

PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM SUB-BASES E BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS, ATRAVÉS DE SUA INCORPORAÇÃO A SOLOS LATERÍTICOS ARGILOSOS

Luis Miguel Gutiérrez Klinsky

Glauco Tulio Pessa Fabbri

Departamento de Transportes

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

RESUMO

Um dos maiores problemas do setor da fundição de metais é a produção de resíduos sólidos, constituídos basicamente pelas areias residuais. No Brasil, a produção de fundidos em 2006 alcançou três milhões de toneladas, com a geração de, aproximadamente, uma tonelada de resíduo para cada tonelada de metal produzida. Esse trabalho avalia o reaproveitamento da areia de fundição como material de construção em sub-bases e bases de rodovias, através de sua incorporação a solos argilosos lateríticos da região de Sertãozinho/SP, que tem grande produção de fundidos e, conseqüentemente, de resíduos, e também carece de jazidas de solos arenosos para a construção de rodovias e vias urbanas. No estudo foi utilizada a técnica de montagem de solos artificiais, nos quais foram realizados ensaios de classificação e propriedades mecânicas. Os resultados indicam que as misturas solo-areia poderiam ser utilizadas como material para sub-bases e bases para tráfego leve.

ABSTRACT

One of the biggest problems of the foundry industry is the solid residues production, constituted basically by sands. The foundry production, in year 2006, in Brazil, reached three millions tons, and for each ton of produced metal, a ton of foundry residue results approximately. Considering this huge residue production, this work evaluates the reuse of the foundry sand in highways layers, such as sub-bases and bases, through its incorporation to clay soils from Sertãozinho/SP region. This region has a highly production of foundry metals and residues, and does not have natural sandy soils deposits for highway construction. The technique used in this study was the artificial soil assembly, in which classifications tests and bearing tests were made. The results show that the mixes soil-sand could be used as base and sub-base material for low traffic pavements.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do setor industrial mundial têm significado, nos últimos anos, o aumento das quantidades e dos tipos de resíduos gerados e a sua correta disposição significa um alto custo para as indústrias.

Um dos principais problemas das indústrias siderúrgicas e de fundição é a geração de resíduos sólidos, constituídos principalmente pela areia de fundição. A areia é largamente usada na indústria siderúrgica para fabricação dos moldes nos quais os metais são vazados. Este método utiliza areia e aditivos sintéticos ou orgânicos como aglutinantes. As propriedades da areia de fundição são determinadas em função das quantidades e tipos de aglutinantes e dos aditivos usados; cada areia residual é única para o tipo de processo de fundição utilizado. Geralmente, o uso destes aditivos e ligantes no processo de fundição limita a reutilização da areia, obrigando as indústrias a eliminar o excesso em depósitos de descarte, apesar da boa qualidade que a areia apresenta para outros usos, principalmente na engenharia civil (Javed e Lovell, 1995; Patridge, 1999; Aydilek e Guney, 2007).

No Brasil, a produção de areia de fundição alcança os três milhões de toneladas por ano e o seu descarte significa grande parte dos custos das siderúrgicas, custo que poderia ser reduzido com o seu reaproveitamento. Nesse sentido já foram desenvolvidos trabalhos no Brasil, cujo propósito é reutilizar a areia de fundição na construção de rodovias.

Bonet (2002) propôs o reaproveitamento da areia de fundição como agregado fino no CBUQ, recomendando a utilização de 8% do resíduo em peso na mistura. Coutinho (2004) estudou a possibilidade de utilizar a areia de fundição em misturas asfálticas densas, com incorporação de até 15% de areia em peso, em substituição ao agregado fino, tendo obtido boas propriedades mecânicas sem comprometimento ambiental. Apesar desses trabalhos apresentarem aplicações interessantes e válidas para o reaproveitamento de areia de fundição, as quantidades reaproveitadas com o uso destas técnicas seriam reduzidas. Neste sentido, procura-se uma alternativa para o reuso da areia de fundição que permita o reaproveitamento de grandes quantidades, de tal forma que se possa consumir parcela significativa da produção desse resíduo. A construção de rodovias fornece oportunidades para esse reuso em grandes quantidades nas diferentes camadas estruturais (reforço do subleito, sub-base e base).

Este trabalho apresenta uma proposta de utilização de areia de fundição misturada a solos argilosos, compondo solos artificiais, para utilização na construção de sub-bases e bases de pavimentos flexíveis de rodovias e vias urbanas sujeitas a tráfego de leve a médio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Areia de Fundição

As areias têm sido usadas por muito tempo para dar forma aos metais. Os motivos são vários: estão prontas para serem usadas, têm baixo custo, são altamente refratárias e facilmente aglutináveis quando misturadas com argilas ou outros aditivos orgânicos ou inorgânicos. Segundo Mariotto (2000), estima-se que mais de 80% dos produtos fundidos sejam fabricados utilizando moldes confeccionados com areia aglomerada.

