

Na Figura 5.19, é possível notar que para as duas energias de compactação existem níveis de resistência distintos, principalmente para os menores teores de umidade, mas diretamente associados a estes.

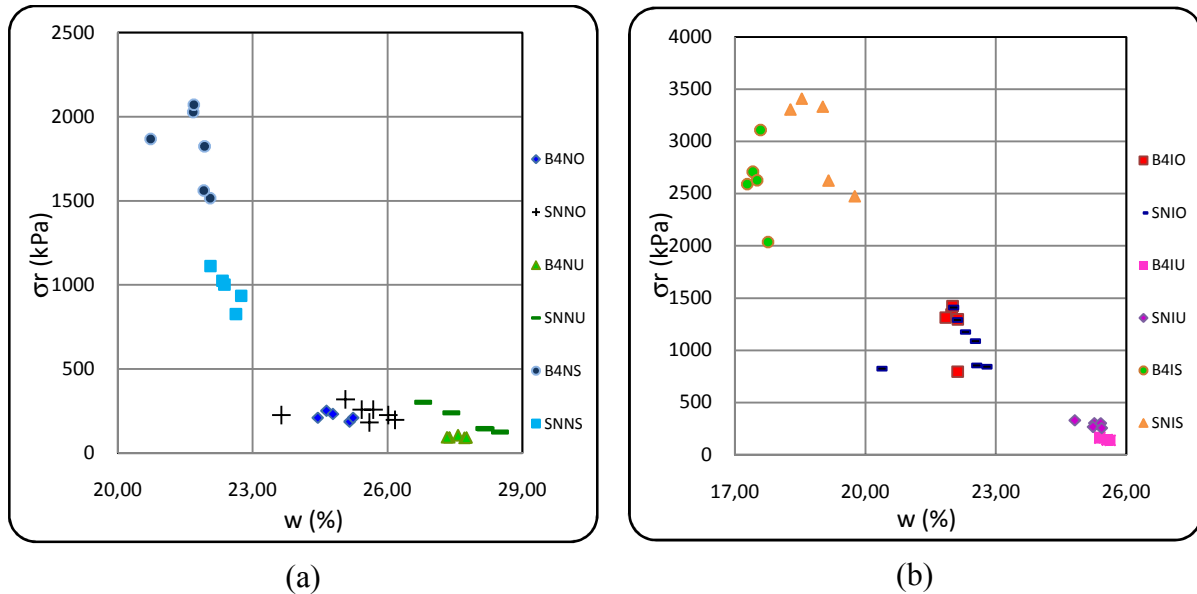


Figura 4.19 Relação  $\sigma_r - w\%$  (a) energia normal. (b) energia intermediária.

Nota-se nos resultados apresentados que os valores de resistência máxima não mudam muito após a adição do meio B4. Isso indica preliminarmente que o tratamento não estaria sendo efetivo quanto à influência na coesão.

Como de modo geral o comportamento do solo varia com o índice de vazios, optou-se por também analisar-se a influência desse índice. Os resultados analisados foram obtidos para corpos de prova compactados na condição ótima e em seguida conduzidos às distintas umidades.

A Figura 4.20 mostra que quanto à umidade, as variações para cada condição de cura e tratamento chegam a atingir 1,7% e para o índice de vazios elas são em alguns casos de até 0,08, sendo que em ambos os casos a dispersão pode ser considerada importante. Como os corpos de prova foram compactados aproximadamente na mesma condição, condição ótima, a tendência do índice de vazios a aumentar com o crescimento da umidade se deve provavelmente à expansão. Todavia, de modo geral, analisando-se os índices de vazios das amostras verifica-se que os valores de “e” para as amostras com o tratamento B4 são semelhantes aos valores obtidos para os corpos de prova de solo natural.

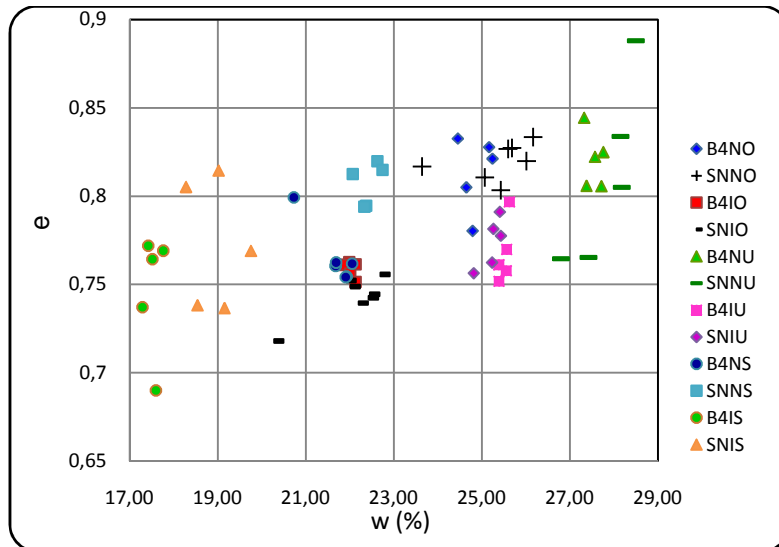


Figura 4.20 Relação  $w\%$  -  $e$  (SN – B4)

Com isso apenas a título de ilustração a Figura 4.21 mostra não ser possível estabelecer tendência clara de variação da resistência com o índice de vazios. Observa-se que mesmo para a mesma condição de tratamento inexistente qualquer tendência.

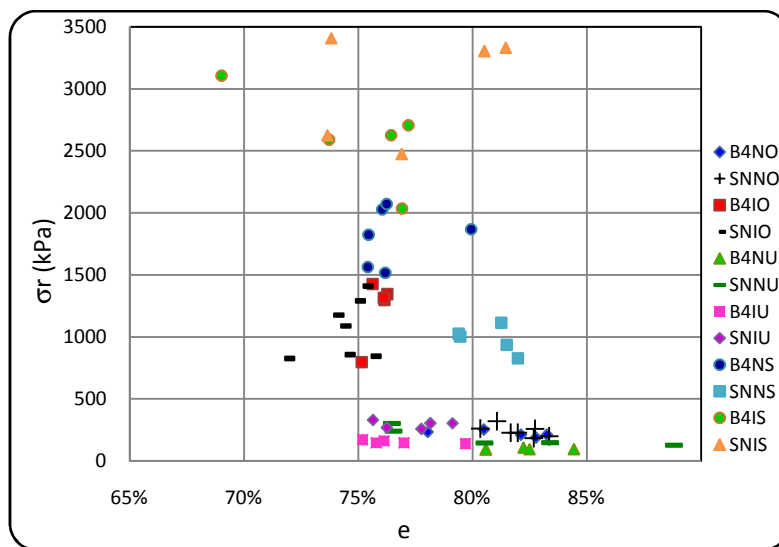


Figura 4.21 Relação  $\sigma_r$  –  $e$  (SN-B4)

Apesar da inexistência de relação direta e clara entre a resistência e o índice de vazios, optou-se por analisar também a relação entre a resistência a compressão simples ( $\sigma_r$ ) e o grau de saturação ( $S_r$ ) (Figura 4.22). A tendência obtida é semelhante e coerente com aquela verificada para o teor de umidade  $e$ , a exemplo do que foi verificado em relação às curvas características, a dispersão também tende a aumentar se comparada com a existente para os resultados correlacionados com a umidade. Quanto à influência do meio B4 na resistência à compressão simples, ela continua não se destacando.

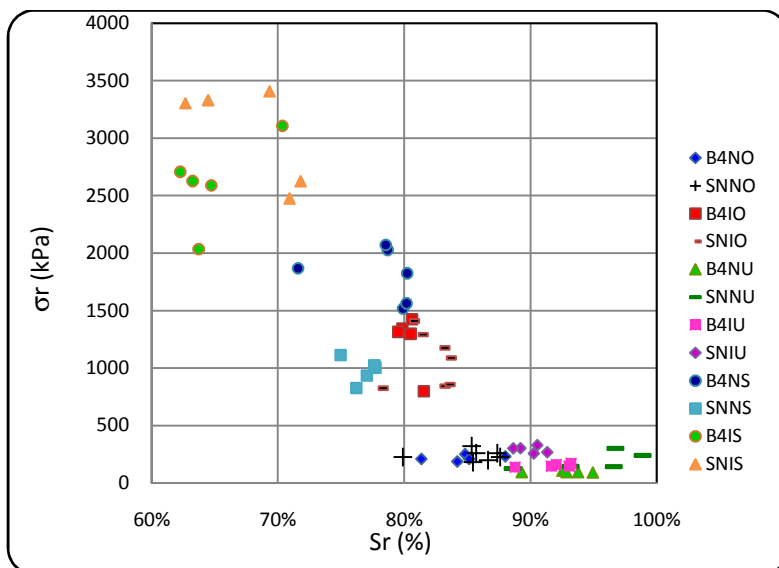


Figura 4.22 Relação  $\sigma_r$  –  $S_r$  % (SN – B4)

Na Figura 4.23 se separou os resultados obtidos para a energia equivalente ao Proctor normal (a) daqueles obtidos para a energia equivalente ao Proctor intermediário (b). Observa-se desses resultados que apenas para o ponto correspondente ao ramo seco da energia normal registra-se uma melhoria no comportamento do solo com a adição do meio B4, isso talvez devido à menor umidade e menor índice de vazios dos corpos de prova nessa condição (Figura 4.21).

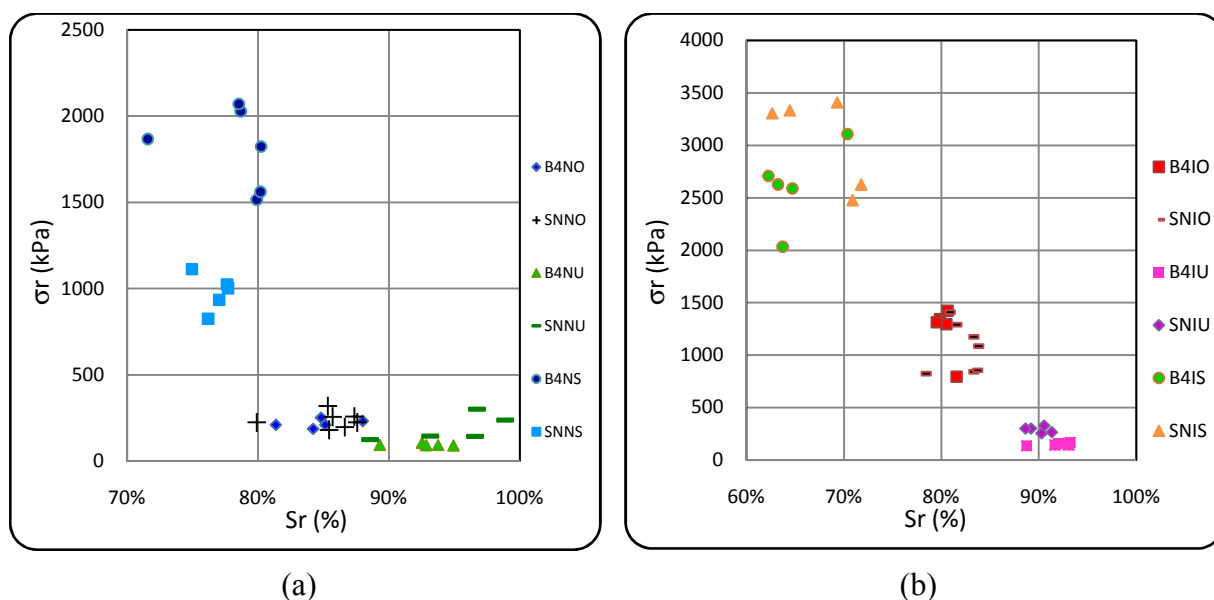


Figura 4.23 Relação  $\sigma_r$  –  $S_r$  % (a) energia normal (b) energia intermediária

Analisando-se os resultados de resistência à compressão simples ( $\sigma_r$ ) em função da sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) (Figura 4.24), verifica-se como no caso da figura anterior, que apenas os corpos de prova compactados na umidade ótima da energia equivalente ao Proctor normal e

conduzidos ao ramo seco, apresentaram melhoria clara da resistência com o tratamento com o meio B4. Uma ligeira tendência de melhoria é também verificada para o solo mantido na condição ótima da energia equivalente ao Proctor intermediário. Destaca-se ainda, que os resultados obtidos para o solo tratado com o meio B4 e conduzidos ao ramo úmido, tenderam a ser piores que os obtidos para o solo sem tratamento.

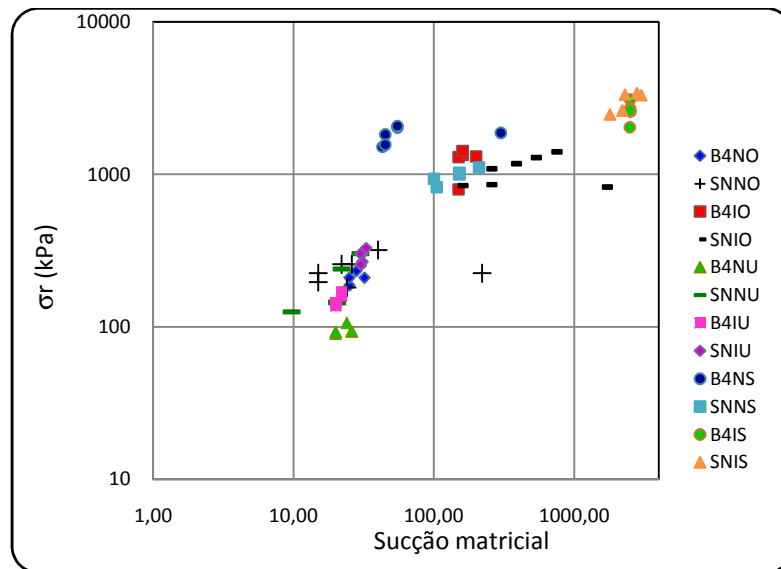


Figura 4.24 Relação Sucção -  $\sigma_r$  (SN – B4)

Para eliminar a influência do índice de vazios no comportamento analisado em função da sucção, foram plotados (Figura 4.25), os pontos de resistência a compressão simples ( $\sigma_r$ ) em função da sucção em pF (pF corresponde ao logaritmo da sucção em cm de coluna de água) normalizada em relação ao índice de vazios (pF/e), conforme proposta apresentada por Camapum de Carvalho e Pereira (2001). Nessa nova forma de análise dos dados se verifica com maior clareza as observações realizadas quanto aos resultados mostrados na Figura 5.34, ou seja, os corpos de prova conduzidos ao ramo seco da energia equivalente ao Proctor normal e aqueles mantidos na condição ótima da energia equivalente ao Proctor intermediário apresentaram melhoria na resistência com o tratamento com o meio B4. Já no ramo úmido, independentemente da energia de compactação, o solo tratado com o meio B4 tendeu a apresentar resistência menor para um mesmo valor de sucção normalizada.

Com base nas análises efetuadas a partir da Figura 4.24 e da Figura 4.25, e levando-se em conta as variações de plasticidade quando da adição do meio B4 ao solo e sua relação com a coesão e, portanto, com a resistência à compressão simples, pode-se inferir que o tratamento com o meio B4 estaria criando condições de melhoria no comportamento mecânico do solo.

Explicando melhor, para umidades maiores onde predominaria o efeito da interação solo-água, e portanto da plasticidade, o comportamento do solo tratado com o meio B4 está piorando, no entanto, nas outras duas condições citadas, tornando-se o comportamento menos dependente dessa interação os possíveis novos compostos gerados melhoram o desempenho. Poder-se-á, no entanto, questionar por que o meio B4 não estaria melhorando o comportamento do solo para umidades ainda menores e sucções maiores como é o caso do solo conduzido ao ramo seco da energia equivalente ao Proctor intermediário? Nesse caso, embora mais estudos seriam necessários, é preciso lembrar que a atuação bacteriana depende de condições propícias de umidade e de porosidade.

