

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DOSAGEM E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-AGREGADO-CIMENTO

Júlia Patrocínio da Silva Coccozza Simoni

Luíza Rijo Valoura

Ana Paula Furlan

Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é contribuir para a dosagem de misturas solo-agregado-cimento (SAC). Para isso, foram produzidas misturas SAC com dois tipos de cimento (CP V-ARI e CP II-Z 32), em três teores de cimento (3, 5 e 7%) e três tempos de cura (0, 7, 28), e avaliadas confrontando suas resistências (à compressão e à tração) às respostas estruturais de pavimentos hipotéticos. Os resultados levam a concluir que: (a) todas as misturas SAC exibiram altos valores de resistência (RCS e RTCD) ao longo do tempo, mas, as misturas com CP V-ARI apresentam maiores resistência e ganho de resistência inicial (7 dias), e (b) as RCS são muito superiores aos níveis de tensão vertical de compressão de pavimentos simulados, porém, os níveis de tensão horizontal de tração se aproximam da RTCD das misturas 3% de cimento aos 7 dias de cura, levando à recomendação do teor de 5%, para ambos os cimentos.

ABSTRACT

This research aims to contribute to the SAC mixture design. Thus, SAC mixtures were produced with two types of cement (CP V-ARI e CP II-Z 32), using three cement content (3, 5 e 7%) and three curing periods (0, 7, 28), and they were evaluated comparing their strengths (compression and tensile) to the structural responses of the hypothetical pavements. The results lead to the regarding conclusions: (a) all SAC mixtures exhibited high values of strength (UCS and ITS) over time, however, the mixtures containing CP V-ARI presented higher strength and initial strength gain (7 days), and (b) UCS are superior at the vertical compression stress levels of the simulated pavement, however, the horizontal tensile stress levels are close to the ITS results of 3% cement mixtures at 7 days, leading to the recommendation of 5% of cement for both cements.

1. INTRODUÇÃO

A estabilização de solos melhora as características físicas e propriedades mecânicas dos materiais geotécnicos empregados em pavimentos, tornando-os mais resistentes e menos compressíveis. Ela pode ser dividida em dois grandes grupos: estabilização física e estabilização química. A estabilização física é efetuada por meio da compactação e/ou adequação da granulometria do material. Já na estabilização química, para a melhoria do solo, um aglomerante hidráulico é adicionado (Bernucci *et al.*, 2008). Alternativamente, pode-se também combinar mais de um tipo de estabilização e de aditivos em busca de melhores materiais.

Cada tipo de estabilização atua a partir de mecanismos particulares, assim, (a) na estabilização mecânica, o esforço de compactação comprime o solo, diminuindo os vazios, a permeabilidade e a compressibilidade, e aumentando a densidade, a resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte; (b) na estabilização granulométrica, a combinação de diferentes frações/materiais modifica a graduação e a textura do material, garantindo uma mistura mais densa e menos permeável, com ganhos também em propriedades físicas, como a redução da expansão; e, (c) na estabilização química, um aditivo aglomerante reage quimicamente com o material, cimentando partículas (ou conjunto delas), melhorando a textura e a expansão dos materiais originais e aumentando suas resistência e rigidez (Pupalla *et al.*, 2015).

A escolha do tipo de ligante hidráulico depende do tipo de solo a ser melhorado e do ganho de propriedades que se almeja (Pupalla *et al.*, 2015). As misturas solo-agregado-cimento (SAC) combinam as estabilizações granulométrica e química, porque é necessário, primeiramente, proporcionar os materiais (solo e agregados) e, depois, encontrar o teor de cimento que leve à resistência exigida em projeto. As resistências dessas misturas são presumidamente mais altas devido à presença do cimento.

De modo geral, nas misturas cimentadas, o material ganha resistência devido à hidratação dos componentes do cimento. O cimento é composto tipicamente por: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF). Na hidratação, os vazios ocupados antes pela água passam a ser ocupados por agentes cimentantes, como os silicatos hidratados de cálcio e alumínio (Mehta e Monteiro, 2008). Sabe-se que alguns compostos são preponderantes para o ganho de resistência, como o C_3S e o C_2S . Porém, o C_3S aumenta a resistência em curto prazo (~28 dias), e o C_2S em longo prazo (1 ano) (Balbo, 2007).

Devido aos diferentes tempos de reação para formação dos compostos cimentantes, é importante avaliar o ganho de resistência em diferentes tempos de cura. Parente *et al.* (2002), por exemplo, observaram que a resistência à compressão de misturas de solo com 7% de cimento aumentou de 6,0 MPa para 7,5 MPa, num período de cura de 7 para 28 dias. Bahar *et al.* (2004) também concluíram que a resistência à compressão de misturas solo com 6% de cimento aumentou com o tempo de cura (de 2,5 para 3,5 MPa). Aranha (2013), analisando as propriedades mecânicas de misturas recicladas de solo-agregado com 6% de cimento, encontrou que a resistência à compressão aumentou de 8,0 para 10 MPa, para tempos de cura de 7 e 28 dias. É importante destacar que, em termos absolutos, as resistências das misturas SAC de Aranha (2003) foram maiores que as das misturas solo-cimento de Parente *et al.* (2002) e Bahar *et al.* (2004); o que se explica como uma contribuição do esqueleto pétreo das misturas SAC, que podem conter até 40% de agregado pétreo na sua composição granulométrica (DER-SP, 2006a). Sanbonsuge *et al.* (2017) concluíram que a resistência aumentou ao longo do tempo de cura, sendo que 70 a 80% da resistência final (aos 28 dias) foi encontrada aos 7 dias.

