

CAPÍTULO 5

AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

5.1. Aquisição dos dados

Nesta pesquisa, os dados GPR foram adquiridos visando obter a melhor imagem dos alvos estudados, considerando as características dos alvos, bem como a geologia da área onde estes estão enterrados. Para isso, foram adquiridos vários conjuntos de dados com diversos parâmetros, dentre estes, modos de aquisição passo a passo e contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey e Ex-Ex, frequências de operação de 100MHz e 200MHz, stack (empilhamento de traços) e espaçamento entre traços.

No modo passo a passo foram adquiridos 64 perfis de reflexão GPR com offset constante, sobre as duas linhas de estudos, sendo que metade foi adquirida com frequência de 100 MHz, visando obter uma boa profundidade de investigação e a outra metade com antena de 200 MHz, para proporcionar uma melhor resolução dos alvos. Os arranjos de antenas utilizados foram, Ey-Ey e Ex-Ex, os quais podem ser vistos na Figura 3.8 e na Figura 5.1, correspondente a aquisição em campo, sendo que o espaçamento entre traços utilizado foi de 0,2m. Visando aumentar a razão sinal/ruído dos traços foram aplicados diversos valores de stacks, i.e., empilhamentos, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512. (VERSTEEG, 1996).



Figura 5.1 – Aquisições de campo passo a passo. a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ex-Ex com antena de 100MHz e c) arranjo Ey-Ey com antena de 200MHz.

Além do modo passo a passo de aquisição, o qual consiste em deslocar manualmente o conjunto de antenas, transmissora e receptora, também foram adquiridos dados no modo de aquisição “contínuo” (Figura 5.2), o qual proporciona aquisições com maior agilidade. Essa aquisição foi realizada com o acoplamento das antenas transmissora e receptora nas frequências de 100MHz e 200MHz no arranjo Ey-Ey, sobre um sistema de reboque, denominado, “trenó”, desenvolvido no departamento de geofísica, o qual pode ser puxado de maneira contínua. Para isso, foi necessário utilizar baixos valores de empilhamentos, pois, para que o “trenó” saísse de uma posição de medida para outra era necessário que cada um dos traços fossem corretamente empilhados. Portanto, foram utilizados os stacks, 4, 8, 16 e 32. Visando o aumento da resolução espacial dos alvos, foram aplicados diferentes valores de espaçamentos entre traços, como, 0,2m, 0,1m e 0,05m.

Estas variações nos espaçamento entre traços só foram possíveis nas aquisições contínuas, pois estas são realizadas em função da distância, onde um odômetro acoplado ao sistema registrava a distância percorrida e quando esta era igual ao espaçamento entre traços previamente ajustado, uma determinada quantidade de pulsos era disparada e empilhada. Para este modo foram adquiridos, 48 perfis, sendo, 24 sobre a linha de tubos de pvc e 24 sobre a linha de manilhas de concreto.



Figura 5.2 – Aquisições de campo no modo contínuo, a) arranjo Ey-Ey com antena de 100MHz, b) arranjo Ey-Ey com antena de 200MHz

5.2. Processamento dos dados

Os dados apresentados foram processados, através dos softwares *Gradix* e *Radan* e as principais etapas utilizadas nos processamentos dos dados foram:

Correção do drift. O drift do equipamento é causado por instabilidades do sistema, tais como, aquecimento e oscilações de carga da bateria, causando, deslocamentos verticais nos dados.

Ajuste da onda aérea para o tempo zero. Após os dados estarem livres de drifts é necessário corrigir a posição da onda aérea para o tempo zero. Fazer isso significa que a onda aérea terá como marco inicial o valor de tempo igual a zero, o qual corresponde à superfície

onde as antenas são colocadas. Dessa maneira, todos os alvos e estruturas identificados em subsuperfície terão seus valores de tempo duplo corretamente ajustados.

Também foram utilizadas filtragens do tipo temporal passa banda para retirar ruídos que estejam fora do espectro gaussiano. Os parâmetros para corte de frequências foram determinados, através da visualização dos espectros de amplitude dos traços que compõem o perfil GPR. Após, os dados serem filtrados foram aplicados ganhos no tempo (linear, constante, esférico e exponencial), os quais servem para compensar as perdas por atenuação e espalhamento esférico do sinal.

Com exceção da correção do drift, todas as outras etapas usadas no processamento foram realizadas usando o software Radan. Após, os processamentos de sinais serem executados, foram realizadas as conversões dos perfis passando da escala de tempo para a escala de profundidade. A conversão foi realizada, através, do seguinte procedimento:

Foi determinada a velocidade para cada um dos refletores presentes nos radargramas, através da relação, $v = 2h/t$, onde t é o tempo duplo mostrado no radargrama, o qual corresponde ao topo da reflexão e h é a posição real do alvo instalado no SCGR. Após, a velocidade ser determinada foi, então, determinado um valor de permissividade dielétrica (ϵ) médio, através da relação $\epsilon = (c/v)^2$, ou seja, para cada topo de reflexão foi determinado um valor para ϵ e, assim, foi calculado um valor médio com esses valores. Esse é um passo importante, pois é através do valor de permissividade dielétrica que as reflexões são colocadas nas profundidades mais próximas das reais.