No processo de fundição a areia é denominada de agregado base ou simplesmente base. Além do material base, as misturas de moldagem são compostas também, dependendo do método de moldagem, de aglomerantes que podem ser orgânicos ou inorgânicos, água e aditivos. Entre os aglomerantes orgânicos se têm: óleos secativos (óleos de linhaça, mamona, oiticica), farinhas de cereais (dextrina, mogul e breu) e produtos sintéticos (resinas furânicas e fenólicas). Dentre os aglomerantes sintéticos, os mais usuais são as resinas sintéticas, e dentre elas, a fenólica é a mais utilizada por ter preço mais acessível. Os ligantes inorgânicos principais são: argila, cimento Portland e silicato de sódio; dentre esses ligantes, os mais usuais são as argilas, sendo mais usada a bentonita, por apresentar características mais favoráveis para esta finalidade.

Ainda segundo Mariotto (2000), estima-se que o parque industrial brasileiro de fundição tenha cerca de 1000 empresas, sendo 80% de pequeno porte (menos de 100 empregados) e o estado de São Paulo concentra 60% desse total. A produção anual de fundidos destas empresas é de aproximadamente três milhões de toneladas e, considerando estimativas feitas, calcula-se que para cada tonelada de metal fundido se tenha aproximadamente uma tonelada de areia de fundição descartada (McIntyre et al., 1992).

O reaproveitamento da areia de fundição se faz necessário para ser evitada a disposição inadequada desses resíduos e também porque essa atividade é grande consumidora de insumos naturais. Desta forma conseguir-se-ia minimizar o uso destes recursos e contribuir-se-ia para a diminuição da poluição do meio ambiente.

A reutilização do resíduo pode se dar na própria indústria de fundição, na chamada “Reciclagem Primária”, ou externamente, com a “Reciclagem Secundária”, onde o resíduo serve como matéria prima para outra atividade que não seja a de fundição.

A areia de fundição residual pode ser utilizada, na reciclagem secundária, principalmente na área de construção civil, como por exemplo: na fabricação de concreto, tijolos, tubos, como substituto de agregado fino no concreto asfáltico e na construção de aterros de rodovias.

2.2. Solos Lateríticos

Segundo Nogami e Villibor (1995), a conscientização das peculiaridades dos solos tropicais, como material de construção rodoviária no Brasil, ocorreu a partir de 1930, quando foi criada a Seção de Solos de Fundação no IPT/SP. Ao longo dos anos, a experiência demonstrou que o estudo tradicional de solos, baseado na consideração dos índices de consistência e da granulometria por peneiramento, não atribuía aos solos tropicais qualidades correspondentes ao seu desempenho real.

Na busca de melhores critérios, esses autores propuseram no Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, no ano 1981, “Uma nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias” denominada MCT. Nela foram propostas duas grandes classes de solos, segundo sua origem pedogenética, e sete grupos.

A classificação geotécnica MCT agrupa os solos tropicais, de acordo com o seu comportamento no estado compactado, em duas classes principais: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em três subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA⁺) e solos argilosos lateríticos (LG⁺), enquanto os de comportamento não laterítico são subdivididos em quatro subclasses: areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA⁺), solos siltosos não lateríticos (NS⁺) e solos argilosos não lateríticos (NG⁺).

Outro ensaio desenvolvido para avaliar os solos tropicais é o ensaio de mini-CBR, desenvolvido por Nogami (1972), que efetuou adaptações no método de ensaio original da Universidade de Iowa, com a finalidade de correlacionar seus resultados com os do ensaio de CBR tradicional. O ensaio modificado por Nogami (1972) permite também obter outras propriedades de interesse do solo, como a expansão, contração, massa específica seca máxima e teor ótimo de umidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desse trabalho utilizou-se areia de fundição proveniente da região de Sertãozinho/SP. A geração anual de resíduo de areia de fundição (passivo ambiental) nessa região está em torno de 26.400 toneladas. O descarte da empresa Pama Mecânica e Fundição Ltda, situada em Sertãozinho/SP, de onde foi coletada a areia de fundição, é, em média, de 200 t/mês, correspondente a, aproximadamente, 30% da areia utilizada na fabricação dos moldes e machos, sendo os 70% restantes reutilizados na fabricação de novas peças.

O processo de moldagem usado por nessa empresa é o de cura a frio (*cold-box*), que utiliza 98,56% de areia de quartzo; 1,2% de resina fenólica e 0,24% de catalisador (20% do teor da resina), sendo 100% manual. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica da areia de

fundição proveniente dessa fundição e utilizada na pesquisa; nela nota-se que a areia é bastante uniforme.