Por outro lado, a hidratação do cimento leva à retração do produto cimentado, induzindo à formação de fissuras e trincas, que modificam as características originais da mistura, tornando-a mais frágil, porosa e mais suscetível a danos por fadiga. As fissuras por retração formam-se em função da quantidade de C_3S e C_3A , que exigem maior quantidade de água para apresentarem maior trabalhabilidade (Balbo, 2007).

Balbo (1993) recomendou o aumento da energia de compactação para melhores resultados da estabilização com cimento. Nesse sentido, Bahar *et al.* (2004) e Aranha (2013) analisaram o comportamento mecânico de misturas SAC compactadas em diferentes energias. Bahar *et al.* (2004) concluíram que o aumento da energia, normal para a modificada, levou a um aumento importante na massa específica seca máxima, da ordem de 10%, e uma diminuição na umidade ótima, da ordem de, 20%. Aranha (2013), por sua vez, observou um aumento da ordem de 50% na resistência à compressão devido ao aumento da energia de compactação.

Outra variável importante é o tipo de cimento. Silvestre Júnior (2002) estudou a influência do tipo de cimento (CP III-40, CP II-E 32 e o CPV-ARI) em misturas SC. O autor observou que, aos 28 dias, o ganho de resistência das misturas com CP III-40 foi 11% maior do que o das misturas com CP II-E 32, e 23% em relação às com CP V-ARI. Contudo, as misturas com CP V-ARI apresentaram as maiores resistências aos 7 dias de cura. Essa particularidade relacionada ao tipo de cimento poderia mudar o teor de projeto.

A seleção do teor de cimento depende, dentre outros fatores, do tipo de solo e da resistência que se deseja atingir (Puppala *et al.*, 2015). Teores de cimento entre 3% e 9% são os mais recorrentes. Em geral, o aumento do teor de cimento provoca um aumento tanto na resistência quanto na rigidez das misturas cimentadas (Parente *et al.*, 2002; Bahar *et al.*, 2004; Aranha, 2013; Sanbonsuge *et al.*, 2017 e Ban e Park, 2014). Parente *et al.* (2002) observaram ganhos de resistência de 200%, ao elevar o teor de cimento de 4% para 7%, e de 25%, para o aumento do teor de cimento de 7% para 10%. Com isso, os autores concluíram que há um teor ótimo de cimento que, se ultrapassado, não deve levar a incrementos significativos da propriedade.

Uma questão a ser resolvida para as misturas SAC se relaciona à dosagem. Na dosagem, busca-se o teor de cimento ideal para atingir as necessidades de projeto. No Brasil, existem normas que instruem a dosagem de misturas solo-cimento (SC) e brita graduada tratada com cimento (BGTC), mas, não há uma norma específica para dosagem da SAC.

A ET-DE-P00/007 (DER-SP, 2006a), referente às misturas SAC, recomenda que o teor de cimento a ser utilizado seja aquele que conferir à mistura a resistência definida em projeto de pavimentação; sendo, minimamente, necessário entender o nível de tensões atuantes na camada do material em dada estrutura, para obter o valor de resistência que a mistura deve apresentar. Esse tipo de estudo associa a propriedade dos materiais às exigências de campo.

Algumas pesquisas contribuíram para o entendimento da resposta estrutural dos pavimentos em condições variadas de seção, composição e espessura de camadas (Suzuki, 1992; Fernandes Junior, 1994; Franco, 2007; Fabbri e Furlan, 2016; Fritzen, 2016). Resultados de estudos desta natureza auxiliam na tomada de decisão sobre o tipo de material que deve ser usado.

Assim, este artigo apresenta um estudo laboratorial do comportamento mecânico de misturas SAC, compostas por dois tipos de cimento, e confronta as propriedades mecânicas com valores de tensões atuantes em bases cimentadas de pavimentos hipotéticos, na tentativa de nortear a seleção do teor de cimento desse tipo de mistura.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo desta pesquisa foi contribuir para a dosagem de misturas SAC e para o entendimento do seu comportamento mecânico, considerando os efeitos da variação do tipo e do teor de cimento, e do tempo de cura. O programa experimental desta pesquisa considerou três fases:

- 1ª. Fase: caracterização dos materiais (solo, agregado e cimentos) e composição granulométrica da mistura (estabilização granulométrica);
- 2ª. Fase: caracterização mecânica e análise dos resultados dos ensaios de compactação e de resistência à compressão simples (RCS) e à tração por compressão diametral (RTCD);

- 3ª. Fase: apreciação do nível de tensões atuantes em pavimentos hipotéticos e estudo do teor de cimento que satisfaça as condições de contorno.

