

APROVEITAMENTO DA CINZA PESADA DE CARVÃO MINERAL NA CONSTRUÇÃO DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Rodrigo Pires Leandro

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Civil

Glauco Tulio Pessa Fabbri

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Nas termelétricas, a produção de energia é obtida a partir da queima do carvão mineral, resultando dois subprodutos: a cinza leve e a cinza pesada. Por não existir aproveitamento adequado, a cinza pesada é armazenada em bacias de sedimentação, causando problemas ambientais. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico, para fins de uso em camadas de pavimentos, de misturas de cinza pesada com diferentes tipos de solos, levando-se em consideração, a conveniência da adição de cal e o efeito do tempo de cura. Os ensaios utilizados foram os de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e de CBR. Os resultados indicaram que as misturas de solo-cinza pesada não são adequadas para uso como camadas de pavimentos e que a adição de 3% de cal melhora substancialmente o comportamento dessas misturas solo-cinza, possibilitando o aproveitamento da cinza na construção de pavimentos rodoviários.

ABSTRACT

The burning of the mineral coal in the power thermal plants produce heading steam to generate electricity. It results in two sub-products: fly ash and bottom ash. There is no adequate utilization for the bottom ash. Thus, it is deposit in the lagoons and is harmful to the environment. Therefore, the purpose this research was to evaluate the mechanic behavior of the soils-bottom ash and soils-bottom ash-lime mixtures. Besides, was verified the influence of the cure period in the property of the mixtures. The tests utilized were unconfined compressive strength and indirect tensile strength. California Bearing Ratio was accomplishing such supplementary test. The addition of the 3% of the lime to soil-bottom ash mixtures provided better mechanical performance offering a feasible solution for the use of this waste in road construction.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção de cinza pesada, oriunda da queima do carvão mineral, está concentrada na região Sul, sobretudo nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Somente no Estado de Santa Catarina, a produção anual de cinzas alcança 818.000t, sendo que 30% desse total, aproximadamente 245.400t, é correspondente à cinza pesada, (Rocha *et al.*, 1999). Nos Estados Unidos, a produção de cinza pesada no ano de 1996 alcançou 16.100.000t (FHWA, 1998). Com o aumento da demanda de energia elétrica e com a perspectiva de instalação de novas usinas termelétricas a carvão, ocorrerá, conseqüentemente, aumento na produção de cinzas.

As pesquisas direcionadas ao aproveitamento das cinzas tornaram possível seu emprego na construção civil e, sobretudo, da cinza leve na fabricação do cimento *Portland* pozolânico. Contudo, a cinza pesada não apresenta o mesmo aproveitamento, sendo depositada em bacias de sedimentação, ficando o resíduo sujeito a processos de lixiviação de metais pesados, podendo contaminar o lençol freático e o solo da região. Outro problema desse método de descarte é a poeira silicosa, resultante da ação do vento sobre a superfície das bacias, que atinge a população residente próximo às instalações. Esses fatores são empecilhos à instalação de novas unidades termelétricas cujo combustível seja o carvão mineral. Deste modo, é importante que novas investigações sejam desenvolvidas no sentido de procurar novas

aplicações para a cinza pesada, reduzindo, assim, os impactos ambientais, além de reduzir os custos de disposição em bacias de sedimentação.

O objetivo principal desse trabalho foi investigar os efeitos da cinza pesada proveniente da Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no Sul do Estado de Santa Catarina, quando incorporada a solos, através de ensaios laboratoriais, visando o aproveitamento deste resíduo na construção de bases e sub-bases de pavimentos. Também foi avaliado o efeito da adição de cal às misturas solo-cinza e a ocorrência de reações pozolânicas ao longo do tempo.

2. CINZA PESADA

A cinza pesada é um material granular, poroso, com distribuição granulométrica predominantemente de areia. Essa cinza resulta da queima do carvão mineral pulverizado no interior das caldeiras de combustão das usinas termelétricas. Ela é gerada a partir da aglomeração dos grãos semifundidos que se depositam no fundo das caldeiras e são transportados por arraste hidráulico até as bacias de sedimentação.

2.1. Características químicas

A cinza pesada é composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de cálcio, magnésio, sulfatos e outras combinações. A composição química desse tipo de material depende principalmente da fonte de carvão mineral. Cinzas derivadas de linhitas ou carvões sub-betuminosos têm uma porcentagem maior de cálcio do que as cinzas derivadas de antracito ou carvão betuminoso (FHWA, 1998).

