

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL E SOLO PARA UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

Carlos Ernesto Chávez Molina

Alexandre Benetti Parreira

José Leomar Fernandes Júnior

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Transportes

RESUMO

A indústria de papel é a terceira maior poluidora das Américas, superada apenas pelas indústrias petrolífera e de produtos químicos orgânicos. Os resíduos produzidos na fabricação de papel são depositados em aterros sanitários ou em áreas controladas, mas este tipo de disposição não é mais visto como uma solução viável em longo prazo. Este trabalho apresenta resultados de ensaios de laboratório realizados para se determinar o comportamento mecânico de misturas de solo e resíduo gerado na fabricação do papel, visando a sua utilização na construção rodoviária. Concluiu-se que estas misturas apresentam resistências à compressão simples e diametral que as qualificam como material para a construção de bases de pavimentos, sendo que a presença do resíduo conduz a resistências superiores às das misturas solo-cal.

ABSTRACT

The paper industry is the third biggest pollutant of America, overcome only by the oil and organic chemical products industries. The wastes generated during the paper manufacture are disposed of either surface impoundments or landfills, but this disposal practices are not longer seen as viable long term solutions. This work presents laboratory tests results performed to determine the mechanical behavior of soil and paper waste mixtures, seeking their utilization in the road construction. It was concluded that these mixtures present unconfined compressive and indirect tensile strengths that qualify them as base course material, being that the waste presence leads to strengths higher than the lime stabilized soils.

1. INTRODUÇÃO

A maior conscientização ambiental e a conseqüente criação de leis mais rigorosas para a administração de resíduos e subprodutos de processos industriais têm feito que disposição ou armazenagem destes materiais sejam cada vez mais problemáticas e dispendiosas, razões pelas quais se tem procurado alternativas para o uso e reciclagem dos mesmos.

A indústria de papel e pasta de celulose é uma das maiores poluidoras do mundo. Segundo o Canadian Environmental Protection (1991), esta é a terceira maior poluidora das Américas, superada apenas pelas indústrias petrolífera e de produtos químicos orgânicos.

Os maiores fabricantes de pasta de celulose são os Estados Unidos e o Canadá, que no ano de 2000 produziram 57 e 26,4 milhões de toneladas, respectivamente. Embora a produção brasileira de pasta de celulose ainda seja menor que a destes países, aqui, a geração de resíduos sólidos é proporcionalmente maior. Segundo um estudo da Associação Brasileira de Celulose e Papel (1997), a geração de resíduos sólidos nos Estados Unidos é de aproximadamente 50kg/ADT (quilogramas de resíduo por tonelada de pasta de papel seca ao ar), enquanto que no Brasil, esta cifra é de aproximadamente 150kg/ADT, portanto três vezes mais elevada.

O ritmo de crescimento deste segmento industrial tem se acelerado muito no país. Em 2002 e 2003, o setor acusou taxas de crescimento de 8,2% e 13,5%, respectivamente. Neste último ano, foram fabricadas 9.104.190 toneladas do produto, e as indústrias do setor empregaram 100.000 pessoas, gerando 3,1 bilhões de dólares em exportações (BRACELPA, 2004).

2. RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE PAPEL E O MEIO AMBIENTE

Na fabricação de papel, considerando-se o volume produzido, os resíduos sólidos que mais se destacam são: cascas e serragem decorrentes da manipulação da madeira para obtenção da pasta de celulose; cinzas originadas da queima de cascas e serragem para a produção de energia; lodos decantados na estação de tratamento de efluentes; e misturas de lama de calcário e *dregs* (expressão muito utilizada na indústria do papel, inclusive no Brasil, que poderia ser traduzida como 'borra'). Estes dois últimos componentes citados são gerados conjuntamente durante a recuperação dos produtos químicos inorgânicos utilizados na extração de celulose da madeira, que após o processo de regeneração são novamente utilizados.

Tradicionalmente, estes resíduos são depositados em aterros sanitários ou em áreas controladas. Porém, a disponibilidade de espaços adequados para a disposição é pequena, e a conservação dos mesmos é muito dispendiosa, visto que apresentam riscos de contaminação para o ambiente e fauna circundantes. Assim, este tipo de disposição não é mais visto como uma solução viável em longo prazo.

Entre as propostas para o aproveitamento destes resíduos, destacam-se o emprego do lodo na agricultura como adubo, e de cinzas, lama de calcário e *dregs* para a correção do pH do solo. Entretanto, estas aplicações absorvem apenas uma pequena parcela dos materiais gerados.

