

EFEITO DA ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU EM MISTURAS DE SOLO-CIMENTO PARA CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTAÇÃO

Livia Fernanda Araújo Borges¹

Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis²

RESUMO

Muito se fala da utilização de diversos tipos de resíduos em técnicas de pavimentação visando à melhoria das rodovias brasileiras e dar um fim útil a esses materiais. Dessa forma, o presente trabalho teve o objetivo de analisar a influência da fibra polimérica de pneu na matriz solo-cimento por meio de ensaios laboratoriais para a sua utilização em camadas de base e sub base de pavimentação. Dez amostras foram realizadas com diferentes tipos de dosagem de cimento (5%, 7% e 9%) e fibra (1% e 2%) em relação ao peso seco do solo. As amostras de solo foram submetidas a ensaios de caracterização, bem como os ensaios de compactação com a mistura de cimento e fibra para avaliação da influência do cimento e da fibra nos teores de umidade ótima e peso específico aparente seco. Além disso, corpos de prova de solo, cimento e fibra foram submetidos aos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), na idade de 7 dias. Para as diversas misturas estudadas observou-se que i) a influência do cimento nos ensaios de resistência à compressão simples é satisfatória, pois a resistência aumenta de acordo com o aumento do teor de cimento na mistura; ii) a fibra apresentou influência satisfatória neste ensaio, principalmente no teor de (7%; 1%) (cimento; fibra), apresentando resistência maior àquelas misturas sem fibra, no entanto, as misturas com teor de 2% de fibra também apresentam valores muito inferiores às demais, sendo inviável a sua utilização na matriz solo-cimento.

Palavras-chave: Solo-cimento. Fibras poliméricas. Estabilização química.

¹ Livia Fernanda Araújo Borges, Universidade Estadual de Maringá-UEM, ra77790@uem.br

² Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, jeselay@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Senço (2007), pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los.

A norma DNER 305/1997 – ES classifica a camada de base como sendo uma camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado.

Para obras rodoviárias é importante levar em consideração as propriedades dos materiais, a fim de analisar o comportamento do pavimento com relação às tensões e deformações providas do tráfego, cujas principais variáveis intervenientes são permeabilidade, capilaridade, compressibilidade, elasticidade, contratilidade, expansibilidade e resistência ao cisalhamento.

Os materiais empregados na base e sub-base necessitam, portanto, passar por uma série de ensaios e análises a fim de verificar suas propriedades, usualmente esses materiais são classificados em materiais granulares e solos. Os solos podem ser utilizados na sua condição natural ou submetidos a algum tipo de estabilização para conferir ganho de resistência à compressão e à tração com relação ao material de origem.

Os processos de estabilização mais comuns são classificados em estabilização mecânica (compactação) e estabilização química (adição de cimento Portland, cal e outros) Em alguns materiais é possível se adicionar inclusões para diminuir a fissuração e aumentar a resistência à tração (fibras naturais e sintéticas) (DNIT, 2006).

O emprego solo-cimento confere melhorias significativas ao solo natural, principalmente àqueles considerados de baixa resistência. Consistem em uma mistura compactada de solo, cimento Portland e água que promove a melhoria de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão (DNIT, 2006).

A borracha de pneu utilizada para melhoria do solo-cimento possui como matéria prima a borracha SBR (borracha estireno butadieno) que possui características elásticas e boa resistência a rupturas e a abrasão.

Diante disso, este trabalho tem o propósito de analisar o efeito da borracha de pneu em misturas de solo-cimento para a utilização em bases e sub-bases do processo de pavimentação, sendo realizados ensaios laboratoriais com quantidades diferentes de fibra de borracha e cimento na mistura.

2. DESENVOLVIMENTO

Neste trabalho foi utilizado o solo da cidade de Mandaguaçu, proveniente da decomposição do Arenito Caiuá, designado Latossolo Vermelho distrófico e constituído por um material de textura média (< 30% argila) com granulometria que pode variar de argila até areia grossa. As amostras coletadas foram devidamente peneiradas no local com uma peneira de malha N°4 (abertura 4,75mm) e colocadas em embalagens de rafia.