2.1. Caracterização dos Materiais

2.1.1. Solo

O solo utilizado nessa pesquisa foi coletado do talude da Rodovia Professor Luís Augusto Oliveira, SP-215 - km 152+500, no município de São Carlos-SP. O material foi coletado acima da linha de seixos. A Tabela 1 apresenta um resumo da caracterização do solo feita por Kakuda (2010) e nesta pesquisa.

Tabela 1: Caracterização do solo

Características físicas			Propriedades de Compactação	
	Kakuda(2010)	Esta pesquisa	Kakuda(2010)	Esta pesquisa
Limite de liquidez	34	33	ρ_s (g/cm³)	2,663
Limite de Plasticidade	21	19	ρ_d (g/cm³) – Energia Normal	1,905
Índice de Plasticidade	13	14	wótima (%) – Energia Normal	13,2
% Passante na #200	34	30	ρ_d (g/cm³) – Energia .Modificada	2,068
Areia (%)	66		wótima (%) - Energia.Modificada	10,4
Silte (%)	13			
Argila (%)	22		CBR (%) - G.C. = 99,3%	115%
Classificações	TRB: A-2-6	USCS: SC	MCT: LA'	

A caracterização foi feita por meio de ensaios de análise granulométrica, de determinação dos limites de Atterberg e massa específica aparente e ensaio de compactação na energia normal e modificado, para determinação da massa específica seca máxima e umidade ótima. O solo foi também classificado de acordo com os métodos HRB, USCS e MCT. Com isso, foi possível confirmar que se trata do mesmo solo de Kakuda (2010).

2.1.2. Agregados

O agregado utilizado foi fornecido pelo Grupo Bandeirantes. Tratam-se de agregados de natureza basáltica, que foram coletados em duas frações granulométricas: pedrisco+pó e brita 1 fina. Os ensaios de caracterização física são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da caracterização do agregado utilizado.

Características físicas do agregado		
	Valor	Norma
Abrasão Los Angeles (%) – limite: máximo de 55%	17	DNER-ME 035/98
Densidade aparente do agregado graúdo (g/cm³)	2,783	DNER-ME 081/98
Absorção do agregado graúdo (%)	2,2	DNER-ME 081/98
Índice de forma – (%) lamelar	8	ABNT NBR 7809

Granulometria das frações					
Porcentagem passada (%)					
Peneiras (mm)		Pedrisco+pó	Brita 1 (fina)		
25,4	100		100		
9,52	100		22,01		
4,76	94,31		0		
2,00	52,49		0		
0,42	24,14		0		
0,074	9,64		0		

2.1.3. Mistura solo-agregado-cimento (SAC)

A composição das misturas SAC foi enquadrada na Faixa II da especificação técnica de solo-brita-cimento ET-DE-P00/007 (DER-SP, 2006a) e na Faixa III do DER-SP. As proporções dos materiais foram as seguintes: 20% de solo e 80% de agregado (sendo 33% de pedrisco+pó e 47% de brita 1 fina). A curva granulométrica da mistura, bem como o centro e os limites da faixa II estão ilustrados na Figura 1.

Os teores de cimento escolhidos foram de 3%, 5% e 7% (incorporados em massa às misturas). Vale destacar que os cimentos são materiais muito finos que, quando adicionado às misturas, alteram a porcentagem passada na peneira de abertura 0,074mm. Contudo, como o teor de cimento máximo é de 7%, ainda se enquadra na faixa II, porque o limite superior é de 20%.

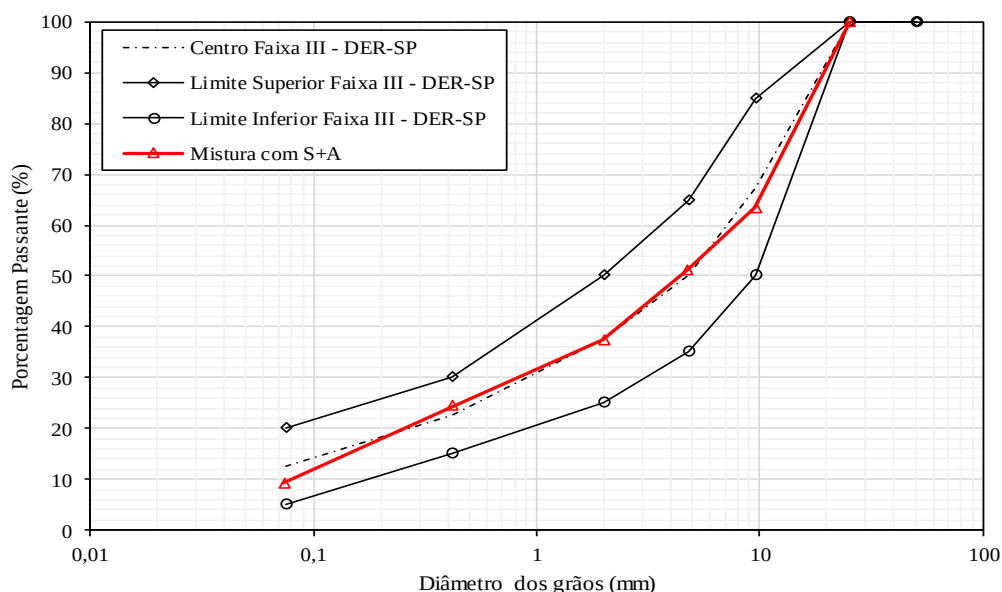


Figura 1: Curva granulométrica da mistura de SAC (20/80).