No Brasil, Nardi (1988) e Rocha *et al.* (1999) caracterizaram quimicamente a cinza pesada proveniente da Usina Termelétrica Jorge Lacerda. Os resultados obtidos revelaram que esta cinza também é essencialmente constituída por uma composição sílico-aluminosa (Rocha, 1999) ou sílico-ferrosa-aluminosa (Nardi, 1988), sendo que o somatório dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ correspondem praticamente à totalidade em peso dos componentes óxidos em sua composição química. A tabela 1 apresenta os resultados da análise química das cinzas pesadas da Usina Termelétrica Jorge Lacerda e da usina americana de *Mitchell*.

Tabela 1: Composição química da cinza pesada proveniente da Usina Termelétrica Jorge Lacerda (Nardi, 1988; Rocha 1999) e de *Mitchell* (Lovell *et al.*, 1991).

Elementos	Procedência da Cinza Pesada		
	Usina Jorge Lacerda (Brasil)		Usina <i>Mitchell</i> (EUA)
	Nardi (1988)	Rocha (1999)	Lovell <i>et al.</i> (1991)
	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	41,30	56,98	51,30
Fe ₂ O ₃	30,30	5,80	6,50
Al ₂ O ₃	18,90	26,73	14,20
CaO	1,40	0,84	8,50
MgO	0,60	0,59	3,00
K ₂ O	1,80	2,59	0,90
Na ₂ O	0,24	0,25	0,30
SO ₃	-	-	1,0
Perda ao fogo	4,00	4,61	8,00

2.2. Características físicas

Segundo o FHWA (1998), as cinzas apresentam partículas com textura superficial muito porosa. O tamanho destas partículas varia de pedregulho a areia, com baixa porcentagem de finos.

A figura 1 mostra a faixa granulométrica obtida por Lovell *et al.* (1991) para as cinzas pesadas coletadas nas usinas termelétricas do estado americano de Indiana. Nesta figura também são apresentadas as distribuições granulométricas das cinzas pesadas da usina Jorge Lacerda estudada por Rocha (2001) e por Leandro (2002). Nela é possível verificar que as distribuições granulométricas das cinzas pesadas estudadas por Rocha (2001) e Leandro (2002) não se enquadram na faixa granulométrica determinada por Lovell *et al.* (1991). Isto se deve, provavelmente, às diferentes características dos carvões empregados no processo de queima.

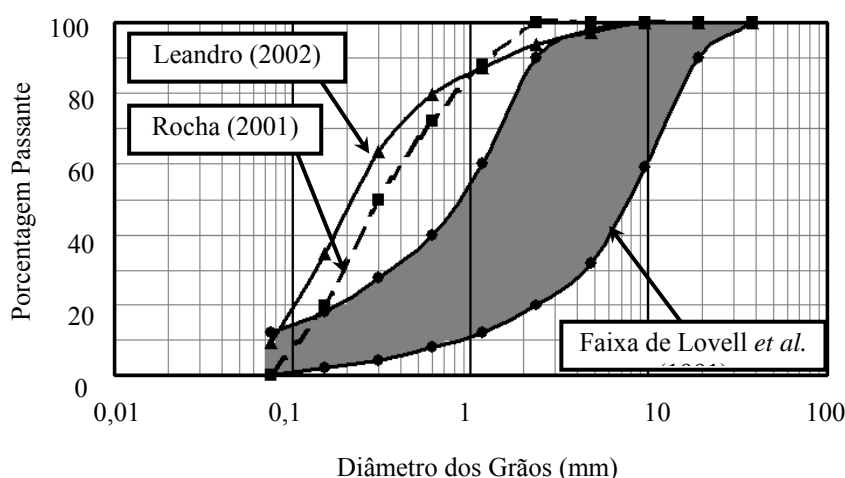


Figura 1: Faixa granulométrica das cinzas pesadas estudadas por Lovell *et al.* (1991) e distribuições granulométricas das cinzas pesadas da Usina Jorge Lacerda.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A cinza pesada utilizada no presente estudo foi coletada na Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no Estado de Santa Catarina. Para a escolha dos solos, delimitou-se a área de estudo em um círculo com 100 km de diâmetro com centro a partir da usina termelétrica em questão.

Com a definição da área de estudo e com o mapa pedológico da região, foi possível distinguir os diferentes tipos de solos existentes, a frequência com que eles ocorrem e quais deles seriam adequados à pesquisa. Assim, foram descartados os solos encontrados em pequenas quantidades e aqueles cuja pedologia indicasse características inadequadas para uso em obras de pavimentação.

