

## 5

### Apresentação e discussão dos resultados

A apresentação dos resultados está disposta separadamente, pelo tipo de instrumento utilizado.

No primeiro momento, no item 5.1, apresentar-se-ão os resultados obtidos pelos tensiômetros. No item 5.2, os resultados dos TDR's serão dispostos. Por fim, ao longo do item 5.3, os acelerômetros terão os seus valores descritos, permitindo a análise dos acelerogramas e dos espectros de potência obtidos.

#### 5.1.Tensiômetros

Antes de abordar qualquer resultado oriundo dos tensiômetros (dispostos da Figura 1 até a Figura 13), algumas ressalvas devem ser feitas.

Ao longo do uso do sensor, algumas dificuldades foram encontradas.

A primeira delas toca a fragilidade do sistema. O sensor necessita ficar conectado durante todo o tempo de inserção no solo. Este fato ocorre, pois o transdutor de pressão pode ser danificado a partir de 2 atm.

A segunda limitação tange a fácil entrada de ar na pedra porosa. Ressalta-se este ponto pela dificuldade em realizar a etapa seca dos ensaios, aos quais dessaturaram as pedras porosas, inviabilizando o uso dos sensores em algumas etapas.

A terceira limitação refere-se ao kit para refilar a pedra, a haste e o sensor. O conjunto de seringas, não conseguiu manter o vácuo necessário para retirar o ar da pedra porosa e preenche-la com água, necessitando assim succionar por diversas vezes a seringa, emanando uma grande quantidade de tempo.

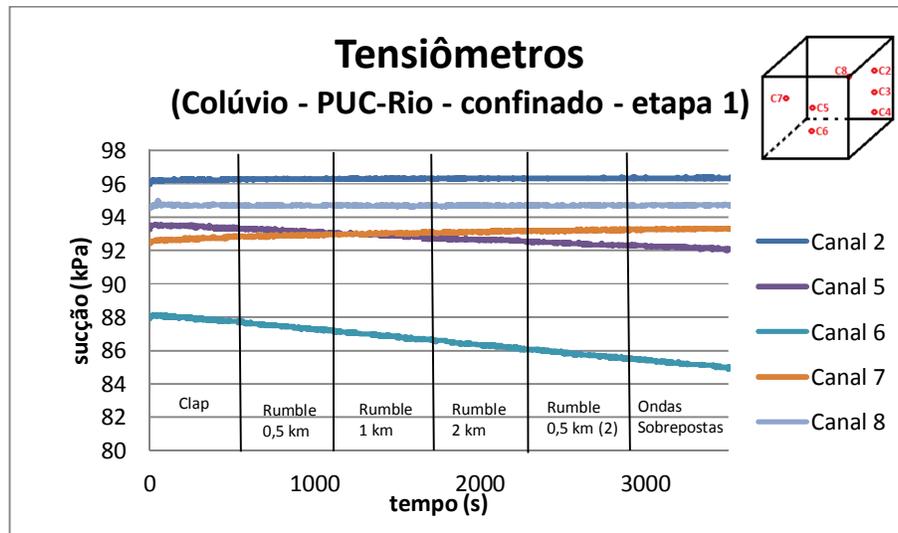


Figura 1: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do colúvio da PUC-Rio, na situação confinada, na execução da etapa 1

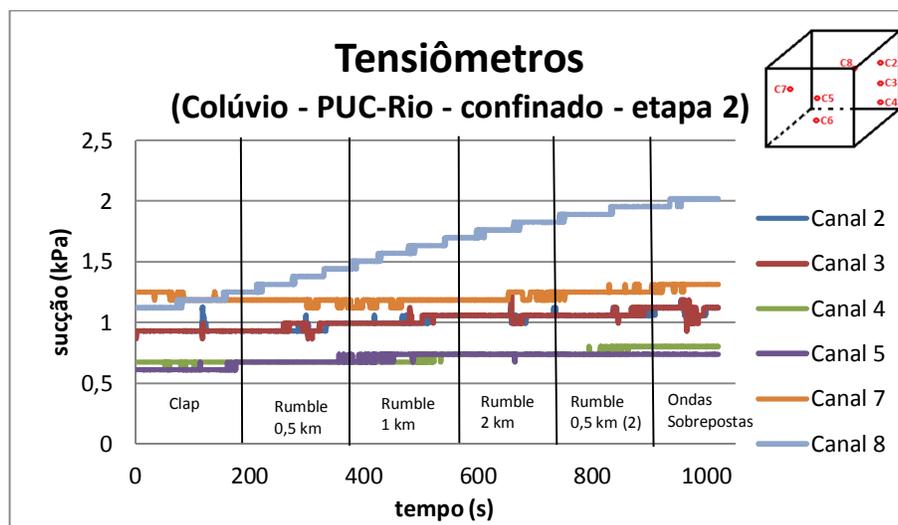


Figura 2: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do colúvio da PUC-Rio, na situação confinada, na execução da etapa 2

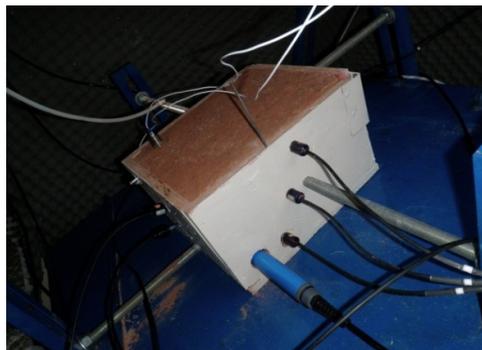


Figura 3: Bloco indeformado, confinado e instrumentado, do colúvio proveniente da PUC-Rio

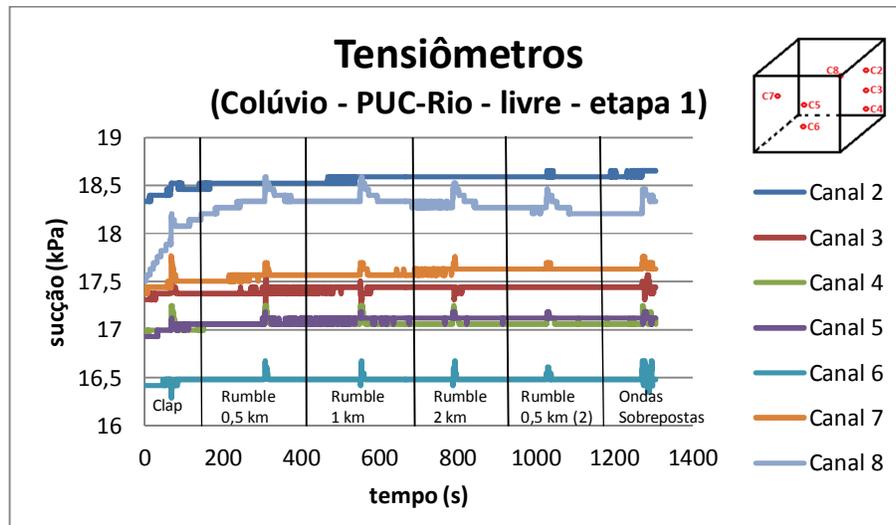


Figura 4: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do colúvio da PUC-Rio, com a amostra livre de confinamento, na execução da etapa 1

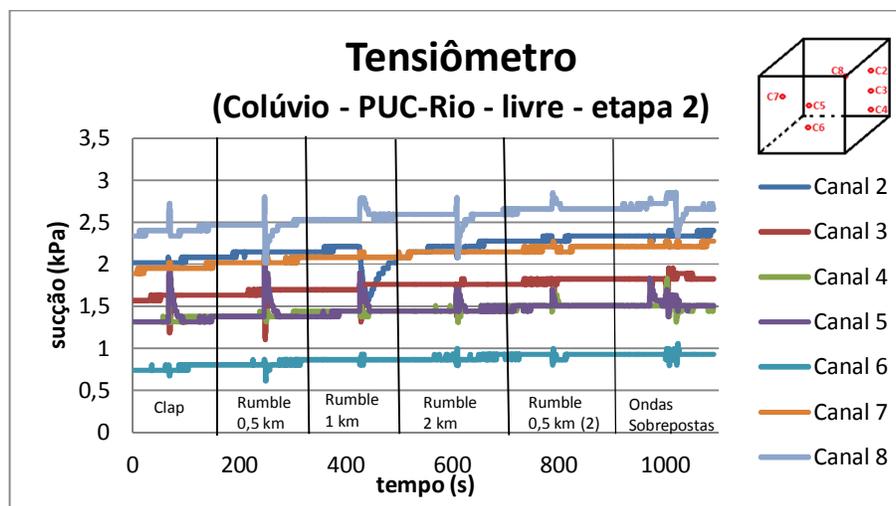


Figura 5: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do colúvio da PUC-Rio, com a amostra livre de confinamento, na execução da etapa 2

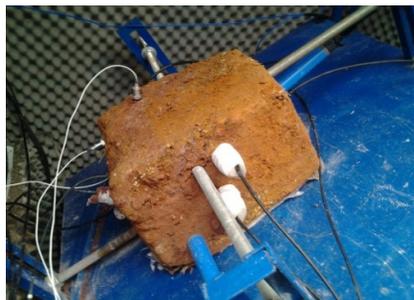


Figura 6: Bloco indeformado, livre de confinamento, instrumentado, do colúvio proveniente da PUC-Rio.

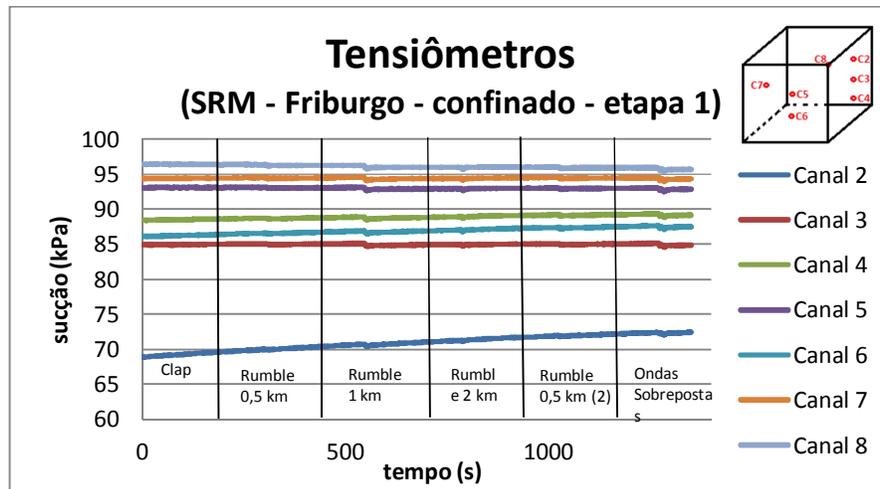


Figura 7: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do condomínio situado no bairro de Conquista, em Nova Friburgo, com a amostra confinada, na execução da etapa 1. (os resultados individuais, com maior detalhamento dos canais, seguem em anexo)