Assim, para os dados de tubos de pvc e manilhas de concreto, foram encontrados os seguintes valores para, comprimentos de onda, permissividades dielétricas e velocidade para as duas linhas de estudos, os quais são apresentados na Tabela 5.1. Tais valores são aqui apresentados, pois farão parte da análise comparativa durante as discussões dos resultados.

Tabela 5.1 – Valores médios de permissividade dielétrica (ϵ), comprimento de onda (λ) e velocidade (m/ns).

Linhas estudadas	Tubos de pvc			Manilhas de concreto		
	Frequências(MHz)	ϵ	λ (m)	v(m/ns)	ϵ	λ (m)
100	18	0,35	0,07	18	0,70	0,07
200	18	0,35	0,07	18	0,35	0,07

Os resultados a seguir foram processados utilizando uma ferramenta conhecida como “macro”, disponível no software Radan, a qual, consiste em inserir e gravar os parâmetros de processamento para aplicá-los automaticamente sobre os perfis que o usuário desejar. Para esta pesquisa, a “macro” foi utilizada em aquisições realizadas sobre a mesma linha de estudo com diferentes modos de aquisição, arranjos de antenas, frequência e diferentes stacks. Essa foi a maneira mais coerente encontrada para estabelecer as comparações entre os efeitos dos diversos valores de empilhamentos empregados durante o estudo de uma determinada linha.

5.3. Interpretação dos resultados

5.3.1- Linha de manilhas de concreto

Nos perfis apresentados a seguir foram utilizados os parâmetros, modo de aquisição passo a passo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m, sendo que, a Figura 5.3 mostra os perfis GPR sobre a linha de manilhas de concreto com stacks variando de 4 à 32 e a Figura 5.4 mostra as aquisições realizadas com stacks variando de 64 à 512.

Como pode ser notado, há uma razoável diferença entre a qualidade dos perfis mostrados nas Figuras 5.3a e 5.3b. A imagem da Figura 5.3a, correspondente à aquisição com

