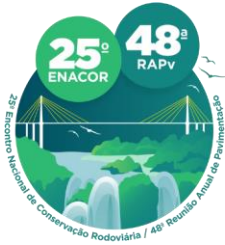
Tabela 4. Propriedades das diferentes composições de RCD

Composição	Propriedade		
	Massa específica seca máxima (g/cm ³)	Teor ótimo de umidade (%)	Abrasão Los Angeles (%)
100C+0T	1,843	12,5	31
90C+10T	1,785	14,4	-
80C+20T	1,729	16,6	-
70C+30T	1,684	18,5	-
60C+40T	1,605	21,5	-
50C+50T	1,523	23,6	43

RESULTADOS

Processo de umedecimento

A Figura 2 apresenta os modelos de módulo de resiliência para os diferentes processos de umedecimento dos RCD. Os valores variaram de 40 a 600 MPa para o RCD1 e de 30 a 400 MPa para o RCD2. É interessante observar que, para estados de baixa tensão, os valores de módulo obtidos para as três condições são semelhantes. O RCD1 (Figura 2 (a)) alcançou os maiores valores de MR na condição úmida e os menores na condição seca, o que é refletido no parâmetro k_1 do modelo. A dependência do estado de tensões do RCD1 também aumentou para as condições de umidade mais elevadas (valores mais altos de k_2), portanto, quanto maior o estado de tensão, melhor parece ser o intertravamento, aumentando a rigidez. Para o RCD2 (Figura 2 (b)), um comportamento semelhante foi observado para as condições úmida e de imersão-seco ao ar. No entanto, a condição seca resultou em valores de MR mais elevados, o que é semelhante ao relatado por Arulrajah et al. (2013). Uma possível explicação para os diferentes comportamentos é que RCD2 possui um teor menor de partículas cerâmicas, o que resulta em menor absorção de água e possivelmente mais água livre na amostra para as condições úmida e de imersão-seco ao ar. Além disso, essa tendência também pode estar relacionada aos efeitos da carga dinâmica ou até mesmo a alguma mudança estrutural devido à etapa de condicionamento que antecede os ensaios de MR. Devido à heterogeneidade inerente dos RCDs, o impacto das condições de umedecimento pode depender da origem (composição, granulometria, absorção, etc.), o que explica a variabilidade observada.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