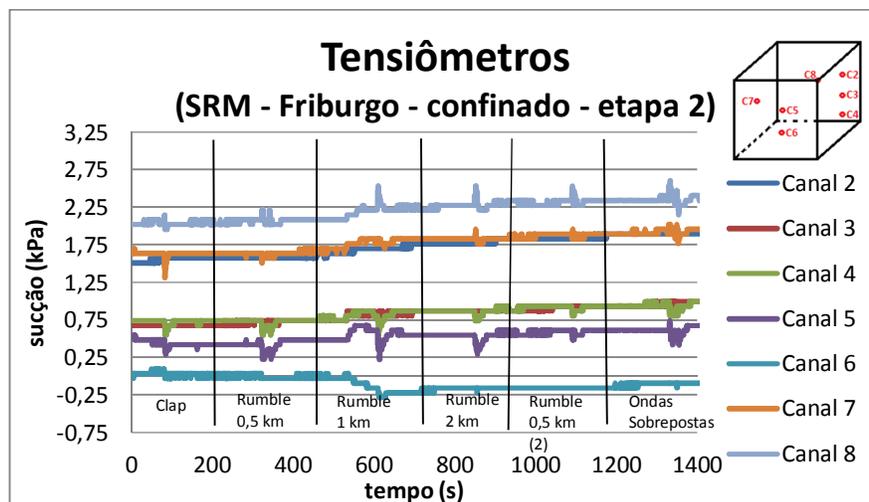


Figura 8: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do condomínio situado no bairro de Conquista, em Nova Friburgo, com a amostra confinada, na execução da etapa 2

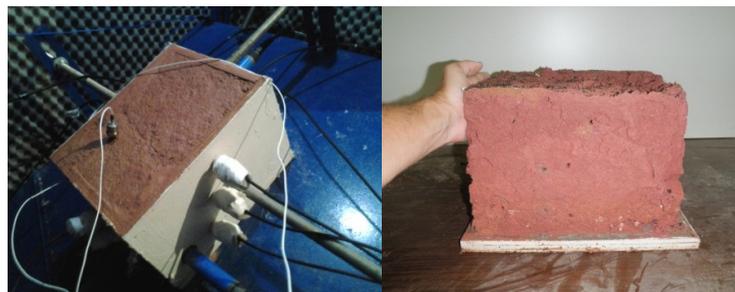


Figura 9: Bloco indeformado, confinado e instrumentado, no momento e após o ensaio, do SRM proveniente do condomínio situado em Conquista – Nova Friburgo

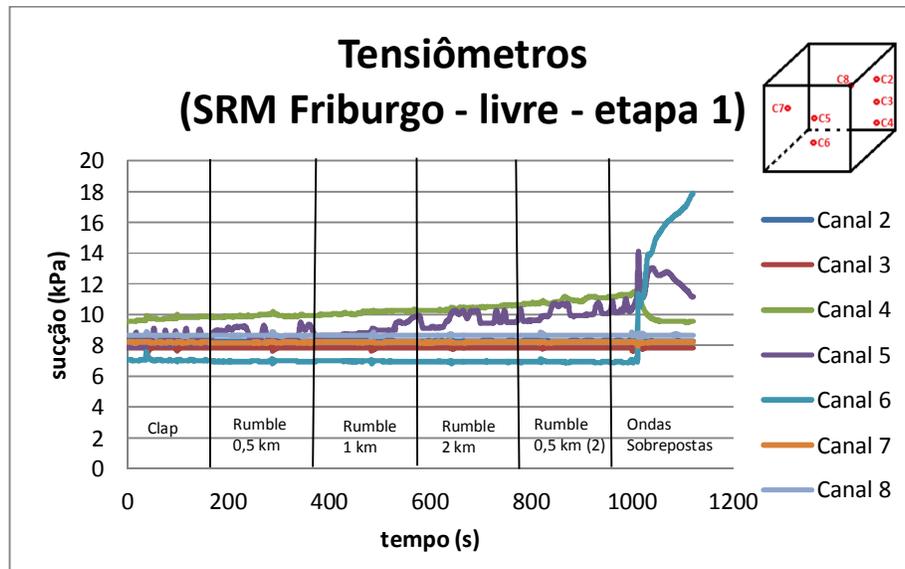


Figura 10: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do condomínio situado no bairro de Conquista, em Nova Friburgo, com a amostra livre de confinamento, na execução da etapa 1

Na Figura 11 podemos observar o bloco rompido. Na imagem, os sensores não estão acoplados ao bloco, pois, devido à fragilidade das hastes, todos os TDR's e tensiômetros foram removidos assim que a câmara foi aberta.



Figura 11: Bloco de solo logo após a ruptura

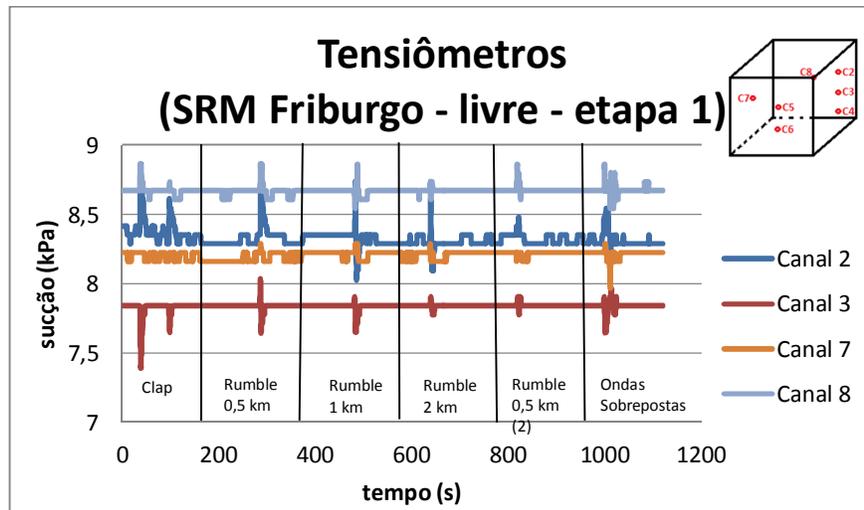


Figura 12: Resultados dos tensiômetros que não foram afetados com a ruptura do solo proveniente do condomínio situado no bairro de Conquista, em Nova Friburgo, com a amostra livre de confinamento, na execução da etapa 1

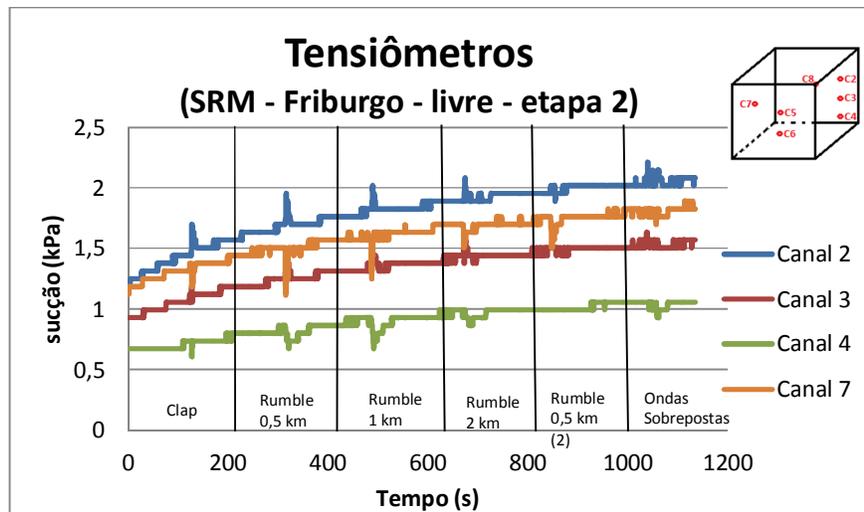


Figura 13: Resultados dos tensiômetros inseridos no solo proveniente do condomínio situado no bairro de Conquista, em Nova Friburgo, com a amostra livre de confinamento, na execução da etapa 2

Os resultados dos tensiômetros apresentaram-se acréscimos e decréscimos de sucção variadas. O bloco que estava sob a proteção da caixa de compensado naval de 19 mm, na fase seca, denominada etapa 1, do solo proveniente da PUC-Rio, não apresentou variações de sucção ao longo da emissão das ondas sonoras.

No caso do bloco confinado, sob a proteção da caixa de compensado naval, na fase seca denominada etapa 1, do solo proveniente do condomínio situado no bairro de

Conquista, em Nova Friburgo, observou-se a diminuição da sucção em todos os canais. Este fato indica que por conta da variação da pressão do ar contido no interior do bloco de solo, ocorre um acréscimo na pressão proveniente dos sons dos trovões, gerando um transiente hidráulico dentro da haste do sensor.

Para todos os outros ensaios, os resultados foram similares e apresentaram variações positivas e negativas na sucção dos materiais ensaiados, cabendo ressaltar que a etapa 1 dos blocos livres da proteção da caixa, não estavam secos, estando os mesmos nas umidades naturais aos quais foram extraídos do campo.

Os comportamentos diferenciados podem ser explicados pela celeridade dos materiais. A celeridade de um material toca a velocidade de propagação de ondas sonoras no mesmo. Sendo assim, para condições saturadas, considerando a maior velocidade de propagação de ondas no meio saturado, onde a água atua como fluido incompressível, a celeridade resulta em  $C = 1425$  m/s, que é a velocidade de propagação do som na água.

Deste modo, a celeridade dos solos irá ser afetada de acordo com a condição saturada ou não saturada dos mesmos, sendo gerado um fenômeno similar ao transiente hidráulico por conta da variação da pressão gerada pela fonte emissora, ocasionando oscilações positivas e negativas de tensões de água no interior da amostra.

Este fato ocorre considerando-se a segunda lei de Newton, onde a força é o produto da massa pela aceleração. Neste caso, considerando que a massa do fluido permanecerá constante e que ocorrerá a variação da aceleração das ondas de pressão que estão atuando dentro do bloco de solo, as ondas propagar-se-ão ao longo de toda a amostra, sofrendo reflexões nas extremidades, podendo também, haver concentração das forças em planos de fraqueza.

As variações de sucção retratadas ao longo dos ensaios indicam magnitudes pequenas, menores que cerca de 2kPa. De acordo com o ressaltado por de Campos (2013), variações de sucção de cerca de 2 kPa em análises de estabilidade (o que corresponde a variações de igual magnitude do parâmetro coesão aparente) podem implicar na instabilização de um dado talude envolvendo um solo com dadas propriedades de resistência. Aliando-se a isto o fato de que dois outros blocos romperam sob a ação das ondas sonoras impostas (com dados não incluídos no presente trabalho

em função de controle inadequado das condições iniciais das amostras e de dúvidas quanto aos resultados das instrumentações instaladas), pode-se considerar que a incidência de ondas sonoras replicadas de trovões possam constituir um fator de instabilização relevante. Assim, partindo do pressuposto que o solo pode estar na iminência da ruptura (se aproximando das envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 14 e na Figura 15), as variações de sucção não estão descartadas como agentes deflagradores de movimentos de massa.