O cimento Portland é o principal aglomerante utilizado na construção e quando adicionado ao solo confere melhorias ao material, sendo assim empregado nas camadas de estruturas dos pavimentos. O cimento Portland utilizado foi o CP II-Z-32 cedido pela professora Dr^a. Juliana Azoia Lukiantchuki do Departamento de Engenharia Civil da UEM.

A borracha de pneu foi cedida pela empresa Guaraciaba Recauchutagem de Pneus, com sede na cidade de Maringá e para obter o resultado final o pneu passou por um processo de trituração, que é realizado por uma série de estágios onde as partículas são progressivamente reduzidas de tamanho, geralmente trituradas com tamanhos variando de 3,0mm a 0,5mm. Ao receber as amostras, é preciso peneira-las novamente conforme a granulometria utilizada nos ensaios deste projeto, sendo que a faixa granulométrica utilizada será a passante na peneira de 9,8mm e retida na peneira de 2,0mm.

2.1 Preparações das amostras e dosagens

Primeiramente os ensaios foram executados apenas com solo, posteriormente foram utilizados diferentes teores de cimento e por fim a fibra de borracha de pneu foi incorporada a matriz solo-cimento. Dessa maneira foi possível comparar os resultados em relação àqueles do solo natural e analisar a influência do cimento e da fibra. No total foram realizadas dez amostras de solo, cimento e fibra (SCF) (Tabela 1).

Tabela 1- Amostras com diferentes teores de materiais

| <i>AMOSTRAS</i> | <i>SOLO SECO (%)</i> | <i>CIMENTO (%)</i> | <i>FIBRA (%)</i> |
|-----------------|----------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 95 | 5 | 0 |
| 3 | 93 | 7 | 0 |
| 4 | 91 | 9 | 0 |
| 5 | 94 | 5 | 1 |
| 6 | 92 | 7 | 1 |
| 7 | 90 | 9 | 1 |
| 8 | 93 | 5 | 2 |
| 9 | 91 | 7 | 2 |
| 10 | 89 | 9 | 2 |

Fonte: A autora.

Para a realização dos ensaios, os componentes foram adicionados em um recipiente da seguinte forma: solo, cimento, fibra e água, em que os materiais secos eram misturados primeiro e depois se acrescentava a água a fim de obter uma amostra mais homogênea. A mistura era então passada por uma peneira nº10 (4,8mm) para que as partículas maiores fossem destorroadas, deixando-as mais uniformes granulometricamente. Em seguida, para os três ensaios (compactação, compressão simples e compressão diametral) foram executadas três camadas de compactação por corpo de prova.

Depois de compactados, os corpos de prova eram acondicionados em uma câmara úmida durante sete dias. Para todos os corpos de prova eram retirados uma pequena quantidade da mistura e transferidos para uma estufa a aproximadamente 120°C com o objetivo de determinar a umidade em que se estava trabalhando. Este procedimento era realizado no momento da compactação dos corpos de prova e após o rompimento dos mesmos para analisar se houve alteração na umidade da amostra.

2.2 Procedimentos dos ensaios de caracterização e resistência

Os ensaios laboratoriais de caracterização constituem um dos mais importantes componentes neste trabalho, uma vez que, a partir daí é possível caracterizar o solo em questão e analisar os resultados de acordo com as suas propriedades fisiológicas. Neste estudo, foram realizados os ensaios de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Ensaio Granulométrico, e Peso Específico dos Grãos, de acordo com suas respectivas normas diretrizes (Tabela 2). Com esses resultados foi possível classificar os solos a partir de diversos sistemas de classificações.

Outros ensaios também são necessários para analisar a resistência do solo e da mistura com cimento e fibra, são eles, Ensaio de Compressão Simples e Ensaio de Tração por Compressão Diametral. Estes ensaios também foram realizados conforme suas normas diretrizes (Tabela 2).