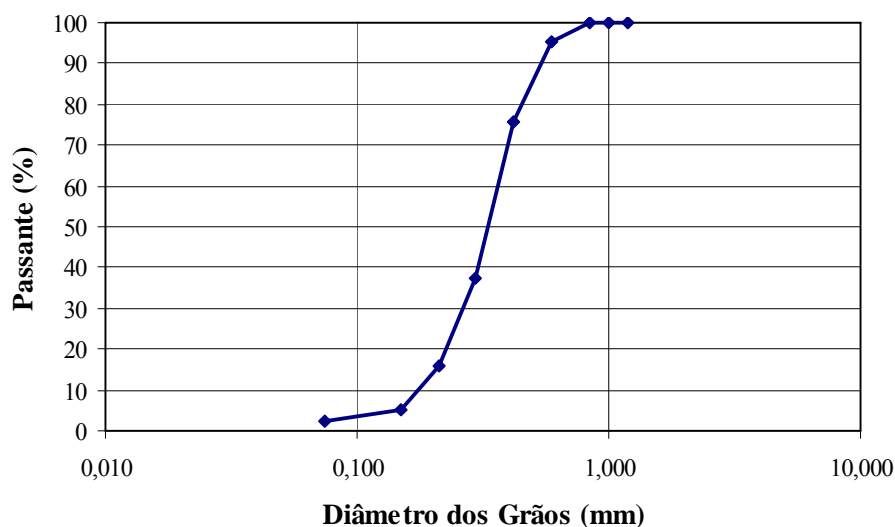


Figura 1: Distribuição granulométrica da areia de fundição da região de Sertãozinho/SP.

Considerando-se o interesse pela busca de processos alternativos que consumam grandes quantidades de areias de fundição, com a finalidade de reduzir substancialmente a estocagem deste resíduo gerado pelas indústrias siderúrgicas, decidiu-se estudar o comportamento de misturas dessas areias com solos argilosos da própria região onde o resíduo é produzido. Para isto, foi coletado um solo da região para a “fabricação” de solos artificiais, com diferentes proporções de areia de fundição / solo argiloso. O solo selecionado, oriundo do bairro Jardim Botânico em Sertãozinho/SP, apresenta características que o classificam como um Solo Laterítico Argiloso (LG’) segundo a MCT, não adequado, em princípio, para a construção de bases ou sub-bases de rodovias e vias urbanas por apresentar baixos valores de índice de suporte, tanto nos ensaios de CBR como nos de mini-CBR. A distribuição granulométrica desse solo pode ser observada na Figura 2.

A montagem de solos artificiais em laboratório, técnica já utilizada em outros experimentos (Barroso, 1996; Santana, 1998), é um recurso que possibilita o estudo de características específicas dos solos, pois permite tanto a obtenção de solos diferindo entre si apenas quanto ao parâmetro escolhido para ser analisado e como a composição de solos inexistentes na natureza. Para a montagem dos solos artificiais, adicionou-se ao solo areia de fundição em diferentes teores (0%, 20%, 40%, 60%, 70%).

Os ensaios realizados para caracterizar e avaliar os solos resultantes das misturas do Solo do Jardim Botânico com a areia de fundição foram os seguintes:

- a) Massa específica dos sólidos;
- b) Granulometria por sedimentação;
- c) Limites de Consistência;
- d) Mini-MCV e perda de massa por imersão;
- e) Mini-CBR com e sem imersão, expansão e contração na energia intermediária;
- f) CBR e expansão na umidade ótima e massa específica seca máxima da energia intermediária.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 2 são apresentadas as distribuições granulométricas dos solos artificiais para os diferentes teores de areia adicionados e na Figura 3 são mostrados os valores das massas específicas dos sólidos respectivas.