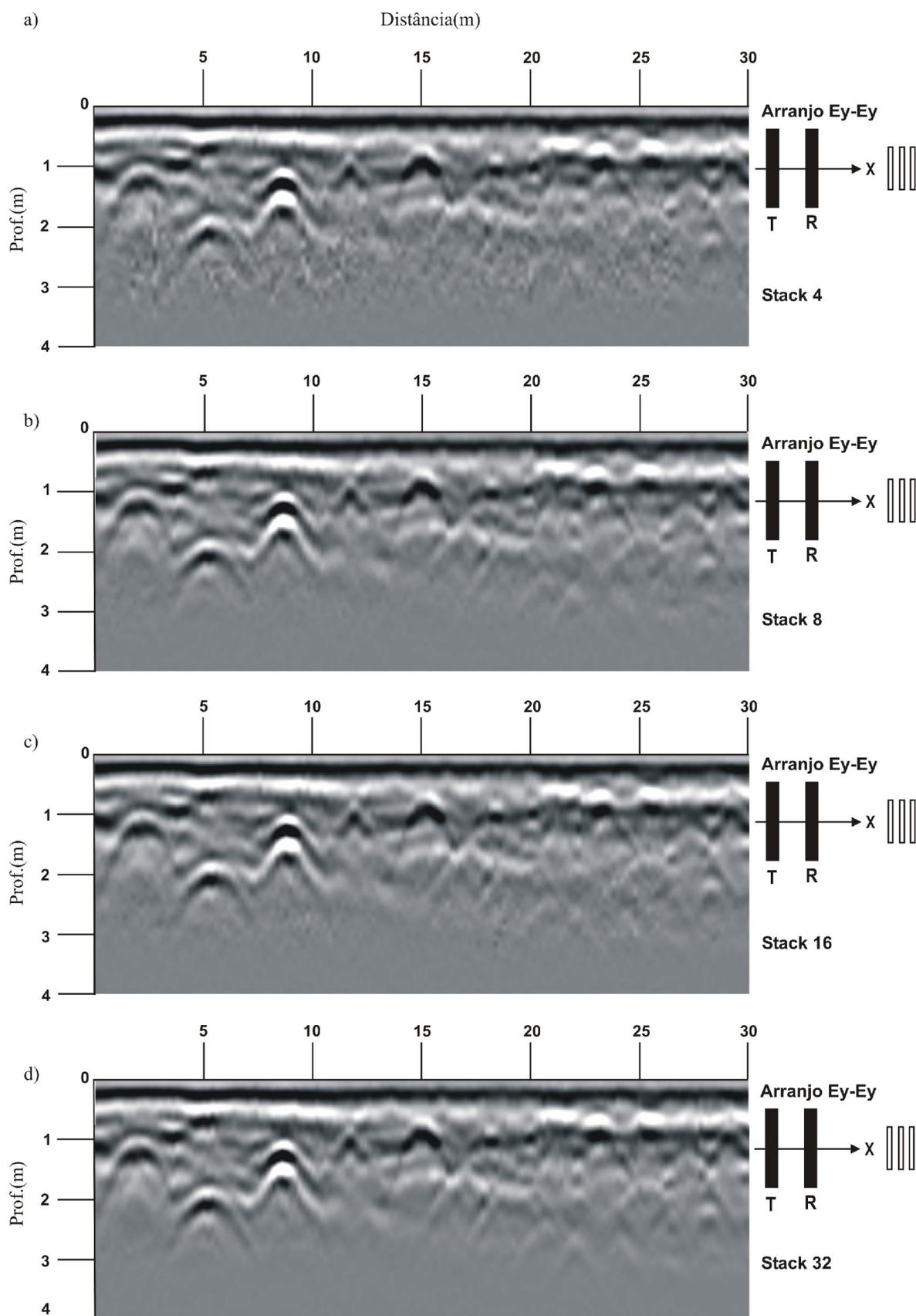


Figura 5.3 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

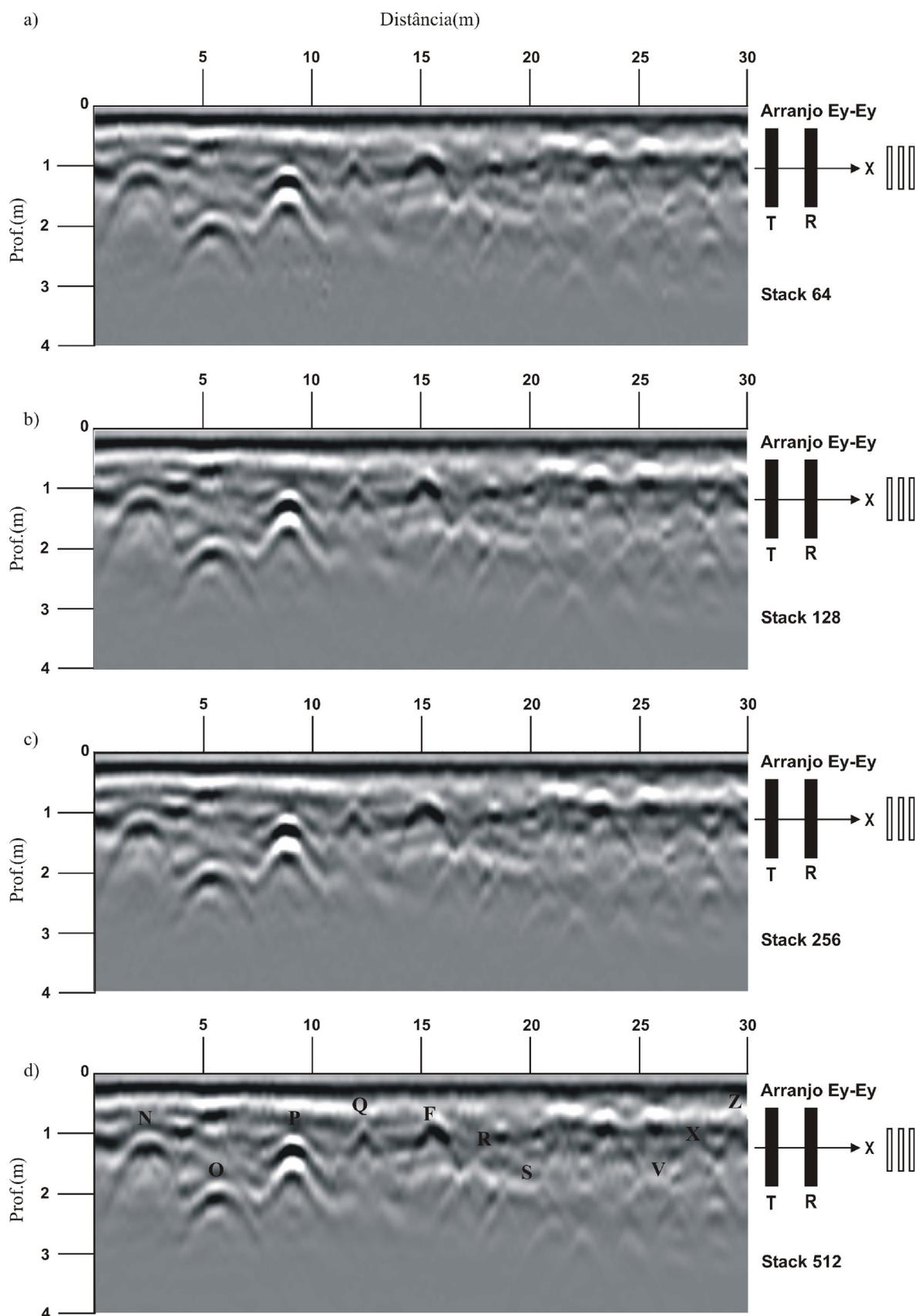


Figura 5.4 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

stack 4, apresenta uma seção mais ruidosa, principalmente, quando a análise visual é feita nas partes mais profundas da seção GPR. A presença desse ruído nas partes mais profundas, combinado, aos pequenos diâmetros das estruturas localizadas nessas posições, e à atenuação natural da onda eletromagnética, a qual, é dependente da profundidade, consistem em fatores que reduzem drasticamente a capacidade de detecção das estruturas estudadas, que se localizam nessas profundidades.

Por outro lado, a Figura 5.3b, adquirida com stack 8, não apresenta os mesmos ruídos presentes na parte mais profunda do perfil da Figura 5.3a. Isso se deve, principalmente pelo aumento do stack (empilhamento), o qual melhorou a razão sinal/ruído (VEERSTEG, 1996) e eliminou, assim, os ruídos aleatórios da parte mais profunda da seção GPR, possibilitando que, alvos mais profundos sejam identificados com mais nitidez. Apesar, do empilhamento ser uma técnica que visa aumentar a razão sinal/ruído, melhorando, assim, a qualidade da imagem, nenhuma melhoria significativa na definição dos refletores foi observada nas seções GPR com stacks maiores que 8.

A seguir, são apresentadas as seções adquiridas no modo contínuo, com frequência de 100MHz, stacks variando de 4 à 32 e espaçamento entre traços iguais a 0,2m, 0,1m e 0,05m. Para estas seções foram feitas comparações entre os perfis adquiridos com os mesmos espaçamentos entre traços e diferentes empilhamentos, visando, estabelecer a influência do aumento do empilhamento na qualidade da imagem. Além disso, também foram feitas comparações entre as aquisições realizadas com os mesmos empilhamentos, mas com espaçamentos entre traços diferentes, visando estabelecer a influência da variação dos espaçamentos entre traços realizada na aquisição dos dados. Por último são apresentadas as comparações entre as seções adquiridas nos modos, passo a passo e contínuo para frequências de 100MHz e arranjos de antenas Ey-Ey. Assim, são apresentados os radargramas reais adquiridos sobre as manilhas de concreto com o modo contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey,