Segundo a organização não governamental canadense Reach for Unbleached (1997), entidade empenhada na redução da poluição gerada pela indústria de papel, os resíduos da fabricação da pasta de celulose contêm metais pesados nocivos à saúde como o cádmio, cobre, molibdênio, níquel e zinco, e assim, só deveriam ser utilizados no cultivo de produtos não comestíveis.

A construção civil, com destaque para a área rodoviária pelos grandes volumes de materiais consumidos, configura-se como uma alternativa muito promissora para a utilização de resíduos industriais como solução capaz de aliviar os impactos ambientais causados pelos mesmos e ainda contribuir para a minimização da exploração de materiais naturais usados na construção de aterros e pavimentos.

Neste sentido, têm sido muito divulgadas propostas do emprego na construção rodoviária de resíduos das indústrias do aço, de adubos, fundição e outros produtos comumente descartados, como pneus. Entretanto, são poucos os relatos de estudos para a utilização de resíduos da indústria do papel nesta área, distinguindo-se apenas duas pesquisas realizadas no exterior por ZHOU *et al.* (1999) e LAHTINEN *et al.* (2001).

Portanto, o objetivo deste artigo é apresentar resultados da avaliação, em laboratório, de propriedades físicas e mecânicas de misturas constituídas de solo e resíduo gerado na fabricação do papel, visando a sua utilização na construção rodoviária.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a composição das misturas, além do resíduo, foram selecionados dois tipos de solo e ainda cal, utilizada como elemento estabilizante.

O resíduo foi coletado numa indústria de fabricação de papel localizada às margens do Rio Moji-Mirim, no interior paulista, sendo constituído por uma mistura de lama de calcário e *dregs* na proporção de 10:1, conforme é obtida. Segundo Biermann (1993), este tipo de lama contém principalmente carbonato de cálcio e pequenas quantidades de óxido de cálcio, e os *dregs* são compostos de 50% ou mais de carbono e por materiais inertes, sobretudo carbonatos metálicos insolúveis, sulfatos, sulfetos, hidróxidos e silicatos. O resíduo é alcalino com pH igual a 11 e segundo a norma NBR 10.004 (ABNT, 1987) situa-se na Classe II, correspondente aos materiais não inertes. A Tabela 1 apresenta os principais elementos químicos inorgânicos presentes no resíduo determinados por difração de raios-X.

Tabela 1: Principais elementos químicos inorgânicos presentes no resíduo

Cálcio (%)	Sódio (%)	Magnésio (%)	Enxofre (%)	Silício (%)
81,23	10,61	4,29	2,79	0,78

A Figura 1 apresenta a curva granulométrica do resíduo, que mostra tratar-se de um material situado predominantemente – 96%, nos limites da faixa correspondente aos siltes. Conforme apresentado na Tabela 2, a sua massa específica dos sólidos é igual a 2,884g/cm³, podendo ser considerado não plástico – NP, pois não ofereceu trabalhabilidade para a execução dos ensaios para a determinação dos limites plásticos.

Os dois solos selecionados para a pesquisa foram coletados em locais de plantio florestal da própria indústria geradora do resíduo com o objetivo de se estudar a aplicação da mistura em áreas pertencentes à empresa. A Figura 1 apresenta suas curvas granulométricas e a Tabela 2 apresenta as correspondentes massas específicas dos sólidos, LL, IP e classificações Unificada (USCS) e AASTHO. Para a identificação do comportamento laterítico dos solos, utilizou-se a classificação MCT (Nogami & Villibor, 1980).

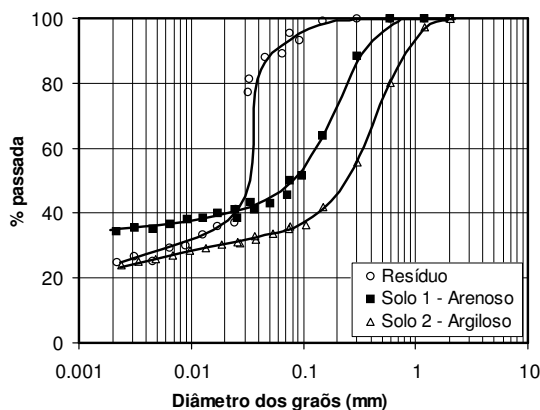


Figura 1: Distribuição granulométrica do resíduo e dos solos

Tabela 2: Massa específica dos sólidos, limite de liquidez, índice de plasticidade, e classificações geotécnicas dos materiais