Tabela 2 - Normas utilizadas em cada ensaio de caracterização

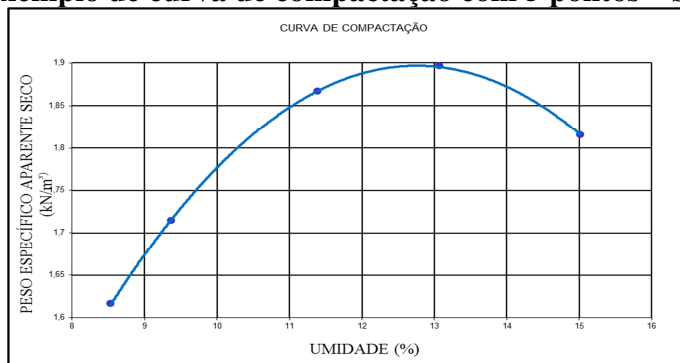
| ENSAIOS | NORMAS |
|---------------------------|-----------------------------------------------|
| Limite de Plasticidade | NBR 7180 (ABNT 1984) |
| Limite de Liquidez | NBR 6459 (ABNR 1984) |
| Peso Específico dos Grãos | NBR 6508 (ABNT 1984) |
| Análise Granulométrica | NBR 7181 (ABNT 1994) e NBR 7217(ABNT 1987) |
| Ensaio de Compactação | NBR 12023 (ABNT 1992) |
| Compressão Simples | NBR 12025 (ABNT 1990) |
| Compressão Diametral | NBR 7222 (ABNT 1994) |

Fonte: A autora.

2.2.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação seguiu as diretrizes do “Método A” da NBR 12023/1992 – Solo-cimento – Ensaio de compactação. A mistura de solo, cimento e água levou em consideração para os três primeiros pontos uma porcentagem de aproximadamente 5%, 3% e 1%, respectivamente, abaixo da umidade ótima prevista, e os outros dois pontos com uma porcentagem de aproximadamente 3% e 5% acima da umidade ótima prevista (Figura 1). O ensaio repetiu-se para as 10 amostras.

Figura 1 – Exemplo de curva de compactação com 5 pontos – SCF (9%;0%)



Fonte: A autora.

2.2.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Para a realização da moldagem dos corpos de prova foi utilizado a NBR 12024 (ABNT, 1992) com moldes cilíndricos nas dimensões 100 mm de altura, 50 mm de diâmetro.

No dia do rompimento, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio por uma prensa (Figura 2), utilizando-se um anel com capacidade de 50N. Anotava-se o valor no relógio dado em micrometros e para encontrar a resistência à compressão simples em que o corpo de prova foi submetido era necessário utilizar a equação de aferição do anel (em quilograma-força) (Equação 1).

$$F = 2,1918xL + 11,565(\text{Equação 1})$$

Figura 2 – Prensa e anel utilizado no ensaio RCS



Fonte: A autora.

Para encontrar a força média dos corpos de prova, descartava-se o valor que possuía maior desvio padrão em relação a media dos quatro valores e em seguida realizava uma média aritmética com os valores restantes.

2.2.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

Os moldes dos corpos de prova do ensaio de compressão diametral seguiram os mesmos princípios do ensaio de compressão simples.

Após os sete dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio com o auxílio de uma prensa e a utilização de duas tiras de chapa dura de fibra de madeira, de modo que a carga foi aplicada continuamente com uma velocidade aproximada de 0,05MPa/s até a ruptura do corpo de prova (Figura 3). O anel utilizado foi de capacidade manual de 50N. O valor lido no relógio do anel era apresentado em micrometros e para encontrar a carga máxima era necessário utilizar a equação de aferição do anel (em quilograma-força) (Equação 2).

$$F = 0,1785xL + 3,6095 \text{ Equação (2)}$$

Figura 3 – Prensa e anel utilizado no ensaio RTCD



Fonte: A autora.