Desse modo, dos solos encontrados em maior quantidade, optou-se pelos de classificação pedológica Podzólico Vermelho-Amarelo (PV). As amostras foram coletadas nos municípios de Jaguaruna (JG), Sangão (SG) e Treze de Maio (TM). A cal empregada nas misturas com solo e cinza pesada é um produto comercial da marca Supercal, do tipo CH-III.

3.1. Caracterização e Classificação dos Materiais

Para a caracterização dos solos e da cinza pesada foram inicialmente realizados ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria e limites de consistência. A cinza pesada foi o material que apresentou menor massa específica dos sólidos, $1,979 \text{ g/cm}^3$, o que já era esperado devido a sua alta porosidade; já os solos apresentaram massas específicas semelhantes, variando entre 2,632 e 2,688.

O solo do município de Sangão (SG) é o que apresenta granulometria mais arenosa. As distribuições granulométricas dos solos dos municípios de Jaguaruna (JG) e Treze de Maio (TM) são semelhantes, sendo os que apresentaram maior quantidade de finos. Por sua vez, a cinza pesada foi classificada como uma areia fina. A Figura 3 mostra as curvas granulométricas dos solos e da cinza pesada.

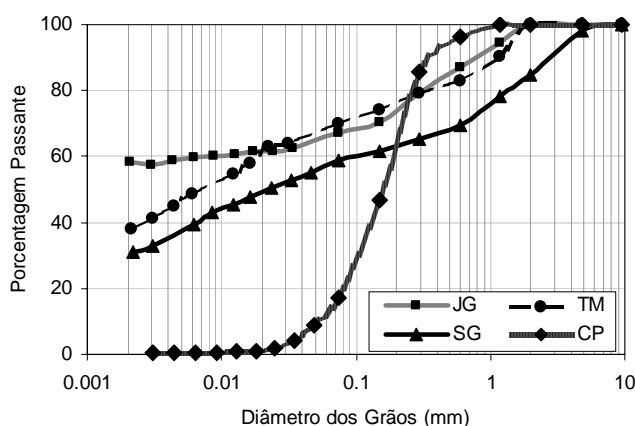


Figura 3: Distribuição granulométrica dos solos e da cinza pesada.

Além dos ensaios de caracterização, os materiais também foram classificados segundo a metodologia MCT e pelos sistemas de classificação da HRB e USC. Também foi feita a caracterização da fração fina através da adsorção de azul de metileno, segundo o método desenvolvido por Fabbri (1994). A tabela 2 apresenta as classificações dos solos e da cinza pesada segundo a MCT, HRB e USC. Ainda nesta tabela é mostrado o grau de atividade dos argilo-minerais presentes nos solos em função do valor do Coeficiente de Atividade (CA).

Tabela 2: Classificação dos materiais em estudo.

Materiais	Sistema de classificação			Classificação da fração fina dos solos	
	MCT	HRB	USC	CA ¹	Atividade dos argilo-minerais
Cinza Pesada (CP)	-	A-3	SM		
Jaguaruna (JG)	LG'	A-7-6	MH	14,20	Ativo
Treze de Maio (TM)	NG'	A-7-5	MH	14,48	Ativo
Sangão (SG)	NG'	A-7-6	MH	14,60	Ativo

¹ CA: Coeficiente de atividade. Pouco ativo: $CA < 11$; ativo: $11 < CA < 80$ e muito ativo $CA > 80$ (Fabbri, 1994).

3.2. Método Experimental

Na etapa experimental foram determinadas, inicialmente, as proporções dos materiais a serem utilizadas na elaboração das misturas através da realização de ensaios de mini-CBR. Os resultados de massa específica seca máxima e teor ótimo de umidade obtidos através desse ensaio orientaram a moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral e de CBR. A tabela 3

apresenta as proporções dos materiais utilizadas em cada uma das misturas.

A nomenclatura de cada uma das misturas é representada pelas iniciais maiúsculas do local onde as amostras de solos foram coletadas e, em seguida, a outra letra maiúscula indica a presença de cal ou não na mistura (A - sem cal; B - com 3% de cal). O par de números subscritos revela a porcentagem de cinza pesada presente na mistura.

Tabela 3: Proporções de solo, cinza e cal usadas em cada mistura para cada tipo de solo.