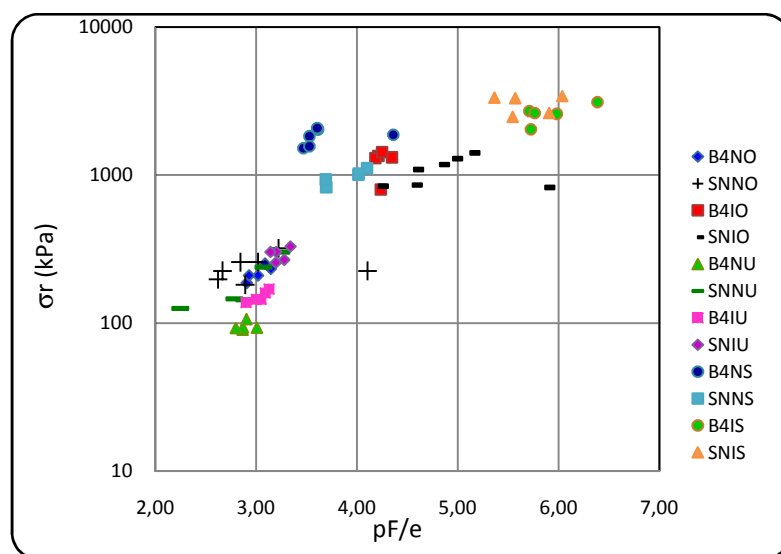


Figura 4.25. Relação sucção normalizada -  $\sigma_r$  (SN – B4)

Ao serem comparados os tipos de ruptura dos corpos tratados com meio B4 em relação aos não tratados, verifica-se que enquanto os tratados tendem a apresentar plano de ruptura inclinado, nos não tratados ele não é claro ou tende a ser verticalizado. (Figura 4.26).

Cabe ressaltar que nos corpos de prova tratados e mantidos na umidade ótima ou submetidos à redução de umidade foi possível observar a formação de uma película branca recobrendo-os como mostra a Figura 4.26 (b). Porém, para os corpos de prova submetidos ao aumento de umidade tal constatação não foi verificada apesar de se observar uma mudança na textura superficial. Estes corpos de prova umedecidos, quando secos em estufa após a realização dos ensaios de compressão simples, passavam a apresentar as mesmas características dos demais, ou seja, as películas superficiais seriam simples deposições químicas de precipitado não correspondendo nesse caso à formação de carbonato de cálcio.



Figura 4.26 Falhas dos corpos de prova em compressão simples (a) SNIO (b) B4IO

#### 4.1.4.3 COMPRESÃO DIAMETRAL

Foram realizados ensaios de compressão diametral sobre os corpos de prova utilizados na determinação das curvas características, ou seja, as diferentes umidades de ruptura foram ajustadas nos corpos de prova depois de efetuada a cura com o solo nas três condições de umidade fixadas para o estudo: ramo seco, umidade ótima e ramo úmido. Portanto, nos gráficos as referências umidade ótima (intermediário  $\rightarrow$  IO e normal  $\rightarrow$  NO), seco (intermediário  $\rightarrow$  IS e normal  $\rightarrow$  NS) e úmido (intermediário  $\rightarrow$  IU e normal  $\rightarrow$  NU) se referem à condição de energia de compactação e cura, não de ruptura. Sendo assim, torna-se possível distinguir a influência da umidade de cura daquela referente à umidade de ruptura.

O conjunto de resultados de resistência à tração obtido é mostrado na Figura 4.27. Verifica-se que para umidades de ruptura inferiores a aproximadamente 20% o meio B4 aumenta a resistência à tração independentemente da condição de cura, no entanto, as resistências obtidas para o solo com cura úmida são inferiores aos obtidos para o solo curado na umidade ótima e no ramo seco. Cabe ainda destacar que para os solos não tratados as resistências obtidas para umidades inferiores à ótima são semelhantes, o que não se verifica para o solo tratado. Isso indica que a condição de cura para o meio B4 é relevante e que ele afeta o comportamento do solo. Para umidades superiores a 20%, o efeito do tratamento e da cura, nesse gráfico é de difícil definição. Para melhor visualização do comportamento se apresenta na Figura 4.28 os resultados obtidos para o solo compactado na energia equivalente ao Proctor normal (a) separadamente da equivalente ao Proctor intermediário (b).

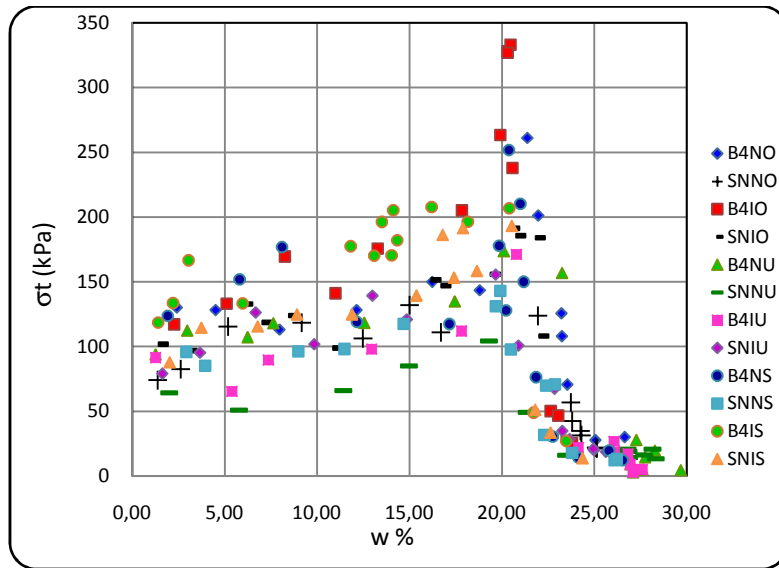
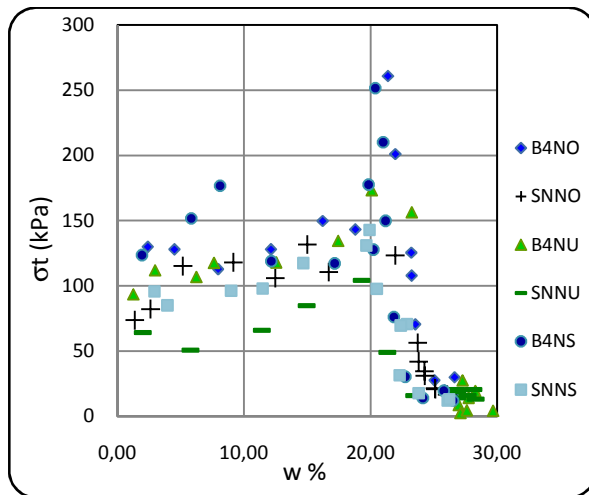
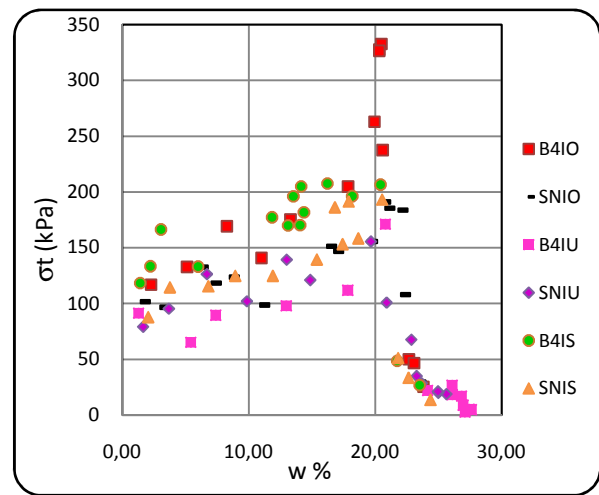


Figura 4.27 Relação  $w\%$  -  $\sigma_t$  (SN - B4)



(a)



(b)

Figura 4.28 Variação  $\sigma_t - w\%$  (a) energia normal (b) energia intermediária

A Figura 4.29 aponta para dispersão mais significativa nos solos tratados em relação aos não tratados. Ressalta-se que todas as amostras apresentam um comportamento semelhante para umidades iguais ou superiores a 24%, tanto para o SN quanto para o solo com adição do meio B4.

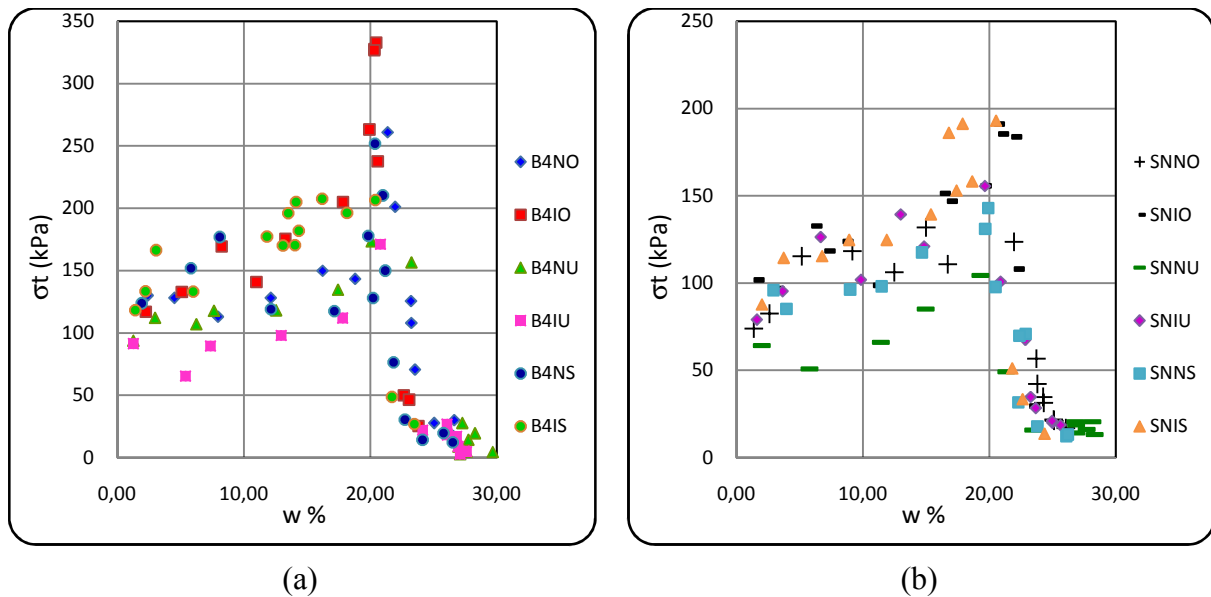


Figura 4.29 Relação  $w \%$  -  $\sigma_t$  (a) B4 (b) SN

Aparentemente, com base nos resultados apresentados, o tratamento tem maior influência para umidades entre 20% e 22% aproximadamente.

Quando feita a relação entre índice de vazios e resistência à tração (Figura 4.30), observa-se, que apesar da grande dispersão, os valores de “e” para as amostras tratadas mostram-se de modo geral inferiores aos obtidos para o solo sem tratamento.

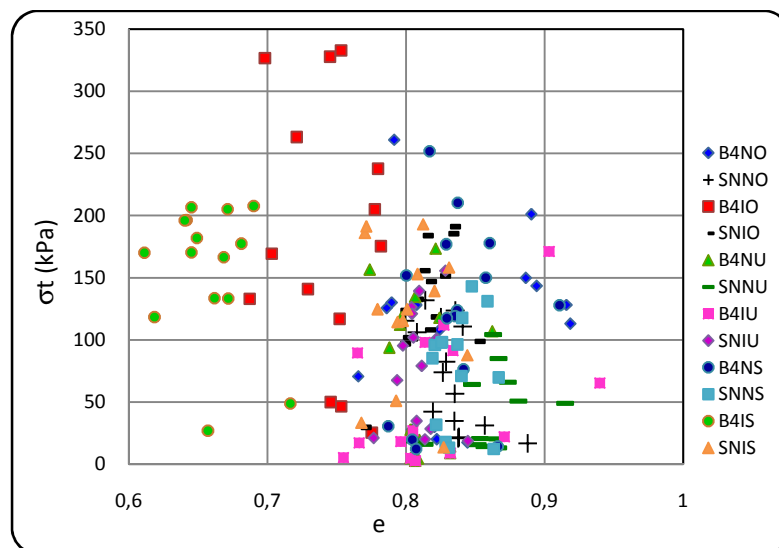


Figura 4.30 Relação  $e$  -  $\sigma_t$  (SN - B4)

Ao se analisar a variação de “e” em função de  $w\%$ , é possível inferir que as variações de porosidade estão ligadas à compactação e não a efeitos de expansão ou retração durante os processos de umedecimento e secagem das amostras (Figura 4.31). Observa-se ainda que essa dispersão tende a ser maior nas amostras tratados que nas naturais.



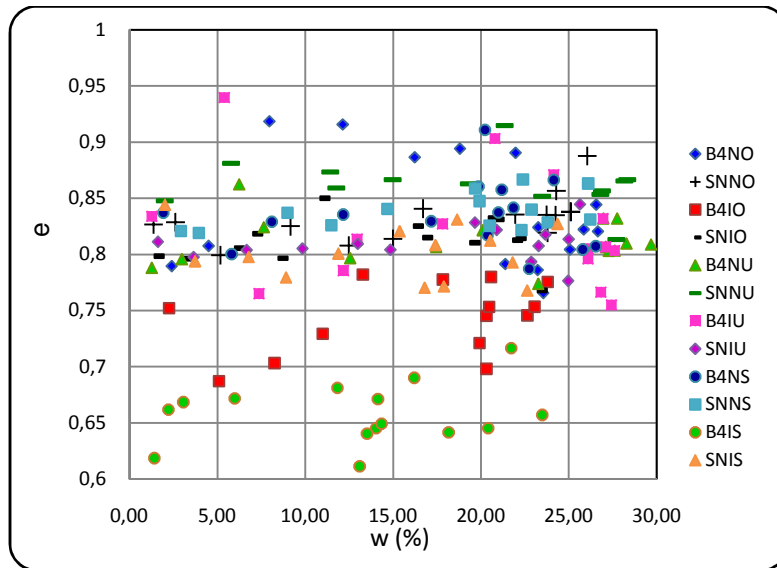


Figura 4.31 Relação w% - e (SN-B4)

O gráfico de resistência à tração em função do grau de saturação na ruptura ( $S_r$ ) (Figura 4.32), mostra que para valores de  $S_r$  inferiores a 80% os resultados de resistência são superiores aos obtidos para o solo natural. Quando a saturação supera este valor a resistência à tração diminui abruptamente até atingir valores muito pequenos e tender à estabilização. Ao separar os resultados por tipo de energia de compactação (Figura 4.33), se observa melhor essas tendências. Note-se que os maiores picos de resistência são apresentados pelos corpos com tratamento. Isso significa que houve uma influência do meio B4 sobre o comportamento mecânico do solo submetido à compressão diametral e como essa influência é mais marcante para determinada condição de umidade e de grau de saturação infere-se que o ganho depende das condições de cura.