Segundo a NBR 7222 (ABNT, 1994), a resistência à tração por compressão diametral é dada pela Equação 3:

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F}{\rho \times d \times L} \text{Equação (3)}$$

Onde $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05MPa.

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

L = altura do corpo de prova (mm)

Analogamente ao ensaio de compressão simples, os valores das forças também foram submetidos à média aritmética com descarte de um valor com maior desvio padrão.

2.3 Resultados e análises dos ensaios de caracterização

Para caracterizar o solo utilizado neste trabalho foram utilizados ensaios de caracterização e dados obtidos a partir da curva de compactação do solo (Tabela 3)

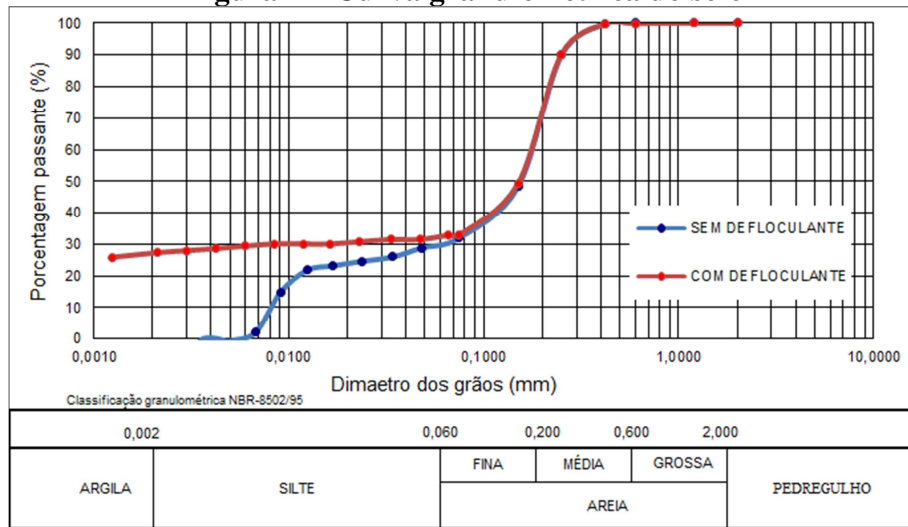
Tabela 3 – Parâmetros dos ensaios de caracterização do solo

| | Areia (%) | Silte (%) | Argila (%) | LL (%) | LP (%) | IP (%) | γ_s (g/cm ³) | $\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³) | $w_{ót}$ (%) |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|--------|--------|--------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| <i>Com defloculante</i> | 68,0 | 4,0 | 28,0 | 28 | 15 | 13 | 2,740 | 1,895 | 12,70 |
| <i>Sem defloculante</i> | 70,0 | 30,0 | - | | | | | | |

Fonte: A autora.

Para a curva granulométrica do solo escolheu-se fazer o ensaio de dois tipos, a i) curva sem defloculante e ii) curva com defloculante, um reagente que evita a sedimentação rápida. Dessa maneira, é possível analisar que na curva ii) a presença de argila, silte e areia é notada, enquanto que na curva i) apenas as partículas com diâmetro a partir dos siltes começam a ser observadas (Figura 4).

Figura 4 – Curva granulométrica do solo



Fonte: A autora.

A partir dos dados apresentados a cima é possível classificar o solo pela granulometria e pelos sistemas de classificação Unificada e HBR. As outras classificações (genética e pedológica) foram possíveis através de Gutierrez (2005) que também estudou os solos do oeste do Paraná (Tabela 4).

Tabela 4 – Classificação do solo

| <i>Profundidade da amostra</i> | <i>Genética</i> | <i>Pedológica</i> | <i>Granulométrica Unificada</i> | <i>HBR</i> |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 2,0 a 2,5m | Solo evoluído do Arenito Caiuá | Latossolo vermelho distrófico (arenoso) | Areia fina argilosa | SC A-2-6(1) |

Fonte: A autora.