	Misturas			Porcentagens (%)		
	Jaguaruna	Treze de Maio	Sangão	Solo	Cinza Pesada	Cal
Designação	JGA ₀₀	TMA ₀₀	SGA ₀₀	100	0	0
	JGA ₂₅	TMA ₂₅	SGA ₂₅	75	25	0
	JGA ₃₅	TMA ₃₅	SGA ₃₅	65	35	0
	JGA ₄₅	TMA ₄₅	SGA ₄₅	55	45	0
	JGB ₀₀	TMB ₀₀	SGB ₀₀	97	0	3
	JGB ₂₂	TMB ₂₂	SGB ₂₂	75	22	3
	JGB ₃₂	TMB ₃₂	SGB ₃₂	65	32	3
	JGB ₄₂	TMB ₄₂	SGB ₄₂	55	42	3

3.2.1. Cura dos corpos-de-prova

Para avaliar a existência e o efeito das reações pozolânicas sobre as misturas de solo-cinza e solo-cinza-cal, os corpos-de-prova dos ensaios de compressão simples e compressão diametral após a moldagem foram identificados, embalados com filme plástico e submetidos ao processo de cura em câmara úmida. Estes corpos-de-prova somente foram ensaiados depois de decorridos períodos de cura diferentes (0, 28 e 84 dias).

3.2.2. Ensaios de resistência à compressão simples

Para a realização dos ensaios de compressão simples, foram moldados três corpos-de-prova para cada uma das misturas de solo-cinza e solo-cinza-cal e também para cada um dos três períodos de cura. Os corpos-de-prova foram moldados na massa específica seca máxima e no teor ótimo de umidade com 5,1 cm de diâmetro e 10,2 cm de altura.

3.2.3. Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados com corpos-de-prova com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, compactados dinamicamente no compactador de mini-CBR na umidade ótima e massa específica seca máxima. Para cada uma das misturas de solo-cinza e solo-cinza-cal foram moldados três corpos-de-prova.

Através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral determinou-se os valores da tensão horizontal de tração na ruptura (σ_x) e da tensão vertical de compressão (σ_y) no centro das amostras, utilizando as expressões 1 e 2.

$$\sigma_x = \frac{2 \times F}{\pi \times t \times d} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{6 \times F}{\pi \times t \times d} \quad (2)$$

em que σ_x : tensão de tração por compressão diametral na ruptura [MPa];
 σ_y : tensão de compressão na ruptura [MPa];
 F : carga aplicada [N];
 t : altura do corpo de prova [cm];
 d : diâmetro do corpo-de-prova [cm].

Com os valores σ_x e σ_y obtidos pelo ensaio de compressão diametral e com os resultados de resistência à compressão simples (σ_1) foram traçados os círculos de *Mohr Coulomb*. Em seguida, traçou-se uma reta tangente a esses dois círculos, sendo que o intercepto coesivo é dado pela altura do eixo das abscissas até o ponto onde essa reta intercepta o eixo das ordenadas. O ângulo de atrito é a inclinação dessa reta; entretanto, esse parâmetro deve ser analisado com cuidado devido ao fato de que a envoltória real de ruptura ser curva. A figura 4 ilustra como foram traçadas as envoltórias de ruptura através dos ensaios de compressão diametral e de compressão simples nesta pesquisa.

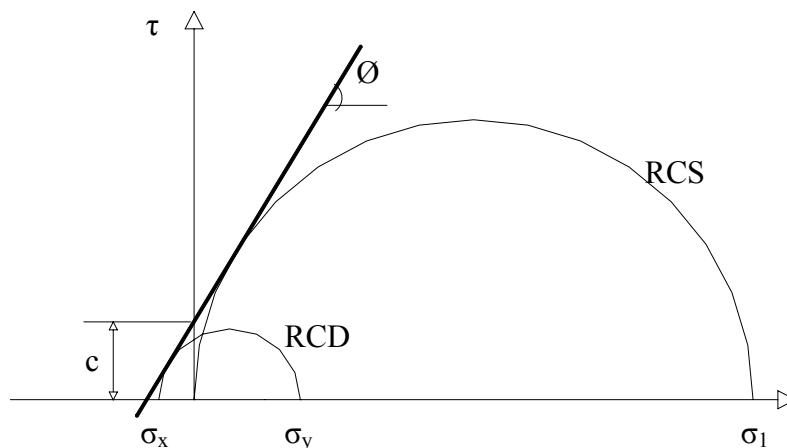


Figura 4: Esquema do traçado dos círculos de *Mohr Coulomb* a partir dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de compressão simples.