2.1.4. Cimentos

Os cimentos escolhidos para esta pesquisa foram o CP II-Z-32 e o CP V-ARI. O CP II-Z-32 é um cimento Portland composto, contendo de 6 a 14% de material pozzolânico e até 10% em massa de fíler. O CP V-ARI é composto por 95 a 100% de clínquer, e 0 a 5% de material carbonático. No laboratório, o material foi quarteado e armazenado em sacos vedados e acondicionados em recipiente fechado.

2.2. Caracterização mecânica: Métodos

O programa experimental sobre propriedades mecânicas das misturas SAC contemplou a avaliação da resistência à compressão e da resistência à tração. Devido à importância da cura no ganho de propriedades, as misturas com cimento Portland foram testadas em diferentes tempos de cura: 0, 7 e 28 dias.

Foram testados 3 teores de cimento para avaliar o efeito do aumento do teor nas propriedades das misturas. Assim, foi executado um ensaio de compactação para cada teor de cimento, na energia modificada, a fim de determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima. Todos os corpos de prova foram produzidos obedecendo a um controle de qualidade de: grau de compactação (GC) de $100 \pm 1\%$, e desvio de umidade de $\pm 0,5\%$.

2.2.1. Resistência à compressão simples (RCS)

Para o ensaio de resistência à compressão simples, foram moldados três corpos de prova por condição experimental, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (relação 2:1). O ensaio foi realizado com base na norma de solo-cimento DNER-ME 201/94. A cura ocorreu em câmara úmida. Os corpos de prova foram rompidos em uma prensa com capacidade de 10000 kgf e a velocidade de aplicação de carga foi de 1,27 mm/min.

2.2.2. Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) foi realizado com base na norma DNER-ME 138-94. A dimensão dos corpos de prova foi de 10,2 cm de diâmetro e 6,7 cm de altura, também foram moldados três corpos de prova por condição experimental. A cura ocorreu em câmara úmida. Os corpos de prova foram rompidos em uma prensa com capacidade de 10000 kgf e a velocidade de aplicação foi de carga de 1,27 mm/min.

2.3. Análise das tensões em pavimentos

A especificação técnica das misturas SAC, ET-DE-P00/007 (DER- SP, 2006a), não instrui sobre a dosagem, mas recomenda obedecer à resistência indicada no projeto do pavimento. Por isso, foi feita uma avaliação do estado de tensões de pavimentos hipotéticos, a fim de suportar a seleção o teor de cimento da SAC.

Com base no método do DNIT e na IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006b), foram dimensionados pavimentos hipotéticos compostos por: uma camada de revestimento, uma camada de base cimentada (simulando a mistura SAC) e, eventualmente, uma subbase, assentados sob dois tipos diferentes de subleito, um arenoso e um argiloso. Dois valores de módulo de resiliência da base cimentada foram usados, a fim de observar o efeito dessa mudança nas tensões e deformações resultantes.

Foram adotados dois níveis de tráfego: pesado ($N = 5 \times 10^7$) e muito pesado ($N = 3 \times 10^8$). Desta maneira, oito pavimentos foram analisados. Os dados de entrada utilizados estão resumidos na Figura 2.

Tráfego: $N=5 \times 10^7$		Tráfego: $N=3 \times 10^8$	
Capa			
MR= 4000 MPa	$\nu=0,35$		
Espessura: 12,5 cm		Espessura: 15 cm	
Base			
MR= 7000 e 10000 MPa		$\nu=0,20$	
Espessura: 17cm			
Subbase		Subbase	
MR= 220MPa	$\nu=0,35$	MR= 220MPa	
Espessura: 18 cm		Espessura: 28 cm	
Subleito arenoso		Subleito argiloso	
MR= 200 MPa		MR= 67 MPa	
$\nu=0,40$		$\nu=0,45$	

Figura 2: Configuração dos pavimentos hipotéticos

Para a verificação mecanicista, foi utilizado o software mePADS (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Design Software*), que fornece a vida útil da camada do pavimento e gráficos de contornos de tensões e deformações. As tensões e deformações foram calculadas

no topo do revestimento, na fibra inferior do revestimento, na fibra inferior da base cimentada e no topo do subleito. O carregamento utilizado nas simulações foi um semi-eixo com rodas duplas, distantes 300 mm uma da outra, com cargas de 20.000 N cada e com pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação das misturas de SAC foram realizados na energia do Proctor modificado, que é a energia recomendada para bases de pavimentos. A Figura 3 apresenta as curvas de compactação de todas as misturas testadas, onde se pode observar que, em geral, as curvas das misturas com CP V-ARI estão sempre acima das misturas com CP II-Z 32, indicando maiores massas específicas. Para melhor visualização, a Tabela 3 mostra um resumo dos valores obtidos da umidade ótima ($w_{ótima}$) e as correspondentes massas específicas seca máxima ($\rho_{d\ max}$).