2.4 Resultados e análises da curva de compactação

O Quadro 1 apresenta os resultados encontrados do peso específico aparente seco e do teor de umidade ótimo de cada amostra de solo, cimento (%) e fibra (%) (SCF) compactadas na energia normal.

| AMOSTRA | $g_d \text{ máx (g/cm}^3)$ | $w_{ót} (\%)$ |
|-------------|----------------------------|---------------|
| SCF (5%;0%) | 1,865 | 13,6 |
| SCF (5%;1%) | 1,89 | 12,2 |
| SCF (5%;2%) | 1,833 | 13,1 |
| SCF (7%;0%) | 1,878 | 13,4 |
| SCF (7%;1%) | 1,899 | 12,7 |
| SCF (7%;2%) | 1,84 | 13,3 |
| SCF (9%;0%) | 1,855 | 13,3 |
| SCF (9%;1%) | 1,88 | 12,2 |
| SCF (9%;2%) | 1,84 | 13,3 |

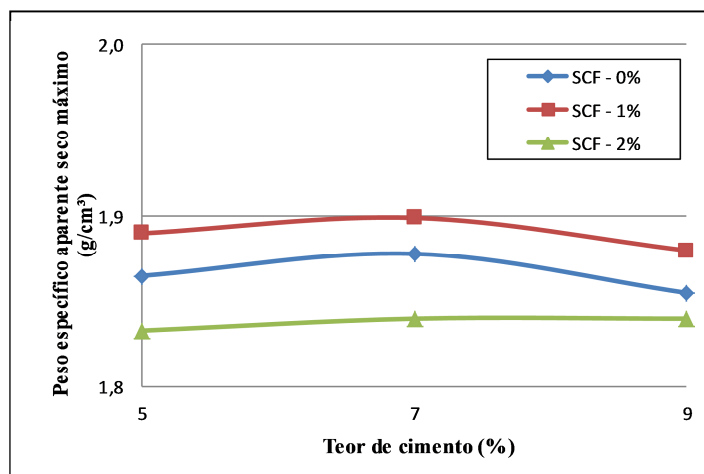
Quadro 1 – Peso específico aparente seco e teor de umidade ótima de misturas de solo, cimento e fibra

Fonte: A autora.

É possível analisar que o solo e a fibra de pneu pouco influenciaram no peso específico aparente seco e no teor de umidade ótima da mistura, com os valores obtidos bem próximos. O peso específico aparente seco variou de 1,840 g/cm³ a 1,899 g/cm³, enquanto que os teores de umidade ótima variaram de 12,2% a 13,6%.

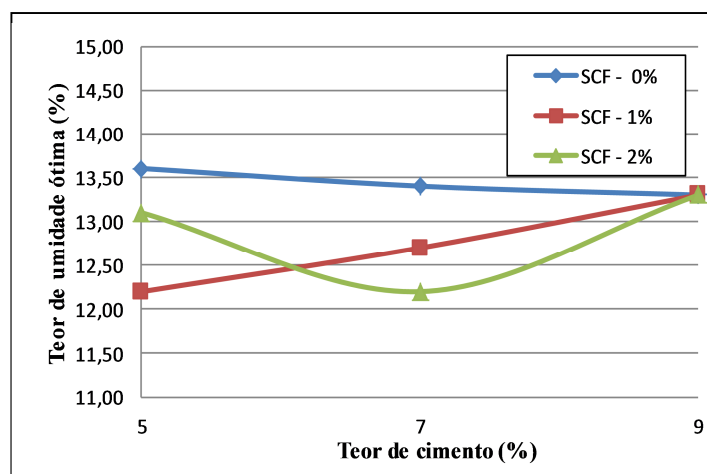
No entanto para avaliar a real influência de cada material em relação à mistura é necessário utilizar outros meios de análise, como gráficos, que possibilitam descrever o comportamento dos materiais de maneira mais clara, conforme mostrados nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Peso específico aparente seco máximo x teor de cimento