freqüência de 100MHz e empilhamentos variando de 4 à 32, onde a Figura 5.5 mostra o perfil com espaçamento entre traços de 0,2m, a Figura 5.6 mostra o perfil com o espaçamento de 0,1m e a Figura 5.7 mostra o perfil com o espaçamento de 0,05m.

Através, de uma análise visual e comparativa entre cada seção GPR, compreendida, em uma mesma família de radargramas que contém seções de diferentes stacks e mesmos espaçamentos entre traços, como é o caso das seções contidas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, nota-se que as imagens que possuem valores maiores de empilhamentos apresentam maior nitidez em toda seção, principalmente, ao longo da profundidade. Isto constitui em um fator importante, pois, pode-se concluir que com o aumento do empilhamento, as manilhas localizadas em maiores profundidades possuem maiores chances de serem identificadas.

Comparando-se as seções adquiridas com empilhamentos iguais e diferentes espaçamentos entre traços, pode-se concluir que para os alvos que possuem grandes diâmetros (70cm e 48cm) não houve alterações significativas, no entanto, houve considerável melhora no delineamento e definição dos refletores de alguns alvos pequenos e superficiais, correspondentes à manilha com 26cm de diâmetro, localizada na posição 29m e ao tubo metálico guia, localizado em 15m.

Por fim, comparando-se os dados adquiridos nos modos passo a passo e contínuo, com freqüências de 100MHz, nota-se que os padrões dos refletores são bem semelhantes. Todos os alvos que foram detectados em um modo, também foram detectados no outro e, devido a isso, mais aquisições foram realizadas. Pode-se dizer, que para ambos os modos, passo a passo e contínuo, com arranjos de antenas Ey-Ey e freqüência de 100MHz foram visualizados o mesmo conjunto de refletores, os quais corresponderam às manilhas, N, O, P, Q, F, R, S, V, X, Z, além de dois buracos vazios localizados nas posições de 23m e 25m, os quais foram identificados no radargrama e confirmados, através de furos de sondagens à trado. Todos os alvos que possuem maiores diâmetros, como as manilhas, N, O e P, foram bem imageados,