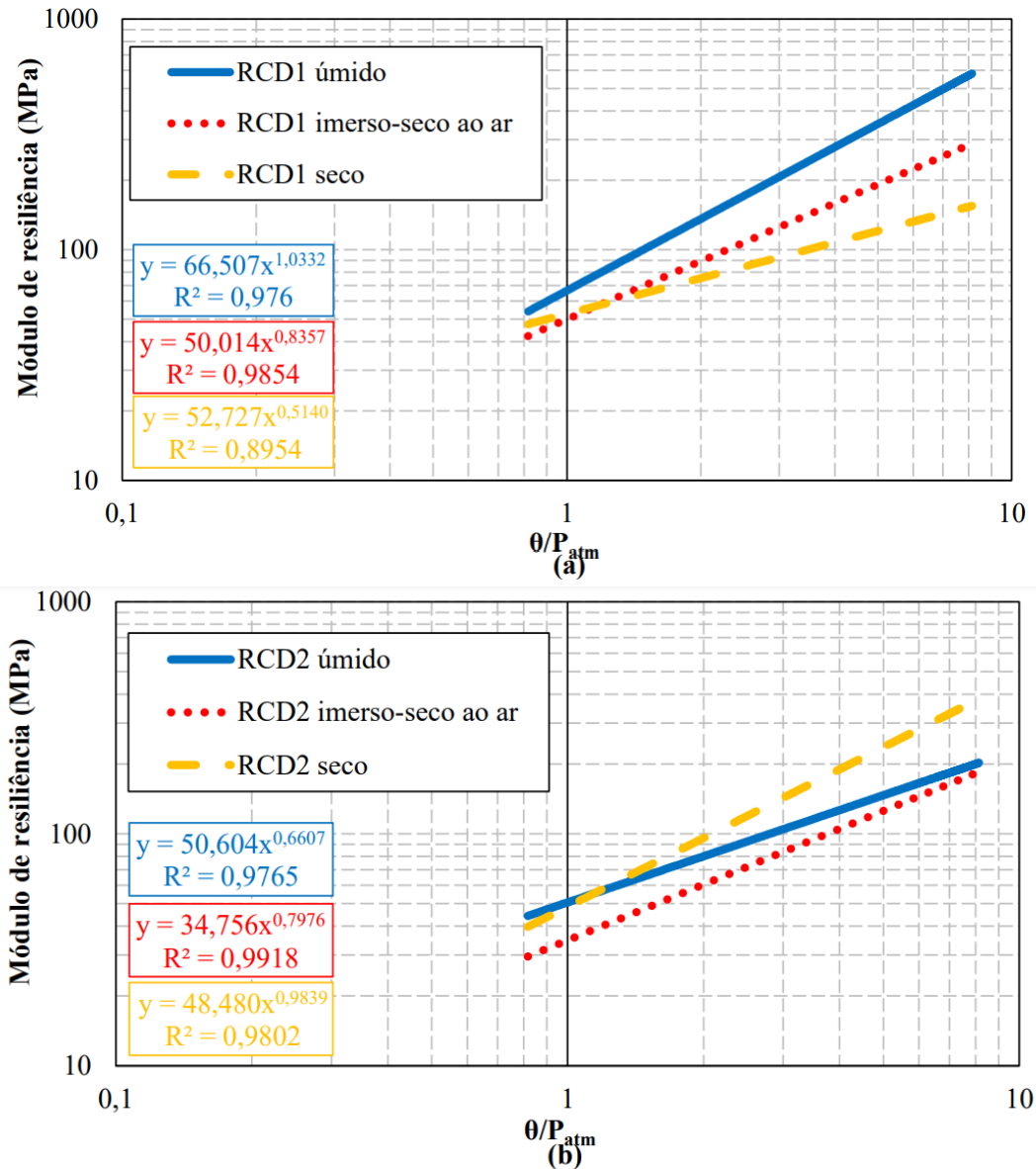
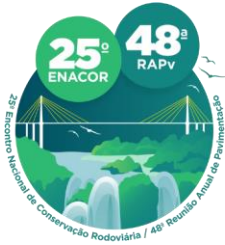


Figura 2. Efeito do processo de umedecimento no módulo de resiliência: (a) RCD1, e (b) RCD2

Método de compactação

O efeito do método de compactação no módulo de resiliência é mostrado na Figura 3. Para as mesmas condições, o martelo vibratório leva a valores mais altos de MR (100-500 MPa) do que o soquete (40-200 MPa), o que é corroborado pelo maior valor de k_1 do primeiro. Essa redução de deformabilidade elástica ocorre possivelmente devido a uma melhor acomodação das partículas. Embora isso esteja de acordo com o fato de que rolos vibratórios serem indicados para compactar materiais granulares em geral, o efeito do método de compactação na dependência de tensões do material é nulo (mesmo valor de k_2).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