Material	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	LL(%)	IP(%)	Unificada	AASHTO	MCT
Resíduo	2,884	–	NP	–	–	–
Solo 1	2,711	45	22	CL	A-7-6	LG'
Solo 2	2,645	25	10	SC	A-4	LA'

Nas análises que se seguem, o Solo 1 (CL /A-7-6 /LG') e o Solo 2 (SC /A-4 /LA'), serão denominados, respectivamente 'solo argiloso' e 'solo arenoso'.

A cal utilizada como elemento estabilizante é calcítica, do tipo CH-III segundo a norma NBR 7175 (ABNT, 1997), sendo comercializada com a marca SUPERCAL.

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Preliminarmente, foram compactadas misturas de solo e diversos teores de resíduo na energia normal do ensaio de Proctor para se determinar o maior teor trabalhável deste material possível de ser adicionado à mistura. O teor máximo obtido foi de 40%. Teores maiores acarretavam dificuldades na execução do ensaio.

Determinado o teor máximo de resíduo, foram escolhidas as misturas a serem analisadas, sendo selecionadas as seguintes composições: misturas contendo 40% de resíduo, 0%, 5% e 10% de cal e o restante constituído por um dos dois solos. Complementarmente, foram também selecionadas misturas de cada um dos solos com 0%, 5% e 10% de cal, sem resíduo, para permitir a avaliação, através de comparação com as misturas com resíduo, do mecanismo de ação deste material. Os teores de cal escolhidos decorrem de um estudo anterior que indicou que teores menores que 5% não conduziam ao nível desejado de estabilização. As misturas de solo e resíduo apresentaram, em média, pH de aproximadamente 8.

Posteriormente, corpos-de-prova compactados estaticamente na umidade ótima e massa específica seca máxima e curados por 7 dias foram submetidos a ensaios de compressão simples, compressão diametral e CBR. Em seguida, com base nos resultados obtidos aos 7 dias, foi determinada a composição que conduzia ao melhor comportamento mecânico – 40% de resíduo, 10% de cal e 50% de cada um dos solos, composição esta que foi então ensaiada a compressão simples e diametral após 3 e 28 dias em câmara úmida com o objetivo de se determinar a influência do período de cura nas variáveis analisadas.

Para cada uma das misturas e condições analisadas, foram ensaiados 3 corpos-de-prova, e com na base nos resultados de média e desvio padrão foi aplicado o Teste de Grubbs (1969) para a identificação e exclusão de *outliers*.

Finalmente, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX) para identificar a micro-estrutura e a composição química do resíduo e misturas.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Ensaios de compactação

A Tabela 3 apresenta os valores de massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e umidade ótima (ω_o) para todas as misturas estudadas. Analisando-se estes valores, observa-se que a adição de resíduo, assim como a adição ou a elevação do teor de cal, conduzem a uma diminuição de ρ_{dmax} e um aumento da ω_o . Neste caso, o efeito da cal é similar ao já verificado em diversas outras pesquisas onde este estabilizante foi utilizado. No tocante ao efeito do resíduo, apesar de suas partículas apresentarem densidade maior que as dos solos, a sua adição conduz a misturas com menores massas específicas secas, evidenciando que o resíduo dificulta o processo de compactação, diminuindo assim a sua eficiência, conforme observado durante os ensaios. Esta fato também é responsável pelas maiores umidades ótimas observadas para as misturas com resíduo.

Tabela 3: Massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas

Tipo de Solo	Mistura			ρ_{dmax} (g/cm ³)	ω_o (%)
	Solo (%)	Resíduo (%)	Cal (%)		
Arenoso	100	0	0	1,920	11,1
	95	0	5	1,850	12,5
	90	0	10	1,770	15,1
	60	40	0	1,635	20,0
	55	40	5	1,520	23,2
	50	40	10	1,470	23,8
Argiloso	100	0	0	1,790	15,3
	95	0	5	1,720	16,1
	90	0	10	1,680	17,2
	60	40	0	1,620	21,0
	55	40	5	1,495	25,3
	50	40	10	1,440	26,2

5.2. Ensaios de compressão simples

O ensaio de compressão simples é o procedimento mais utilizado no meio rodoviário para se avaliar propriedades mecânicas de misturas estabilizadas com cal com vista à aplicação na construção de pavimentos.