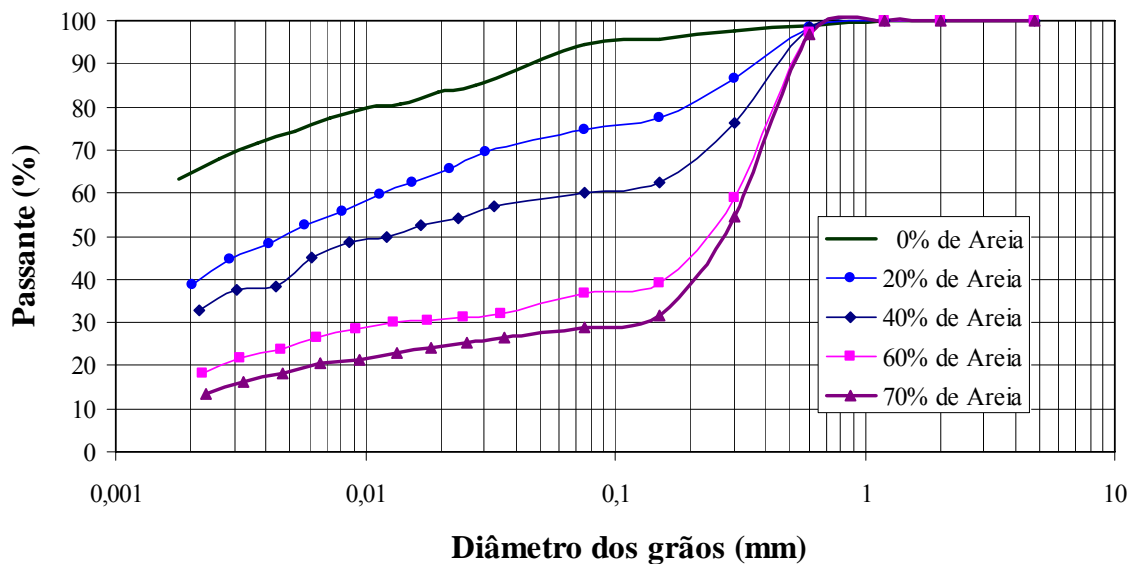


Figura 2: Distribuições granulométricas das misturas solo Jardim Botânico – areia de fundição.

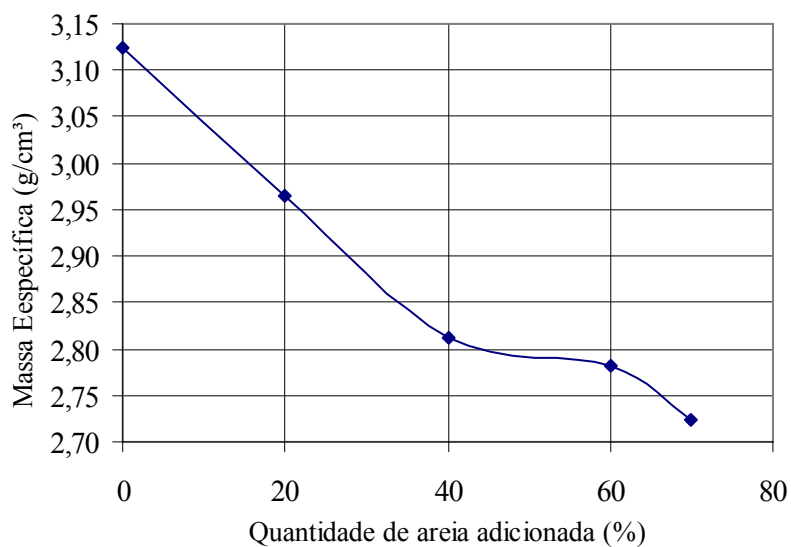


Figura 3: Massa específica dos sólidos em função do teor de areia de fundição adicionada ao solo.

Na Figura 4 são apresentadas as variações dos limites de consistência dos solos artificiais, onde nota-se que tanto o valor do Limite de Liquidez como o do Índice de Plasticidade decrescem com o aumento de teor de areia.

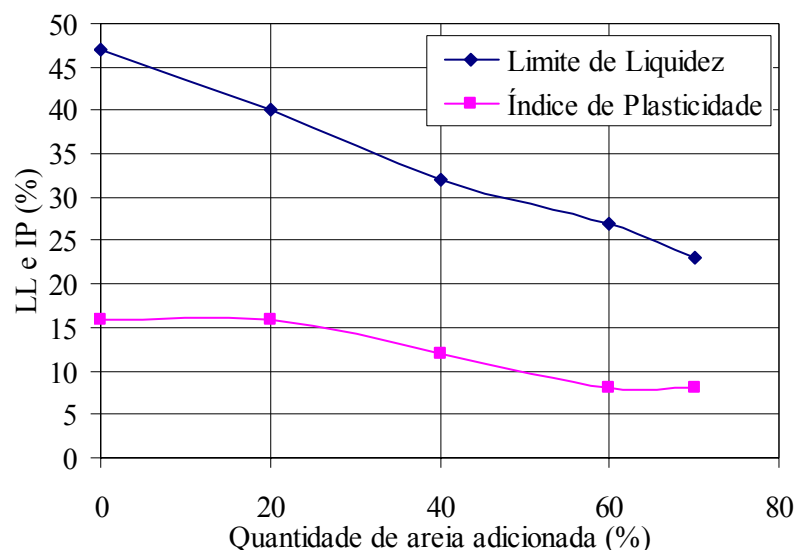


Figura 4: Limites de Consistência dos solos artificiais.