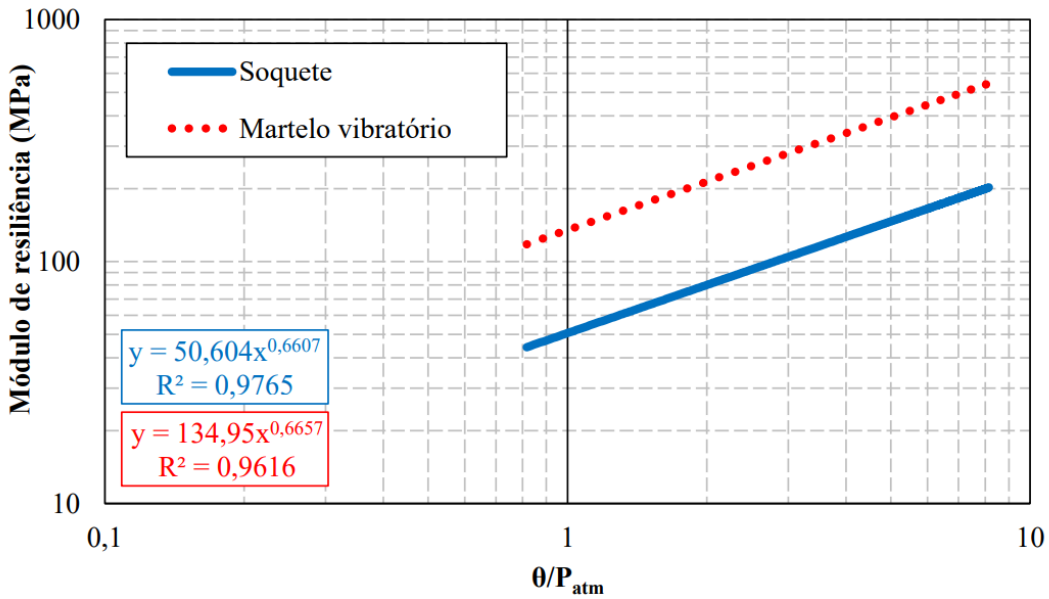


Figura 3. Efeito do método de compactação no módulo de resiliência

Tamanho do corpo de prova

O corpo de prova menor resultou em valores ligeiramente mais altos de módulo de resiliência (100-600 MPa) do que o corpo de prova maior (80-500 MPa) (Figura 4). Os modelos mostram que o corpo de prova maior é mais dependente do estado de tensões do que o menor (valor mais alto de k₂). Entretanto, para níveis elevados de tensão, o corpo de prova maior parece enrijecer, levando a valores de módulo semelhantes.

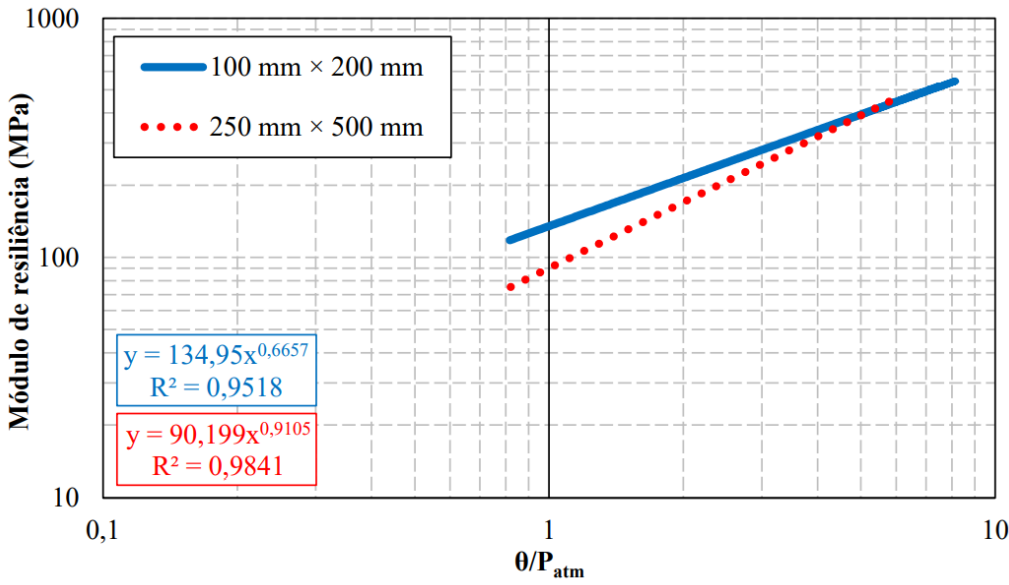
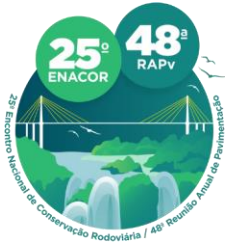