4. RESULTADOS

4.1. Parâmetros de compactação

Os parâmetros de compactação, massa específica seca máxima e teor ótimo de umidade, dos solos e também das misturas solos-cinza foram determinados pelo ensaio de mini-CBR na energia intermediária. O comportamento típico das curvas de compactação das misturas de solo com teores crescentes de cinza está ilustrado na figura 5.

Analisando-se a forma das curvas de compactação da figura 5, observa-se que a adição de cinza pesada conduziu à suavização dessas curvas, ou seja, a massa específica seca máxima das misturas com cinza pesada é menos sensível à variação do teor de umidade de compactação do que os solos sem adição de cinza. Verifica-se também que o aumento no teor de cinza pesada adicionada aos solos resultou na diminuição das massas específicas secas máximas e no aumento dos teores de umidade ótimos das misturas de solo-cinza. Entretanto,

o aumento no teor ótimo de umidade foi pouco significativo para teores de até 35% de cinza pesada adicionados aos solos.

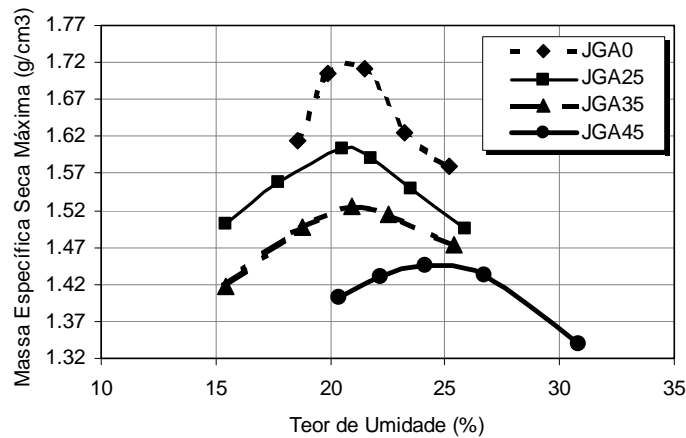


Figura 5: Curvas de compactação das misturas dos solos JG com cinza pesada.

4.2. Resistência à compressão simples

As adições crescentes de cinza pesada aos solos provocaram a diminuição das resistências à compressão simples em todos os períodos de cura, sendo que, geralmente, as resistências são menores para as misturas com maiores quantidades de cinza pesada. Dessa maneira, constata-se que as adições de cinza pesada não desencadeiam nenhum tipo de reação benéfica com o solo em relação à resistência à compressão simples, ocasionando a redução acentuada desse fator. A tabela 4 apresenta os valores médios de resistência à compressão simples para os solos puros, para todas as misturas solo-cinza, solo-cinza-cal e para todos os períodos de cura.

Tabela 4: Resistência à compressão simples dos solos e das misturas de solo-cal, solo-cinza e solo-cinza-cal para todos os períodos de cura.

Solo	Teor de Cinza (%)	Resistência à Compressão Simples (kPa)					
		Período de Cura (dias)					
		0		28		84	
		Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal
TM	0	871,78	1431,88	1127,01	1454,67	1294,27	1610,00
	25	274,33	571,07	367,67	848,81	333,39	991,05
	35	276,98	600,48	368,64	986,59	407,11	1216,03
	45	178,47	232,02	203,06	422,19	250,73	558,00
JG	0	1872,00	1331,15	1269,53	2168,38	1508,11	2535,00
	25	539,20	620,03	531,00	1333,74	630,05	1771,50
	35	402,18	662,10	489,00	987,30	472,23	1366,33
	45	134,42	295,02	231,47	556,81	184,44	752,00
SG	0	996,01	1368,27	885,30	1655,87	1215,82	1812,76
	25	414,78	643,17	437,71	1029,62	380,18	1278,02
	35	293,40	508,58	267,84	646,72	246,34	863,81
	45	274,08	439,80	334,69	798,17	340,79	1028,39

Para as misturas com cal o teor de cinza foi reduzido em 3%.

Observando-se, para um mesmo teor de cinza, a variação da resistência à compressão simples

das misturas de solo-cinza ao longo dos períodos de cura, conforme mostrado na tabela 4, nota-se que ocorreram pequenos aumentos de resistência para a maioria das misturas de solo-cinza. Entretanto, esses aumentos não ocorreram em um nível esperado, ou seja, não foram observadas reações pozolânicas significativas que proporcionassem o aumento da resistência à compressão simples ao longo do tempo.