As classificações MCT dos solos artificiais são apresentadas na Figura 5. Nela percebe-se que o índice c' fez um caminhar da direita à esquerda, desde um valor maior, igual a 2,25, para o solo sem adição de areia, até um valor menor, igual a 0,95, para o solo com 70% de areia adicionada, como era esperado, uma vez que o c' traduz a argilosidade do solo, conforme Nogami e Villibor (1995). Da maneira análoga, o índice e' manteve-se aproximadamente constante (variando de 0,95 a 1,12), já que foi utilizado o mesmo solo para todos os teores de areia de fundição, também concordando, de certa maneira, com o previsto pelos mesmos autores, já que esse índice traduz o “caráter” laterítico dos solos.

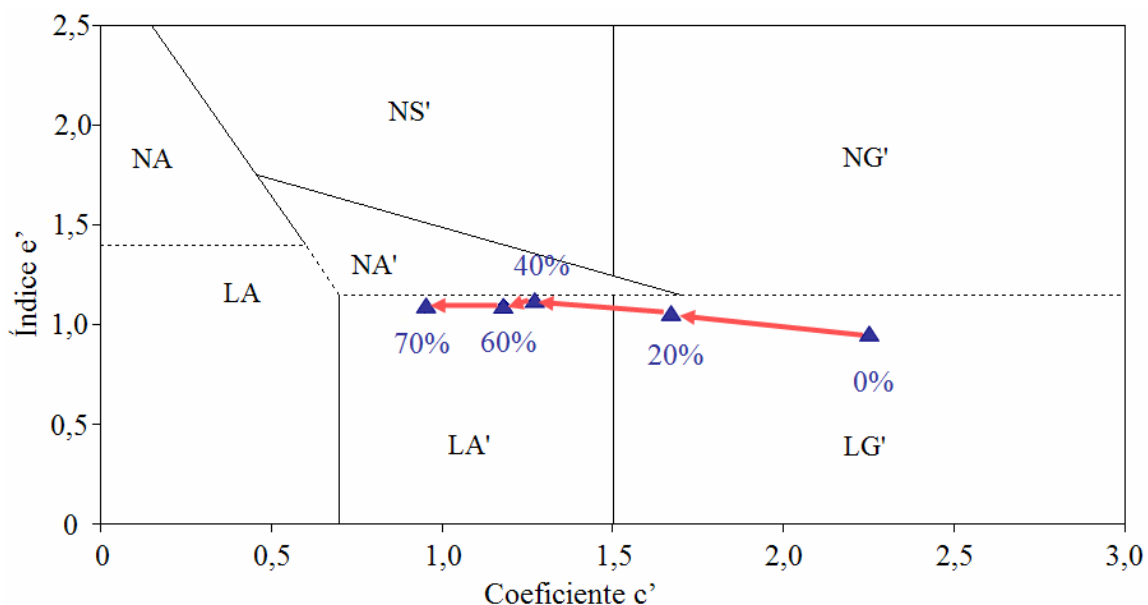


Figura 5: Classificação MCT das misturas Solo Jardim Botânico – Areia de Fundição.

A Tabela 1 apresenta um resumo das classificações USCS, HRB e MCT dos solos artificiais estudados. Analisando-se os resultados das três classificações nota-se que a adição de areia ao

solo argiloso leva à melhoria na previsão de desempenho dos materiais resultantes do ponto de vista de emprego como material na construção de rodovias. Nas classificações USCS e HRB, os solos SM e SC e A-4 e A-2-4 apresentam comportamento de bom a regular como material de subleito. Para a classificação MCT, os solos com 0 e 20% de areia apresentaram comportamento Laterítico Argiloso (LG'), indicando uso, preferencial, como proteção à erosão; entretanto, os solos com adição de 40 a 70% de areia apresentam comportamento Laterítico Arenoso (LA'), material ideal para ser usado em bases e sub-bases de pavimentos, reforços de subleitos e aterros Nogami e Villibor, 1995).

Tabela 1: Classificação das misturas de solo-areia de fundição segundo as tecnologias USCS, HRB e MCT.

% de Areia	Classificação		
	USCS	HRB	MCT
0	ML	A-7-5	LG'
20	CL	A-6	LG'
40	CL	A-6	LA'
60	SM-SC	A-4	LA'
70	SM-SC	A-2-4	LA'

A Figura 6 mostra os resultados dos ensaios de mini-CBR imediato e após 24 de imersão, para a energia intermediária de compactação. Nela verifica-se que não há uma variação muito grande dos valores de mini-CBR em função da variação do teor de areia de fundição, talvez devido à uniformidade da areia empregada. Observa-se que, para praticamente todos os teores, os valores de mini-CBR após 24h de imersão são aproximadamente iguais ou maiores que 40%, com valor máximo igual a 48% para o teor de 60% de areia.