A Figura 2 ilustra a variação da resistência à compressão simples (RCS) com o teor de cal e a adição de resíduo de corpos-de-prova ensaiados após 7 dias de cura em câmara úmida para misturas constituídas com os solos arenoso e argiloso.

Analisando-se a Figura 2, observa-se que a adição de resíduo, assim como a adição ou a elevação do teor de cal têm uma influência marcante no valor da resistência a compressão simples. Ambos os solos sem adição de resíduo têm a RCS aumentada quando se adiciona cal, sendo que os maiores valores de resistência acontecem para o teor de 5% e não para o maior teor – 10%. A diminuição da resistência quando se aumenta o teor de 5% para 10% revela que a adição de cal é favorável enquanto existe disponibilidade de elementos para as reações pozolânicas, limite a partir do qual, novos acréscimos de cal revelam-se desfavoráveis.

Entretanto, para as misturas com 40% de resíduo, os ganhos de RCS quando se aumenta o teor de cal são sempre crescentes para os teores considerados. Para 5% de cal, as misturas de solos arenoso e argiloso com resíduo apresentam resistências, respectivamente, 179% e 138% maiores que as misturas correspondentes sem cal. Para 10% de cal, o aumento da resistência é de, respectivamente, 393% e 383%. A explicação para esta diferença reside no fato de que a cal reage principalmente com a fração fina dos materiais, e no caso dos solos, a disponibilidade de finos para a reação com 10% de cal já estaria esgotada, o que não aconteceria com a mistura com resíduo, que contaria com uma parcela maior de finos.

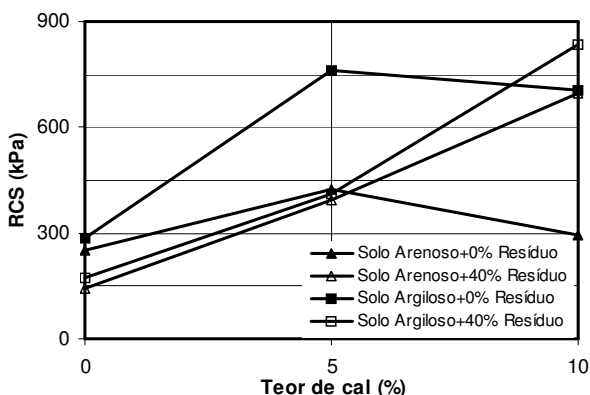


Figura 2: Variação da RCS aos 7 dias de cura com o teor de cal e a adição de resíduo

Comparando-se a RCS de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição na resistência de 44% e 39%, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, a diminuição da resistência é de, respectivamente 8% e 46%. No entanto, para as misturas com 10% de cal, a adição de resíduo produz um aumento de resistência de respectivamente, 135% e 18%. Isto mostra que os maiores valores de resistência, dentre todas as misturas estudadas, são aqueles verificados para as misturas com 40% de resíduo e 10% de cal.

Quando se comparam misturas sem e com resíduo, destaca-se que o ganho de resistência decorrente da adição de resíduo só é expressivamente favorável para as misturas constituídas com o solo arenoso. Para este solo, a máxima resistência alcançada pela mistura sem resíduo (95% de solo e 5% de cal), 426kPa, é da ordem de 61% da máxima resistência alcançada pela mistura com resíduo (50% de solo, 10% de cal e 40% de resíduo), 695kPa.

5.3. Ensaios de compressão diametral

A resistência e a rigidez elevadas que camadas estabilizadas com cal podem oferecer induzem que as mesmas comportem-se similarmente a placas, que além de agirem no sentido da redução das pressões transmitidas às camadas subjacentes, geram tensões de flexão consideráveis na própria camada estabilizada. Este aspecto justifica a importância de se conhecer o comportamento à tração das misturas analisadas.

A Figura 3 ilustra a variação da resistência à tração determinada em ensaios de compressão diametral (RCD) com o teor de cal e a adição de resíduo de corpos-de-prova ensaiados após 7

dias de cura em câmara úmida para misturas constituídas com os solos arenoso e argiloso. Analisando-se esta figura, observa-se que a adição de resíduo, assim como a adição ou o incremento do teor de cal têm um efeito na RCD muito semelhante ao descrito anteriormente para a RCS, indicando que os mecanismos de ação destes elementos são semelhantes sob os dois tipos de sollicitação.