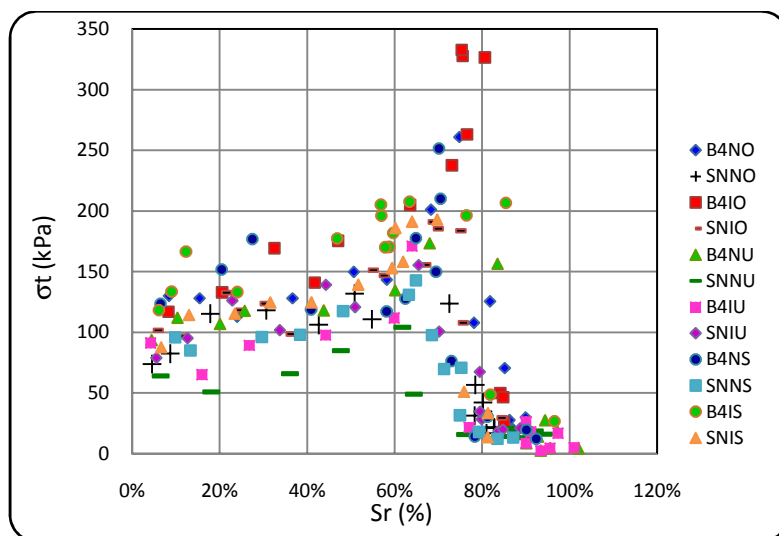


Figura 4.32 Variação  $\sigma_t$  -  $S_r$  % (SN - B4)

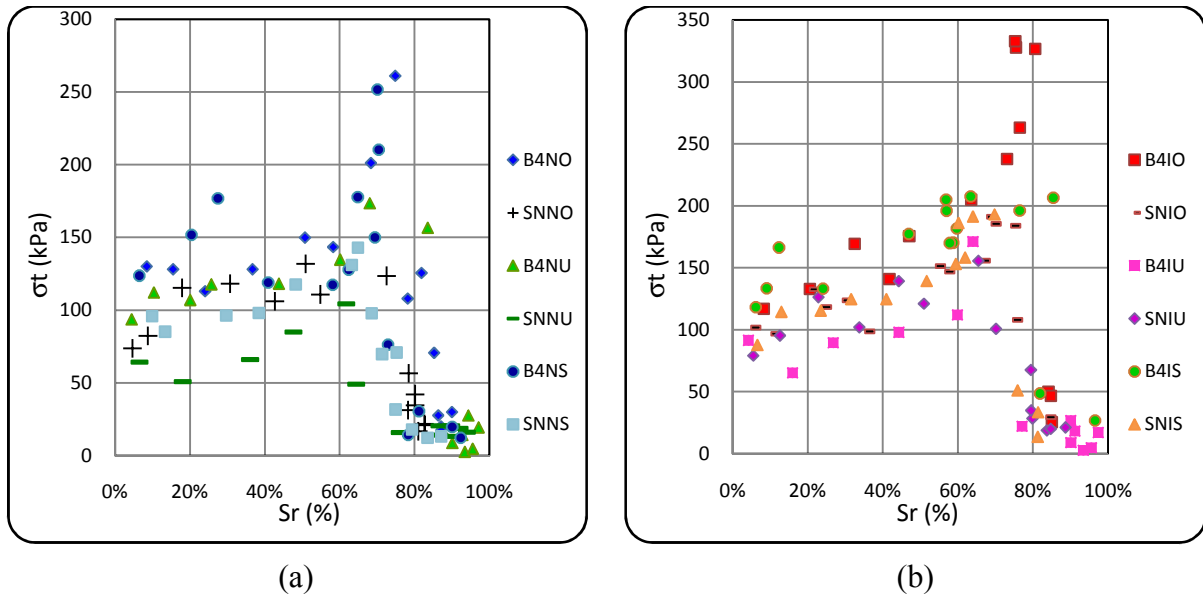


Figura 4.33 Variação  $\sigma_t$  – Sr % (a) energia normal (b) energia intermediária

Para entender melhor a variação do comportamento do solo submetido ao tratamento e como é afetada a estrutura interna por tal tratamento, foram plotados gráficos entre a resistência à tração e a sucção matricial (Figura 4.34). Os resultados obtidos são compatíveis com as curvas características de retenção de água, ou seja, a resistência aumenta com a sucção até que essa passa a atuar na microposidade, momento a partir do qual a resistência tende a se estabilizar ou mesmo a cair.

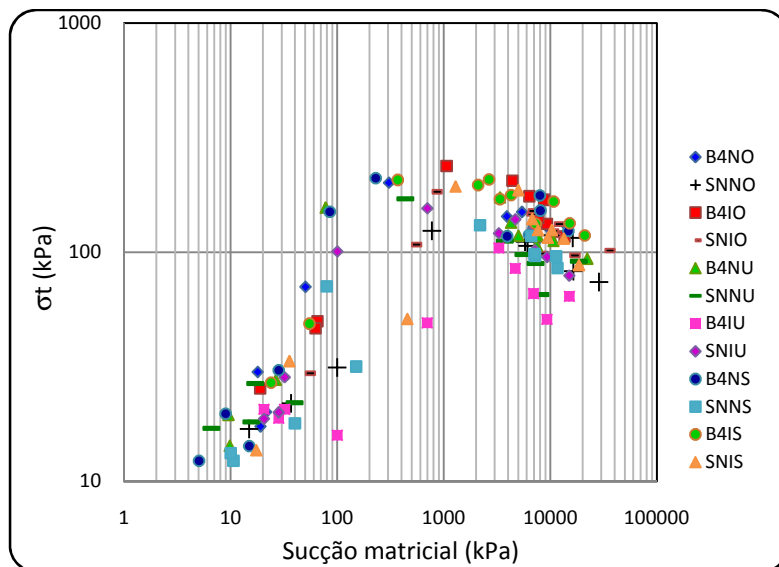


Figura 4.34 Relação sucção matricial –  $\sigma_t$  (SN – B4)

Tal intervalo pode ser observado melhor na Figura 4.35, na qual os resultados estão separados por tipo de energia de compactação. Ao se separar os resultados com e sem tratamento na Figura 4.35, se observa que os resultados do solo tratado tendem a serem

superiores aos obtidos para o solo não tratado. Aparentemente tem-se ainda uma faixa de máximo mais ampla para o solo tratado.

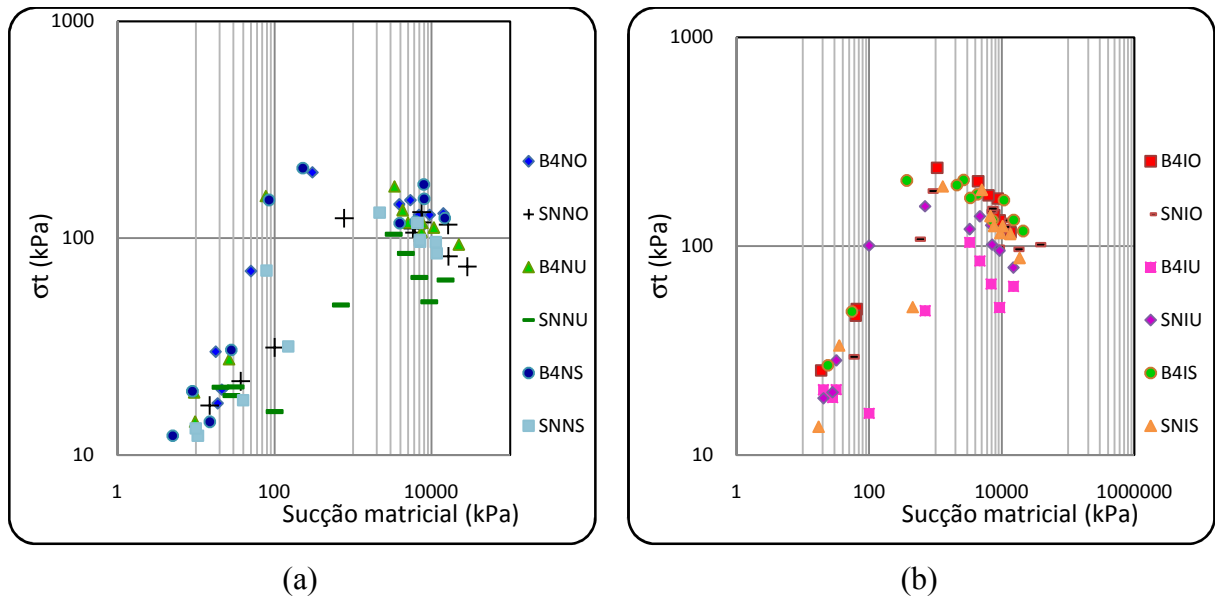


Figura 4.35 Relação sucção matricial -  $\sigma_t$  (a) Energia normal (b) Energia intermediária

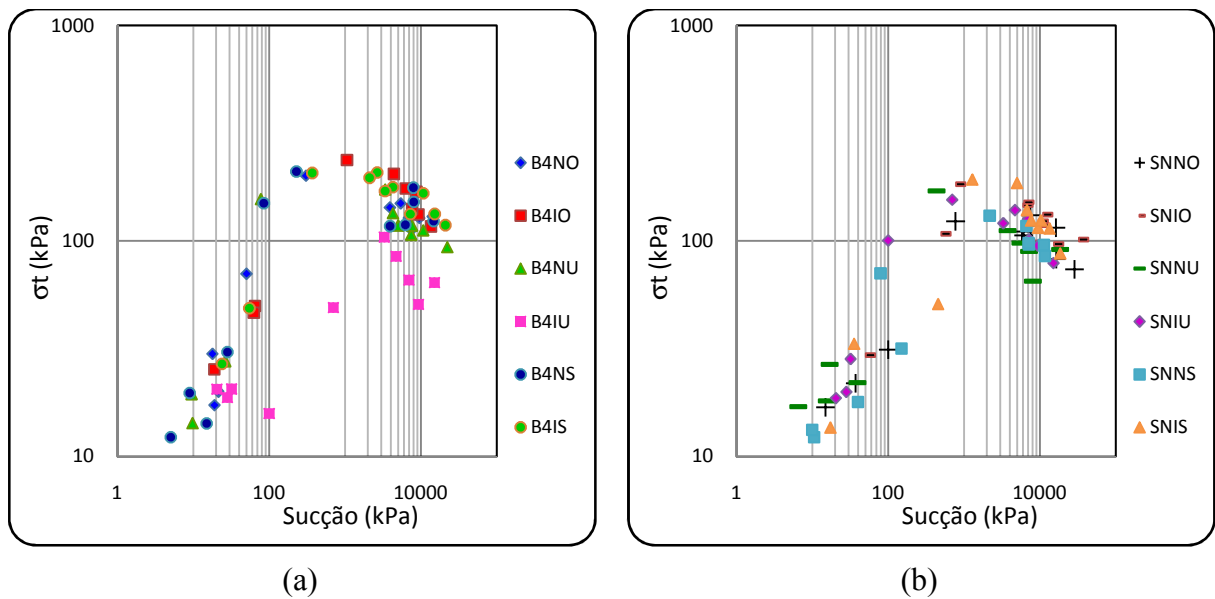


Figura 4.36 Relação sucção -  $\sigma_t$  (a) B4 (b) SN

Para avaliar a influência do índice de vazios sobre a resistência à tração do solo, a sucção em pF foi normalizada em relação ao índice de vazios (Figura 5.49). Ao se separar os resultados das duas energias de compactação, verifica-se certa tendência aos valores de resistência à tração obtidos com tratamento serem ligeiramente superiores aos obtidos para o solo natural.

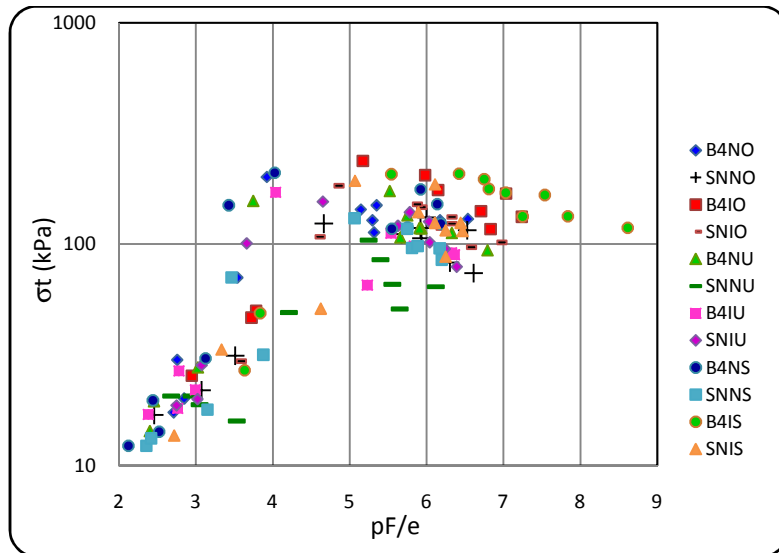


Figura 4.37 Relação pF/e -  $\sigma_t$  (SN-B4)

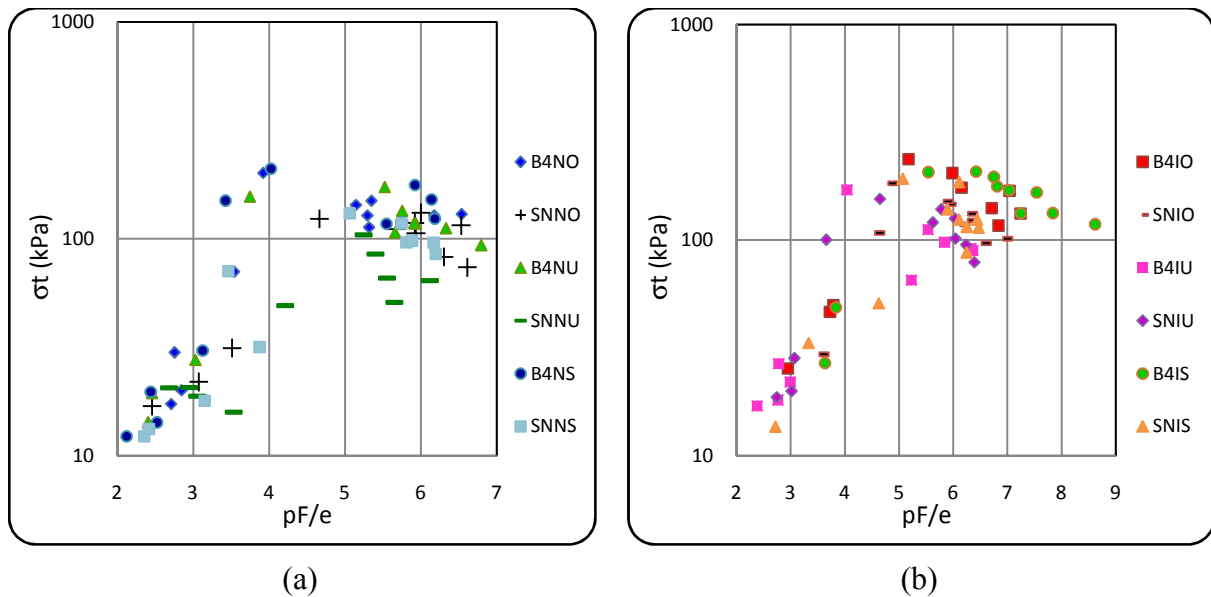


Figura 4.38 Relação pF/e -  $\sigma_t$  (a) energia normal (b) energia intermediária

É importante destacar que ao agrupar os resultados por tipo de solo, é possível perceber que quando se reduz os efeitos decorrentes da variação do índice de vazios, de forma geral, ratifica-se a melhora das propriedades de resistência a compressão diametral do solo produzida pela adição do meio B4 (Figura 4.39).