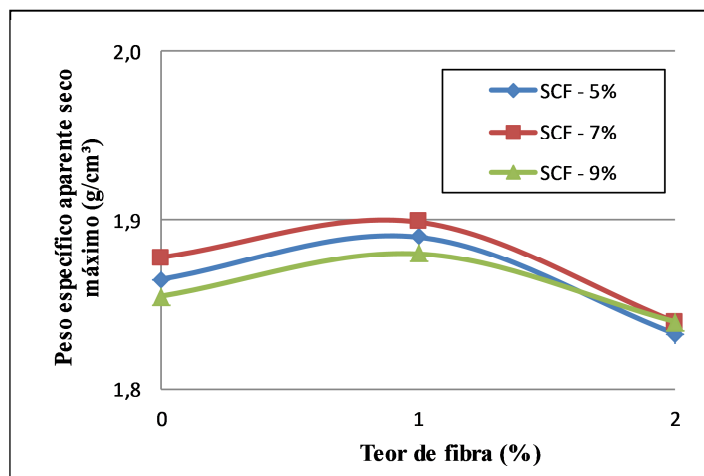
Fonte: A autora.

Figura 6 – Teor de umidade ótima x teor de cimento



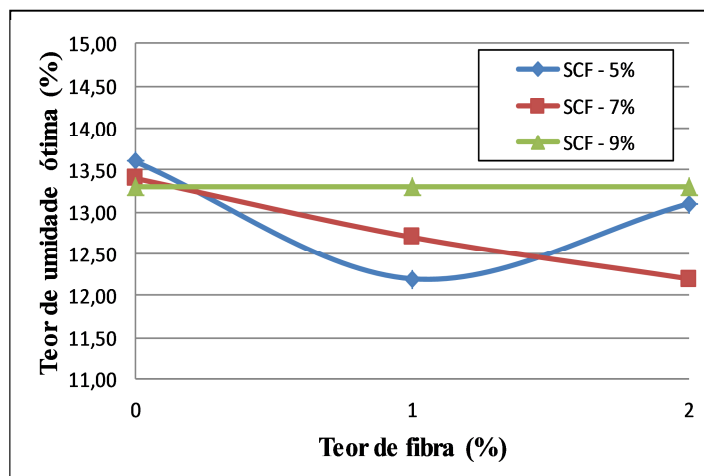
Fonte: A autora.

Figura 7 – Peso específico aparente seco máximo x teor de fibra



Fonte: A autora.

Figura 8 – Peso específico aparente seco máximo x teor de fibra



Fonte: A autora.

Analisando as Figuras 5 e 6 é possível perceber que o peso específico aparente seco máximo diminui com a adição de cimento e o teor de umidade se estabiliza com maiores teores de cimento, porém pouco significativo. Para as Figuras 7 e 8 a análise é análoga ao cimento, uma vez que o peso específico aparente seco máximo diminui com a adição de fibra, no entanto, para o teor e umidade é possível analisar que as misturas sem fibras se estabilizam e as misturas com 1% 2 % de fibra alteram a umidade ótima sem uma padronização.

2.5 Resultados e análises do ensaio RCS

A resistência não drenada da mistura de solo, cimento e fibra foi obtida através do ensaio de compressão simples. Após a ruptura dos corpos de prova, dos cálculos com a equação do anel da prensa utilizada foi encontrado a carga máxima no momento da ruptura e para encontrar a resistência à compressão simples, dividiu-se este valor pela área transversal do corpo de prova. O Quadro 2 mostra a RCS definida como a média obtida entre os valores de quatro corpos de prova, sendo descartado o valor que apresentou resistência fora do intervalo de confiança definido pela média mais ou menos o desvio padrão.