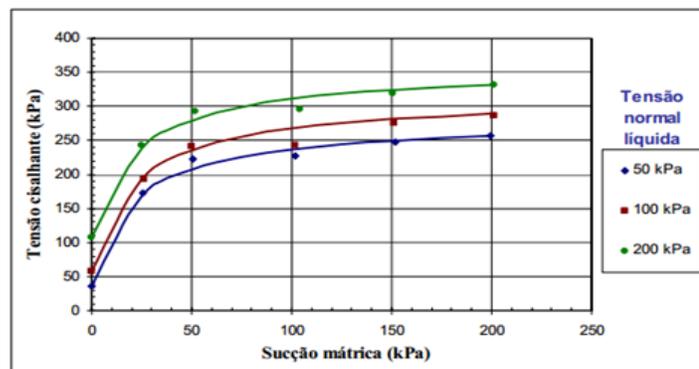


Figura 14: Envoltória de ruptura relacionando a tensão cisalhante com a sucção mátrica do solo proveniente do colúvio da PUC-Rio (Soares, 2005)

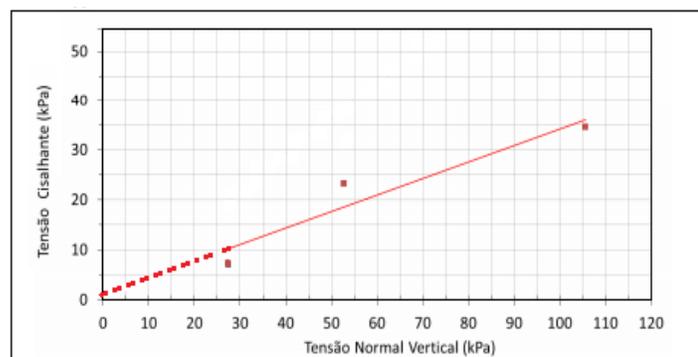


Figura 15: Envoltória de ruptura, proveniente do ensaio de cisalhamento direto, para o solo residual maduro, oriundo de Nova Friburgo (Escobar, 2012)

Deve-se destacar que os resultados obtidos de forma experimental ainda não permitem conclusões mais detalhadas acerca do resultado proveniente do experimento, no que toca o uso dos tensiômetros. Para isso é necessário que se amplie o debate e as pesquisas sobre o tema.

## 5.2.TDR's

Assim como os tensiômetros, o uso do sensor capacitivo para o presente estudo carece de algumas ressalvas.

A primeira delas é a fragilidade da haste, que dificulta a inserção em blocos de solos aos quais os tamanhos não permitem o uso do trado convencional e o preenchimento do furo com a lama do próprio material. Nesse caso o fabricante sugere o uso do mini-trado. Entretanto, o contato entre o solo e as hastes é de grande importância, conforme se ressalta na dissertação e um mau contato entre o conjunto solo-haste pode acarretar valores errados de umidade volumétrica.

A segunda ressalva não aborda necessariamente o equipamento e sim à aplicabilidade ao que o mesmo foi submetido nos ensaios. Os TDR's necessitam de um determinado tempo para o carregamento e descarregamento do sistema. Deste modo, as leituras variam naturalmente, não permitindo que seja efetuada uma leitura precisa de um exato ponto de medição.

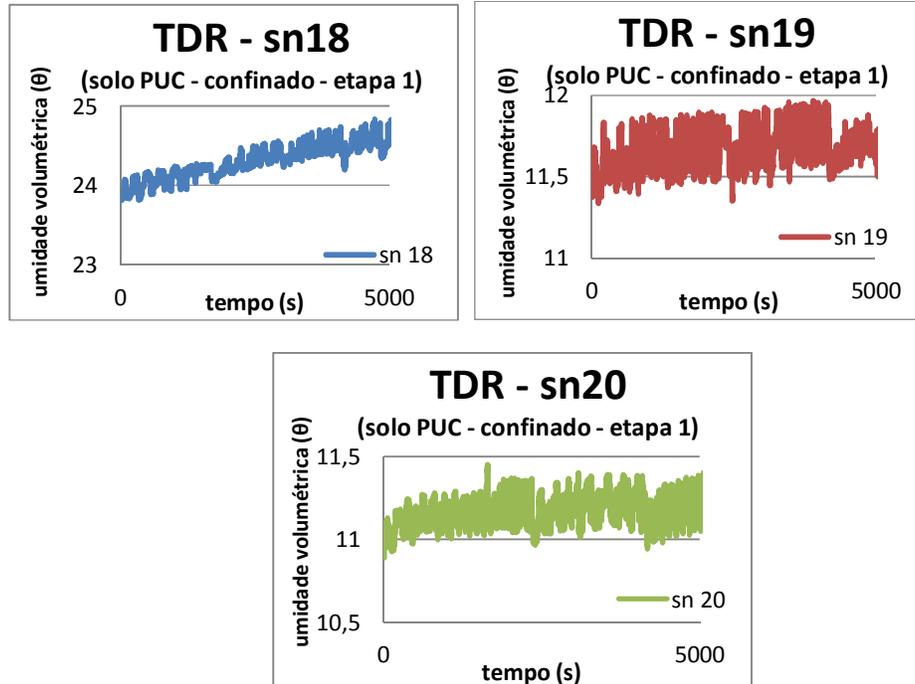


Figura 16: Disposição dos resultados dos TDR's no momento da incidência das ondas de som

Deste modo, os resultados dos TDR's permitiram a aferição de mais pontos na curva característica de retenção de umidade, destacando a interpolação dos dados para a obtenção dos valores do grau de saturação existente em cada um dos pontos das amostras.

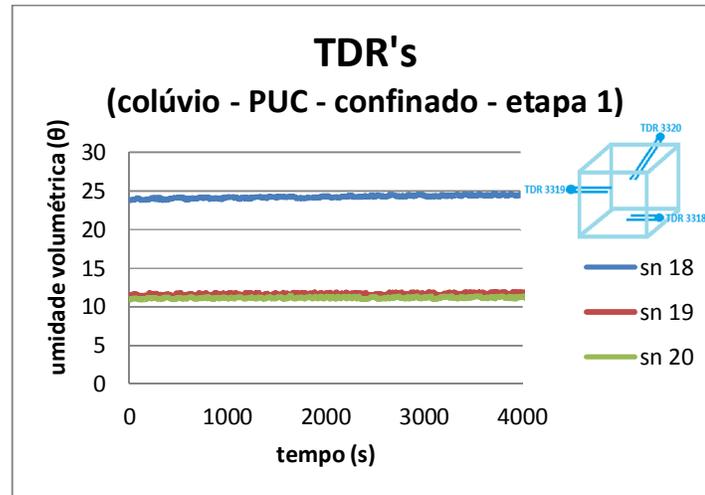


Figura 17: Resultados obtidos pelos TDR's, no colúvio proveniente da PUC-Rio, com a amostra confinada, na etapa 1

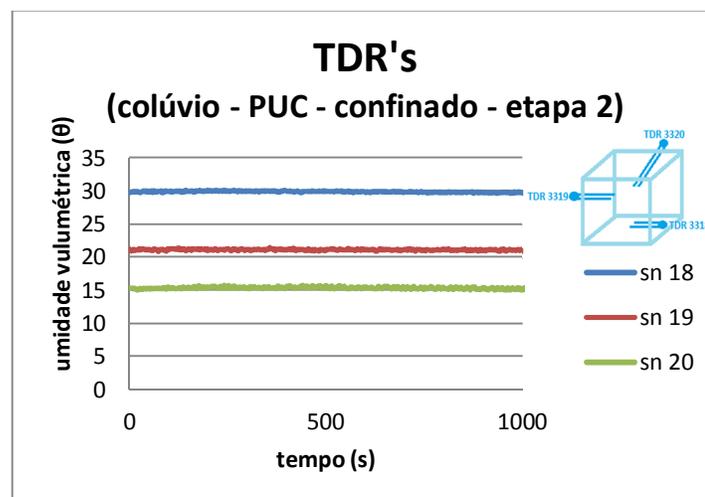


Figura 18: Resultados obtidos pelos TDR's, no colúvio proveniente da PUC-Rio, com a amostra confinada, na etapa 2

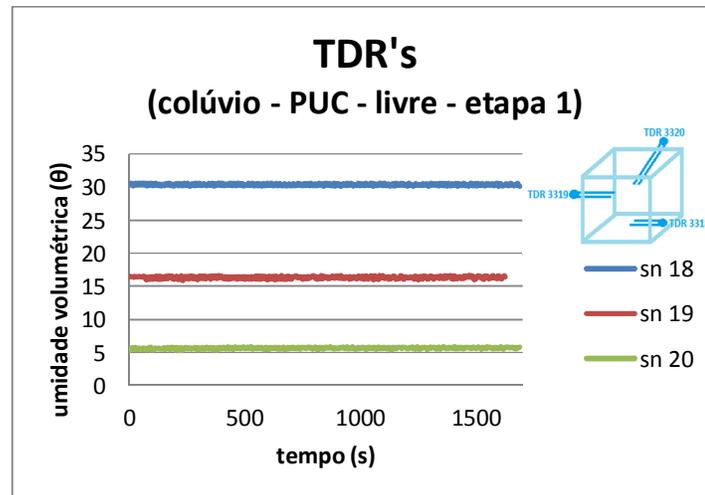


Figura 19: Resultados obtidos pelos TDR's, no colúvio proveniente da PUC-Rio, com a amostra livre de confinamento, na etapa 1

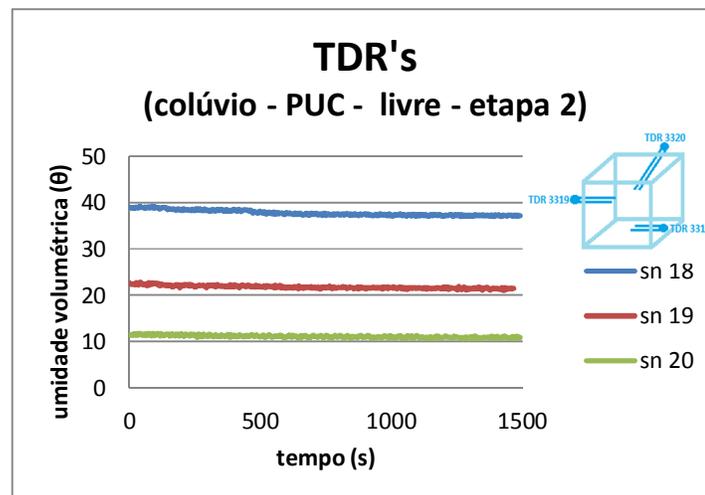


Figura 20: Resultados obtidos pelos TDR's, no colúvio proveniente da PUC-Rio, com a amostra livre de confinamento, na etapa 2

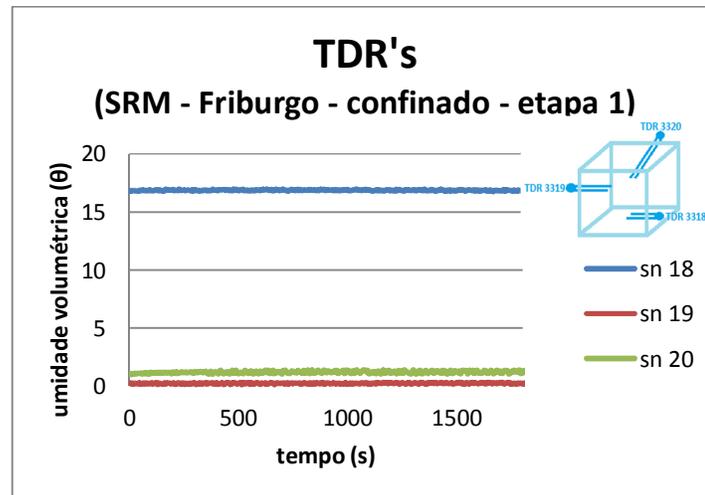


Figura 21: Resultados obtidos pelos TDR's, no solo residual maduro proveniente do condomínio do bairro de Conquista – Nova Friburgo, com a amostra confinada, na etapa 1