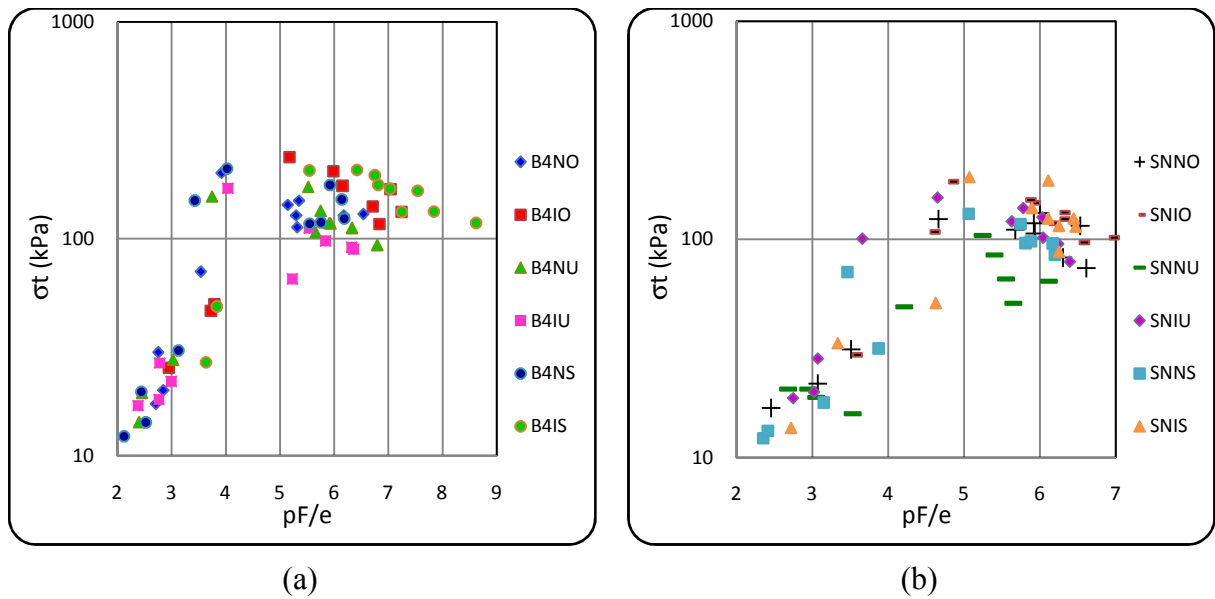


Figura 4.39 Relação pF/e -  $\sigma_t$  (a) B4 (b) SN

Durante a execução dos ensaios observou-se que todas as rupturas apresentadas pelos corpos de prova, tanto para os naturais quanto aqueles com tratamento, foram muito similares. Todas as amostras tiveram a trinca diametral bem marcada (Figura 4.40).

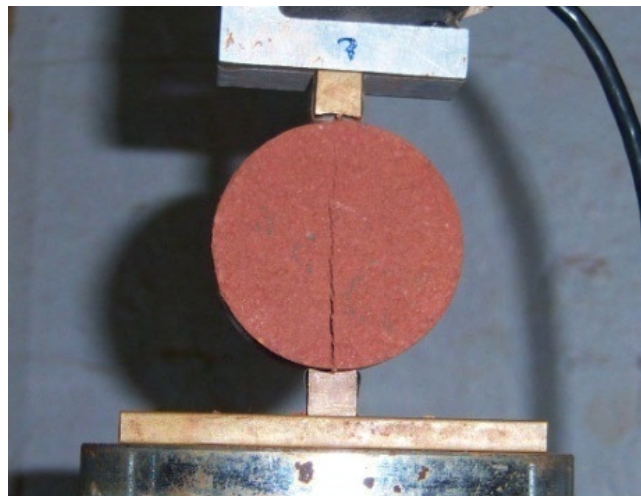


Figura 4.40 Corpo de prova após o rompimento

#### 4.1.4.4 MINI-CBR

Os ensaios de mini-CBR foram realizados sobre corpos de prova após imersão. A Figura 5.53 mostra que o tratamento com meio B4 piorou o comportamento do solo. Durante a execução dos ensaios de Mini-CBR também foi medida a expansão dos corpos de prova. Os resultados permitiram inferir que essa expansão é praticamente independente da presença do

meio B4, pois os valores obtidos tanto para o solo natural quanto para o solo tratado estão abaixo de 1%.

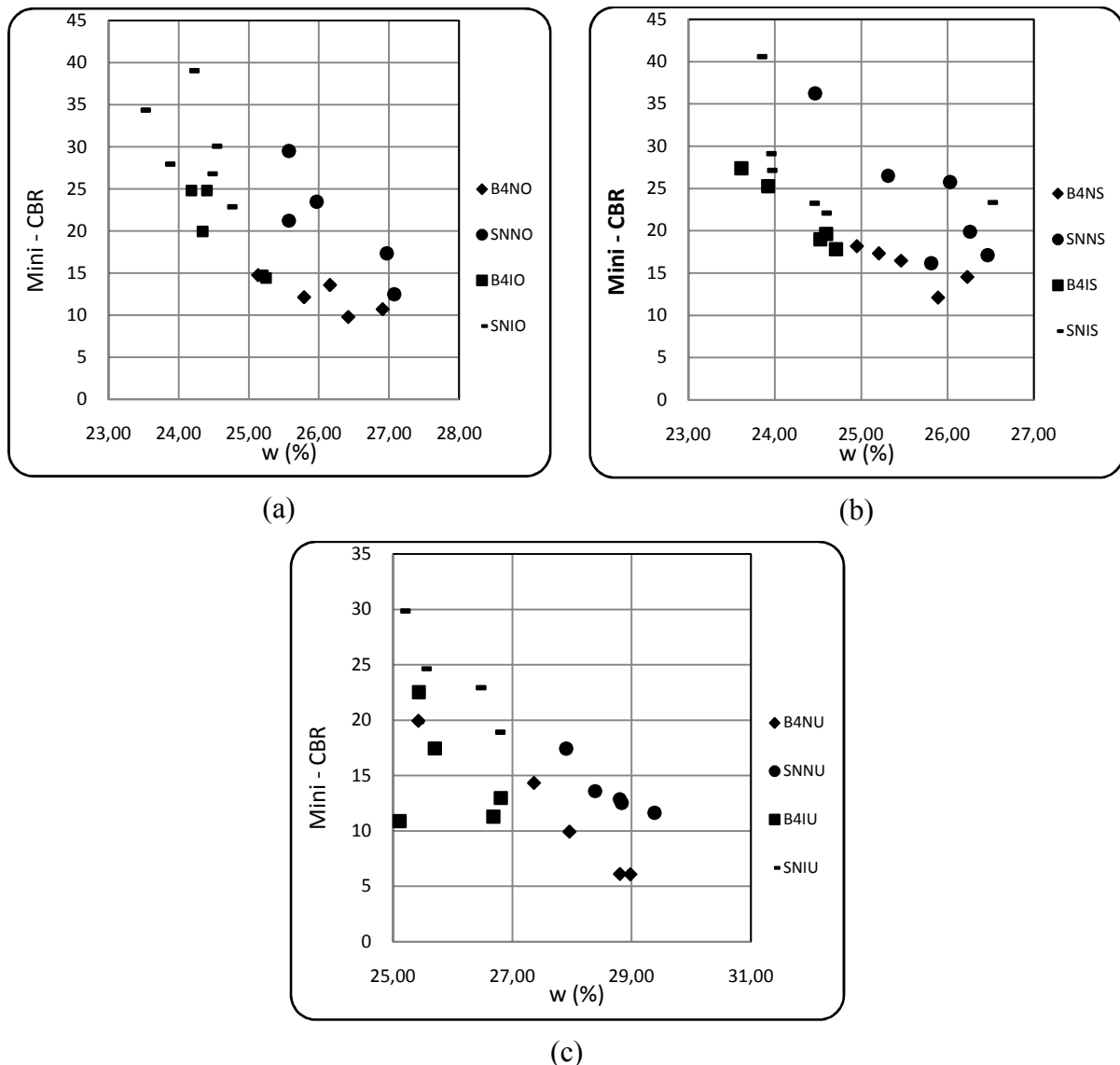


Figura 4.41 Mini – CBR com w% (a) umidade ótima (b) ramo seco (c) ramo úmido

#### 4.2 FEIJÃO DE PORCO (*Canavalia Ensiformis*)

Desconhecendo-se a efetividade do extrato de feijão de porco como agente indutor da hidrólise de uréia para gerar precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , foram realizados alguns ensaios preliminares. O primeiro para determinar a atividade ureasica do extrato. O segundo visando avaliar a influência do extrato no comportamento mecânico do solo quando adicionado com a água necessária para atingir o teor de umidade ótimo. A seguir são apresentados os resultados obtidos nesses ensaios.

#### 4.2.1 VERIFICAÇÃO DE ATIVIDADE UREASICA

Foi realizado o ensaio qualitativo descrito no item 3.2.6.3 para verificar a atividade ureasica da enzima uréase presente no extrato de feijão de porco.

O extrato de feijão de porco quando colocado na solução de Agar Uréia reage apresentando uma mudança de cor. A solução inicial era de cor laranja e quando foi adicionada o extrato de feijão de porco mudou instantaneamente a cor indicando um acréscimo de pH. Estes resultados permitiram concluir que, embora o extrato de feijão de porco tenha sido colocado em baixas concentrações, efetivamente ele apresenta muita atividade ureasica (Figura 4.42).

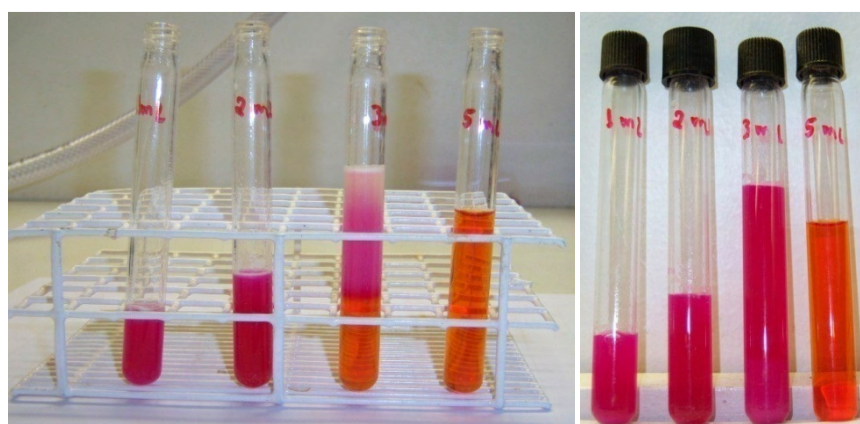


Figura 4.42 Ensaio de atividade ureasica do extrato de feijão de porco

#### 4.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Para a realização dos ensaios de compressão simples foram preparados corpos de prova usando-se as relações do extrato de porco para solução de acetato de cálcio e uréia iguais à:

5/5 – amostra F5

4/5 – amostra F4

3/5 – amostra F3

2/5 – amostra F2

Nas concentrações anteriormente descritas, aclara-se que o numerador indica a proporção de extrato de feijão de porco e o denominador representa o volume correspondente à solução de acetato de cálcio com uréia.

Terminado o período de cura dos corpos de prova, esses foram retirados da caixa de isopor para serem rompidos mediante o ensaio de compressão simples. Foi possível perceber



visualmente a ocorrência de uma precipitação nos corpos de prova (Figura 4.43). As cadeias de precipitação foram observadas com mais detalhe quando analisadas com o microscópio “ProScope de alta resolução HR” da Avantgarde. A Figura 4.44 apresenta as formações precipitadas geradas para o solo compactado nas duas energias de compactação, intermediária (partes a, b, c) e normal (partes d, e, f). Destaca-se que os precipitados são mais visíveis no solo compactado na energia normal.



Figura 4.43 Corpo de prova com adição de extrato de feijão de porco

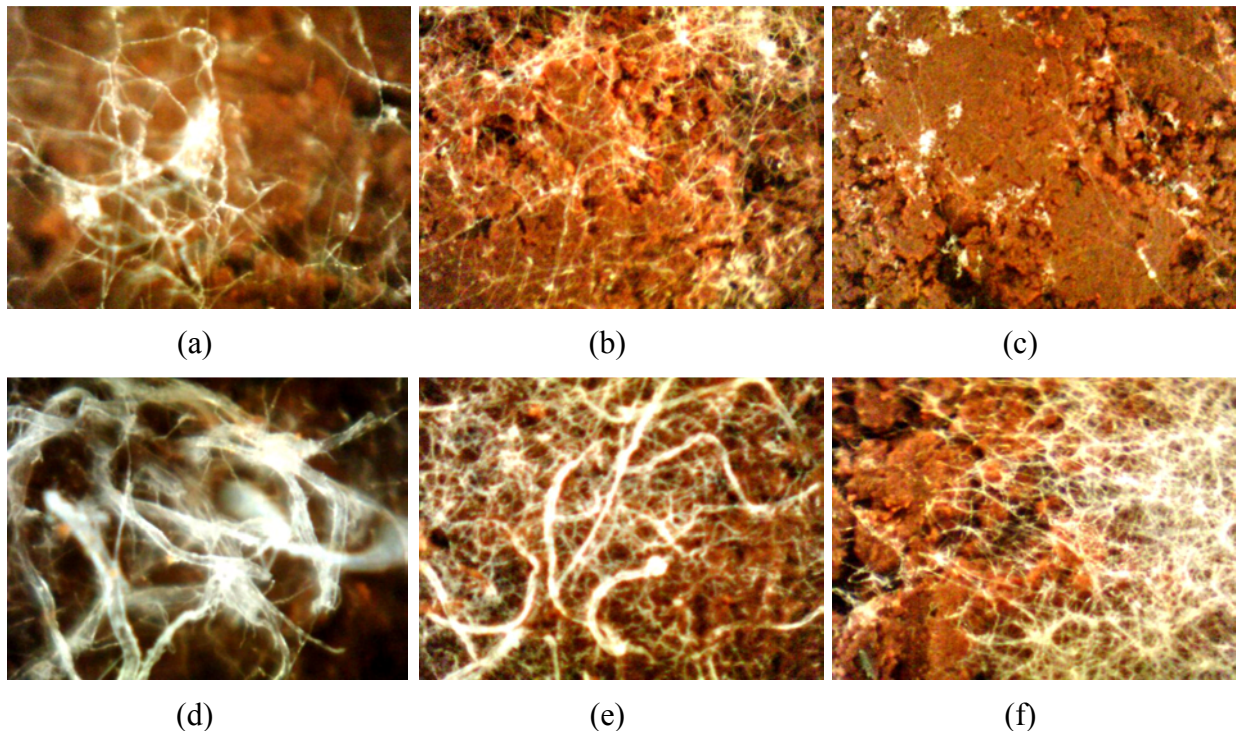


Figura 4.44 Imagens da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  para o solo com extrato de feijão de porco (a) F5I-400x (b) F5I-200x (c) F5I-100x (d) F5N-400x (e) F5N-200x (f) F5N-100x

Os resultados obtidos permitiram concluir que a produção de  $\text{CaCO}_3$  foi maior nos solos com maior concentração de extrato de feijão de porco, ou seja, naqueles com uma relação 4/5



(F4) e 1/1 (F5). Nos ensaios de compressão simples as maiores resistências foram apresentadas para esses mesmos solos como se pode observar na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Resistência para todos os solos

<b>SOLO</b>	<b><math>\sigma_r</math> (kPa)</b>	<b>SOLO</b>	<b><math>\sigma_r</math> (kPa)</b>
F2N	170,11	F2I	828,65
	172,86		831,55
	169,69		861,59
F3N	213,38	F3I	1574,64
	180,96		820,70
	169,69		861,59
F4N	198,32	F4I	1153,26
	213,38		1574,64
	204,34		1045,70
F5N	295,03	F5I	1126,25
	311,99		1717,74
	273,54		914,05
B4NO	251,73	B4IO	1343,89
	232,16		1297,64
	209,75		1314,38
	186,64		1424,38
	209,75		797,12
SNNO	251,73	SNIO	1343,89
	232,16		1297,64
	209,75		1314,38
	186,64		1424,38
	209,75		797,12

A Figura 4.45 mostra, ao se analisar as resistências obtidas para os diferentes tratamentos em função da sucção (a) e da sucção normalizada em relação ao índice de vazios (b), que o solo tratado com feijão de porco apresenta comportamento pior que o solo natural e que o solo tratado com o meio B4. Para a energia intermediária o solo tratado com B4 apresentou comportamento melhor que o solo natural, no entanto, na energia normal os resultados foram semelhantes.

Com base nos resultados obtidos, é possível dizer que embora o feijão de porco tenha gerado uma precipitação no solo, essa não proporcionou melhoria nas propriedades mecânicas do solo.

Os planos de ruptura apresentados pelos corpos de prova com o extrato de feijão de porco foram muito similares as apresentadas pelo solo natural. Por causa desses resultados decidiu-se dar maior ênfase ao trabalho de tratamento com o outro agente indutor de precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , ou seja, o B4.