Analisando-se as resistências à compressão simples das misturas de solo-cinza-cal e das misturas de solo-cinza da tabela 4, constata-se que ocorreram aumentos significativos de resistência após a adição da cal, sendo que geralmente os ganhos de resistência foram tão maiores quanto maior a quantidade de cinza pesada presente nas misturas. Desse modo, pode-se afirmar que há indícios de que esses ganhos maiores para as misturas de solo com cinza após adição de cal se devem às reações ocorridas, principalmente, entre os compostos de cinza e a cal.

Para misturas com cal verificou-se que quanto maior o período de cura, maior é o ganho de resistência em relação às misturas de solo-cinza sem adição de cal, caracterizando a ocorrência de reações pozolânicas significativas. A figura 6 ilustra o desenvolvimento típico da resistência à compressão simples em função do tempo de cura ocorrido para as misturas de solo-cinza-cal.

Através da análise conjunta da figura 6 e da tabela 4 observa-se que há ocorrência de reações pozolânicas significativas ao longo do tempo para as misturas solo-cinza-cal alcançando, na maioria das vezes, aos 84 dias, resistências à compressão simples maiores do que 1000kPa para as misturas de solo-cinza-cal e acima de 1600kPa para os solos-cal. Pela forma das curvas, percebe-se que a maior parte das reações ocorridas entre a cinza e a cal acontece até 28 dias de cura, sendo que após esse período a taxa de aumento diminui.

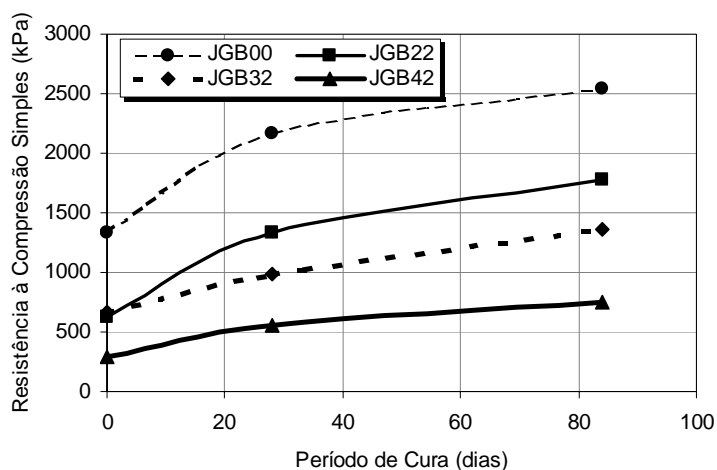


Figura 6: Resistência à compressão simples em função do período de cura para as misturas do solo JG com cinza pesada e cal.

Segundo o critério do Departamento de Estradas do *Texas*, aos 84 dias de cura, apenas os solos puros poderiam ser empregados em camadas de base de pavimentos, uma vez que estes apresentaram resistência à compressão simples superior a 677kPa. Contudo, com a adição de 3% de cal, todas as misturas solo-cal e solo-cinza-cal, aos 84 dias de cura, com exceção da

mistura TMB₄₂, superaram com certa folga a resistência mínima exigida para camadas de base de pavimentos flexíveis.

4.3. Resistência à tração por compressão diametral

As adições de cinza pesada aos solos provocaram a diminuição das resistências à tração por compressão diametral conforme pode ser observado na tabela 5. Normalmente, quanto maior a quantidade de cinza misturada aos solos, menor foi o valor da resistência à tração observado.

Tabela 5: Resistência à tração por compressão diametral média dos solos e das misturas de solo-cal, solo-cinza e solo-cinza-cal para todos os períodos de cura.

Solo	Teor de Cinza (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (kPa)					
		Período de Cura (dias)					
		0		28		84	
		Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal
TM	0	121,92	185,63	97,43	157,01	93,58	140,08
	25	15,20	45,27	13,46	60,80	12,03	69,72
	35	21,67	50,89	16,44	58,79	31,90	67,35
	45	13,31	15,34	11,48	20,13	10,95	30,13
JG	0	181,06	234,13	139,89	197,62	115,47	160,56
	25	76,53	74,83	43,24	103,16	33,50	131,57
	35	36,65	49,28	24,65	72,11	19,73	101,59
	45	10,13	14,23	21,92	23,91	22,03	-
SG	0	82,50	161,20	71,59	149,68	70,26	145,03
	25	28,10	51,35	47,46	63,85	54,45	80,15
	35	18,73	31,24	26,25	43,57	31,90	58,49
	45	12,36	14,38	9,57	51,72	9,80	60,89

Para as misturas com cal o teor de cinza foi reduzido em 3%.