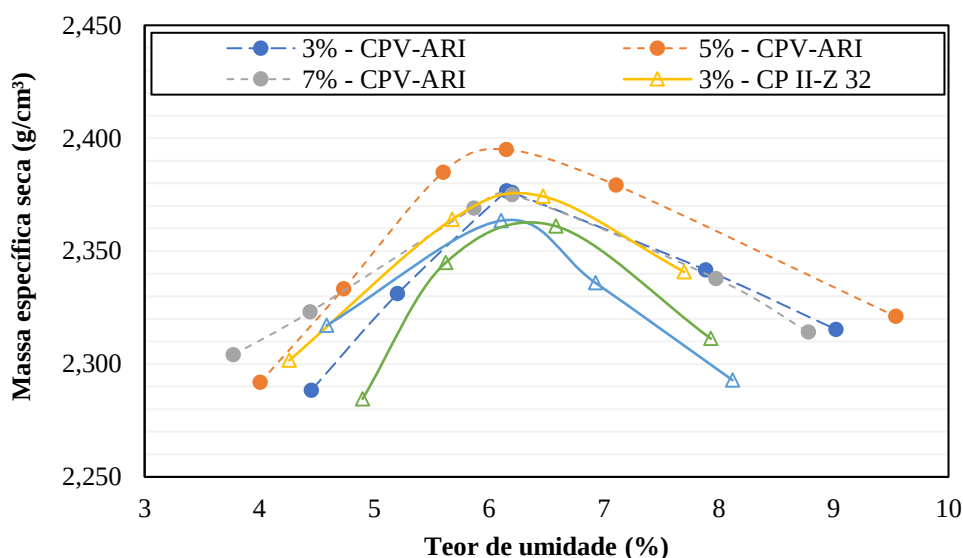


Figura 3: Curvas de compactação das misturas SBC estudadas.

Tabela 3: Valores da $w_{ótima}$ e ρ_d na energia modificada do ensaio Proctor.

Energia de compactação		Proctor modificado					
Tipo de cimento		CP II-Z-32			CP V-ARI		
Teor de cimento (%)		3	5	7	3	5	7
$\rho_{d\ max}$ (g/cm³)		2,376	2,364	2,366	2,376	2,395	2,375
$w_{ótima}$ (%)		6,20	6,15	6,20	6,20	6,15	6,20

Os valores da Tabela 3 mostram que as $w_{ótima}$ das misturas testadas são muito parecidas, podendo ser consideradas iguais. Contudo, em relação às $\rho_{d\ max}$, a diferenciação é possível, porque todas as misturas com CPV-ARI apresentaram maiores propriedades que as com CP II-Z 32. Isso pode ser explicado pelo maior envolvimento das partículas do solo com o cimento, visto que o CPV-ARI é mais fino e pode atuar envolvendo aglomerados de solo e preenchendo parcialmente os vazios da mistura.

Observa-se também que $\rho_{d \max}$ das misturas com CPV-ARI encontrou o maior valor no teor de 5%. Já as misturas com CP II-Z 32 não exibiram tendência clara.

3.2. Resistência à compressão simples (RCS)

A Tabela 4 apresenta os valores médios (de 3 corpos de prova) obtidos do ensaio de resistência à compressão simples (RCS). Os valores de RCS indicam que o tipo de cimento é uma variável importante na propriedade, inclusive para a condição sem cura. De modo geral, as misturas com CP V-ARI apresentaram maiores RCS e ganhos de RCS, como se pode observar da Tabela 4. Quanto ao teor do cimento, observa-se que aumentar o percentual de cimento aumenta o valor de RCS para os dois tipos de cimento, sendo que ganho de RCS para o aumento do teor de 3 para 5%, foi ~50%, e de 25%, de 5 para 7%.

Quanto à cura, observou-se que, de 0 para 28 dias, houve aumento de RCS, contudo, cada cimento levou a ganhos particulares de resistência; por exemplo, o ganho de RCS da mistura com 5% CP V-ARI foi de ~6,0 MPa, no período de 0-7 dias, e de ~0,4 MPa no período de 7-28 dias. Já as misturas com 5% de CP II-Z 32, o ganho de RCS, no período de 0-7 dias, foi de ~5,0 MPa e de ~1,2 MPa no período de 7-28 dias.