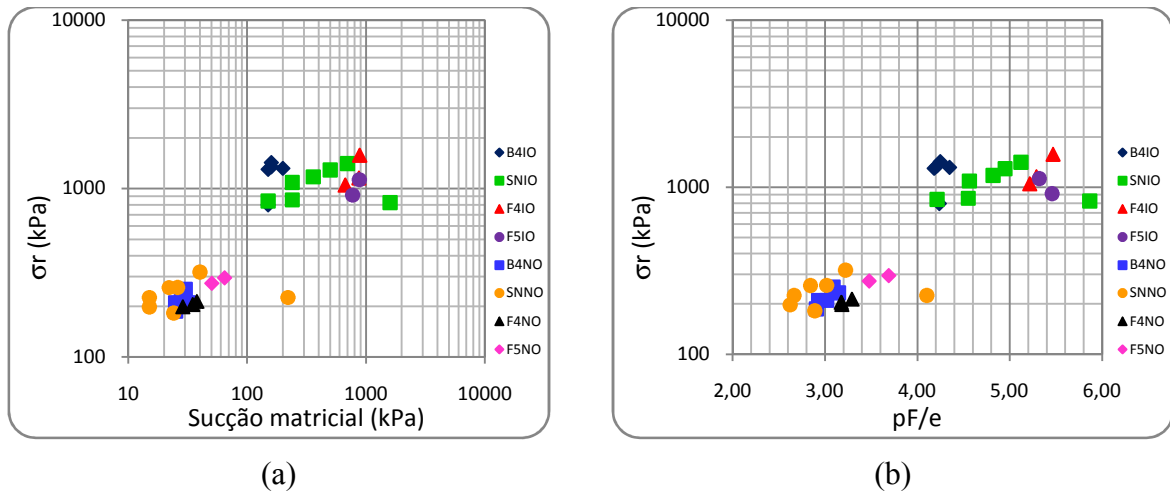


Figura 4.45 Comparação entre as resistências dos tratamentos (a) Sucção matricial –  $\sigma_r$  (b)  $pF/e - \sigma_r$

## **6. CONCLUSÕES**

Esta pesquisa teve como objetivo, fazer a análise da influência da variação da umidade e da porosidade na precipitação induzida de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), e desta no comportamento mecânico do solo para fins de pavimentação rodoviária.

Dessa maneira, adotou-se uma metodologia que permitisse abordar conceitos básicos de engenharia relacionados com o tema, para assim poder avaliar de maneira apropriada a influência do tratamento no comportamento solo.

Durante a etapa de caracterização, observou-se que para um melhor entendimento dos processos de precipitação de carbonato de cálcio, faz-se necessário um trabalho interdisciplinar que permita a complementação entre aspectos, geomecânicos, químicos, mineralógicos e aqueles atinentes à biomineralização.

No estudo da influência do meio B4 na plasticidade do solo verificou-se que ele gera a sua redução, no entanto tal redução não pode ser atribuída apenas às alterações químicas proporcionadas pelo meio B4. Sugere-se que a redução pode também estar ligada a cristalização de  $\text{CaCO}_3$ .

As análises granulométricas realizadas apontam para a agregação do solo gerada pelo meio B4.

Estruturalmente pôde ser observado que o meio B4 gerou a deposição de precipitados no solo bem como sugere uma maior agregação quando do uso do tratamento com esse meio.

Mineralogicamente não se detectou a partir do Raios X a formação de carbonatos quando da adição do meio B4 ao solo. Quimicamente ele proporcionou o aumento do pH do solo.

A semelhança entre as curvas características de retenção de água obtidas com e sem a adição do meio B4 quando plotadas em função do teor de umidade apontam para a inexistência de influência da química do fluido nas mesmas. Porém, as curvas características de retenção de água transformadas em relação ao índice de vazios indicam certa influência do meio B4 na estrutura do solo compactado o que corrobora com as análises estruturais.

Os resultados de compressão simples mostraram que a melhoria do comportamento mecânico do solo com a adição de meio B4 só se dá para condições específicas de umidade e porosidade. Dependendo dessas condições sua adição poderá gerar a queda na resistência do solo. Entende-se que a melhoria seria gerada pela formação de carbonatos e não havendo condições propícias para tal, a química do meio termina por piorar o comportamento do solo. Ainda no que diz respeito à resistência a compressão simples verificou-se compatibilidade entre esses resultados e os relativos às curvas características e à plasticidade.

No que tange à resistência à tração verificou-se que o tratamento do solo com o meio B4 proporcionou a melhoria do comportamento mecânico. Tal constatação, embora o ganho tenha sido pequeno, é relevante para o desempenho da estrutura de pavimento.

Partindo dos resultados obtidos nos ensaios, concluiu-se que o fator de maior influência sobre a resistência à compressão simples e diametral para o solo com tratamento é a umidade. Diferenças no índice de vazios afetam a resistência, no entanto, dentro das variações registradas essa influência não é tão relevante quanto às relativas ao teor de umidade.

Uma das possíveis causas para que os resultados de resistência a tração diametral refletissem uma melhora mais notória quanto aos ensaios de compressão simples, pode estar originada na idade dos corpos de prova. Os ensaios de compressão simples foram realizados com uma idade de 15 dias, e os de compressão diametral com 30 dias. Em outros termos, é possível que o tempo de cura necessário para gerar uma melhora importante no comportamento mecânico do solo quando compactado, pôde ser maior do que o tempo sugerido por Valencia (2007) para o mesmo solo em condições inalteradas.

Após imersão, o meio B4 proporcionou a redução dos valores de mine CBR em relação aos valores obtidos para o solo sem tratamento compactado nas mesmas condições. A expansão não foi alterada pelo meio B4.

O tratamento do solo com extrato de feijão de porco proporcionou ao solo resistência inferior às obtidas para o solo sem tratamento e tratado com o meio B4.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, conclui-se como síntese geral, que o tratamento com o meio B4 e com o feijão de porco não conduziram a melhorias de comportamento mecânico do solo que justificassem suas utilizações em obras de

pavimentação para o caso específico do solo estudado e sob as características de ensaio adotadas nesta pesquisa.

## ***7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a realização do estudo da evolução das características físicas e do comportamento mecânico do solo tratado para tempos de cura mais longos.

Também se recomenda realizar estudos nesta mesma linha de pesquisa para outros tipos de solo, permitindo estabelecer quais deles são mais apropriados para serem tratados mediante o uso de biotecnologia.

É importante desenvolver um trabalho de campo para estabelecer correlações entre as condições de cura de campo e de laboratório e verificar se no campo os resultados seriam semelhantes.

Em trabalhos futuros, é recomendável a realização de ensaios para a determinação do módulo resiliente visando avaliar a viabilidade de uso dos solos tratados biotecnologicamente como materiais de construção na área de pavimentação.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- Alvarez, I., Chávez, N. & Fernández, R. (2004). Estudio del efecto de la aplicación de bacterias en la respuesta mecánica de suelos de subrasante. Etapa 4. Trabajo de grado, Universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 67 p.
- Araki, M. S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 113 p.
- Bang, S. & Ramakrishnan, V. (2001). Microbiologically-Enhanced Crack Remediation (MECR). South Dakota School of Mines and Technology, 13p.
- Bang, S., Galinat, J., Ramakrishnan, V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 28, 404–409.
- Cabral, R. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 172 p.
- Cardoso, F.B.F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140p.
- Camapum de Carvalho, J. & Pereira, J.H.F. (2001). Estudo do Comportamento Mecânico dos solos Não-Saturados com Base na Sucção Normalizada. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre-RS, vol. único: 134–148.
- Camapum de Carvalho, J., Leroueil, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.
- Camapum de Carvalho, J., Guimarães, R.C. & Pereira, J.H.F. (2002). Courbes caracteristiques d'un profil d'alteration. Third international conference on unsaturated soils. ABMS/ISSMGE, Recife-PE.

- Camapum de Carvalho, J. ; Konrad, J. ; Muma, M. (2000). Fluência em Material Granular estabilizado com Emulsão. 32ª Reunião Anual de Pavimentação. Pavimentação - A Rota para o Desenvolvimento Nacional, v. 1, Brasília, DF, p. 175-183.
- Camapum de Carvalho, J. (2007). Notas de aula: Geotecnia de solos tropicais. Universidade de Brasília. Brasília.
- Camapum de carvalho, J. (2007). Solo como material de construção. Livro: Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. Geraldo Cechella Isaia. São Paulo. Cap 17, 525-561.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). Étude Du comportement mécanique d'une marne compactée. Thèse de doctorat, Institut National dès Sciences Appliquées – I.N.S.A., France-Toulouse, 181 p.
- Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT UnB, Brasília, DF, 356 p.
- CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLOGICA (CSDB). (1992). Disponível em [www.cinu.org.mx/eventos/conferencias/johannesburgo/documentos/convencion%20sobre%20diversidad%20biologica.pdf](http://www.cinu.org.mx/eventos/conferencias/johannesburgo/documentos/convencion%20sobre%20diversidad%20biologica.pdf). Acesso em fevereiro de 2009.
- Delgado, A. K. C. (2002) Influência da Sucção no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical Compactado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.
- Fitolito. Disponível em [es.wikipedia.org/wiki/Fitolito](http://es.wikipedia.org/wiki/Fitolito). Acesso em fevereiro de 2009.
- Flórez, J. A. (2007). Estabilización de suelos con biocemento. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 6p.
- GidiGasu, M. D. (1976). Laterite soil engineering pedogenesis and engineering principles. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 554 p.
- Gómez, E. (2006). Evaluación de las propiedades geotécnicas de suelos arenosos tratados con bacterias calcificantes. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 147 p.



- Grim, R. E. (1962). Applied Clay Mineralogy. New York, McGraw Hill, 422p.
- Hammes, F. & Verstraete, W. (2002). Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. Environmental Science & Bio/Technology 1: 3-7.
- Ismail, M.A. & Joer H.A. & Randolph M.F. & Meritt, A. (2002). Cementation of porous material using calcite. Geotechnique 52: 5, 313 - 324.
- Lee, Y. N. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. Journal of Microbiology, 41 (4): 345-348.
- Lima, M. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p.
- Lo Bianco, A., Madonia, G. (2007). B.U.L.M. technique for increase of the bearing capacity in the pavement layers subjected to biological treatment. 4th INTERNATIONAL SIIV CONGRESS. Italia.
- López, I. (2008). Tratamiento de un suelo con *Bacillus pasteurii*. Efecto de la humedad y la porosidad. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 160 p.
- Martínez, G., Maya, L., Rueda, D. & Sierra, G. (2003). Aplicaciones estructurales de bacterias en la construcción de nuevas obras de infraestructura –Estabilización de suelos-. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 151 p.
- Montoya, C., Márquez, M., López, J. & Cuervo, C. (2005). Caracterización de cristales de calcita bioprecipitada por un aislamiento nativo de *Bacillus subtilis*. Revista Colombiana de Biotecnología. vol VII, número 002, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 19-25.
- Meurs, G. V., Zon, W. V. D., Lambert, J., Ree, D. V. Whiffin, V., Moldendijk, W. (2006). Disponível em [www.smartsoils.nl/files/2006\\_SmartSoil.pdf](http://www.smartsoils.nl/files/2006_SmartSoil.pdf). Acesso em fevereiro de 2009.
- Muniz de Faria, M. & Palmeira, E. M. (2007). Agregados para a construção civil. Livro: Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. Geraldo Cechella Isaia. São Paulo. Cap 16, 481-525.

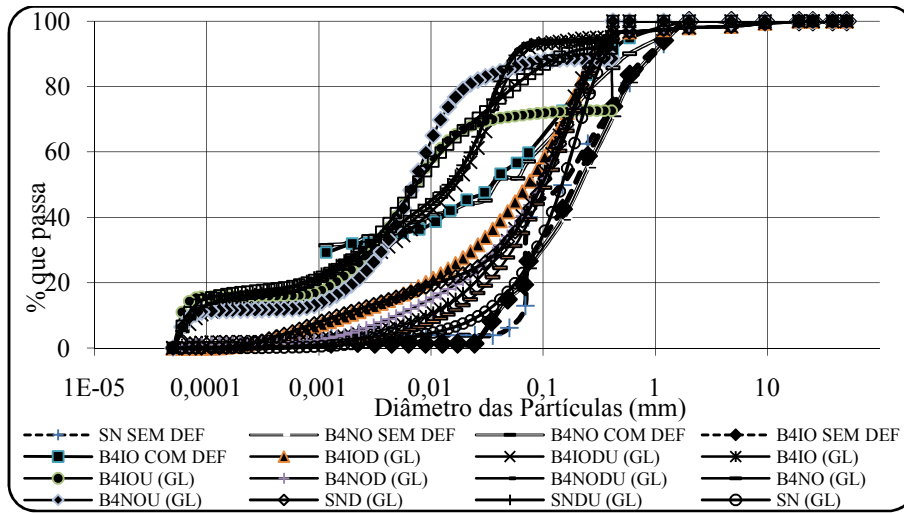
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213p.
- RedBi. (2001) Biomineralización, los microorganismos reconstruyen monumentos. Disponível em [www.biologia-en-internet.com/default.asp?Id=22&Fd=2](http://www.biologia-en-internet.com/default.asp?Id=22&Fd=2). Acesso em março de 2008.
- Ribeiro, L. (1999). Técnicas administrativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 143 p.
- Riding, R. (2000). Microbial carbonates: the geological Record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47, 179-214.
- Santos, P. S. (1975). Tecnologias de argilas: aplicada as argilas brasileiras. Volume 1 Fundamentos. Brasil. Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, SP, 340 p.
- Schmittner K.-E., Giresse P. (1999). Micro-environmental controls on biomineralization: superficial processes of apatite and calcite precipitation in quaternary soils. *Sedimentology*, 46, 463-476.
- SECSASA. 2008. Permazyme 11X. Disponível em [www.secsasa.com/PermaZyme\\_Home.htm#QEPZ](http://www.secsasa.com/PermaZyme_Home.htm#QEPZ). Acesso em Juno de 2008.
- Sondi, I. & Matijević, E. (2001). Homogeneous Precipitation of Calcium Carbonates by Enzyme Catalyzed Reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 238, 208–214.
- STASOIL. Terrazyme. Disponível em [www.stasoil.com/pdf/newterrazyme\\_10\\_01\\_04.pdf](http://www.stasoil.com/pdf/newterrazyme_10_01_04.pdf). Acesso em fevereiro de 2008.
- Stocks-firscher, S., Galinat, J. & Bang, S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 1563-1571.
- Teixeira, W., Mota, M. C. T., Fairchild, T. R., Taioli, Fabio. (2000). Decifrando a terra. Oficina de textos. São Paulo. 558 p.
- Terrazyme. Disponível em [www.naturezyme.com.br/produtos.html](http://www.naturezyme.com.br/produtos.html). Acesso janiero de 2009.

- Valencia, Y. (2007). Influência da biomineralização nas propriedades físicas e mecânicas de um perfil de solo tropical afetado pela erosão. Relatório interno sobre exame de qualificação. Publicação G.RI.YVG - 01A/07. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 51p.
- Whiffin, V., Van Paasen, L. A., Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24, 1-7.
- Whiffin, V., Lambert, J., Dert F. & Van ree, C. (2005). Biogrout and Biosealing. Pore space engineering with bacteria. September-October, 13-36.
- Zilli, J., Gouvea, N., da Costa, H. & Prata, M. C. (2003). Diversidade Microbiana como indicador da qualidade do solo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília, 20 (3): 391-411.