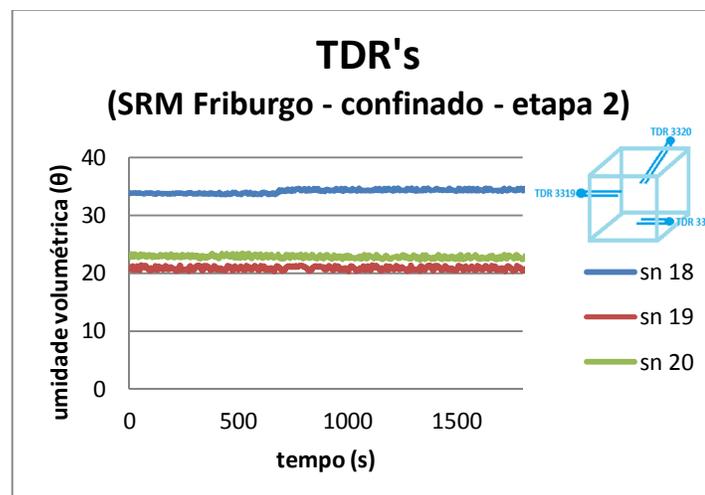


Figura 22: Resultados obtidos pelos TDR's, no solo residual maduro proveniente do condomínio do bairro de Conquista – Nova Friburgo, com a amostra confinada, na etapa 2

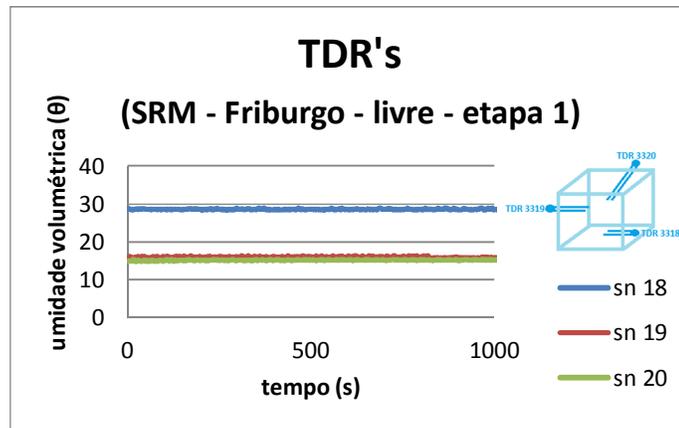


Figura 23: Resultados obtidos pelos TDR's, no solo residual maduro proveniente do condomínio do bairro de Conquista – Nova Friburgo, com a amostra livre de confinamento, na etapa 1

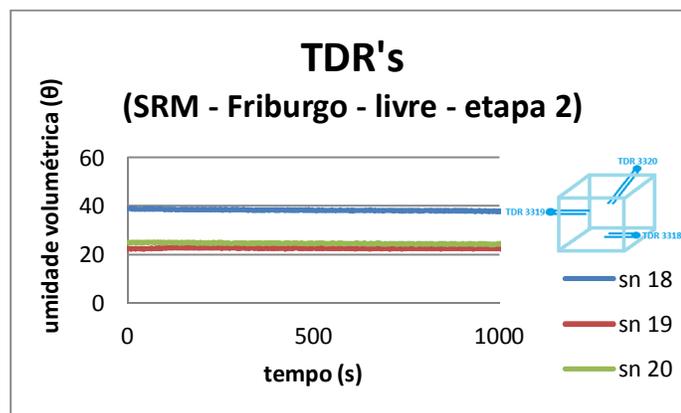


Figura 24: Resultados obtidos pelos TDR's, no solo residual maduro proveniente do condomínio do bairro de Conquista – Nova Friburgo, com a amostra livre de confinamento, na etapa 2

De modo geral os TDR's apresentaram boa trabalhabilidade. Os valores encontrados foram de grande valia para que analisadas fossem as áreas com o maior grau de saturação dentro dos blocos de solos ensaiados.

Outro fator importante, ao qual o uso do equipamento se fez atuante, foi a garantia de que todas as áreas da amostra atingiram valores mais elevados de umidade volumétrica após a inserção de água nos blocos de solos. Mesmo sem possuir uma metodologia que aplicasse a saturação com uma carga constante, os materiais sempre alcançaram valores mais elevados de umidade volumétrica na etapa 2, permitindo o desenvolvimento do ensaio em uma fase mais úmida do que a etapa 1.

### 5.3. Acelerômetros

No que toca a geotecnia, geralmente os resultados dos acelerômetros são usados para análises sísmicas principalmente por conta das acelerações horizontais, às quais têm sido comumente usadas para descrever terremotos. Este fato ocorre, devido à natural relação dos acelerogramas com as forças inerciais, assim como pelo fato das maiores forças dinâmicas induzidas em certos tipos de estruturas estarem amplamente relacionadas à máxima aceleração horizontal.

Entretanto, não somente a máxima aceleração horizontal possui importância na ciência geotécnica. Para o presente estudo, como as acelerações são geradas a partir da explosão dos pontos de pressão, se propagando em todas as direções da atmosfera, as acelerações que se destacam no fenômeno são consideradas verticais por conta do efeito da gravidade.

As acelerações verticais têm recebido menos atenção do que as acelerações horizontais, por conta das elevadas margens de segurança das forças verticais estáticas, induzidas pela gravidade. Estas usualmente apresentam adequadas resistências às forças dinâmicas, induzidas por acelerações verticais durante terremotos.

No entanto, a discussão é válida, pois a partir de terremotos registrados ao longo do tempo, acelerações verticais máximas sutilmente acima de 0,5g foram registradas (Kramer, 1996). Entretanto, no terremoto ocorrido no recentemente no Japão (Tohoku 2011), foi registrado um acréscimo de até 1g, perto do epicentro.

No que toca as atividades sísmicas, estes valores não são indicadores de dano significativo nas estruturas devido a que as acelerações máximas ocorrem a muito altas frequências e a duração do terremoto não é longa.

Entretanto, não se sabe sobre o efeito do amortecimento das ondas de som no solo e a propagação das mesmas dentro da câmara, ressaltando assim a importância da ampliação dos debates acerca do tema.

Os equipamentos se mostraram robustos com uma pequena dificuldade encontrada na que aquisição dos cabos para a conexão dos acelerômetros com o osciloscópio.

Embora os acelerômetros tenham sido fabricados em 1984, o princípio de funcionamento é o mesmo dos acelerômetros piezoelétricos da atualidade. Outro ponto relevante são as suas hastes de metal que facilitaram a inserção nos diferentes materiais utilizados na presente pesquisa sendo de grande valia para a execução dos ensaios.

Os acelerômetros foram dispostos ao longo dos três eixos, conforme mostra a Figura 25. Os resultados estão expressos nos gráficos que relacionam a força  $G$  (kN) e o tempo, permitindo a comparação com as formas de onda emitidas, destacadas em azul, na parte superior dos gráficos.

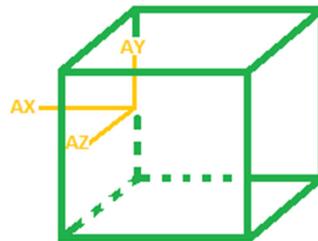


Figura 25: Disposição dos acelerômetros nos blocos

Como a disposição das formas de onda emitidas foi destacada, cabe ressaltar que os tempos do clap, rumble 0,5km, rumble 1km, rumble 2km, rumble 0,5(2) e das ondas sobrepostas foram devidamente sincronizados com o tempo indicado nos acelerogramas.

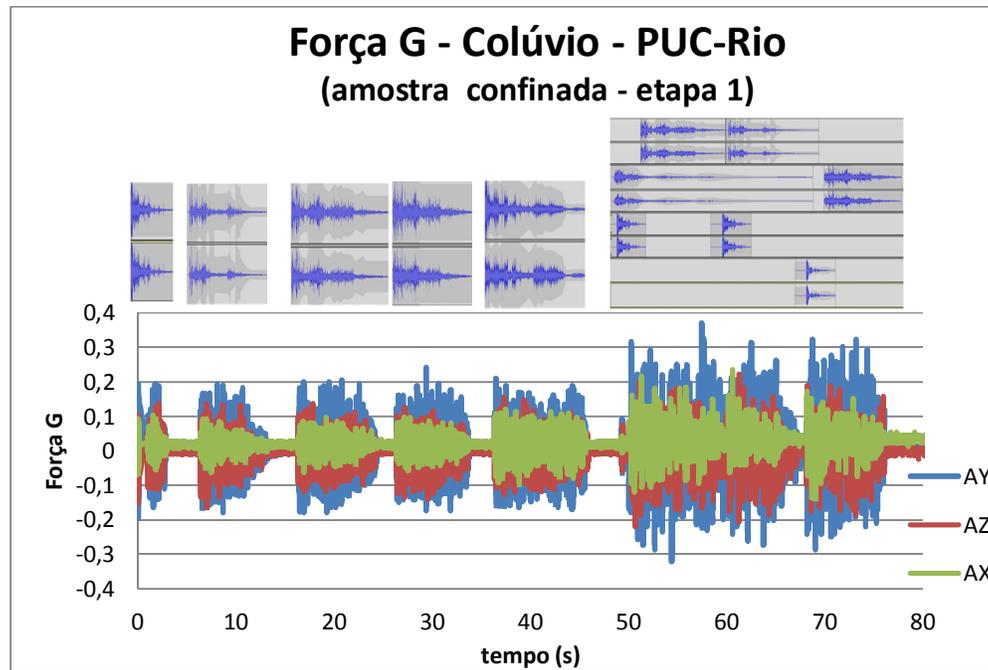


Figura 26: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra confinada, do colúvio proveniente da PUC-Rio, ao longo da execução do ensaio, na etapa 1