Figura 4. Efeito do tamanho do corpo de prova no módulo de resiliência



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Grau de compactação

Os modelos na Figura 5 mostram que o módulo de resiliência aumenta com o GC para níveis entre 91% e 100%. Além disso, para a maioria dos GCs, o efeito do estado de tensões é semelhante (k_2 de aproximadamente 0,7). Por outro lado, para um GC de 103%, o módulo de resiliência diminuiu e o efeito do estado de tensões aumentou, o que pode estar relacionado à quebra das partículas (Leite, F. C.; Motta, R. S.; Vasconcelos, K. L. Bernucci, 2011; Zulkati et al., 2013). Para entender melhor esse efeito, a distribuição granulométrica do material foi determinada após o ensaio. Observou-se uma redução das partículas de 9,5 mm em comparação com o corpo de prova compactado com GC de 100%. Isso comprova que um excesso de compactação não melhoraria as características técnicas da camada de RCD, ao invés disso, comprometeria seu comportamento resiliente.

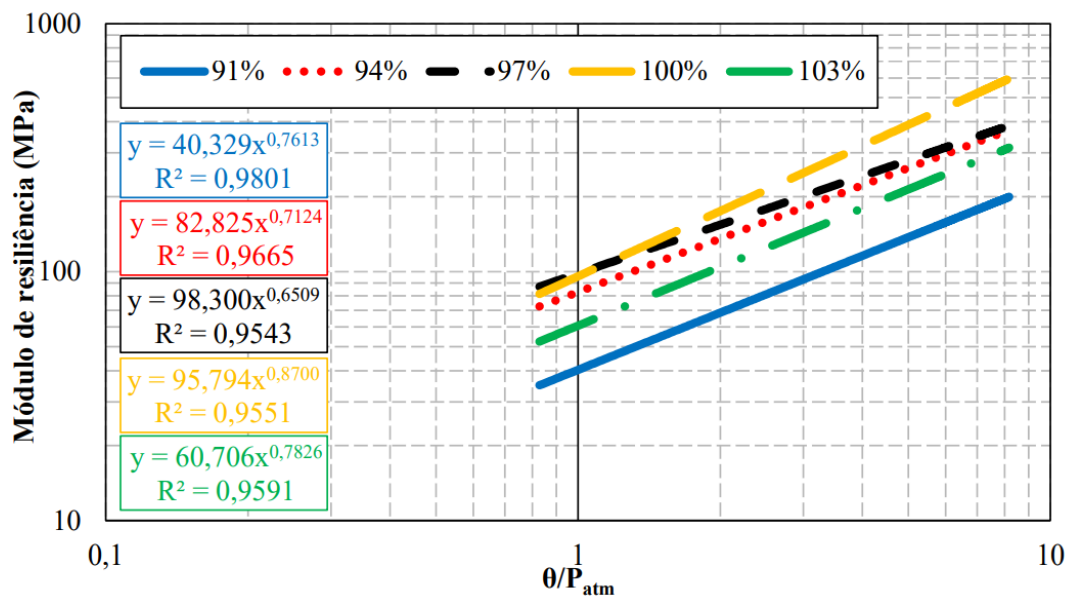
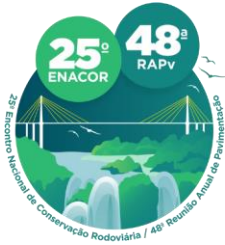