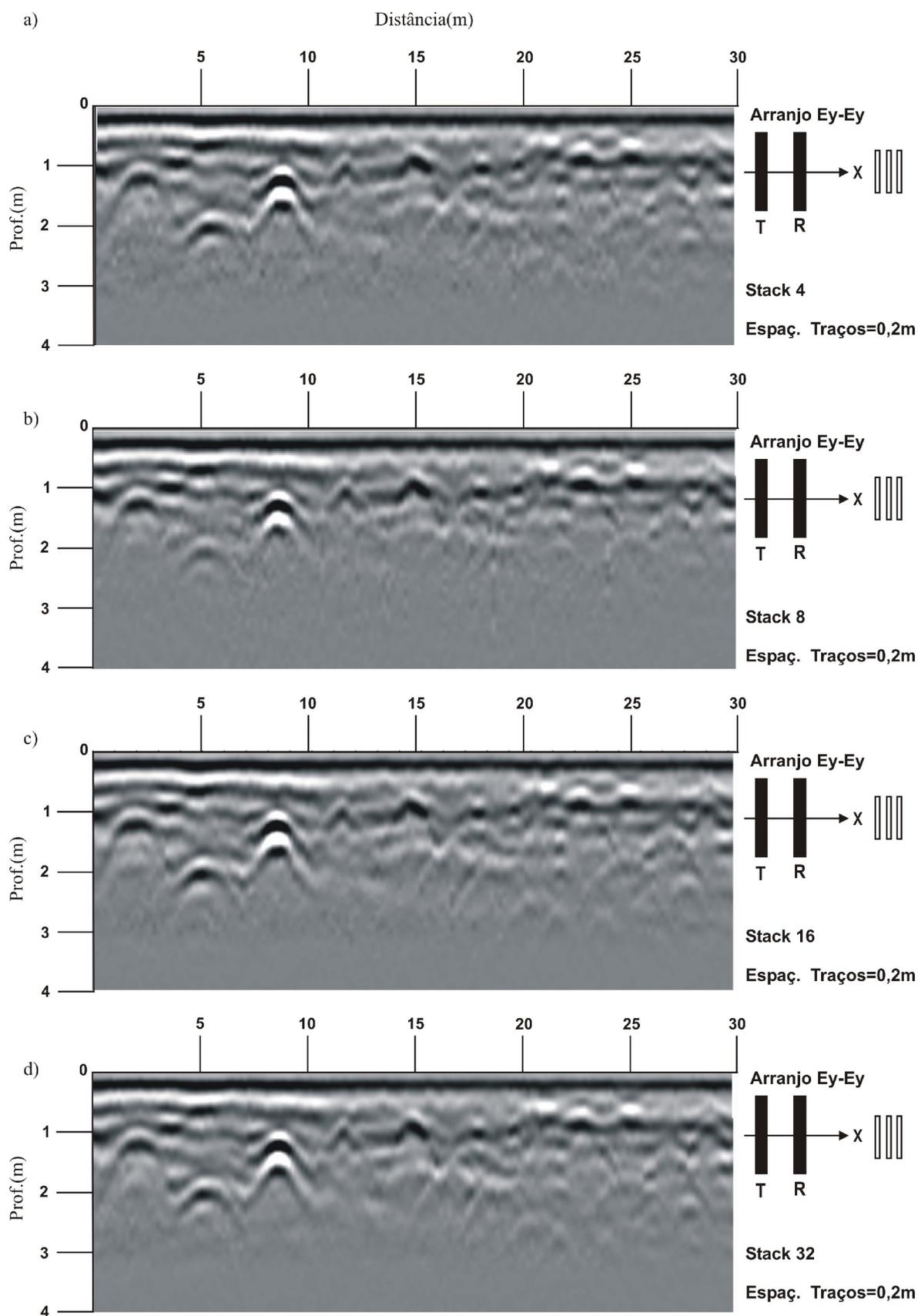


Figura 5.5 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

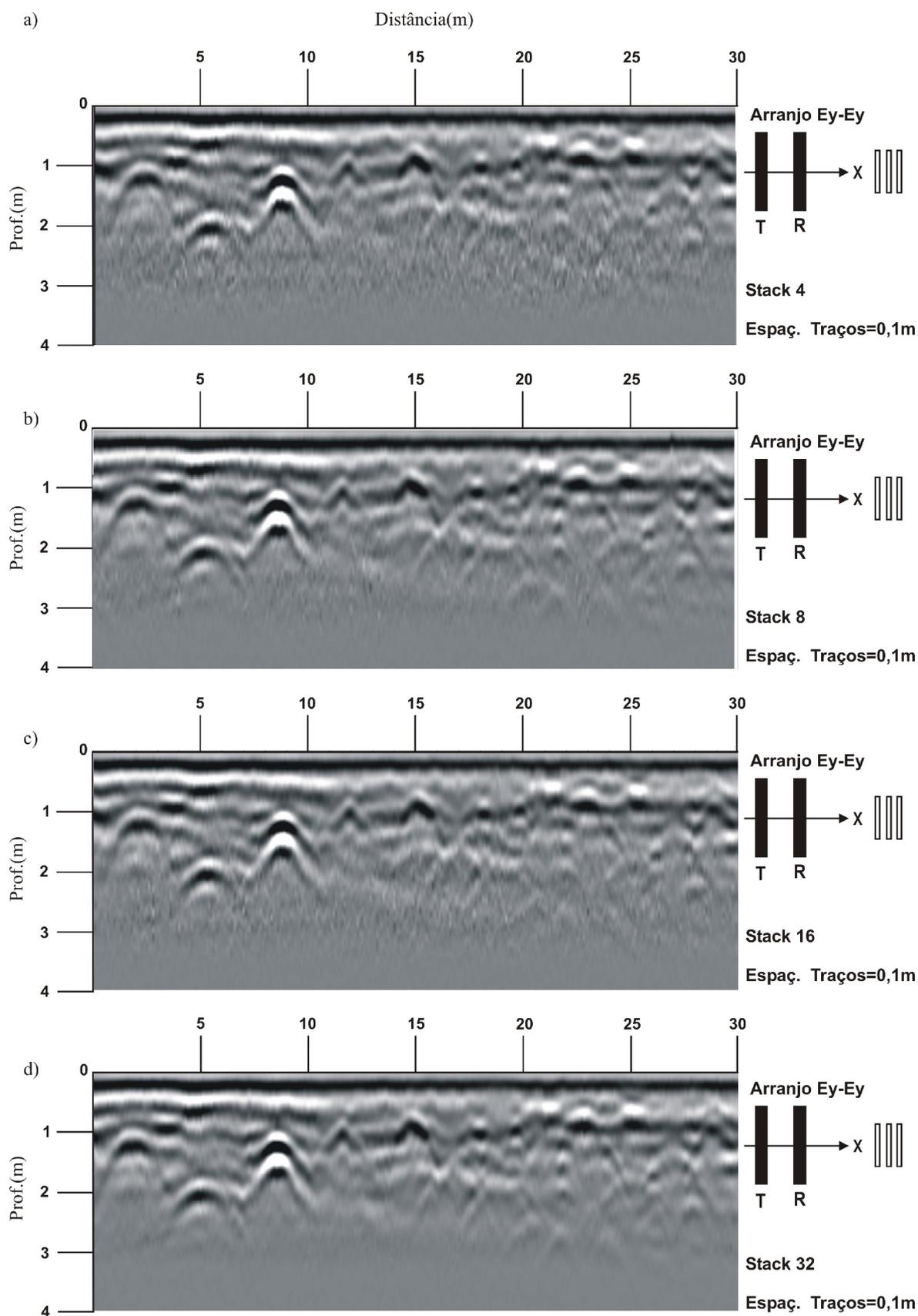


Figura 5.6 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

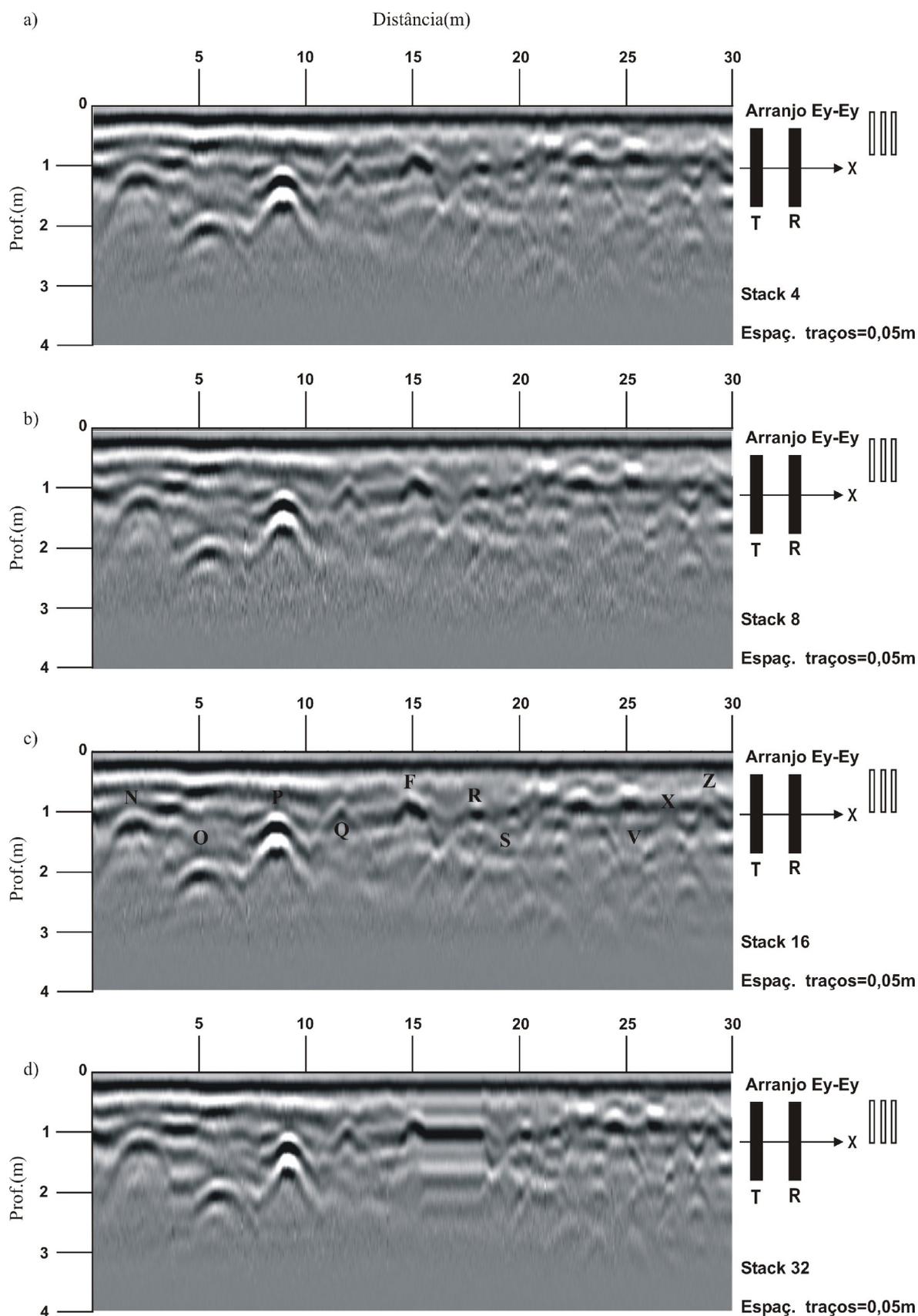


Figura 5.7 - Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) Stack 4, b) Stack 8, c) Stack 16 e d) Stack 32.

sendo que à medida que, os diâmetros dos corpos diminuía e suas profundidades aumentavam, os padrões dos refletores também diminuía quando estes foram comparados aos padrões dos refletores correspondentes às manilhas de grande diâmetro, N, O e P.

No modo contínuo na Figura 5.7d, entre a posição 15,5m e 17m, houve o aparecimento de um refletor horizontal diferenciado dos demais, o qual, na realidade corresponde a um problema na aquisição, ocasionado, por uma saturação do sistema, provavelmente devido à variação de velocidade durante a aquisição, ou seja, a velocidade de reboque das antenas foi maior que a velocidade necessária para o que sistema precisa para empilhar e montar um traço de sinal GPR. Isto causa uma falsa amostragem espacial e deve ser evitado durante a aquisição dos dados.