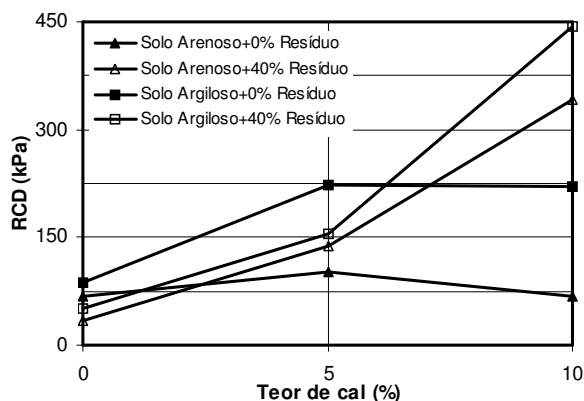


Figura 3: Variação da RCD aos 7 dias de cura com o teor de cal e a adição de resíduo

A Figura 3 mostra que ambos os solos sem adição de resíduo têm a RCD aumentada quando se adiciona cal, sendo que os solos arenoso e argiloso apresentam para 5% de cal, respectivamente, ganhos de resistência de 51% e 159% em relação à resistência do solo não estabilizado. A diminuição da RCD quando se aumenta o teor de cal de 5% para 10% é da mesma ordem daquela já observada nos ensaios de RCS.

Entretanto, para as misturas com 40% de resíduo, os ganhos de RCD quando se aumenta o teor de cal são sempre crescentes para os teores considerados. Para 5% de cal, as misturas de solos arenoso e argiloso com resíduo apresentam resistências, respectivamente, 302% e 202% maiores que as misturas sem cal. Para 10% de cal, o aumento da resistência é de, respectivamente, 905% e 771%. Comparando-se os ganhos de resistência dos dois solos com a adição de cal, observa-se que as misturas com solo arenoso apresentam ganhos de resistência maiores que as misturas com solo argiloso.

Comparando-se a RCD de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição na resistência de 50% e 41%, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, a mistura com solo argiloso apresenta uma diminuição de resistência de 31%, no entanto, a mistura com solo arenoso apresenta um aumento de resistência de 34%. E para as misturas com 10% de cal, a adição de resíduo produz um aumento de resistência de respectivamente, 403% e 101%.

Para todas as misturas estudadas, os maiores valores de resistência à tração são aqueles verificados para as misturas com 40% de resíduo e 10% de cal. Destaca-se que as maiores resistências à tração alcançadas pelos solos arenoso e argiloso sem adição de resíduo (95% de solo e 5% de cal), respectivamente 102 kPa e 221 kPa, são da ordem de 30% e 50% das máximas resistências alcançadas pelas misturas com resíduo, 342 kPa e 444 kPa.

Finalmente, quando se analisa o efeito positivo da adição do resíduo na resistência das misturas, conclui-se que este é consideravelmente maior nos resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral do que aqueles obtidos nos ensaios de compressão simples.

5.4. Envolvória de resistência de Mohr-Coulomb

As resistências à compressão simples e diametral permitem que se determine a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais das mistura ensaiadas aos 7 dias de cura.

Para se analisar o efeito da cal e do resíduo na resistência das misturas, foi considerada a variação dos parâmetros coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) com a adição destes materiais. As envoltórias foram estabelecidas a partir da média calculada com base nos resultados correspondentes aos dois solos para cada uma das seguintes condições: solos sem adição de cal ou resíduo, solos com adição de 5% e 10% de cal e solos com 40% de resíduo e 10% de cal. A Tabela 4 apresenta os parâmetros de resistência correspondentes a estas condições.

Tabela 4: Valores médios de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) dos solos puros, solos com cal e solos com resíduo e cal

Solo (%)	Resíduo (%)	Cal (%)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito interno
100	0	0	71	34°
95	0	5	155	35°
90	0	10	134	34°
50	40	10	273	19°

Analisando-se os valores da Tabela 4, observa-se que a adição de 5% ou 10% de cal praticamente não altera o ângulo de atrito interno correspondente aos solos puros. Entretanto para estes teores, a coesão tem um ganho de respectivamente, 118% e 89%, evidenciando a ação cimentante da cal.