Tabela 4: Valores médios da resistência à compressão simples (MPa) das misturas

Tipo de cimento	Teor (%)	RCS (MPa) para diferentes tc (dias)			Ganho de RCS (MPa) no período	
		0	7	28	0 a 7 dias	7 a 28 dias
CP II-Z 32	3	0,17	2,80	3,55	2,63	0,75
	5	0,21	5,11	6,32	4,90	1,21
	7	0,21	7,16	7,81	6,95	0,65
CP V-ARI	3	0,28	3,54	3,91	3,26	0,37
	5	0,32	6,35	6,72	6,03	0,37
	7	0,31	8,33	8,86	8,02	0,53

Para melhor visualização, a Figura 4 mostra as curvas de RCS x tempo de cura. Nela pode se observar que as misturas com CP V-ARI sempre apresentaram maiores valores de RCS em relação às misturas com CP II-Z 32.

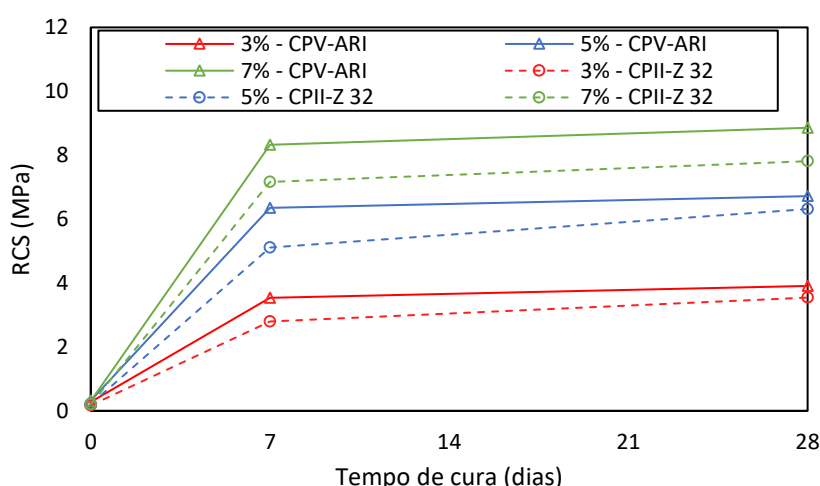


Figura 4: RCS das misturas SAC ao longo do tempo de cura.

O distanciamento entre as curvas mostra, indiretamente, que o aumento do teor de cimento promove maiores ganhos de RCS para dado tempo de cura (7 dias). Como comentado a partir

dos valores da Tabela 4, as misturas com CP II-Z 32 parecem ter um ganho discretamente maior de RCS, entre 7 e 28 dias, que as misturas com CP V-ARI.

Quanto ao tempo de cura, observa-se que o CPV-ARI levou a maiores ganhos de resistência no período entre 0 e 7 dias. A taxa de ganho RCS da mistura com 5% de CP V-ARI, assumindo linearidade, foi de 0,85 MPa/dia, enquanto que para as misturas com 5% de CP II Z 32, a taxa foi de 0,70 MPa/dia. Uma particularidade do CP V-ARI é que entre 7 e 28 dias a taxa se estabiliza e foi menor que a das misturas com CP II -Z 32.

3.2. Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Os valores médios (de 3 corpos de prova) obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) estão apresentados na Tabela 5. Os valores de RTCD indicam a mesma tendência observada para RCS, ou seja, o aumento da propriedade em função (a) da adição de cimento (independentemente do tipo), (b) do aumento do teor do cimento, e (c) ao longo de do tempo de cura.

Tabela 5: Valores médios da resistência à tração por compressão diametral (MPa).

Tipo de cimento	Teor (%)	Tempo de cura (dias)			Ganho de RTCD (MPa) no período	
		0	7	28	0 a 7 dias	7 a 28 dias
CP II-Z 32	3	0,03	0,66	0,73	0,63	0,07
	5	0,03	1,03	1,26	1,00	0,23
	7	0,03	1,63	1,72	1,60	0,09
CP V-ARI	3	0,03	0,62	0,91	0,59	0,29
	5	0,04	1,36	1,5	1,32	0,14
	7	0,05	1,42	2,18	1,37	0,76

No que se refere à RTCD_{imediata}, as misturas com CP II-Z 32 não apresentaram mudanças nos valores da propriedade com o aumento do teor de cimento. Já as misturas com CP V-ARI, há o aumento de 25% e de 20% em RCS, com o aumento do teor de cimento de 3%, para 5% e de 5% para 7%, respectivamente. Essa pode ser uma contribuição da granulometria CP V-ARI e da variação do percentual de finos (0,074mm) da curva granulométrica da mistura.

A Figura 5 ilustra o comportamento de RTCD das misturas ao longo do tempo de cura. A RTCD exibiu comportamento particular e diferente da RCS, sem tendência clara. Contudo, nota-se uma variação do ganho de resistência se considerada a análise conjunta dos fatores. Por exemplo, para a maioria das misturas testadas, o incremento de RTCD continua a acontecer no período de 7 a 28 dias, ao contrário do que se notou para RCS. Isso se observa nas curvas das misturas com 3 e 7% de CP V-ARI. Uma explicação para esse comportamento pode estar relacionada aos aditivos do cimento. No cimento CP V-ARI, encontram-se materiais carbonáticos, que aumentam a velocidade de reação para formação de agentes cimentantes.