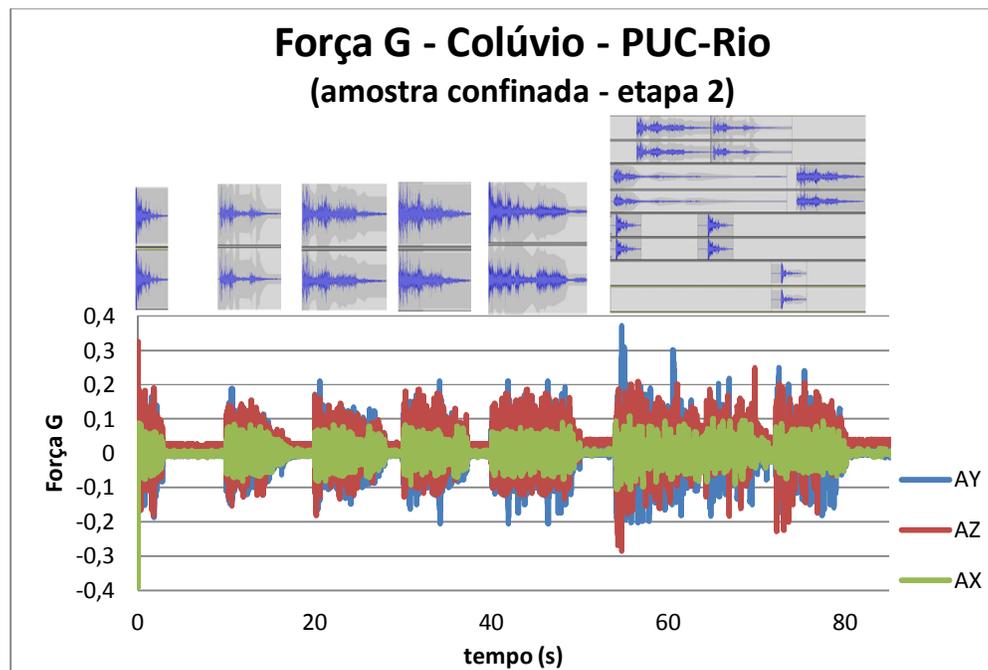


Figura 27: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra confinada, do colúvio proveniente da PUC-Rio, ao longo da execução do ensaio, na etapa 2

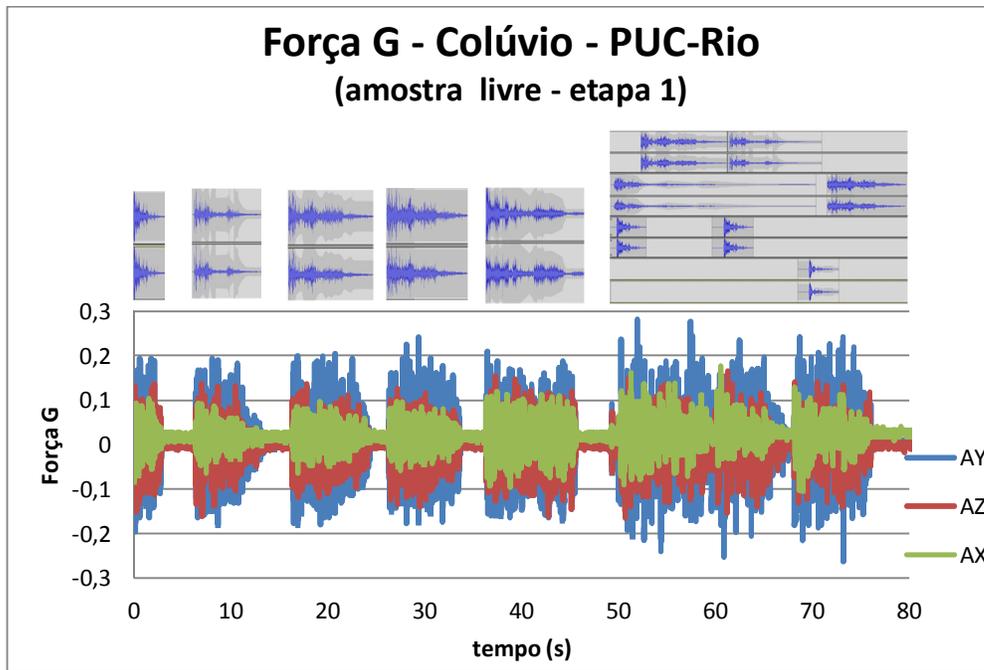


Figura 28: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra livre do confinamento, do colúvio proveniente da PUC-Rio, ao longo da execução do ensaio, na etapa 1

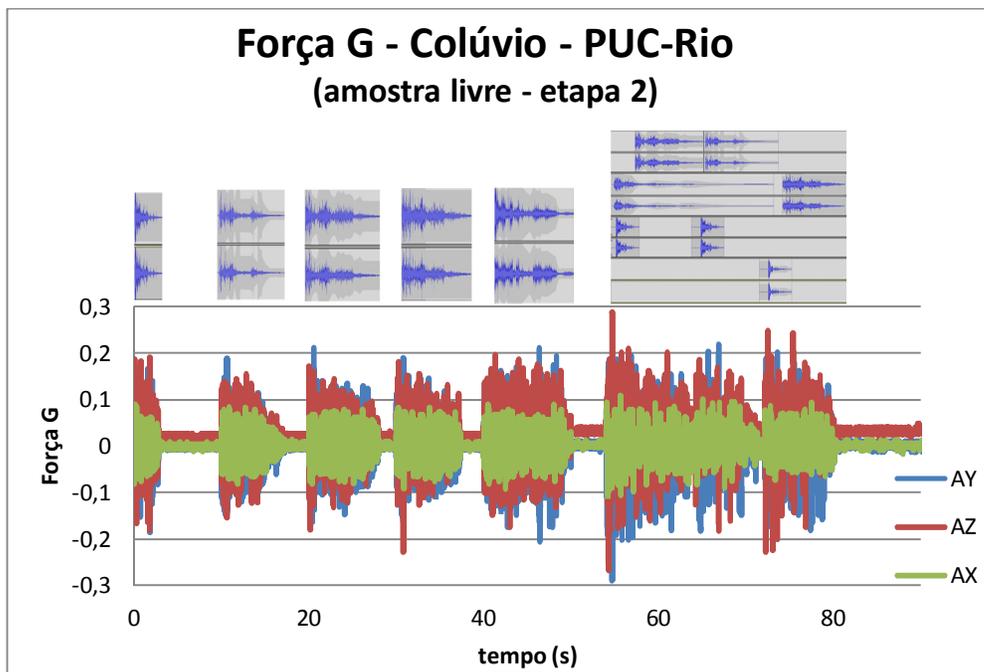


Figura 29: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra livre do confinamento, do colúvio proveniente da PUC-Rio, ao longo da execução do ensaio, na etapa 2

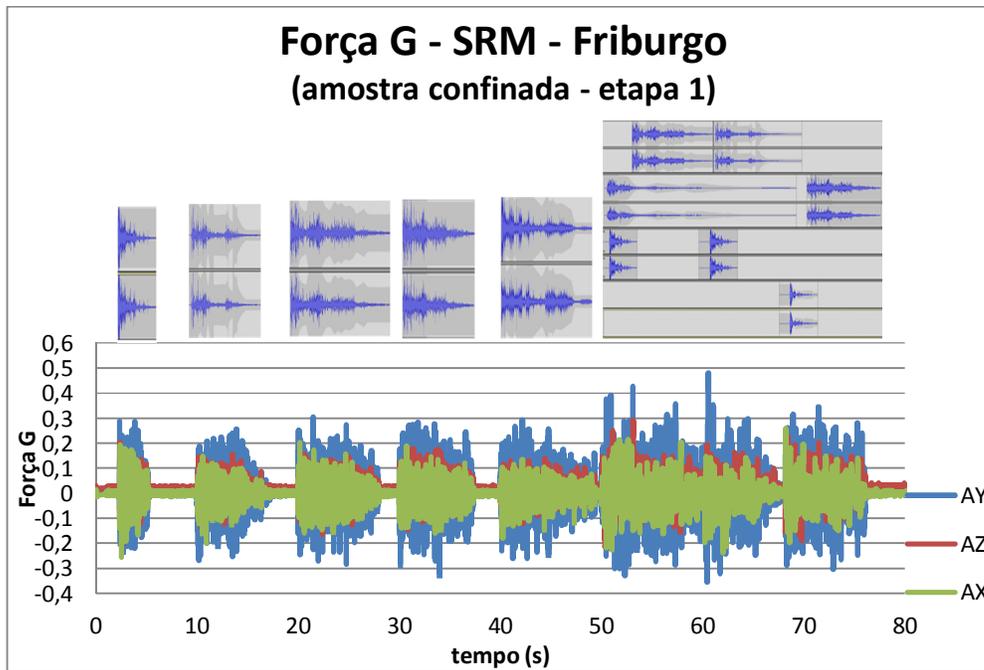


Figura 30: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra confinada, do SRM proveniente do condomínio localizado no bairro de Conquista – Nova Friburgo, ao longo da execução do ensaio, na etapa 1

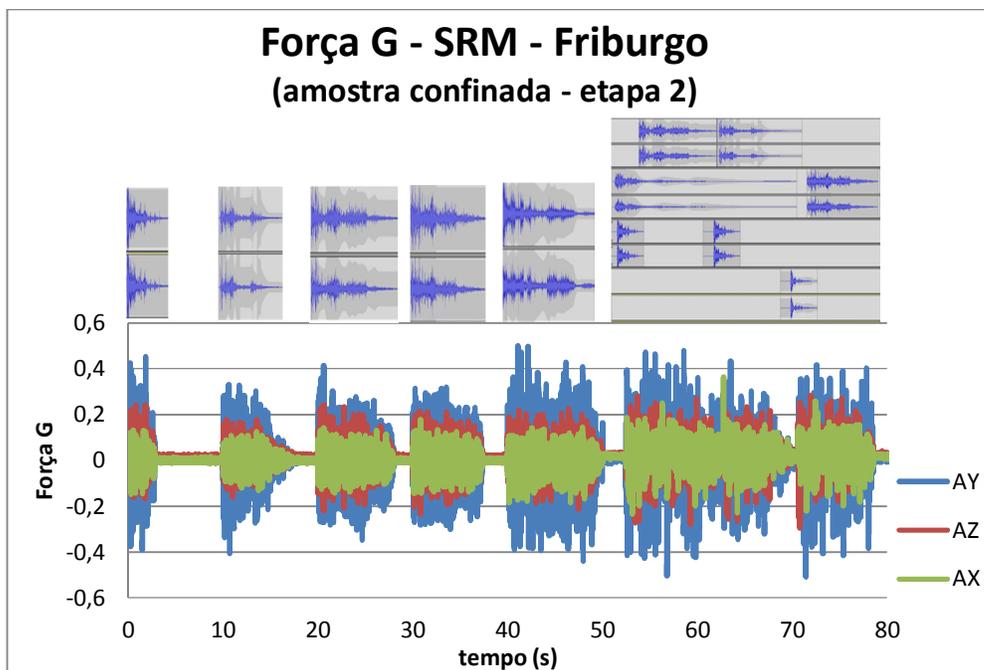


Figura 31: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra confinada, do SRM proveniente do condomínio localizado no bairro de Conquista – Nova Friburgo, ao longo da execução do ensaio, na etapa 2