Comparando-se o comportamento dos solos puros com o da mistura constituída com 40% de resíduo e 10% de cal, observa-se que o ângulo de atrito interno diminui 79% e a coesão aumenta 285%. Isto mostra que a adição de resíduo, material com um elevado teor de finos, contribui para a diminuição do ângulo de atrito, mas ao mesmo tempo, a sua reação com a cal promove uma forte ação cimentante, levando a um ganho de coesão bastante expressivo. Este fato explica a razão do efeito positivo da adição de resíduo ser mais evidente nos resultados de resistência à tração do que nos resultados de resistência a compressão.

5.5. Influência do tempo de cura na RCS e RCD

Conforme justificado anteriormente, a mistura constituída com 10% de cal, 40% de resíduo e 50% de cada um dos solos foi escolhida para a avaliação da influência do tempo de cura nas resistências à compressão simples e diametral. A Figura 4 ilustra, para ambos solos, a variação da resistência com o aumento do tempo de cura.

Analisando-se a Figura 4, observa-se que existe um aumento continuado das resistências à compressão simples e diametral com o tempo de cura e que o padrão de variação de ambas são muito semelhantes entre si. Resistências crescentes devem-se à reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo a qual se processa ao longo do tempo.

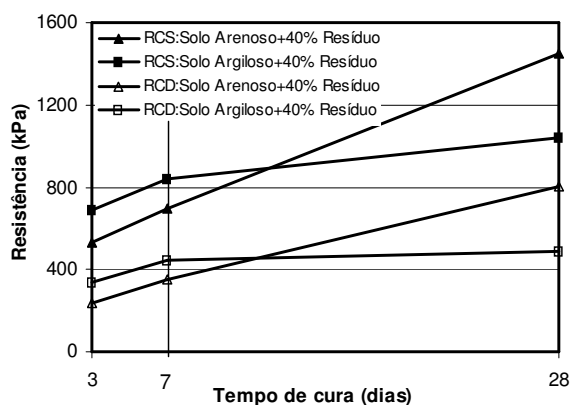


Figura 4: Variação da RCS e RCD com o tempo de cura

Observa-se ainda que no período de cura de 3 a 7 dias, os gradientes de ganho de resistência são coincidentes quando se comparam os comportamentos correspondentes a cada um dos solos. Entretanto, após os 7 dias iniciais, a mistura com solo arenoso mantém o mesmo gradiente anterior, enquanto a mistura com solo argiloso apresenta uma diminuição considerável no seu gradiente de ganho. Considerando-se os 3 e 7 dias de cura, a mistura com solo argiloso apresenta resistências, na média, 21% maiores que as da mistura com solo arenoso. Porém aos 28 dias, ocorre uma inversão e a mistura com solo arenoso apresenta resistências, na média, 32% maiores.

O pior desempenho final da mistura com o solo argiloso seria decorrente, conforme explicação apresentada por Bhuiyan *et al.* (1995), do fato de que, apesar da ação cimentante da cal sobre materiais calcários, caso do resíduo utilizado, ser muito pronunciada, a parcela fina do solo argiloso consumiria uma parcela elevada da cal disponibilizada, restando apenas uma quantidade reduzida para a reação com o resíduo.

5.6. Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) tem sido muito utilizado na qualificação do comportamento de misturas estabilizadas com cal, embora não seja o parâmetro mais adequado para este fim (TRB, 1987). Assim, na presente pesquisa, os resultados dos ensaios para a avaliação do CBR devem ser considerados num contexto restrito, visto que têm caráter apenas especulativo.

A Figura 5 ilustra a variação do CBR com o teor de cal e a adição de resíduo de corpos-de-prova ensaiados após 4 dias de cura em câmara úmida e três dias de imersão em água para misturas constituídas com os solos arenoso e argiloso.

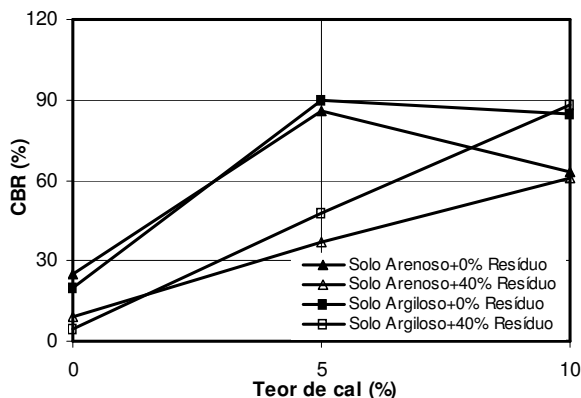


Figura 5: Variação do CBR aos 7 dias de cura com o teor de cal e adição de resíduo

Analisando-se a Figura 5, observa-se que o padrão de variação do CBR é similar aos verificados anteriormente para a RCS e a RCD. As misturas sem resíduo apresentam o CBR máximo para o teor de 5% de cal, enquanto que para as mistura com 40% de resíduo, o valor máximo do índice de suporte ocorre para 10% de cal.