Figura 5. Efeito do grau de compactação no módulo de resiliência

Estabilização química

Para o RCD estabilizado com cimento, o MR aumentou continuamente com o tempo de cura. Após 14 dias, os valores de MR aumentaram de 50-300 MPa para 200-1500 MPa (Figura 6-a). Essa tendência não foi tão acentuada para o RCD estabilizado com cal (Figura 6-b). Para certos tempos de cura iniciais (14 e 28 dias), nos quais as reações pozolânicas ainda não são significativas, a adição de cal reduziu o MR, já que estaria se comportando apenas como um material fino, diminuindo a rigidez. A partir dos 56 dias, essas reações se pronunciaram, aumentando o MR. Os valores observados para o módulo de resiliência do RCD estabilizado com cal variaram entre 100 e 1500 MPa após 112 dias. Os valores alcançados com a estabilização com cimento e com cal foram semelhantes, provando que ambos estabilizadores podem ser usados para melhorar o comportamento resiliente do RCD. É importante observar que a estabilização também pode ajudar a reduzir heterogeneidade inerente dos RCDs, embora possa gerar outros problemas, como a retração.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

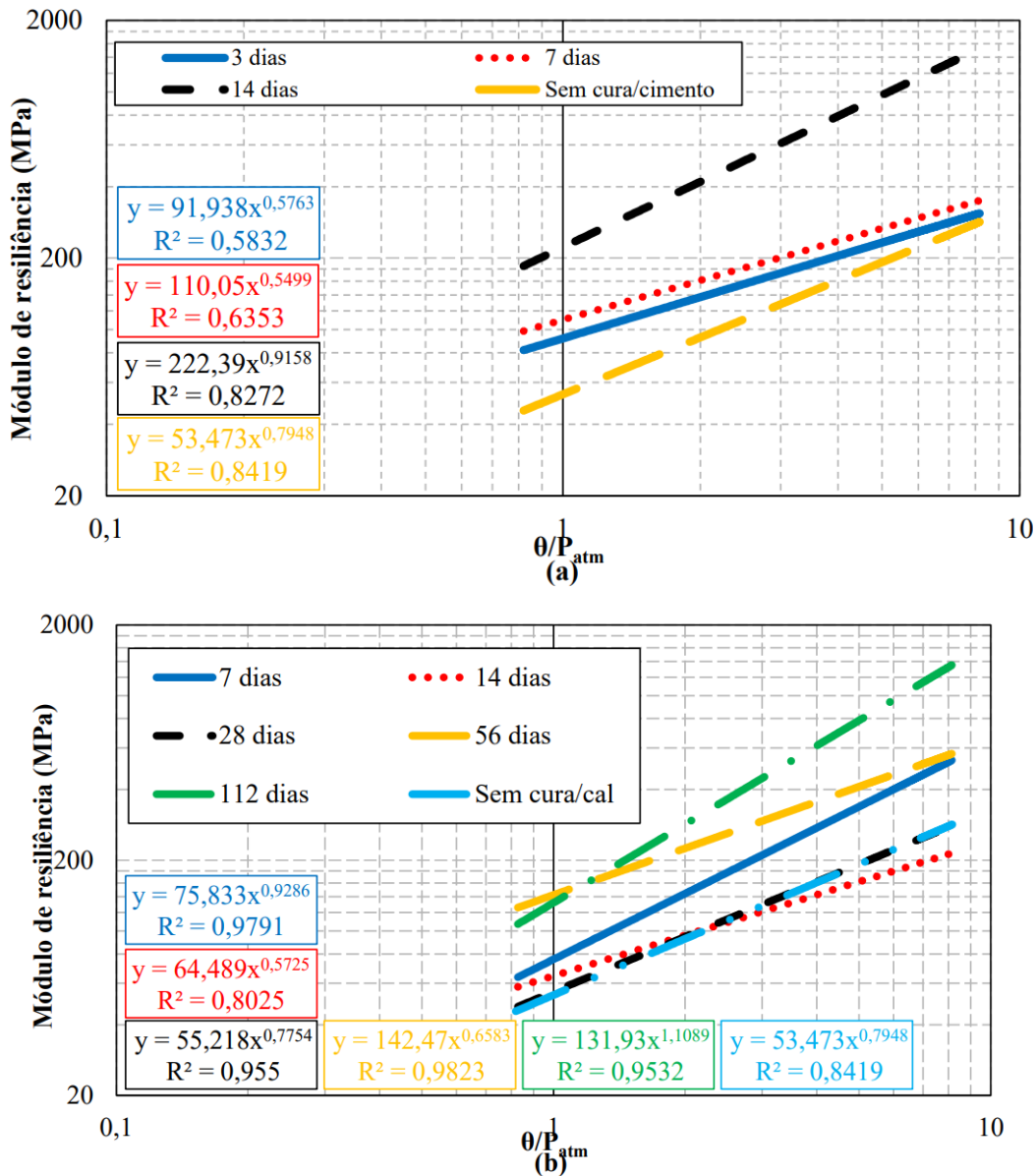