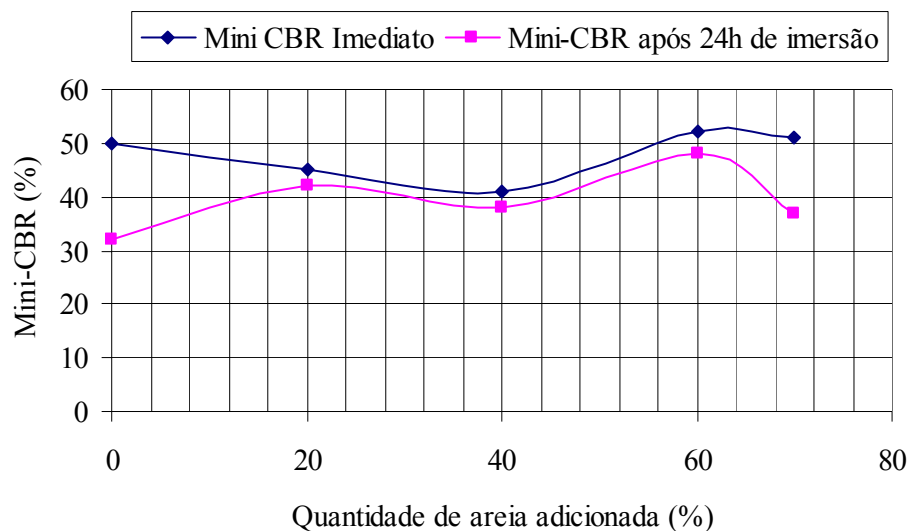


Figura 6: Valores de mini-CBR para a energia de compactação intermediária nos diferentes teores de areia adicionada.

A partir dos ensaios de mini-CBR foram obtidos também os valores de perda de suporte por imersão, contração, expansão, umidade ótima e massa específica seca máxima dos solos artificiais. A Figura 7 mostra os valores de umidade ótima para os diferentes teores de areia de

fundição adicionada ao solo, onde se verifica, como esperado, a diminuição do teor de umidade com o aumento do teor de areia. Na Figura 8 são apresentados os valores das massas específicas secas máximas, onde se constata o aumento da massa específica com o aumento do teor de areia.

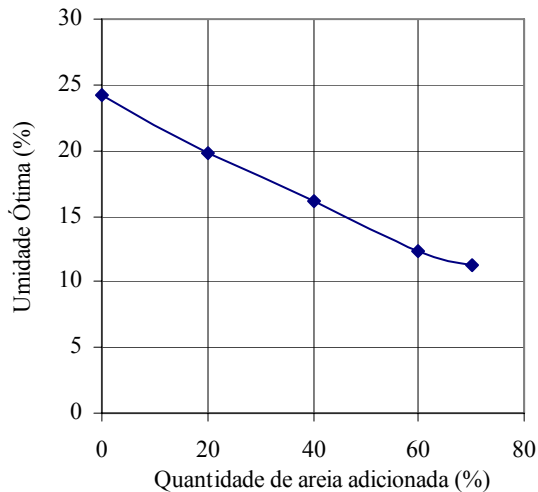


Figura 7; Umidade ótima.

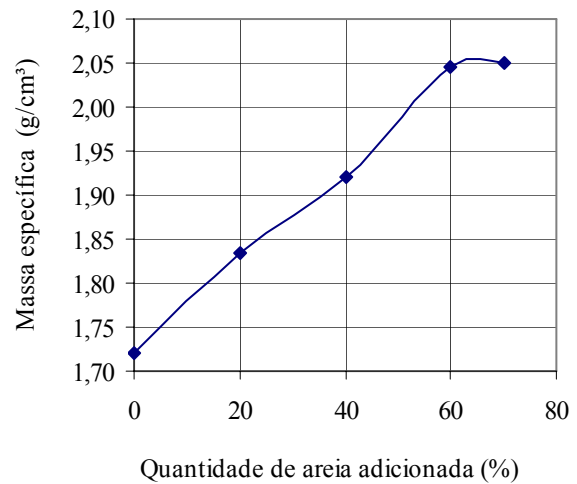


Figura 8; Massa específica seca máxima.

Na Figura 9 são apresentados os valores de contração e expansão dos solos artificiais. Nela observa-se que todos os valores de expansão são inferiores a 0,3%, o que os qualificaria para o uso em bases de pavimentos; já os valores de contração variam de 0,2 a 1,7%, sendo admissíveis, para uso em pavimentos, aqueles com teores de areia de 60 e 70%, por apresentarem contrações inferiores a 0,5%. A Figura 10 mostra os valores de perda de suporte por imersão; nela verifica-se que todos os solos apresentam perdas de suporte inferiores a 50%, condição necessária, segundo Nogami e Villibor (1995), para uso como base em pavimentos.