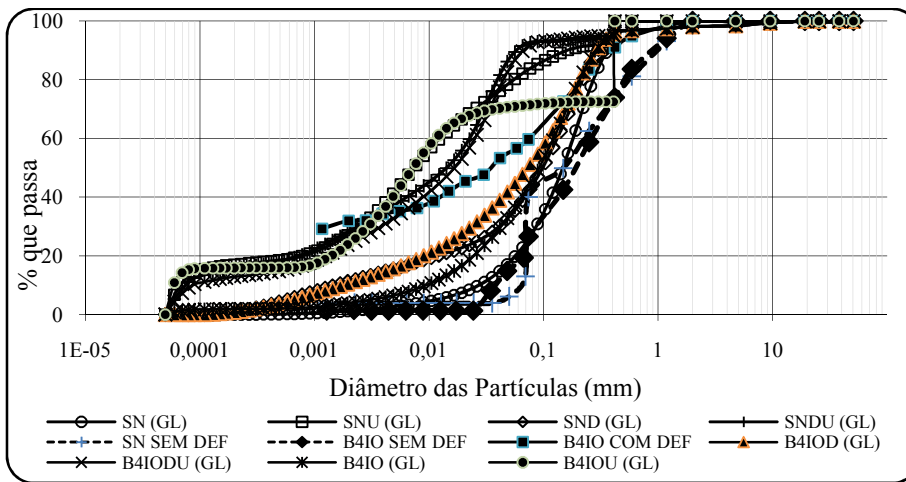
## APENDICE A

### CURVAS GRANULOMETRICAS

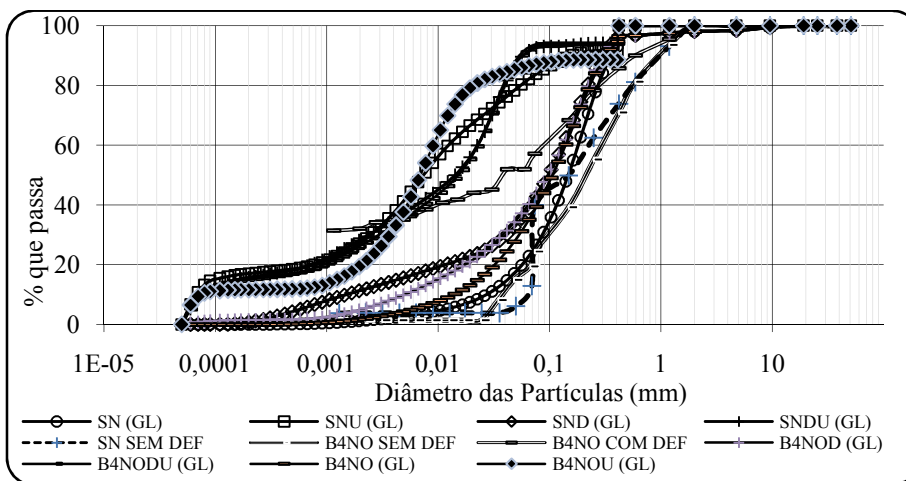
Na Figura A.1 até Figura A.3 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas a partir dos ensaios de análise granulométrica por sedimentação e pelo granulômetro laser, com e sem defloculante.



(a)

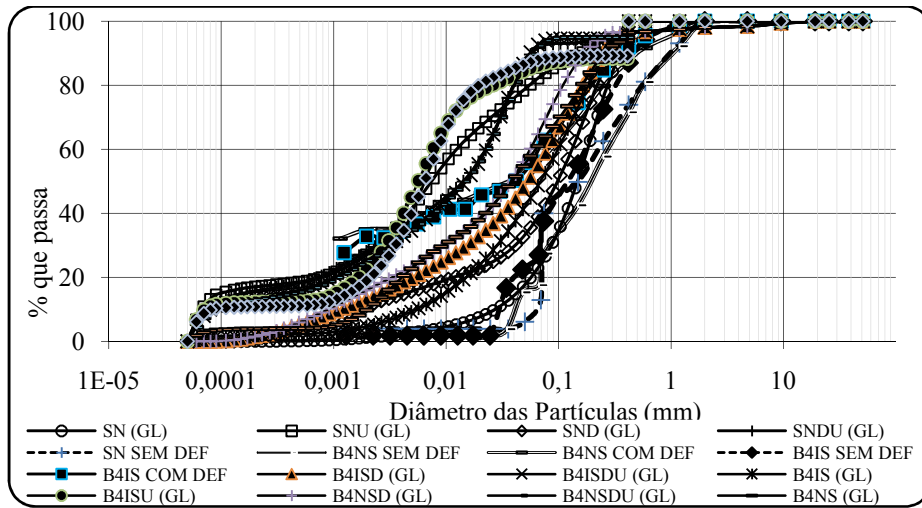


(b)

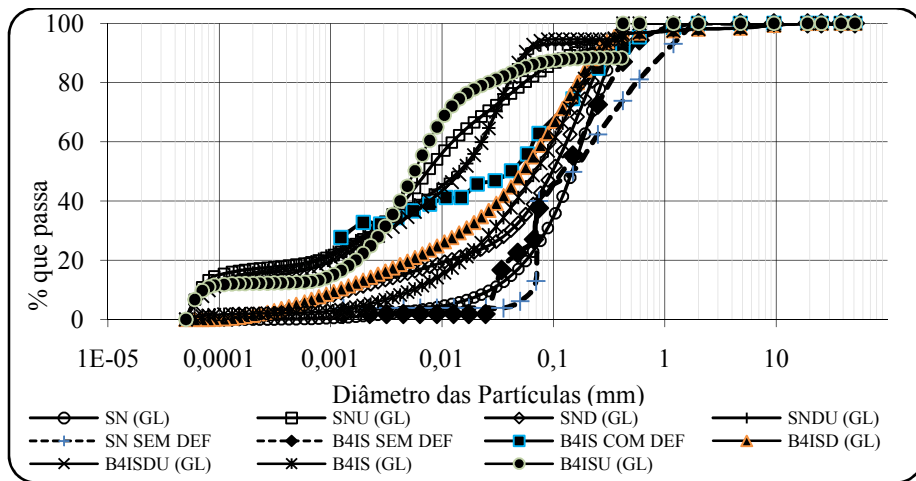


(c)

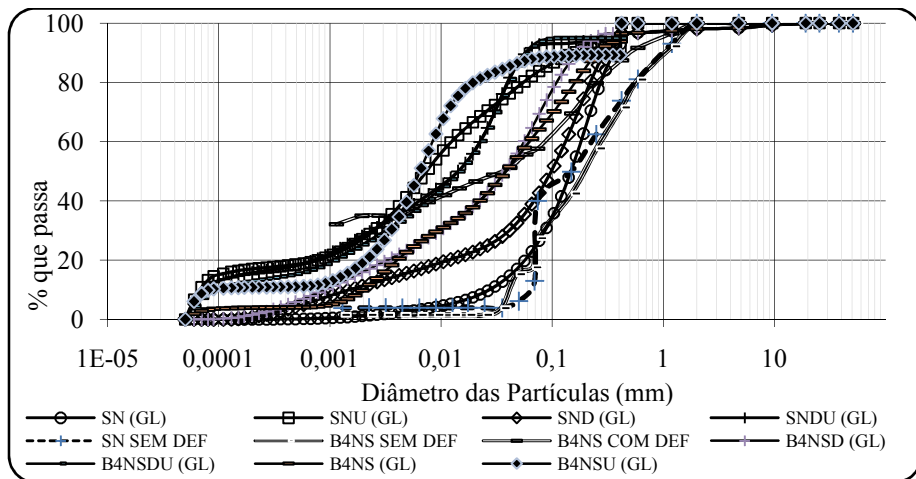
Figura A.1 Curvas Granulométricas para unidade ótima (a) Energias unificadas (b) Energia intermediária (c) Energia normal



(a)

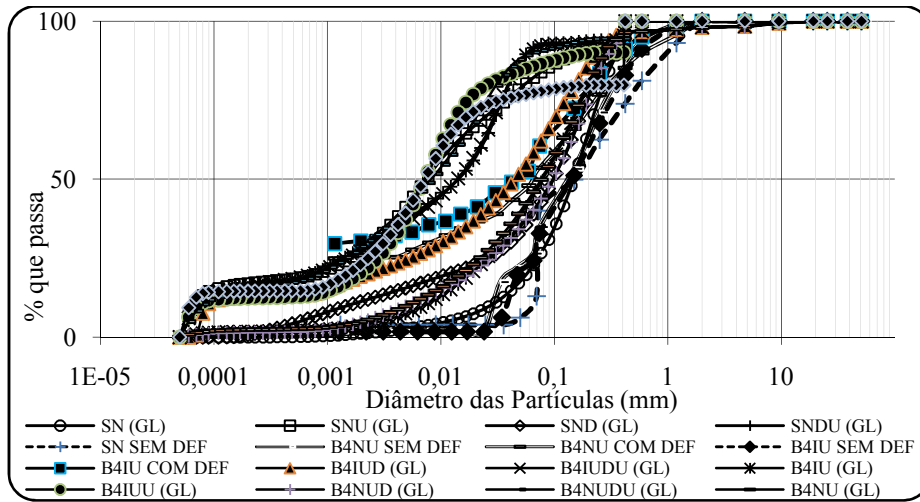


(b)

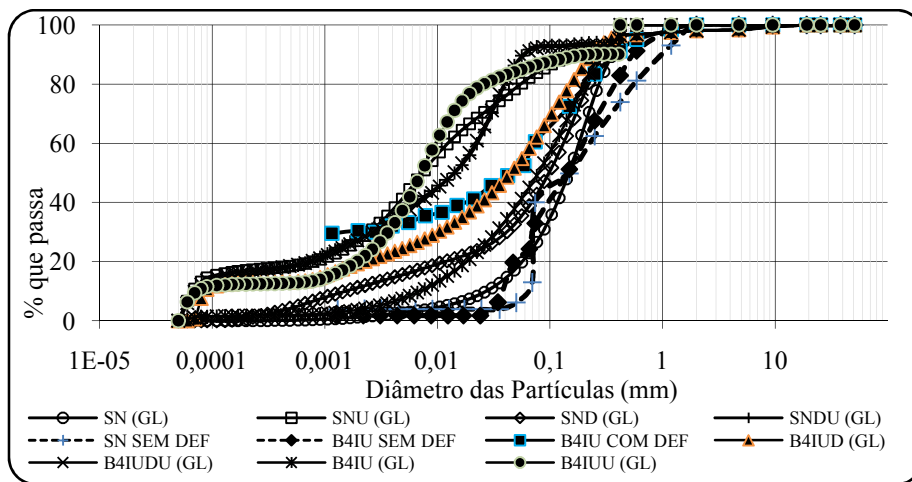


(c)

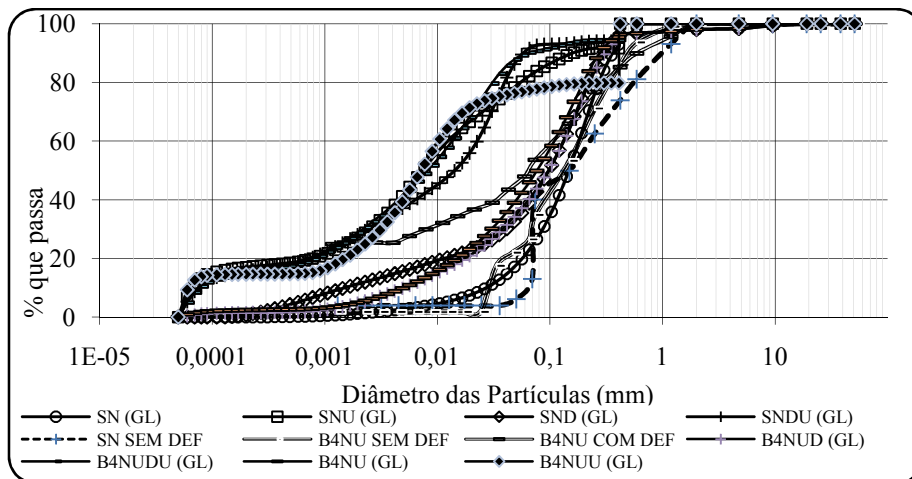
Figura A.2 Curvas Granulométricas para umidade ótima (a) Energias unificadas (b) Energia intermediária (c) Energia normal



(a)



(b)



(c)

Figura A.3 Curvas Granulométricas para o Ramo Úmido (a) Energias unificadas (b) Energia intermediaria (c) Energia normal

## APENDICE B

### GRÁFICOS ANALÍTICOS DE GRANULOMETRIA

Na Figura B.1 até Figura B.3 Figura B.3 são apresentados os dados da Tabela 4.2 por frações granulométricas.