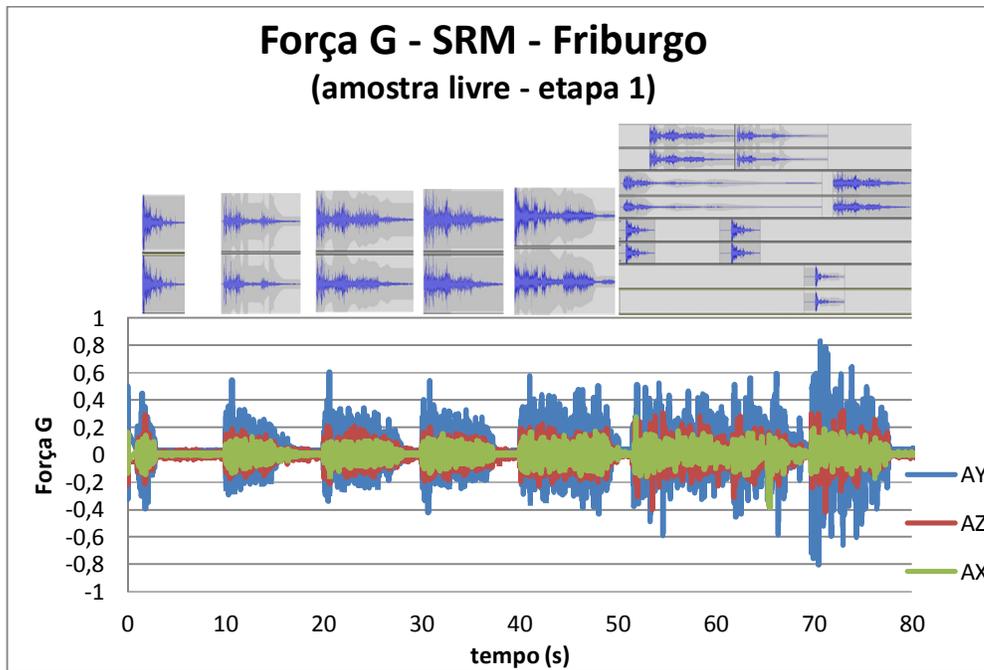


Figura 32: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra livre do confinamento, do SRM proveniente do condomínio localizado no bairro de Conquista – Nova Friburgo, ao longo da execução do ensaio, na etapa 1

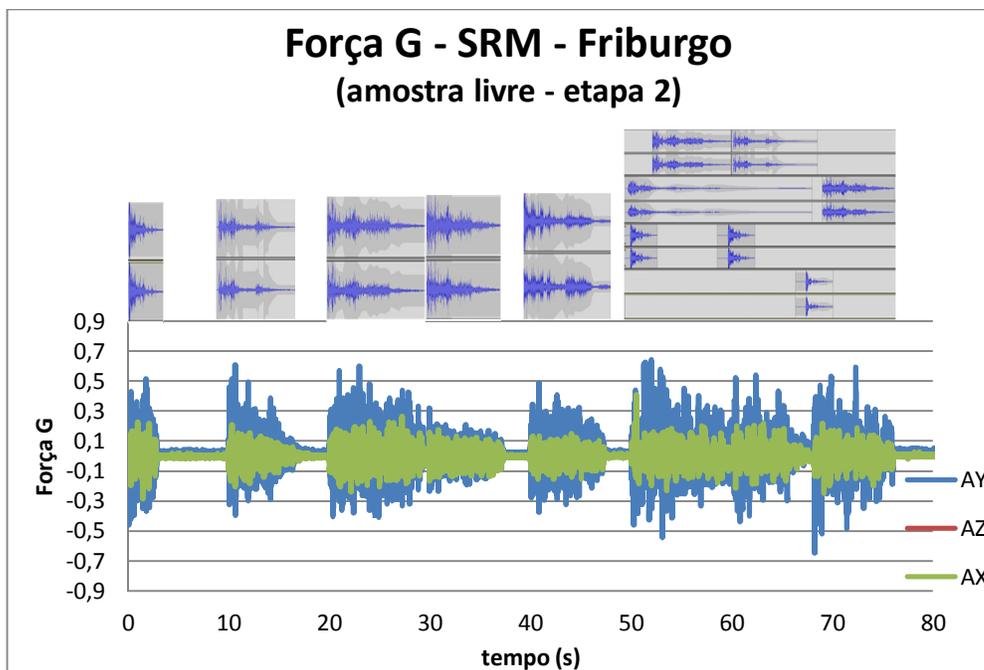


Figura 33: Resultado do acelerograma em função da força G, da amostra livre do confinamento, do SRM proveniente do condomínio localizado no bairro de Conquista – Nova Friburgo, ao longo da execução do ensaio, na etapa 2

Na apresentação dos resultados dos acelerômetros inseridos no solo residual maduro, na etapa 2 (Figura 33), observa-se a ausência do acelerômetro que estava no sentido do eixo z. Este fato ocorre, pois com a ruptura, as leituras do canal apresentaram grandes variações na aceleração, permitindo o questionamento sobre a representatividade dos dados obtidos no canal, acarretando o descarte do mesmo.

### **5.3.1. Análise das frequências**

Um dos questionamentos impostos ao longo do desenvolvimento da presente pesquisa foi a possibilidade de uma eventual ruptura por ressonância. Para que tal condição seja possível, as faixa de frequências da ondas replicadas dos trovões, oscilariam em máximas amplitudes quando atuam na mesma faixa de frequências naturais do solo.

Por conta disso, foi efetuada uma análise dos acelerogramas no software Seismo Signal, com o intuito de se obter mais informações sobre o espectro de frequência, que aborda a faixa em que as maiores potências estão concentradas.

O conteúdo de frequências de um registro é geralmente descrito através do uso de diferentes tipos de espectros. Os espectros de Fourier e de potência ilustram de forma direta o conteúdo de frequência por si mesmo e o espectro de resposta reflete a influência de um tipo de vibração na estrutura, que por sua vez possui diferentes frequências naturais.

Para que seja possível a comparação, Kramer (1996) indica registros de conteúdo de frequências naturais em solos (ou registros em rochas) que indicam uma predominância de até 10 Hz nos espectros.

Deste modo, para que haja ressonância, os resultados expressos no espectro de frequência das ondas emitidas deve se concentrar até a faixa de 10 Hz (Tabela 1).

Tabela 1: Intensidade frequência e amortecimento do solo para diferentes condições de sítio (Elghadamsi et al., 1988)

| Condições do sítio         | Frequência do solo, $w_g$ | Amortecimento do solo, $\zeta_{CR}$ |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Solo aluvionar             | 18,4 (2,93Hz)             | 0,34                                |
| Solo aluvionar sobre rocha | 22,4 (3,63Hz)             | 0,3                                 |
| Rocha                      | 27,0 (4,30Hz)             | 0,34                                |
| Solo aluvionar             | 26,2 (4,14Hz)             | 0,46                                |
| Solo aluvionar sobre rocha | 29,1 (4,63Hz)             | 0,46                                |
| Rocha                      | 38,8 (6,18Hz)             | 0,46                                |

Os resultados são apresentados de forma resumida, somente para o clap, livre de confinamento, ao longo da etapa 1, para os dois tipos de materiais ensaiados. Para uma análise mais ampla, os resultados que contemplam todas as formas de onda da etapa 1, das amostras livres, estão disponíveis em anexo.

Por fim, para que se compreenda os espectros, é necessário abordar o fato que os mesmos são resultados da Transformada de Fourier, e que para a maioria dos resultados encontrados, apresenta-se um espelho das frequências a partir de 100 Hz. Entretanto, pode-se destacar que o comportamento do espectro para as ondas sobrepostas apresentaram espelhos a partir de 20 Hz.

Sendo assim, a maior potência considerada deve estar até a faixa de valores de 0-100 Hz, para os resultados do clap, rumble 0,5 km, rumble 1 km, rumble 2 km e rumble 0,5(2) km. Para os espectros oriundos das ondas sobrepostas, a faixa situa-se de 0-20 Hz.

Deste modo, qualquer valor fora dos intervalos mencionados anteriormente não foi considerado no presente estudo.

Clap – colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1  
AZ

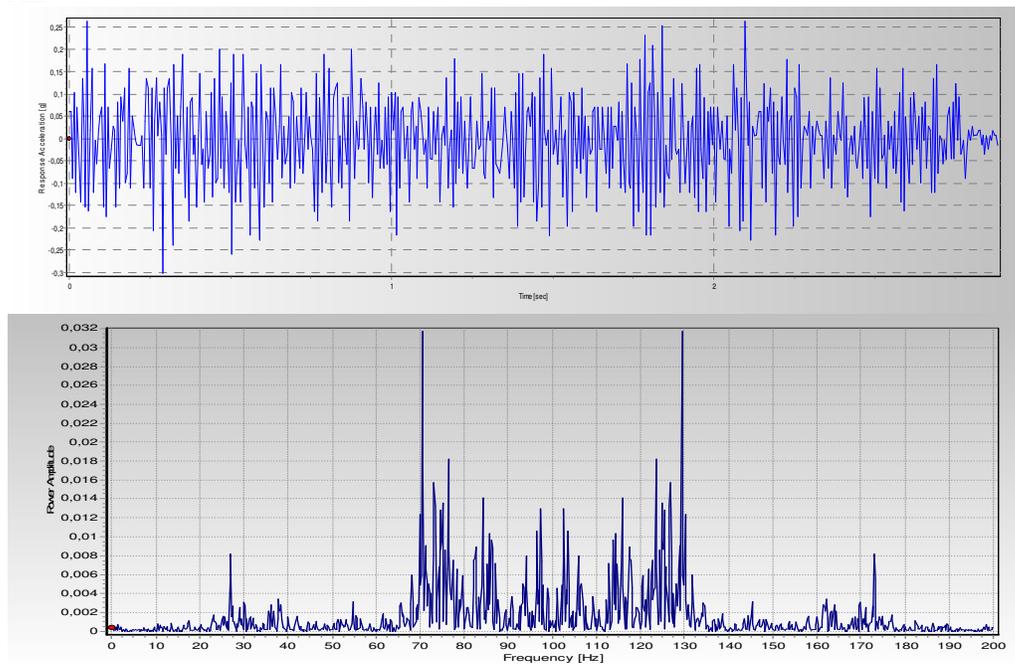


Figura 34: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção z, no colúvio proveniente da Puc-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Clap – SRM condomínio de Conquista - Nova Friburgo – amostra livre – etapa 1  
AZ

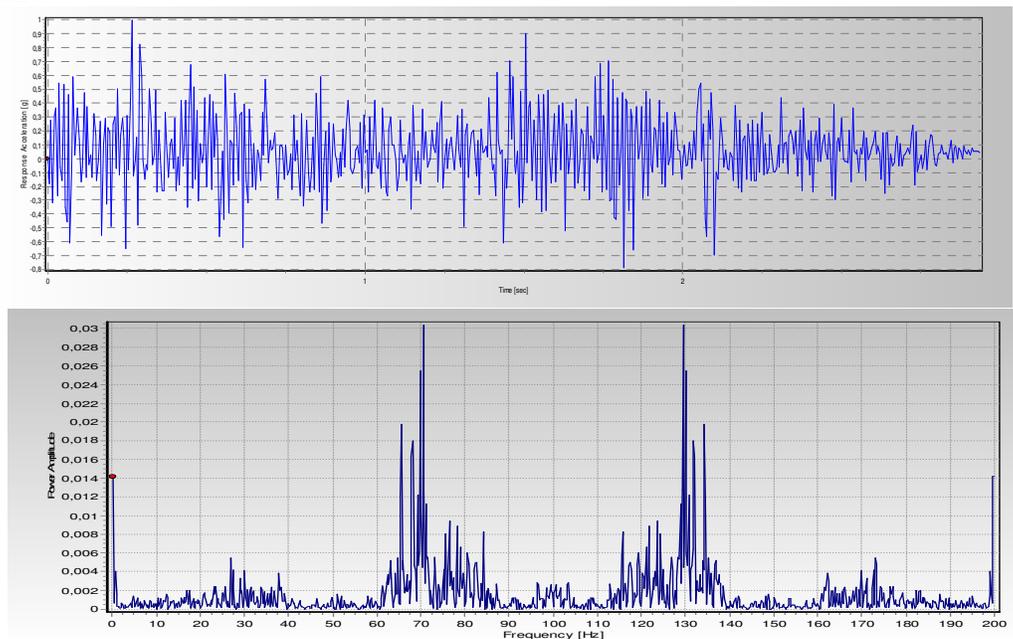


Figura 35: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção z, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Clap – colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1  
AY