Comparando-se o CBR de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo é prejudicial mesmo para o teor de cal de 10%, contrariando o comportamento observado nos ensaios de compressão simples e diametral. Destaca-se ainda que a adição de resíduo induz ao aumento da expansão durante a imersão em água. No entanto, observou-se que apenas a mistura de solo argiloso e resíduo, sem cal, apresentou expansão superior a 0,5%.

5.7. Formação de cristais na superfície dos corpos-de-prova

Durante a pesquisa, observou-se que os corpos-de-prova já ensaiados e deixados expostos ao ar, sem proteção, no ambiente do laboratório, apresentavam a formação de cristais em suas superfícies. Os cristais acumulavam-se ao longo do tempo e após 3 a 4 semanas, ocorria a desagregação dos corpos-de-prova.

Supõe-se que tais formações decorram da presença de sais de sódio, cálcio e magnésio no resíduo, e que a perda de umidade por evaporação promoveria a concentração destes sais na superfície dos corpos-de-prova e sua conseqüente cristalização.

Para investigar o fato, corpos-de-prova de solo e resíduo, sem a adição de cal, foram submetidos a duas condições de cura sem perda de umidade: em câmara úmida e revestidos com filme de PVC e mantidos no ambiente do laboratório. Após 21 dias, não se observou formação de cristais em nenhuma das condições, corroborando com a suposição de que é a grande concentração de sais que ocorre com a evaporação, o motivo da formação dos cristais.

As Figuras 6 e 7 apresentam fotografias obtidas por microscopia eletrônica de materiais provenientes de corpos-de-prova, respectivamente, expostos ao ar sem proteção e mantidos em câmara úmida. Observa-se na Figura 6, a presença de cristais com formato de agulha de

diferentes tamanhos dispostos desordenadamente, enquanto que na Figura 7, não é possível identificar a presença dos mesmos.

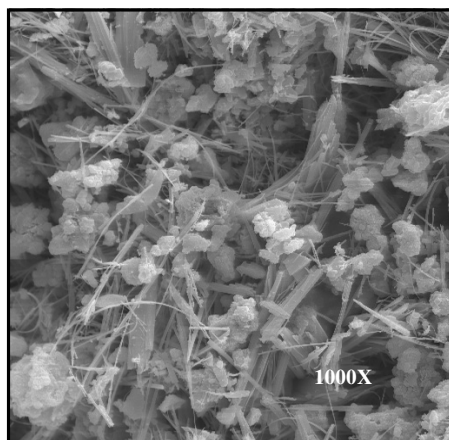


Figura 6: Mistura solo e resíduo exposta ao ar

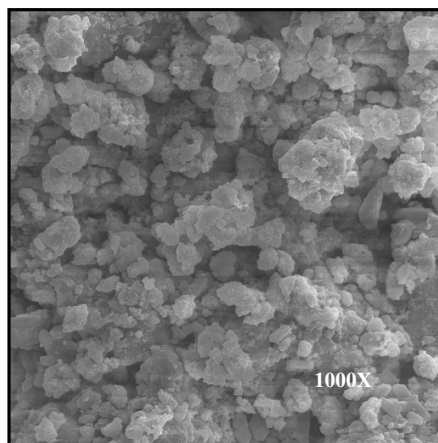


Figura 7: Mistura solo e resíduo mantida em câmara úmida

Posteriormente, foi acompanhado o comportamento de misturas constituídas com solo, 40% de resíduo e cal. Observou-se, para corpos-de-prova expostos ao ar, que a formação de cristais é minimizada à medida que o teor de cal aumenta. Supõe-se que este fato deva-se à ação cimentante da cal, que promove a redução da segregação de sais solúveis e o aumento do pH, dificultando a formação de cristais.