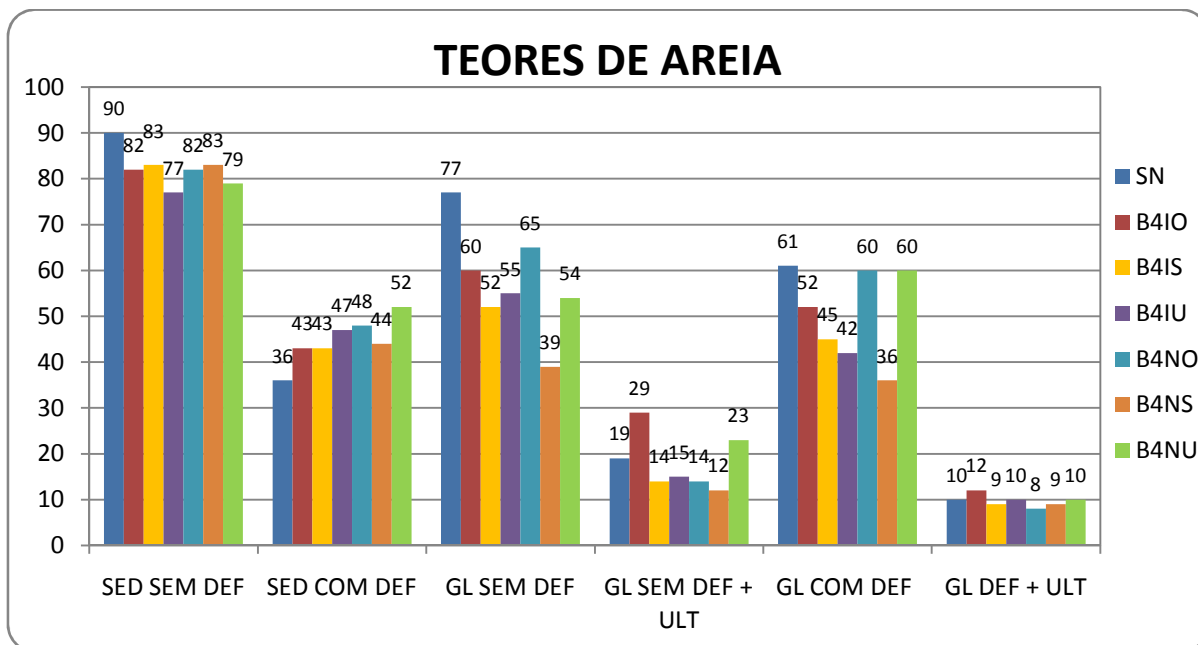


Figura B.1 Teores granulométricos para a fração areia

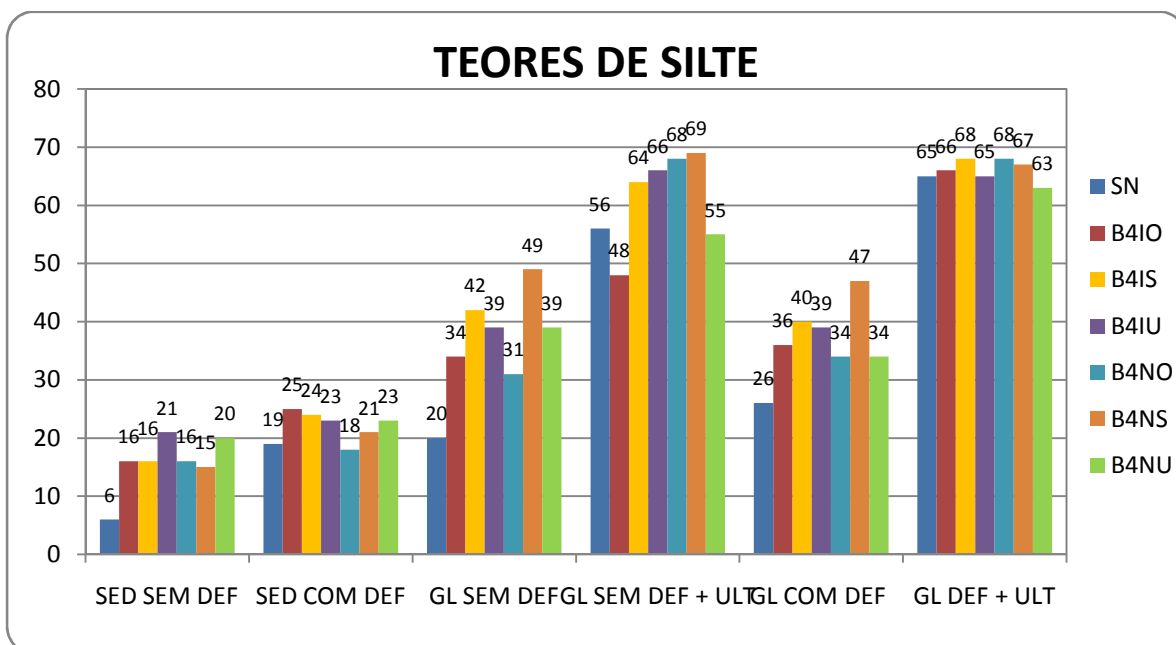


Figura B.2 Teores granulométricos para a fração silte

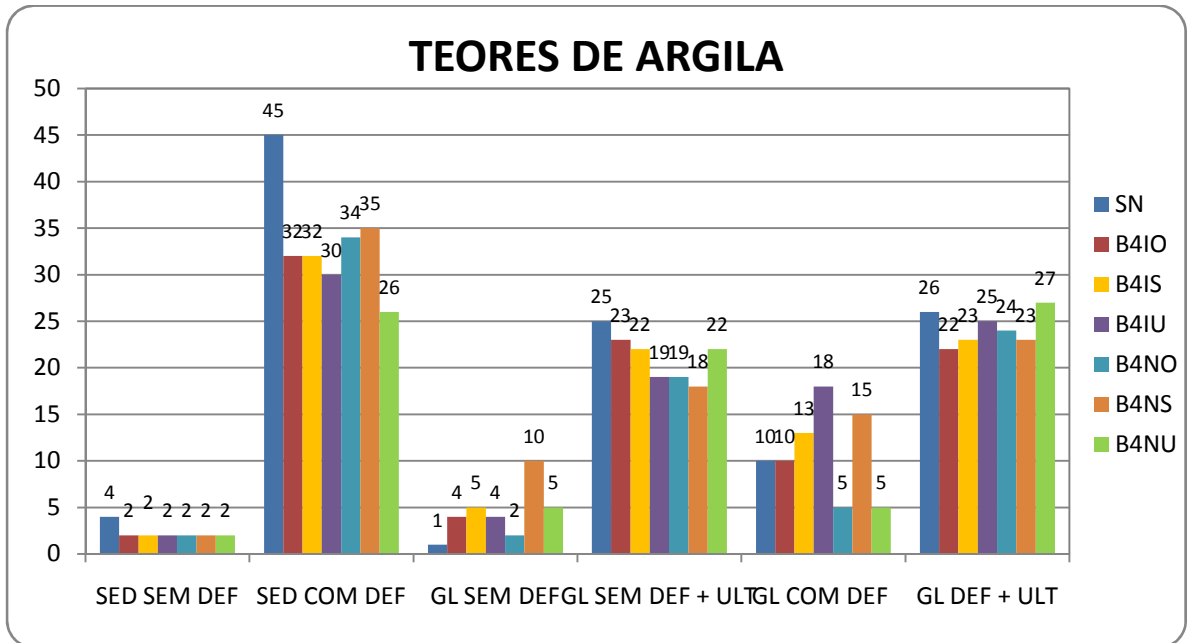


Figura B.3 Teores granulométricos para a fração argila

## APENDICE C

### DIFRATOGRAMAS DE DRX

Na Figura C.1 até Figura C.6 são apresentados os difratogramas obtidos nos ensaios de DRX.

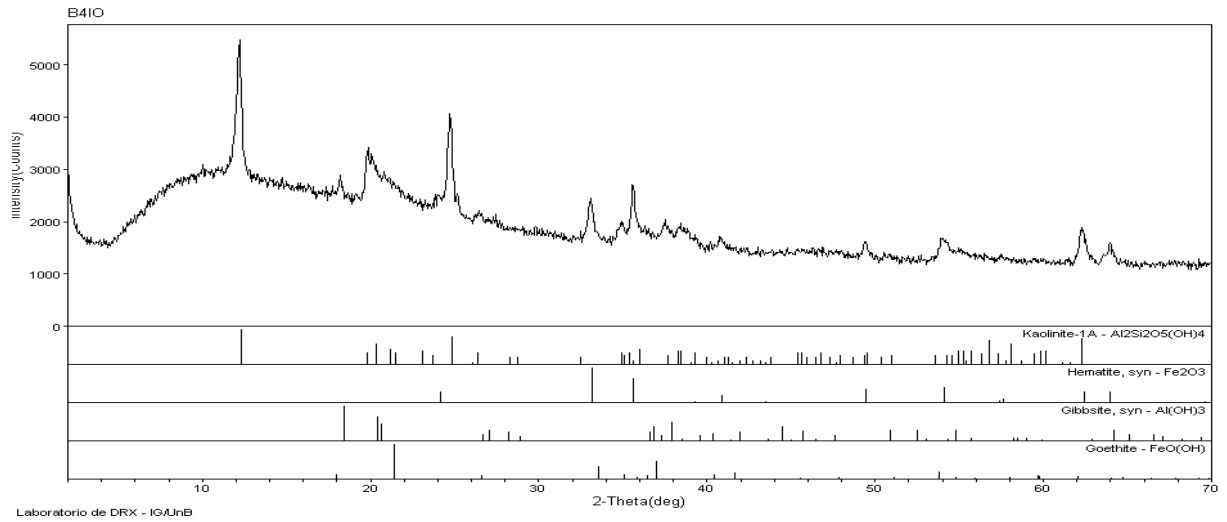


Figura C.1 Difratoograma de raios X para amostra B4IO

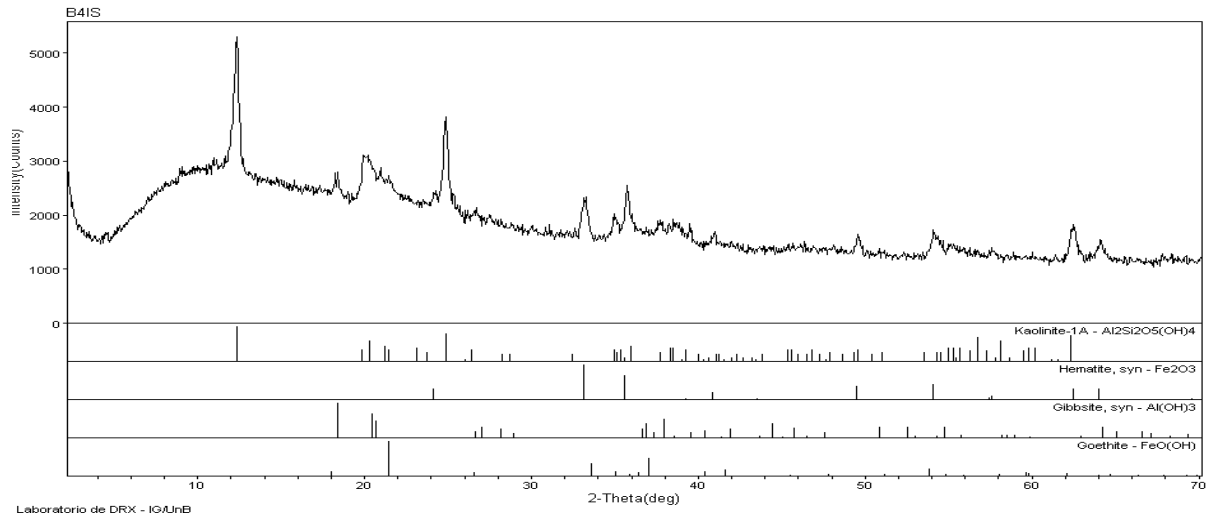


Figura C.2 Difratoograma de DRX para o B4IS

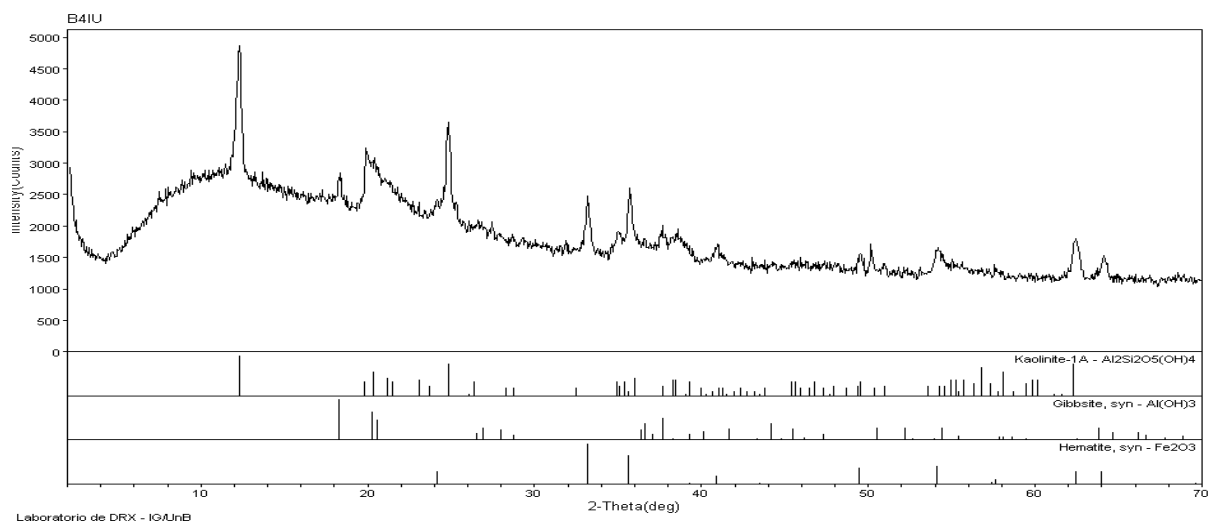


Figura C.3 Difratoograma de raios X para amostra B4IU

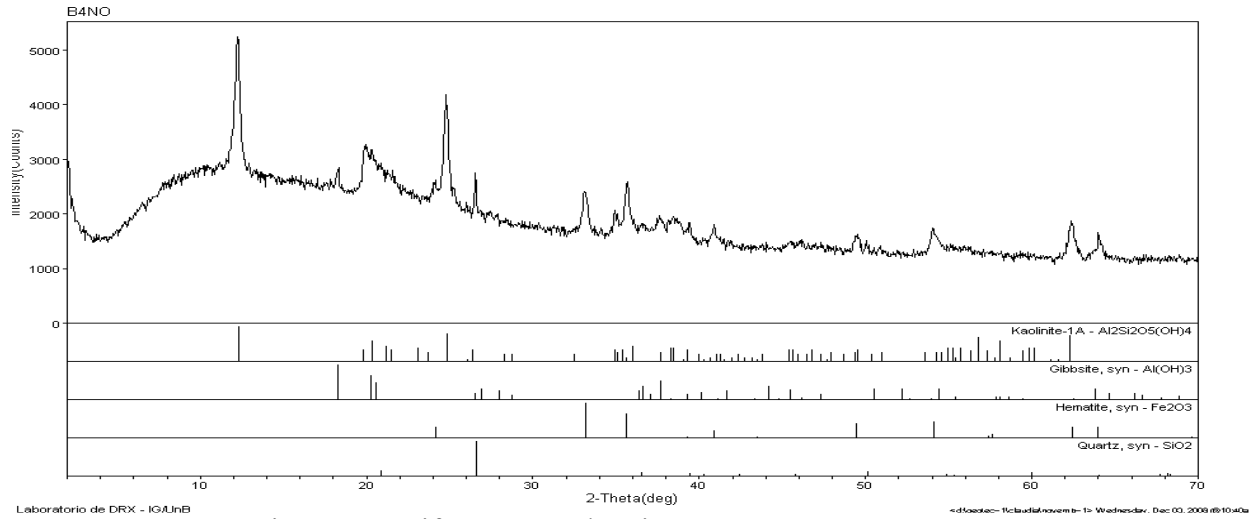


Figura C.4 Difratoograma de raios X para amostra B4NO

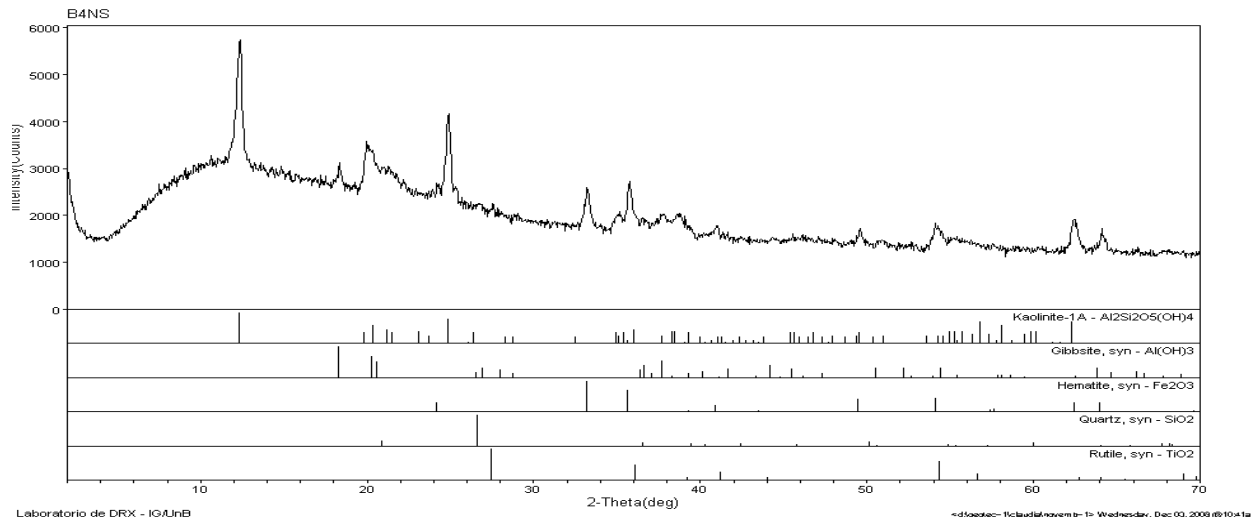


Figura C.5 Difratoograma de raios X para amostra B4NS

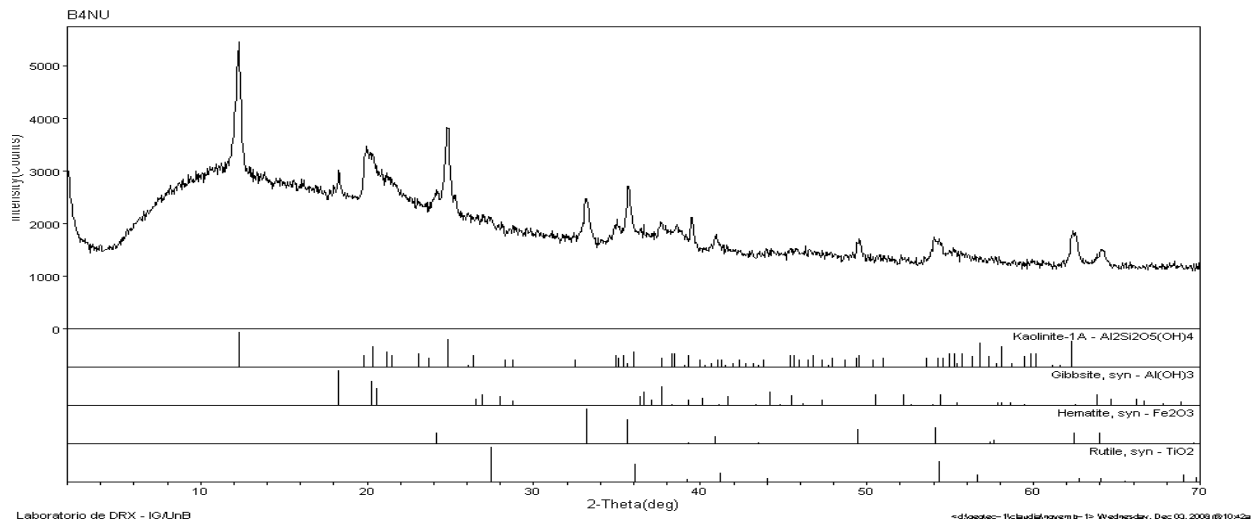


Figura C.6 Difratoograma de raios X para amostra B4NU

## APENDICE D

### ESPECTROS DE FTIR

Na Figura E.1 até Figura E.2 são apresentados os espectros correspondentes aos resultados dos ensaios de FTIR.