Como pôde ser observado foram usados diferentes valores de empilhamentos e stacks para os modos, passo a passo e contínuo. No modo passo a passo, por exemplo, é possível a utilização de empilhamentos maiores do que no modo contínuo, o que permite melhorar a razão sinal/ruído e conseqüentemente, aumentar as chances de visualizar estruturas ou alvos mais profundos, no entanto, quando este parâmetro é muito elevado, torna-se impraticável realizar a aquisição neste modo, devido ao enorme tempo necessário à coleta dos dados.

No modo contínuo é de grande utilidade a diminuição nos espaçamentos entre os traços, o que permite aumentar a resolução espacial dos alvos em subsuperfície, principalmente os mais rasos, sendo assim, mais apropriado para a detecção de alvos de pequeno diâmetro. Por outro lado, neste modo não se pode utilizar os empilhamentos dos traços elevados, pois como o sistema é continuamente puxado com uma velocidade aproximadamente constante há necessidade de um determinado tempo para que a antena transmissora emita os pulsos e a antena receptora possa empilhá-los e gerar a imagem corretamente. Neste caso, os alvos mais profundos tornam-se mais difíceis de serem detectados devido à baixa razão sinal/ruído.

As seções apresentadas anteriormente, adquiridas com antenas de 100MHz, apresentaram boa profundidade de penetração e bom imageamento dos alvos grandes, entretanto, devido ao grande comprimento de onda de aproximadamente 0,7m, as estruturas de menores diâmetros não foram bem detalhadas. Sendo assim, na tentativa de detectá-las e de obter respostas melhoradas para os demais alvos foram realizadas aquisições com antenas de 200MHz, a qual proporciona maior resolução dos alvos, devido, ao menor comprimento de onda (aproximadamente igual a 0,35m) gerado por essa antena. Dessa maneira, são mostradas na seqüência as aquisições realizadas com antenas de 200MHz usando os mesmos modos de aquisição, arranjo de antenas, espaçamento entre traços e empilhamentos, utilizados nas aquisições com 100MHz.