Analisando-se a influência da cura nas resistências à tração por compressão diametral das misturas solo-cinza (tabela 5), nota-se que todos os solos apresentaram diminuição de resistência à tração ao longo do tempo, sendo que o mesmo comportamento foi verificado para as misturas de solo-cinza, indicando que não ocorreram reações entre a cinza pesada e os solos que contribuíssem para a melhora do comportamento mecânico dessas misturas.

Com a substituição parcial da cinza pesada por cal (em 3%), observou-se melhora importante das resistências à tração por compressão diametral para um mesmo período de cura (tabela 5). Além disso, também ocorreu aumento significativo dessas resistências com o aumento do período de cura, caracterizando reações cimentantes originadas após a adição da cal.

4.4. Intercepto coesivo das misturas solo-cinza e solo-cinza-cal

A tabela 6 mostra os resultados de intercepto coesivo (c), obtidos graficamente a partir dos valores de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, dos solos e das misturas de solo-cal, solo-cinza e solo-cinza-cal para todos os períodos de cura.

Através da análise dos dados apresentados na tabela 6, constata-se que as adições crescentes de cinza pesada influíram negativamente nos valores de intercepto coesivo dos solos

estudados para todos os períodos de cura, ou seja, na maioria das vezes o intercepto coesivo foi menor para as misturas com maior quantidade de cinza pesada. Esse comportamento foi verificado tanto para as misturas de solo-cinza quanto para as misturas solo-cinza-cal. A diminuição dos valores de intercepto coesivo para teores crescentes de cinza se deve, provavelmente, ao caráter granular da cinza.

Entretanto, as adições de 3% de cal aos solos e às misturas solo-cinza elevaram de maneira significativa os valores de intercepto coesivo, sendo que as misturas do solo TM com cinza foram, geralmente, as que apresentaram maior aumento de intercepto após a adição de cal, sendo esses aumentos, em alguns casos, superiores a 400%.

Tabela 6: Intercepto coesivo dos solos e das misturas de solo-cal, solo-cinza e solo-cinza-cal para todos os períodos de cura.

Solo	Teor de Cinza (%)	Intercepto Coesivo (kPa)					
		Período de Cura (dias)					
		0		28		84	
		Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal	Sem Cal	Com Cal
TM	0	213,31	329,68	193,12	290,39	191,48	277,00
	25	32,94	90,29	31,50	125,67	28,26	143,98
	35	43,64	99,28	37,17	129,99	63,72	155,34
	45	27,36	32,15	24,72	48,67	25,07	70,38
JG	0	345,52	421,11	255,97	381,62	236,91	357,18
	25	134,26	133,10	89,83	206,15	79,11	273,35
	35	65,72	102,04	58,98	146,19	50,86	205,09
	45	20,70	31,18	41,81	60,34	39,77	-
SG	0	163,57	291,5	144,21	295,03	156,63	290,78
	25	61,42	101,77	85,88	135,64	94,93	171,89
	35	39,60	69,94	49,33	94,83	56,57	121,95
	45	28,09	39,77	22,64	113,77	23,44	133,33

Para as misturas com cal o teor de cinza foi reduzido em 3%.

Analisando-se os valores de intercepto coesivo apresentados na tabela 6, nota-se que praticamente todas as misturas solo-cinza-cal apresentaram valores maiores que as misturas solo-cinza para um mesmo teor de cinza pesada. Assim, verifica-se que as adições de cal atuaram de maneira positiva nas misturas solos-cinza, contribuindo para a melhora da coesão. Esse comportamento pode ser creditado às reações de cimentação ocorridas principalmente entre a cal e os compostos da cinza pesada, uma vez que na maior parte das situações, as misturas solo-cinza apresentaram aumentos nos interceptos coesivos, após a adição de cal, muito maiores que os aumentos causados nos interceptos coesivos dos solos puros após essas adições.

4.5. CBR

A tabela 7 apresenta os resultados de CBR para as misturas do solo laterítico JG e do não laterítico SG com cinza pesada e com cinza pesada mais cal.

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 7, verifica-se que as misturas com solo laterítico (JG) apresentaram valores de CBR muito maiores que as com solo não laterítico

(SG). Entretanto, com as adições crescentes de cinza, os valores de CBR das misturas com solo laterítico (JG) diminuíram gradativamente, enquanto que para as misturas com solo não laterítico (SG) houve ganhos significativos.