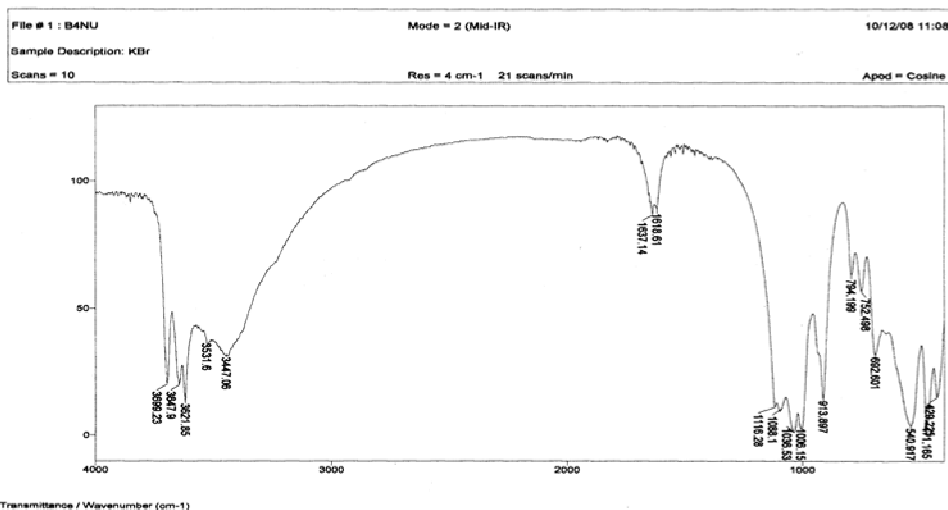


Figura D.1 Espectro de FTIR para a amostra B4NU

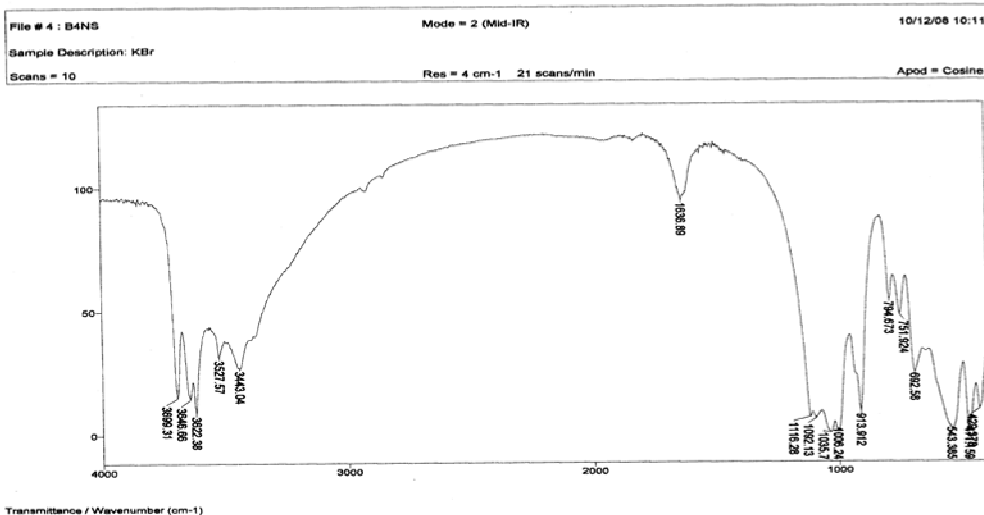


Figura D.2 Espectro de FTIR para a amostra B4NS

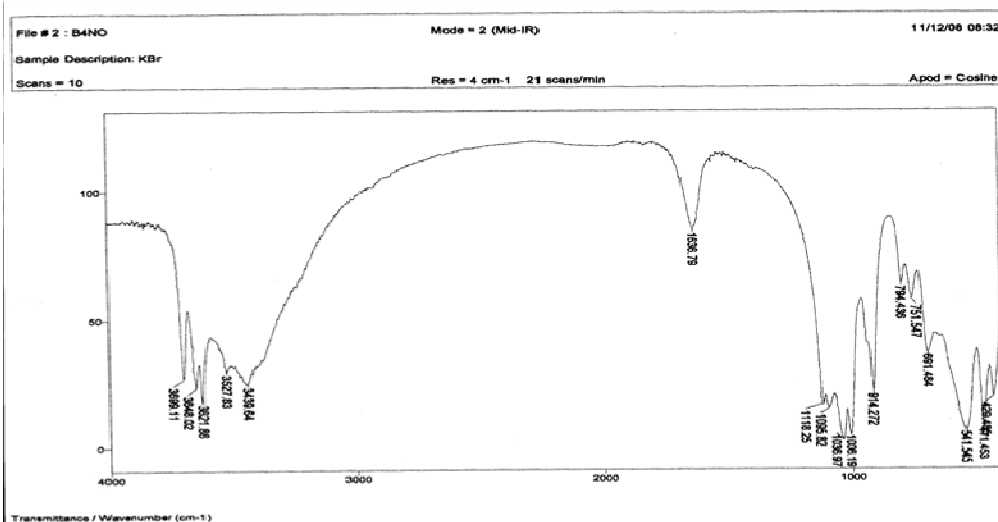


Figura D.3 Espectro de FTIR para a amostra B4NO

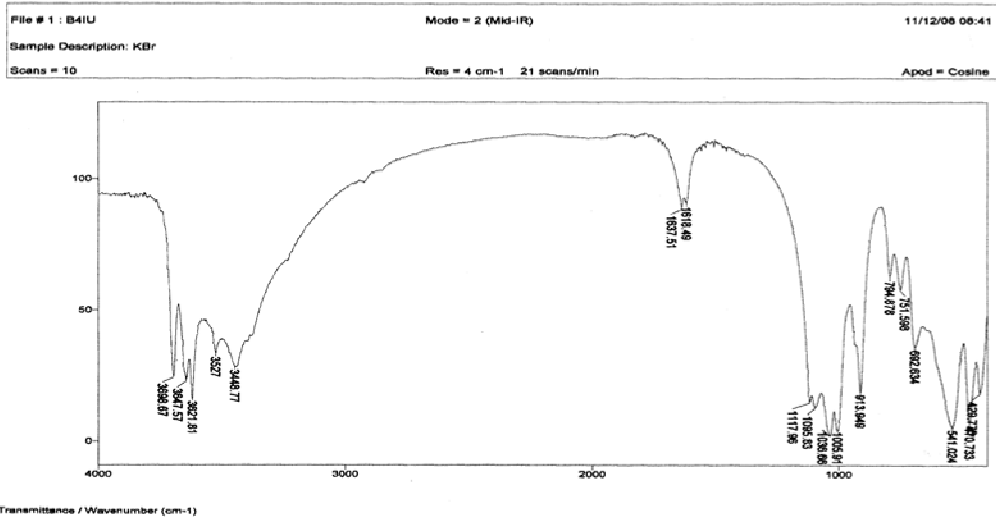


Figura D.4 Espectro de FTIR para a amostra B4IU

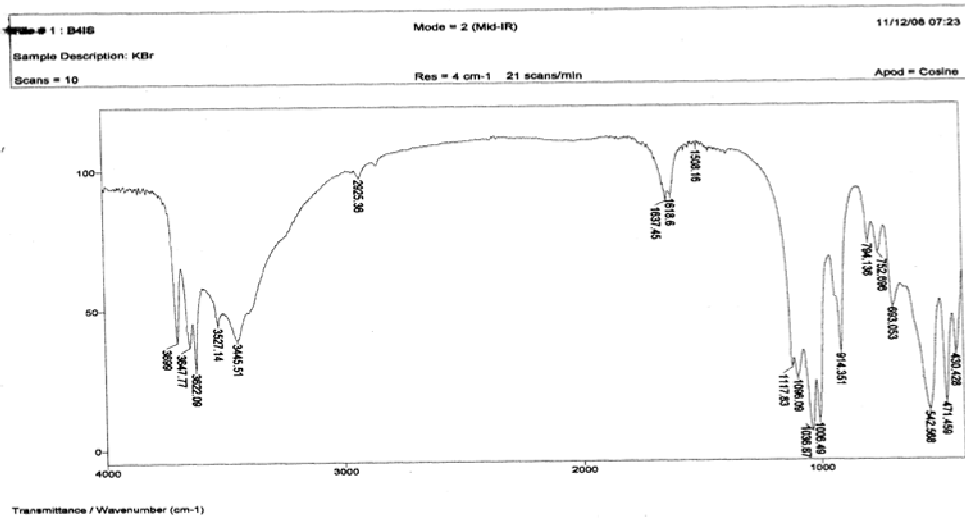


Figura D.5 Espectro de FTIR para a amostra B4IS

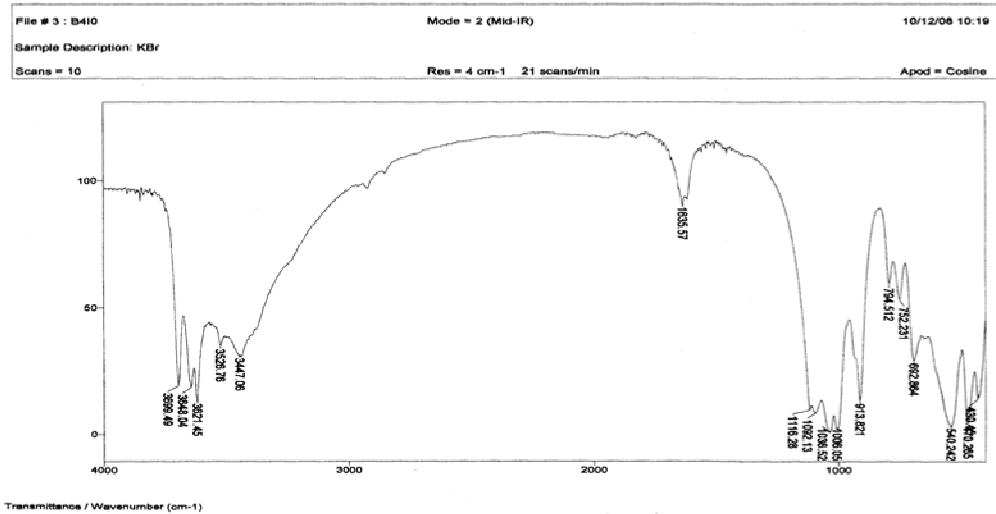


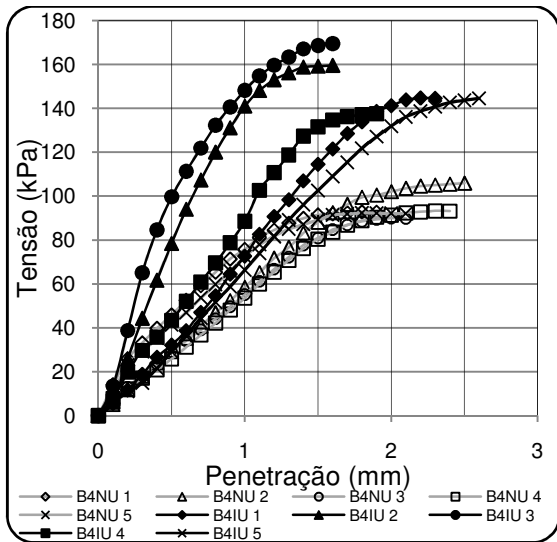
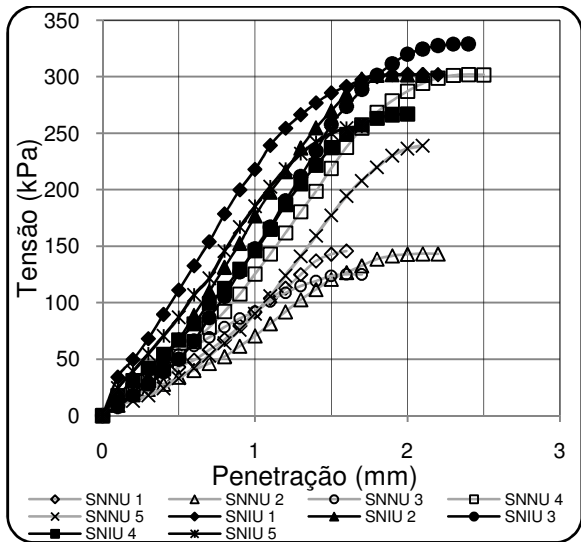
Figura D.6 Espectro de FTIR para a amostra B4IO



## APENDICE E

### GRAFICOS DE RESISTENCIA À COMPRESSAO SIMPLES

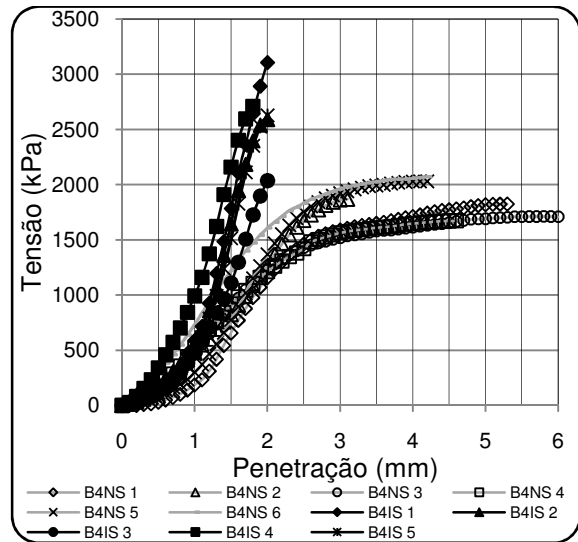
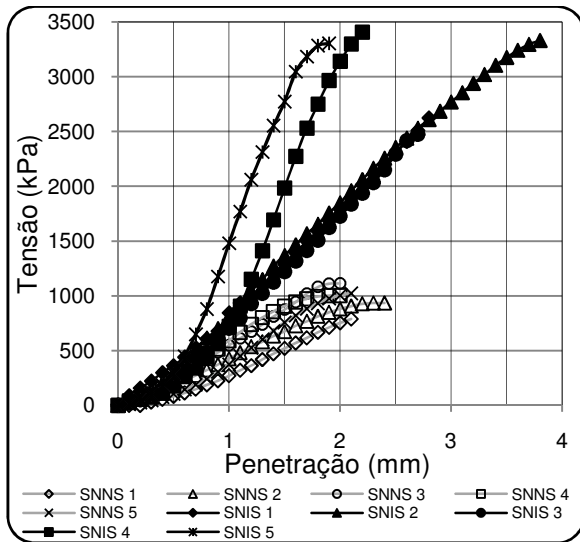
Na Figura E.1 até Figura E.2 são apresentados os resultados de compressão simples para umidades diferentes da ótima.



(a)

(b)

Figura E.1 Resistência à compressão simples (a) SNS. (b) B4S



(a)

(b)

Figura E.2 Resistência à compressão simples (a) SNS. (b) B4S