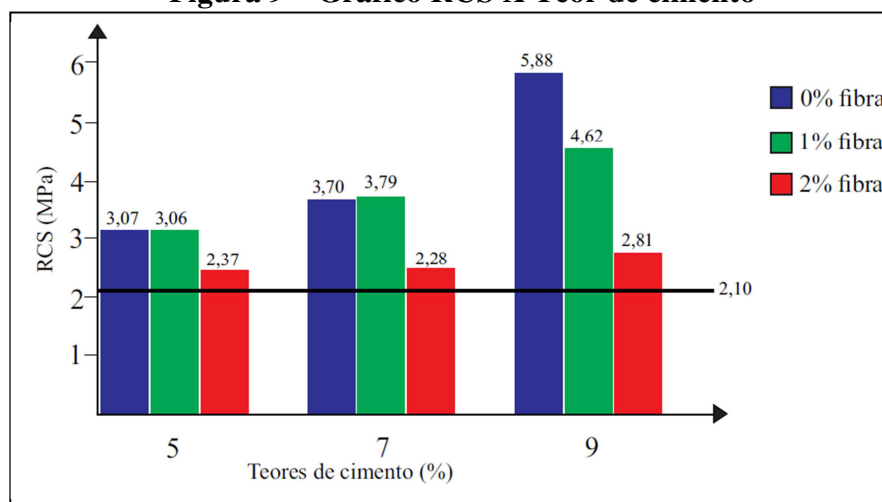
| AMOSTRAS | RCS (MPa) | RCS (MPa) | RCS (MPa) | RCS médio (MPa) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| SCF (5%;0%) | 3,22 | 3,02 | 2,97 | 3,07 |
| SCF (5%;1%) | 3,3 | 3,26 | 2,63 | 3,06 |
| SCF (5%;2%) | 2,57 | 2,29 | 2,24 | 2,37 |
| SCF (7%;0%) | 3,58 | 3,8 | 3,72 | 3,7 |
| SCF (7%;1%) | 3,44 | 3,63 | 4,3 | 3,79 |
| SCF (7%;2%) | 2,15 | 2,4 | 2,29 | 2,28 |
| SCF (9%;0%) | 5,7 | 5,73 | 6,2 | 5,88 |
| SCF (9%;1%) | 4,3 | 4,91 | 4,64 | 4,62 |
| SCF (9%;2%) | 3,24 | 2,91 | 2,29 | 2,81 |

Quadro 2 - Resultados das amostras submetidas à RCS (MPa)

Fonte: A autora.

Através dos resultados obtidos foi avaliada a influência do teor de cimento e de fibra de pneu na RCS (Figura 4.6).

Figura 9 – Gráfico RCS X Teor de cimento



Fonte: A autora.

A influência do teor de cimento pode ser percebida significativamente, pois para todas as amostras as resistências obtiveram valores acima de 2,1 MPa e além disso o solo natural obteve um valor de 0,33MPa, bem abaixo das demais misturas. O teor de cimento que obteve maiores valores à resistência foi o de 9%, constatando que quanto maior o teor de cimento neste caso maior a resistência obtida no final da amostra.

2.6 Resultados e análises do ensaio RTCD

A resistência a tração da mistura de solo, cimento e fibra foi obtida através do ensaio tração por compressão diametral. Após a ruptura dos corpos de prova, dos cálculos com a equação do anel da prensa utilizada foi encontrado a carga máxima no momento da ruptura e para encontrar a

resistência a compressão simples, utilizou-se a Equação 2 para encontrar a carga máxima de tração e dividiu-se este valor pela área transversal do corpo de prova. Dessa forma foram obtidos os valores de RTCD de cada amostra (Quadro3).