Observa-se ainda nessa tabela que as adições de 3% de cal provocaram ganhos expressivos de CBR nas misturas solo-cinza, tanto para as com solo laterítico como para as com solo não laterítico. Entretanto, as misturas do solo não laterítico apresentaram ganhos maiores após a adição de cal do que as misturas do solo laterítico. Isto é, as misturas solo-cinza do solo SG mostraram-se mais reativas à adição da cal.

Tabela 7: CBR das misturas de solo-cinza e solo-cinza-cal.

Solo	Misturas sem Cal		Misturas com Cal	
	Mistura	CBR (%)	Mistura	CBR (%)
JG	JGA ₀₀	43	JGB ₀₀	76
	JGA ₂₅	50	JGB ₂₂	67
	JGA ₃₅	39	JGB ₃₂	107
	JGA ₄₅	24	JGB ₄₂	32
SG	SGA ₀₀	7	SGB ₀₀	37
	SGA ₂₅	4	SGB ₂₂	55
	SGA ₃₅	13	SGB ₃₂	43
	SGA ₄₅	32	SGB ₄₂	56

5. CONCLUSÕES

Com respeito ao comportamento mecânico, foi verificado que quanto maior a quantidade de cinza presente na mistura, maiores são as reduções de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e do intercepto coesivo, ou seja, há uma piora do comportamento em termos de resistência não confinada e de coesão das misturas. Entretanto, a adição de 3% de cal em substituição a parte dos teores originais de cinza conduziram a melhoras significativas das propriedades das misturas solo-cinza. Após a adição da cal, as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral e o intercepto coesivo apresentaram aumentos imediatos e ao longo do tempo de cura extremamente importantes. Isto é, ocorreram reações de cimentação significativas, que proporcionaram o aumento das resistências e da coesão das misturas solo-cinza, caracterizando a ocorrência de reações pozolânicas devido à adição de 3% de cal.

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que as misturas de solo-cinza não são adequadas ao uso em camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Contudo, a adição de 3% de cal a essas misturas propiciou reações importantes que se refletiram no comportamento mecânico, indicando que misturas solo-cinza-cal poderiam ser utilizadas na construção rodoviária, representando assim, uma solução alternativa para o aproveitamento da cinza pesada e redução do problema ambiental causado por esse resíduo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Tractebel Energia pelo fornecimento da cinza pesada e ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado para o primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fabbri, G. T. P. (1994) Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.
- FHWA: Turner Fairbank Highway Research Center (1998) *User Guidelines for Waste and By-product Material in Pavement Construction*. FHWA-RD-97-148. United States Department of Transport.
- Heath, J. C. O. e N. R. Brandenburg (1953) Pozzolan Properties of Several Oregon. Corvallis, Oregon State System of Higher Educative, Oregon State College. Bulletin n. 34.
- Leandro, R. P. (2002) Utilização das Cinzas Pesadas Provenientes da Queima do Carvão Mineral em Diques de Contenção: Aspectos Técnicos e Ambientais. Trabalho de Final de Curso. Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão.
- Lima, D.C. (1981) Algumas Considerações Relativas à Aspectos da Estabilização dos Solos em Particular à Estabilização Solo-Cal. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Lovell, C. W.; T. C. Ke; W. H. Husng e J. E. Lovell (1991) Bottom Ash as a Highway Material. *Transportation Research Record*, n. 1310, p. 106-116.
- Nardi, J. V. (1988) Cinza: Uma Alternativa na Construção de Pavimentos – Noções Gerais. *Vigésima Terceira Reunião Anual de Pavimentação*, Florianópolis, Santa Catarina, p. 287-309.
- Rocha, J. C.; M. Cheriaf; C. Pozzobon; M. S. Maia; L. Magri e S. M. T. Xavier (1999) Reaproveitamento das Cinzas Pesadas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda na Elaboração de Materiais de Construção: Aspectos Tecnológicos e Ambientais. *Décimo Quinto Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, Paraná, p. 1-5.
- Rocha, J. C. (2001) Aproveitamento de Cinzas Volantes e Pesadas para a Produção de Concretos Usinados, Blocos e Pavimentos de Concreto. Relatório Final do Convênio GS-15/99 - Gerasul, Aneel, UFSC, Florianópolis, Santa Catarina.

Rodrigo Pires Leandro (rodrigoleandro@feciv.ufu.br)

Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Uberlândia, MG, Brasil.

Glauco Tulio Pessa Fabbri (glauco@sc.usp.br)

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