Outro aspecto analisado foi a influência do período de cura sem perda de umidade anterior à exposição da mistura ao ar. Observou-se que o aumento do período de cura nestas condições reduz significativamente a formação de cristais. Acredita-se que a cimentação das partículas que ocorre ao longo do tempo dificultaria a formação de cristais. Este fato indicaria que no período posterior à construção da camada de base, o efeito da formação de cristais no desempenho do pavimento seria cada vez menos significativo devido ao aumento da cimentação na camada selada.

6. CONCLUSÕES

Para os materiais estudados e situações consideradas na pesquisa, as seguintes conclusões podem ser destacadas.

As misturas de cada um dos solos, resíduo e cal apresentam CBRs e expansões, respectivamente, superiores e inferiores aos limites estabelecidos nas normas do DER-SP para camada base estabilizada granulometricamente, tomada como referência. No tocante à resistência à compressão simples aos 28 dias de cura, os valores determinados situam-se acima do limite mínimo para a construção de camada base – 1000 kPa, estabelecido no processo Illinois para misturas solo-cal (State of the Art 5 - TRB, 1987).

As misturas de solo arenoso, resíduo e cal alcançam resistências superiores às resistências correspondentes às misturas constituídas com o solo argiloso. A reação do resíduo com a cal

produz um forte efeito cimentante, conduzindo a um expressivo aumento da coesão que se reflete, principalmente, na resistência à tração, que alcança valores máximos da ordem do dobro daqueles verificados para as misturas solo-cal.

A resistência oferecida por misturas de solo, resíduo e cal cresce com decorrer do tempo de cura, mas este efeito é mais pronunciado para as misturas constituídas com o solo arenoso. O processo de formação de cristais que prejudicaria o desempenho das misturas de solo e resíduo pode ser evitado ou minimizado consideravelmente impedindo-se a perda da umidade durante o período de cura ou aumentando-se o teor de cal adicionado.

É necessária a continuidade da pesquisa para que conclua favoravelmente pelo uso de resíduo da fabricação de papel na área rodoviária. Deve-se ainda determinar o comportamento das misturas após períodos de cura mais longos e também sob o aspecto da deformabilidade e estabilidade frente à ação da água, incluindo-se ainda a construção e monitoramento de um trecho experimental, assim como a avaliação precisa dos riscos ambientais associados a esta forma de disposição.

Agradecimento

À CAPES, pela bolsa de mestrado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1987) *NBR 10004: Resíduos Sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (1992) *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Bhuiyan, J.U.; Dallas, N. L.; Graves, R.E. (1995) *Evaluation of Calcareous Base Course Materials Stabilized With Low Percentage of Lime in South Texas*. In: Transportation Research Board, n°.1486,1995, p.77-87.
- Biermann, C. J. (1993) *Essentials of pulping and papermaking*. San Diego: Academic Press Inc.
- BRACELPA (2004) *Desempenho do setor em 2003*. Associação Brasileira de Celulose e Papel Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/>. Acesso em: Janeiro 2004.
- Canadian Environmental Protection (1991) *Act Priority Substances List Assessment, Report N°. 2, Effluents from Pulp Mills Using Bleaching*. Health and Welfare. Ontario, Canadá. Disponível em: <http://www.rfu.org/index.htm>. Acesso em: março 2003.
- Chávez M. C. (2004) *Estudo do comportamento mecânico de misturas de resíduo da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária*. São Carlos 2004. 104p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Grubbs, F. (1969) *Procedures for detecting outlying observations in samples*. Technometrics. V.11, n.1, p.1-21.
- Lahtinen, P. (2001) *Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads*. FINNRA reports 70/2001. Disponível in: http://lib.hut.fi/Diss/2001/isbn9512257076/isbn_9512257076.pdf. Acesso em: março 2003. Helsinque, Finlândia.
- Nogami, J. S. e D. F. Villibor (1980) Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional. Apresentação de uma nova sistemática. *Anais da 15ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Belo Horizonte, p. 1-38.
- Reach For Unbleached (1997) *What we know about sludge, grate ash and lime dregs*. Disponível em: <http://rfu.org/MonSolid.htm>. Acesso em: Março 2003.
- Transportation Research Board, National Research Council (1987) *State of the art 5 - Lime Stabilization Reactions, Properties, Design, and Construction*. Washington, D.C.
- Zhou, H.; Smith, W.D.; Sego, D.C. (1999) *Characterization and Use of Pulp Mill Fly Ash and Lime By-Products as Road Construction Amendments*. In: Canadian Journal of Civil Engineering, v.27, p. 581-593.