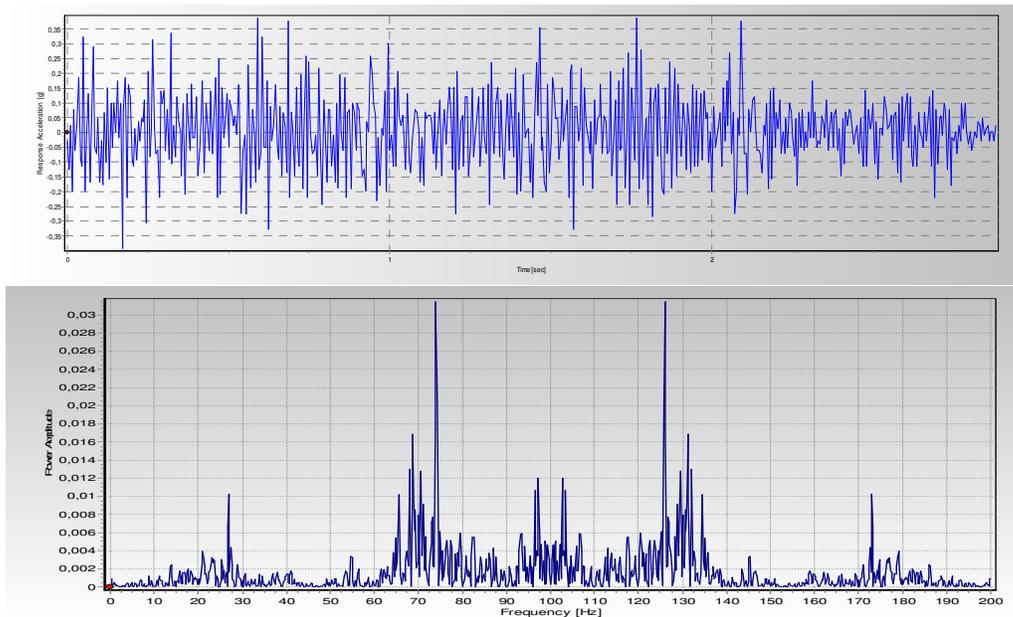


Figura 36: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção y, no colúvio proveniente da PUC-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Clap – SRM condomínio de Conquista - Nova Friburgo – amostra livre – etapa 1  
AY

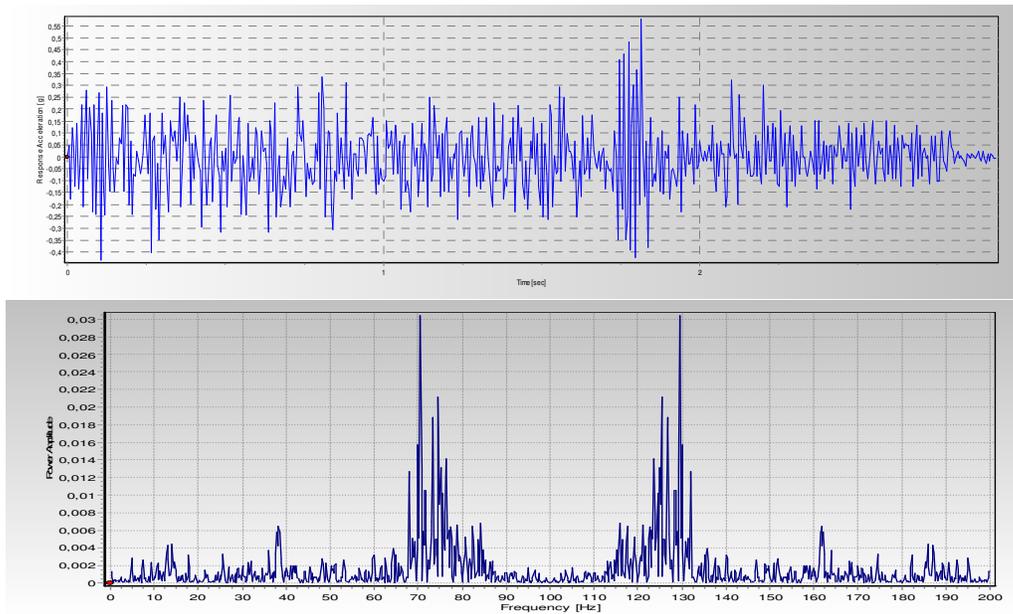


Figura 37: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção y, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Clap – colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1  
AX

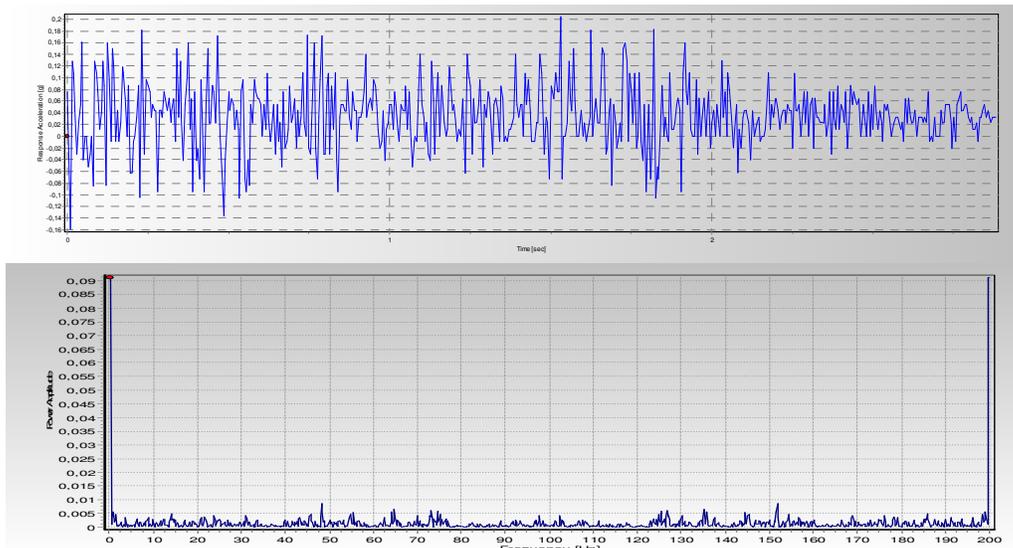


Figura 38: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção x, no colúvio proveniente da Puc-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Clap – SRM condomínio de Conquista - Nova Friburgo – amostra livre – etapa 1  
AX

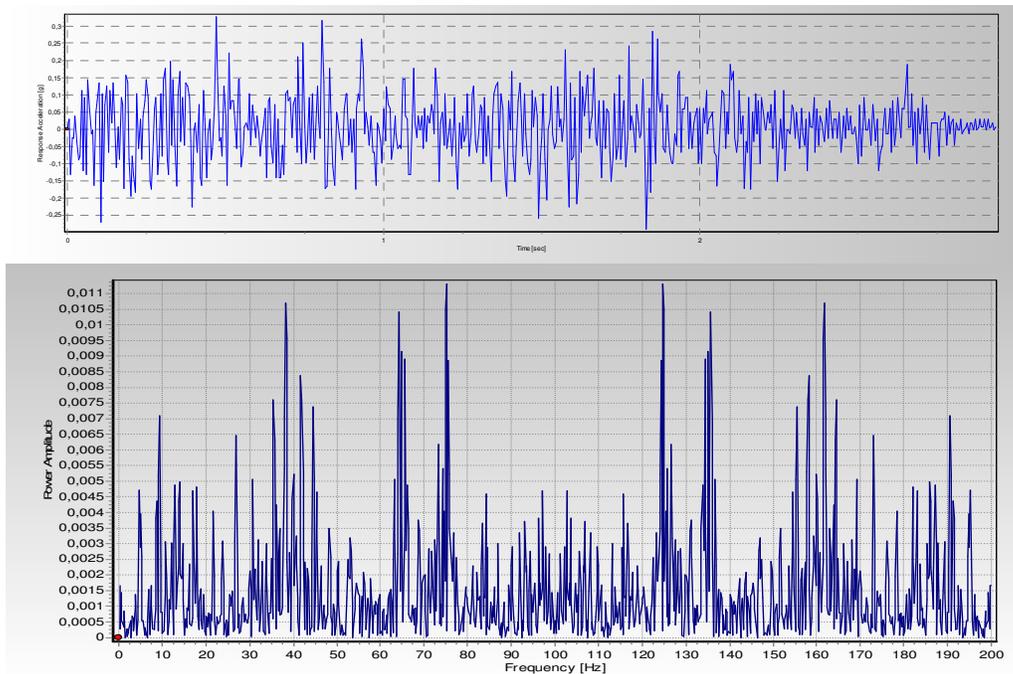


Figura 39: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção x, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

## Sobrepostas – Colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1

AZ

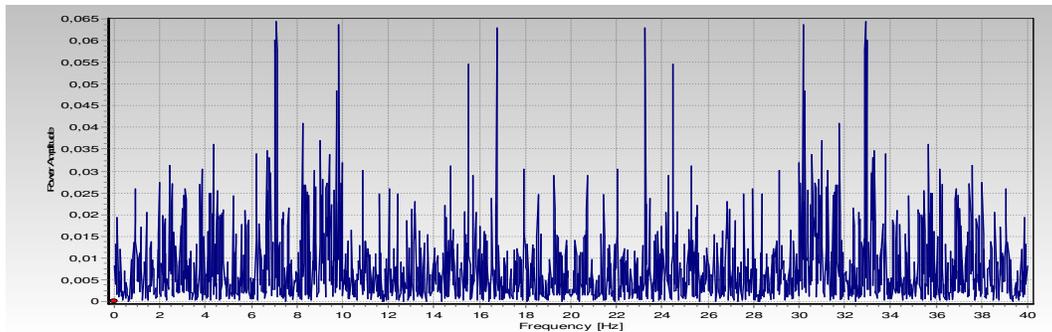
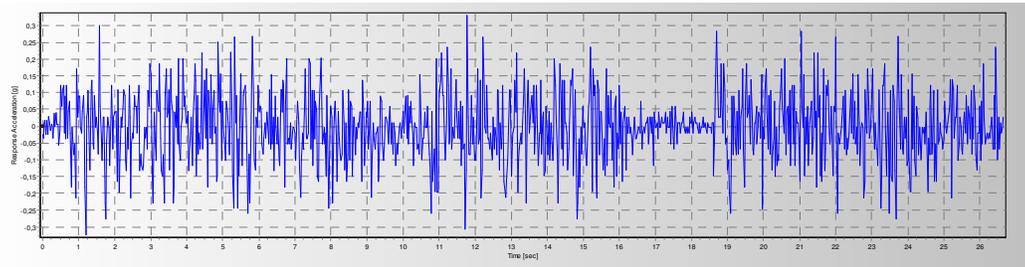