Figura 6. Efeito da estabilização química no módulo de resiliência: (a) cimento, e (b) cal

Composição

A Figura 7 mostra o efeito da composição no módulo de resiliência. O módulo de resiliência diminuiu em função da porcentagem de tijolos (T), o que é corroborado pela redução dos valores de k_1 . A dependência da tensão se mostra quase constante até a porcentagem de 50% de tijolos, quando o parâmetro k_2 diminui ligeiramente. Conforme relatado na literatura (MOTTA, 2005; ARULRAJAH et al., 2013; Lu et al., 2021; Arisha et al., 2016; Delongui, 2016), o comportamento observado está possivelmente relacionado à maior deformação que ocorre nas misturas com alta porcentagem de tijolos (cerâmica), pois essas partículas são mais fracas do que as partículas de



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



concreto. O fato de as partículas de tijolos serem geralmente planas e alongadas também contribui para sua quebra e consequente deformação, resultando em menor rigidez.

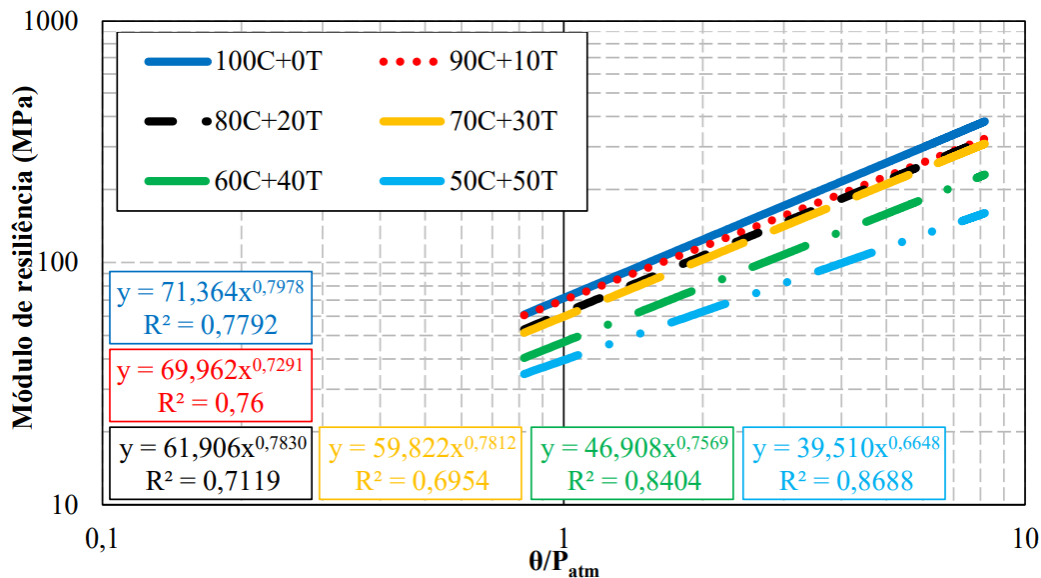


Figura 7. Efeito da composição no módulo de resiliência

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tecidas com base nos resultados apresentados:

- O processo de umedecimento influencia o módulo de resiliência (MR) dos resíduos de construção e demolição (RCD). Na condição úmida, com maior teor de água, foram observados valores mais altos de MR, sugerindo um melhor entrosamento das partículas. A forma como a água deve ser adicionada deve ser avaliada para cada RCD, uma vez que isso depende da composição do material;
- A compactação vibratória leva a valores mais altos de MR devido a uma melhor acomodação e entrosamento das partículas, reduzindo assim a deformabilidade. Isso está em consonância com a prática de usar rolos vibratórios para compactação de materiais granulares;
- O corpo de prova menor resultou em valores mais altos MR, possivelmente por conta de tensões de contato mais elevadas surgirem entre as partículas grosseiras. O corpo de prova maior é mais dependente do estado de tensão e, para níveis elevados de tensão, leva a valores de MR semelhantes aos do corpo de prova menor. Os resultados de laboratório precisam ser comparados com resultados de campo para ajudar a entender a melhor forma de se determinar o MR no laboratório;
- O MR aumenta para graus de compactação (GC) de até 100% e após diminui, devido à quebra das partículas. Deste modo, um GC de 100% é adequado para camadas de RCD;
- A estabilização química pode melhorar o comportamento resiliente dos RCD e reduzir a heterogeneidade inerente ao material. Embora o RCD estabilizado com cimento tenha alcançado valores mais altos de MR após curtos períodos de cura, o RCD estabilizado com cal obteve valores semelhantes após períodos de cura mais longos;



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- O MR dos RCDs diminui à medida que a porcentagem de tijolos (cerâmica) aumenta. Os agregados de cerâmica são mais frágeis, planos e alongados em comparação com o concreto, o que leva a uma menor rigidez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arisha, A., Gabr, A., El-Badawy, S., Shwally, S., 2016. Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement. *Procedia Eng.* 143, 1317–1324. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.148>
- Arulrajah, A.; Rahman, M.A.; Piratheepan, J.; Bo, M.W.; Imteaz, M.A. Interface shear strength testing of geogrid-reinforced construction and demolition materials. *Advances in Civil Engineering Materials*. ASTM. doi:10.1520/ACEM20120055. 2013.
- Cardoso, R.; Silva V. R.; Brito, J.; Dhir, R., 2016. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Manag.* 49, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>
- Chen, Wei; Jin, R., Xu, Yidong; Wanatowski, Dariusz Li, Bo; Yan, L., Pan, Z., 2019. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature 218, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>
- Delongui, L., 2016. Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição. Univ. Fed. do Rio Gd. do Sul.
- Esa, M.R., Halog, A., Rigamonti, L., 2017. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 19, 1144–1154. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0516-x>
- European Union, 2018. Waste statistics, Eurostat, 2018 [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics
- Ghisellini, P., Ripa, M., Ulgiati, S., 2018. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *J. Clean. Prod.* 178, 618–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- Leite, F. C.; Motta, R. S.; Vasconcelos, K. L. Bernucci, L., 2011. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Concr. Struct. Mater.* 25, 2972–2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Lu, C., Chen, J., Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Zhang, T., Lin, G., 2021. Resilient and permanent deformation behaviors of construction and demolition wastes in unbound pavement base and subbase applications. *Transp. Geotech.* 28, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100541>
- MOTTA, R. dos S. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2005.
- Pomponi, F., Moncaster, A., 2017. Circular economy for the built environment: A research framework. *J. Clean. Prod.* 143, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Silva, R. V., De Brito, J., Dhir, R.K., 2014. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Tam, V. W.Y.; Mahfooz S.; Evangelista, A.C.J., 2018. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Constr. Build. Mater.* 172, 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>
- Zulkati, A., Wong, Y.D., Sun, D.D., 2013. Mechanistic Performance of Asphalt-Concrete Mixture Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1299–1305. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000668](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000668)