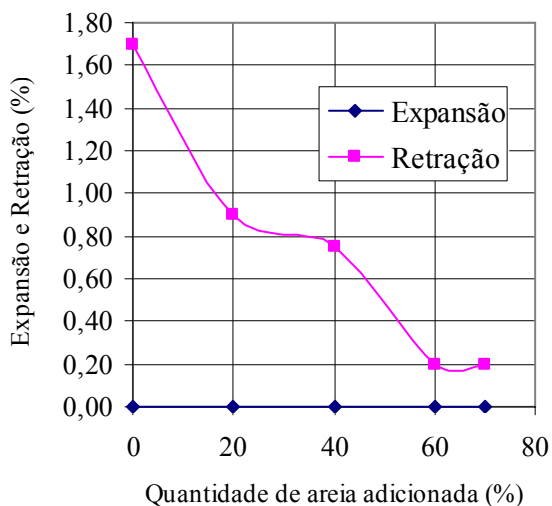


Figura 9; Expansão e Retração.

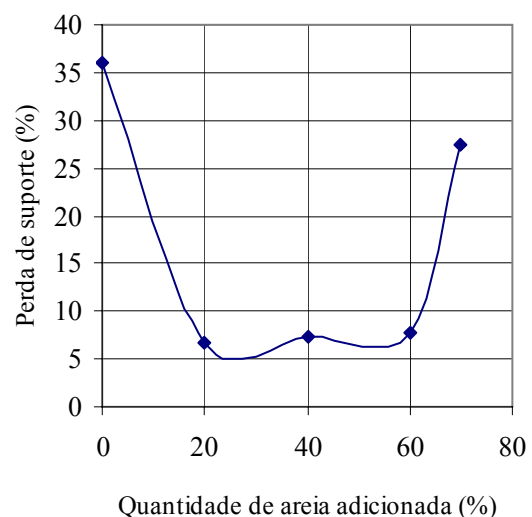


Figura 10; Perda de suporte por Imersão.

Também foram executados ensaios tradicionais de CBR (*California Bearing Ratio*) e de expansão, na energia intermediária, com a finalidade de obter os valores desses índices para

os solos artificiais montados em laboratório. Os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima utilizados nos ensaios de CBR foram os obtidos dos ensaios de mini-CBR. Na Figura 11 são apresentados os resultados desses ensaios. Nela nota-se um aumento da capacidade de suporte, a partir do solo natural, em função do aumento do teor de areia adicionada até a quantidade de 60%, de 28% para 67%; a partir deste teor de areia o valor do CBR parece decrescer.

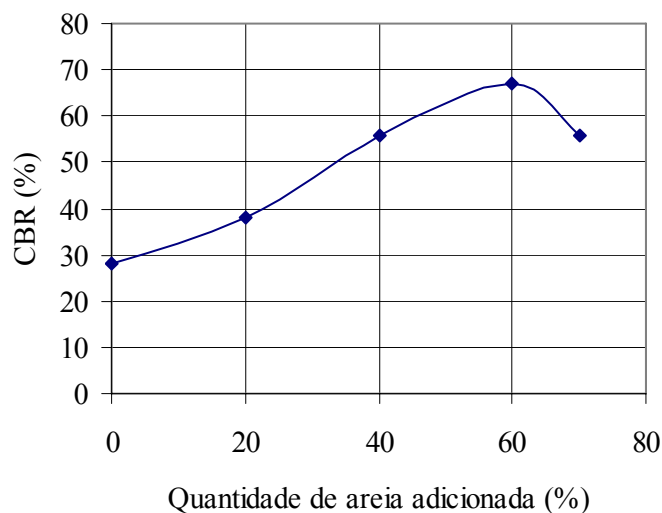


Figura 11; Valores de CBR em função do teor de areia de fundição nos solos artificiais.

A Figura 12 apresenta os valores de expansão obtidos a partir dos ensaios de CBR. Nela nota-se que a expansão dos solos decresce com o aumento do teor de areia. Para teores acima de 20%, as expansões apresentam-se menores que 0,5%, limite este fixado pelas normas brasileiras para aproveitamento dos solos como material para uso em sub-bases e bases de pavimentos.

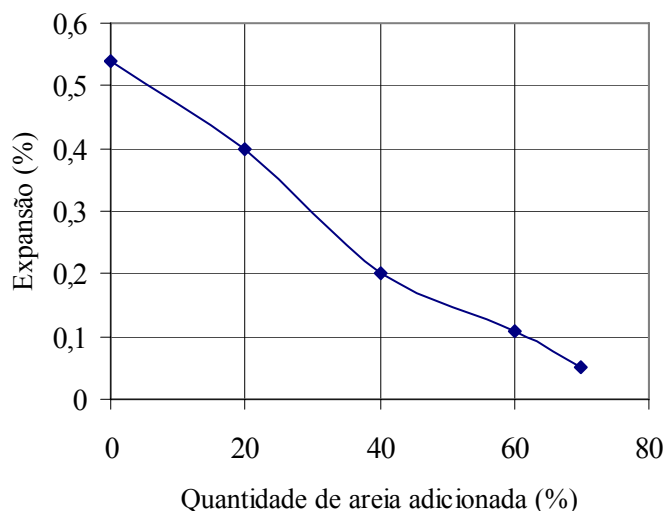


Figura 12; Expansão dos solos artificiais em função do teor de areia de fundição nos solos artificiais.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios efetuados nas misturas de areia de fundição e o solo Jardim Botânico pode-se concluir:

- Segundo as classificações tradicionais de solos, o aumento progressivo do teor de areia de fundição originou solos que apresentam comportamento de regular a bom como material de subleito na construção de rodovias;
- Segundo a classificação MCT, os índices e' e c' obtidos concordaram com o esperado, já que o e' se manteve aproximadamente constante, pois a matriz argilosa foi a mesma e o c' fez um caminamento de direita à esquerda indicando a diminuição da argilosidade dos solos com o aumento do teor de areia de fundição;
- Os resultados dos ensaios de mini-CBR indicaram pequena variação desse índice de suporte em função da variação do teor de areia de fundição. O solo artificial com 60% de areia de fundição apresentou os maiores valores de mini-CBR imediato e após 24h de imersão, iguais a 52 e 48%, respectivamente;
- As expansões obtidas nos ensaios mini-CBR foram iguais a zero para todos os teores de areia de fundição estudados e a contração diminuiu com o aumento do teor de areia;
- Ainda dos resultados dos ensaios de mini-CBR, observou-se que as umidades ótimas das misturas decresceram com o aumento do teor de areia de fundição enquanto que as massas específicas aumentaram, como era esperado;
- O maior valor de perda de suporte por imersão obtido dos ensaios de mini-CBR foi 37%, para o solo puro, sem adição de areia;
- Os valores de CBR aumentaram com o aumento do teor de areia de fundição até um máximo de 67% para o teor de areia de 60% adicionada no solo, depois disso o CBR decresce;
- As expansões obtidas dos ensaios de CBR mostraram-se decrescentes com o aumento do teor de areia de fundição adicionada ao solo.

Dos resultados dos ensaios executados em corpos de prova de dimensões reduzidas nos solos artificiais montados em laboratório, verificou-se que aquele com 60% de areia de fundição foi o que apresentou melhores propriedades mecânicas, com valores de mini-CBR após imersão de 24h igual a 48%, expansão nula, contração de 0,2% e perda de suporte por imersão da ordem de 8%. Segundo as especificações do DER-SP (1991), Seção 3.09-88 - Base de Solo Arenoso Fino Laterítico, tanto esse solo, quanto o com 70% de areia de fundição atenderiam os requisitos mínimos para serem utilizados em camadas de bases. Já com relação aos ensaios de CBR tradicional, os resultados indicam que o solo com 60% de areia de fundição poderia ser utilizado como material para base de pavimentos com tráfego leve ($N \leq 5 \times 10^6$ solicitações de eixo padrão) segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) ($CBR \geq 60\%$ e expansão $\leq 0,5\%$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aydilek, H.; Guney, Y. (2007) *Laboratory Evaluation of Foundry Sand-Amended Highway Subbases*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Barroso, S. H. A. (1996) *Estudo do comportamento de solos artificiais através da adsorção de azul de metileno* – Dissertação de Mestrado – EESC/USP.
- Bonet, I. I. (2002) *Valorização do resíduo de areia de fundição RAF. Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.* Dissertação de Mestrado – UFSC.
- Coutinho, B. N. (2004) *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas* Tese de Doutorado - EESC/USP.

- DER (1991) *Manual de Normas "Pavimentacao"*, Seção 3,09-88. Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo.
- DNIT (2006) *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR-179. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes, Rio de Janeiro.
- Javed, S.; Lovell, C. W. (1995) *Uses of Waste Foundry Sands in Civil Engineering*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- McIntyre, S., Rundman, K., Bailhood, C., Rush, P., Sandell, J., and Stillwell, B. (1992) *Benefication and Reuse of Foundry Sand Residuals: A Preliminary Report*. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, vol. 100, p.201-208.
- Nogami, J. S. (1972) *Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamento de dimensões reduzidas (ensaio mini-CBR)*. In: Reunião das Administrações Rodoviárias, 2. Brasília, Distrito Federal.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo – Brasil.
- Partridge, B. K. et al. (1999) *Field Demonstration of Highway Embankment Construction Using Waste Foundry Sand*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Santana, J. A. (1998) *Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa* – Dissertação de Mestrado – EESC/USP.

chiligk@gmail.com, glauco@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos (STT-EESC-USP)

Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13.560-970