Figura 40: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção z, no colúvio proveniente da PUC-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

## Sobrepostas - SRM Friburgo – amostra livre – etapa 1

AZ

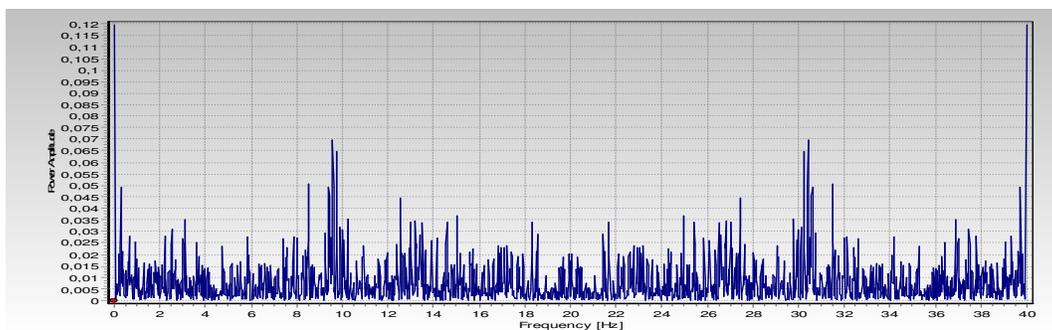
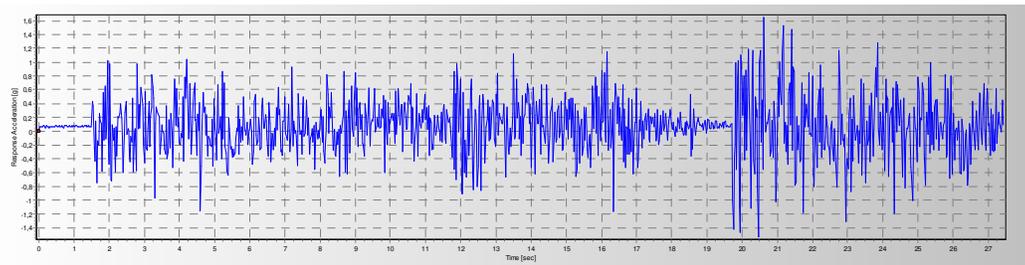


Figura 41: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção z, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Sobrepostas – Colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1  
AY

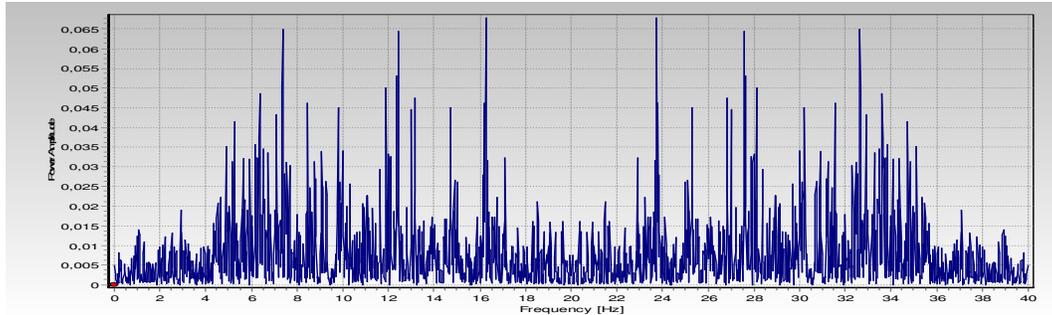
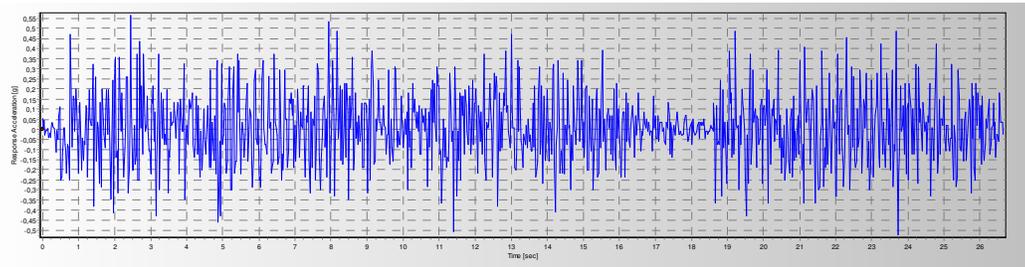


Figura 42: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção y, no colúvio proveniente da PUC-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

Sobrepostas - SRM Friburgo – amostra livre – etapa 1  
AY

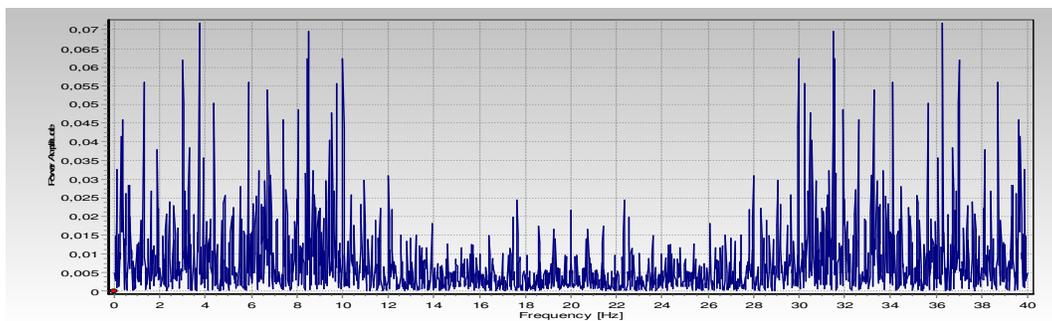
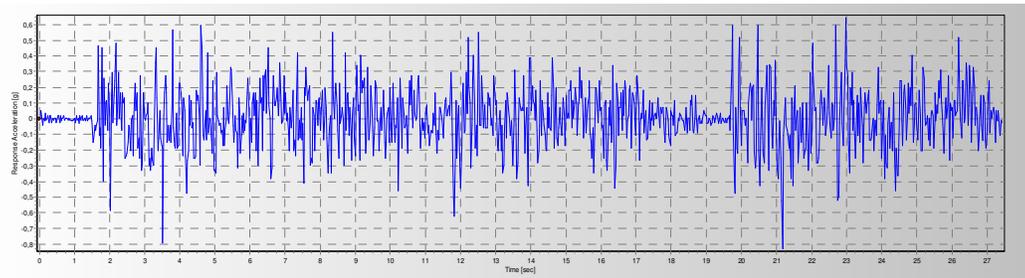


Figura 43: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção y, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

## Sobrepostas – Colúvio PUC-Rio – amostra livre – etapa 1

AX

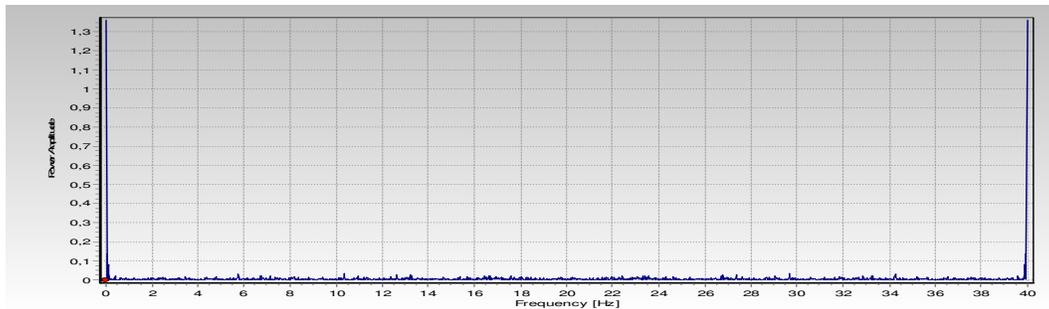
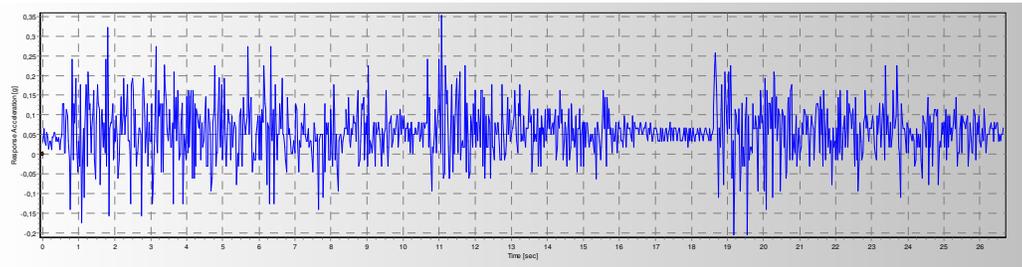


Figura 44: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção x, no colúvio proveniente da Puc-Rio, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1

## Sobrepostas - SRM Friburgo – amostra livre – etapa 1

AX

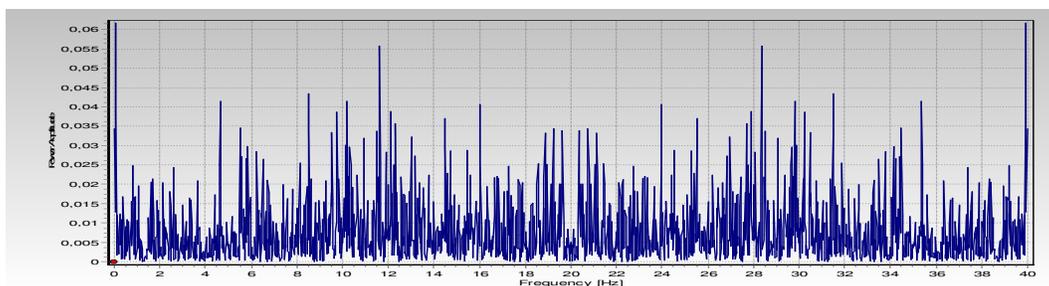
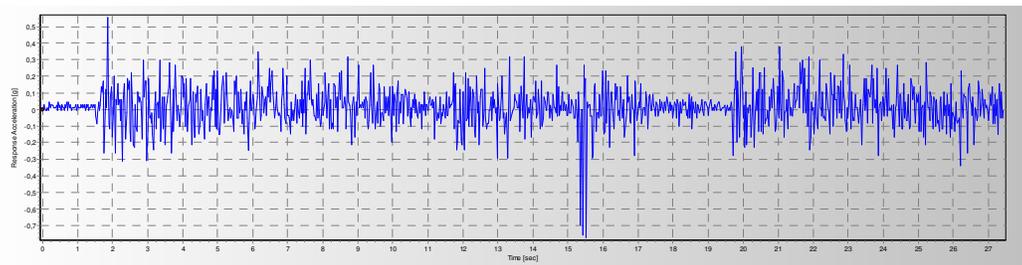


Figura 45: Acelerograma e espectro de frequência do acelerômetro inserido na direção x, no SRM proveniente do condomínio do bairro Conquista – Nova Friburgo, na amostra livre de confinamento, ao longo da etapa 1