Essas constatações podem ser úteis na prática, uma vez que o tempo de cura é questão complexa e o pavimento não pode receber esforços do tráfego para não prejudicar desenvolvimento da cimentação. Entretanto, como o parâmetro de projeto para as misturas SAC é a resistência característica, admitida pelo projetista, talvez seja interessante escolher o tipo de cimento focalizando maior resistência num tempo menor de cura, o que impactaria no tempo de “operações pare-siga” de trechos em manutenção/reconstrução, principalmente, os que envolvem processos de reciclagem.

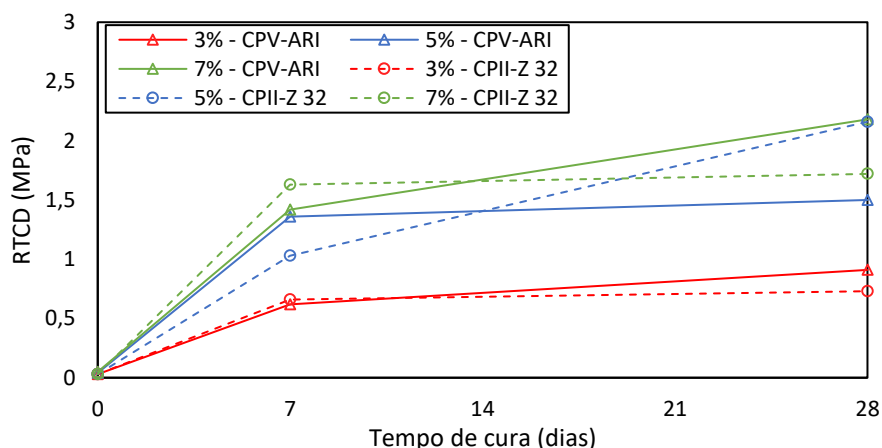


Figura 5: Resistência à tração por compressão diametral das misturas.

Para entender melhor o comportamento mecânico das misturas SAC, a Tabela 6 apresenta um resumo das relações RTCD/RCS. De modo geral, as relações RTCD/RCS variaram entre 0,11 e 0,25; com tendência a exibir maiores valores a partir dos 7 dias de cura, em média, de 0,20xRCS.

Tabela 6: Relações RT/RCS das misturas testadas.

Tipo de cimento	Teor (%)	RT/RCS para diferentes tc (dias)		
		0	7	28
CP II-Z 32	3	0,17	0,24	0,21
	5	0,14	0,20	0,20
	7	0,15	0,23	0,22
CP V-ARI	3	0,11	0,18	0,23
	5	0,13	0,21	0,22
	7	0,16	0,17	0,25

Os valores de RTCD/RCS desta pesquisa são diferentes de outros tipos de misturas cimentadas. Em misturas do tipo solo-cimento (SC), a relação é da ordem de 0,10. Esse valor foi superado pelas misturas SAC desta pesquisa. No entanto, os valores desta pesquisa encontram concordância com os dados de Aranha (2013), que observou, para misturas de solo-brita reciclada com 7% de cimento, RTCD/RCS de 0,14 e 0,28, aos 7 e 28 dias de cura, respectivamente.

3.3. Escolha do teor de cimento das misturas SAC

Os resultados da análise mecanicista para as diferentes configurações de pavimento e tráfego são apresentados na Tabela 7, nela se observa que os valores de tensão de compressão (σ_{vc}) na base cimentada variaram entre 0,021 e 0,032 MPa, já a tensão de tração (σ_{ht}), os valores variaram entre 0,359 e 0,551 MPa. Esses valores foram confrontados com as resistências das misturas SAC e observou-se que:

- Os valores da tensão de compressão são muito baixos quando comparados aos valores de RCS das misturas curadas (entre 2,8 e 8,8 MPa);
- Os valores da tensão de tração são relativamente altos, e, se comparados aos valores de RTCD das misturas curadas, nota-se que a RTCD das misturas com 3% de cimento aos 7 dias de cura (0,66 e 0,62 MPa) se aproxima da σ_{ht} de 0,551 MPa;
- As misturas sem cura, apresentam valores de RCS superiores ao valor mais alto de σ_{vc} , mas, RTCD inferiores ao valor mais alto de σ_{vc} .

Tabela 7: Nível de tensão atuantes na base cimentada.

Tráfego	Estrutura do pavimento	$\sigma_{h,t}$ na fibra inferior da base (MPa)	$\sigma_{v,c}$ na fibra inferior da base (MPa)	$\sigma_{v,c}$ no topo do subleito (MPa)
N=5x10 ⁷ ecapa=12,5cm	Capa, base 7000MPa, subleito arenoso	0,400	-0,032	-0,032
	Capa, base 7000MPa, subbase, subleito argiloso	0,470	-0,023	-0,015
	Capa, base 10000MPa, subleito arenoso	0,471	-0,029	-0,029
	Capa, base 10000MPa, subleito argiloso	0,551	-0,021	-0,014
N=3x10 ⁸ ecapa=15cm	Capa, base 7000MPa, subleito arenoso	0,359	-0,029	-0,029
	Capa, base 7000MPa, subbase, subleito argiloso	0,404	-0,023	-0,012
	Capa, base 10000MPa, subleito arenoso	0,424	-0,026	-0,026
	Capa, base 10000MPa, subleito argiloso	0,477	-0,021	-0,011

A ET-DE-P00/007 (DER-SP, 2006a) exige que teor de cimento utilizado confira à mistura as resistências à compressão e à tração, aos 28 dias, especificadas no projeto do pavimento. A partir disso, concluiu-se que, para ambos os cimentos testados, o teor de cimento de 5% é suficiente para a estabilização da mistura SAC deste estudo.