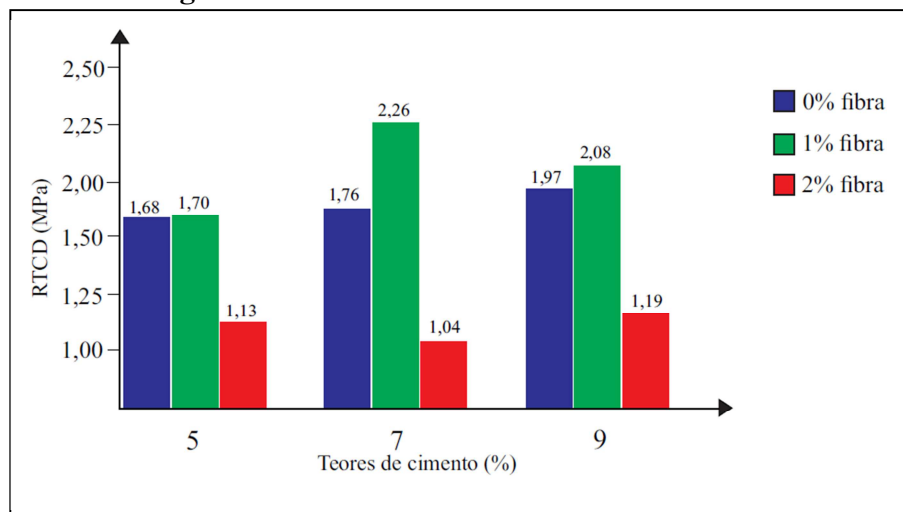
| <i>AMOSTRAS</i> | <i>RTCD (MPa)</i> | <i>RTCD (MPa)</i> | <i>RTCD (MPa)</i> | <i>RTCD médio (MPa)</i> |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| SCF (5%;0%) | 1,55 | 1,72 | 1,77 | 1,09 |
| SCF (5%;1%) | 1,66 | 1,65 | 1,78 | 1,10 |
| SCF (5%;2%) | 1,18 | 1,09 | 1,11 | 0,76 |
| SCF (7%;0%) | 1,25 | 1,39 | 1,14 | 0,88 |
| SCF (7%;1%) | 2,15 | 2,19 | 2,43 | 1,45 |
| SCF (7%;2%) | 1,02 | 1,02 | 1,09 | 0,68 |
| SCF (9%;0%) | 1,25 | 1,39 | 1,14 | 0,88 |
| SCF (9%;1%) | 2,25 | 2,02 | 1,96 | 1,42 |
| SCF (9%;2%) | 1,1 | 1,38 | 1,1 | 0,83 |

Quadro 3 - Resultados das amostras submetidas à RTCD (MPa)

Fonte: A autora.

Através dos resultados obtidos foi avaliada a influência do teor de cimento e de fibra de pneu na RTCD (Figura 4.7).

Figura 10 – Gráfico RTCD x Teor de cimento



Fonte: A autora.

Avaliando a influencia do teor de cimento nos resultados, é possível analisar que não houve uma linearidade nos resultados. As amostras de cimento com 0% e 1% de fibra de pneu tiveram resultados significativos, sendo possível perceber que a fibra aumentou a resistência do material, no

entanto, as amostras com 2% de fibra de pneu alteraram a resistência da mistura para inferior às aquelas com 0% e 1% de fibra.

3. CONCLUSÃO

Na análise dos resultados em relação à compactação dos materiais, pode-se concluir que a inclusão de fibra não causou alterações significativas nos picos de umidade.

Quanto ao comportamento mecânico dos materiais, concluiu-se que nos ensaios de RCS a inclusão de cimento apresentou um aumento significativo comparado ao solo natural, esse percentual chegou a 1000% de aumento. Já a inclusão de fibra não apresentou aumento de resistência comparado ao solo natural e ao solo misturado com cimento. Nos ensaios de RTCD a inclusão de cimento também apresentou um aumento em relação ao solo natural, chegando a 300%. A inclusão de fibra apresentou aumento de resistência em relação ao solo natural e ao solo misturado com cimento.

Em relação ao emprego da mistura para as camadas de base e sub-base, é possível citar que o solo é apropriado para as condições de uso em camadas de pavimentação e a mistura que apresentou melhores resultados para ser empregada com o objetivo de resistir a cargas de tração dos veículos é o teor de 7% de cimento com 1% de fibra de pneu.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 305. Pavimentação – base de solo-cimento**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ª ed., Rio de Janeiro, 2006.278p.

SENÇO, W., **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª ed., São Paulo: PINI, 2007. 761p.