4. CONCLUSÕES

Os comportamentos mecânico e estrutural das misturas SAC podem ser garantidos a partir da adequada seleção dos materiais e de um processo de dosagem eficiente. Cada tipo de mistura se comporta de modo particular porque depende, dentre outras variáveis, do esqueleto solo-agregado e dos agentes cimentantes produzidos na hidratação do cimento. Esta pesquisa buscou compreender o comportamento mecânico de misturas SAC, compostas por dois cimentos (CP V-ARI e CP II-Z 32), com objetivo de contribuir para melhores práticas na dosagem deste tipo de mistura. Os resultados levam a concluir que:

- Do ponto de vista mecânico: embora todas as misturas SAC tenham exibido altos valores de resistência (RCS e RTCD) ao longo do tempo, as misturas com CP V-ARI apresentam vantagens quanto ao ganho de resistência inicial (7 dias), o que favoreceria a eficiência de produção;
- Do ponto de vista estrutural, as misturas SAC apresentam RCS muito superiores ao nível de tensão vertical de compressão de pavimentos hipotéticos (tráfego pesado e muito pesado), porém, com relação aos níveis de tensão horizontal de tração, recomenda-se cautela, porque as misturas com teores mais baixos (3%) e tempo menor de cura (7d) apresentam valores de RTCD muito próximos dos calculados;
- No que se refere à dosagem, a associação das análises mecânica e estrutural permitiu recomendar o teor de 5%, para ambos os cimentos, como sendo suficiente para as condições de contorno do dimensionamento e abrangendo a análise conjunta das resistências à compressão e à tração.

Por fim, deve-se ressaltar que essas constatações se baseiam em simulações e ensaios laboratoriais e que os pavimentos em serviço apresentam características elásticas e configurações de carregamento diferentes das adotadas, sendo, portanto, desaconselhada interpolações e adaptações para esses fins.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) – Projeto Universal 435885/2018-9.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranha, E. B. (2013) *Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos* (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Bahar, R.; Benazzoug, M. e Kenai, S. (2004) Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 7, p. 811–820.
- Balbo, J. T. (1993) *Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos*. (Tese - Doutorado em Engenharia) -Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2007.
- Ban, H. e Park, S.W. (2014) Characteristics of modified soil-aggregate system and their application in pavements. *ASCE Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 6, p. 1672–1678.
- Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2008) *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Editora Petrobras Abeda. Rio de Janeiro.
- Ceratti, J. A. P. (1991) *Estudo de comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos*. (Tese-Doutorado em Engenharia) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- DER-SP (2006a) ET-DE-P00/007B – *Sub-base ou base de solo-brita-cimento*. Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DER-SP (2006b) – IP-DE-P00/001 - *Instrução de projeto de pavimentação*. Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- Fabbri, G. T. P. e Furlan, A. P. (2016) In situ Pavement Layer Properties Using Artificial Neural Networks. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 21.18, p. 6013-6024.
- Fernandes Junior, J.L. (1994) *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. (Tese-Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Franco, F.A.C.P. *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV*. (2007) (Tese- Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fritzen, M. A. (2016) *Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos*. (Tese – Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Kakuda, F. M. (2010) *Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico*. (Tese – Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M. (1994) *Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais*. Editora Pini, São Paulo, SP.
- Parente, E. B.; Parreira, A. B. e Soares, J.B. (2002) Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento. *XVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes*, p. 95-107.
- Puppala, A.J.; Perdala, A. e Bheemasetti, T. (2015) *Chapter 10 - Soil Modification by Admixtures: Concepts and Field Application - Ground Improvement Case Histories Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering*. Editora: Butterworth-Heinemann, Oxônia, Reino Unido.
- Sanbonsuge, K.; Vasconcelos, K.; Bernucci, L. e De Moura, E. (2017) Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento. *Transportes*, v. 25, n. 4, p. 68.
- Silvestre Júnior, O. B. (2002) *Fosfogesso estabilizado com cimento para aplicação na construção rodoviária – a influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade da estrutura da mistura*. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Suzuki, C. Y. e Domingues, F. A. A. (1992) Considerações sobre o comportamento de Pavimentos Rodoviários com Estrutura Invertida *Boletim Técnico EPUSP*, São Paulo, v. 5. 1-25.

Júlia Patrocínio da Silva Coccoza Simoni (julia.simoni@usp.br)

Luíza Rijo Valoura (luizarijov@usp.br)

Ana Paula Furlan (afurlan@sc.usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – São Carlos, SP, Brasil