Assim, são apresentadas na Figura 5.8, as aquisições no modo passo a passo realizadas sobre a linha de manilhas de concreto com stacks variando de 4 a 32 e na Figura 5.9 são apresentados os dados correspondentes aos stacks de 64 a 512. Numa análise comparativa destas figuras, nota-se que os alvos N, O, Q, F e Z foram realçados devido ao aumento do stack que permitiu melhorar a razão sinal/ruído.

Também são notadas diferenças quanto à resolução dos refletores provenientes dos alvos mais rasos quando são comparados os padrões dos refletores provenientes das aquisições com ambas as frequências. Os refletores mais rasos são melhores visualizados com a frequência de 200MHz, independentemente de seus diâmetros, como pode ser observado, através dos refletores Q, F e Z, assim como, a maior resolução proveniente dos dois buracos localizados nas posições 23m e 25m. Apesar, da antena de 200MHz proporcionar maior resolução, os alvos mais profundos não foram visualizados, devido, principalmente, à atenuação da onda eletromagnética se dar de maneira mais intensa às ondas de altas frequências, devido ao menor comprimento de onda.

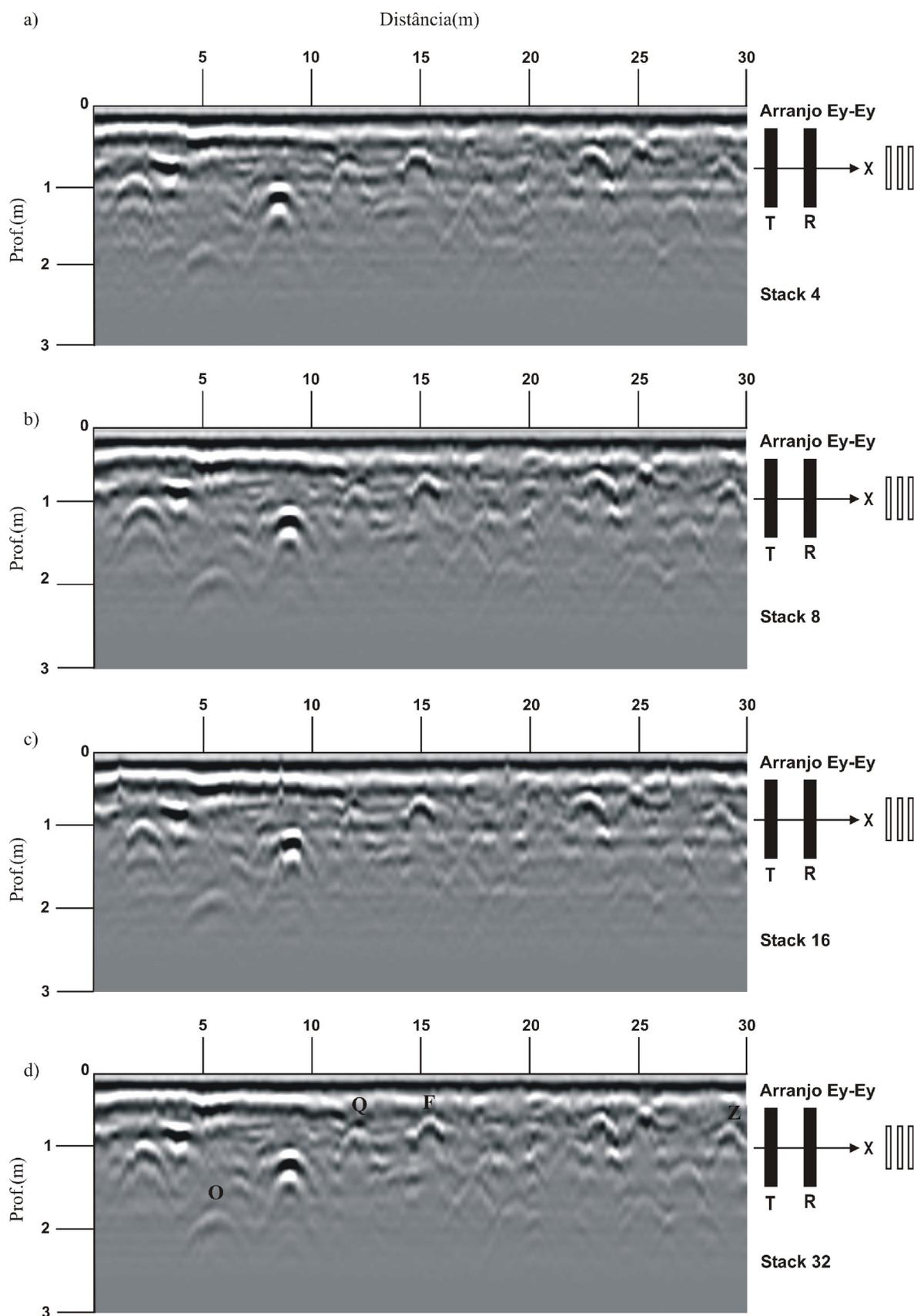


Figura 5.8 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

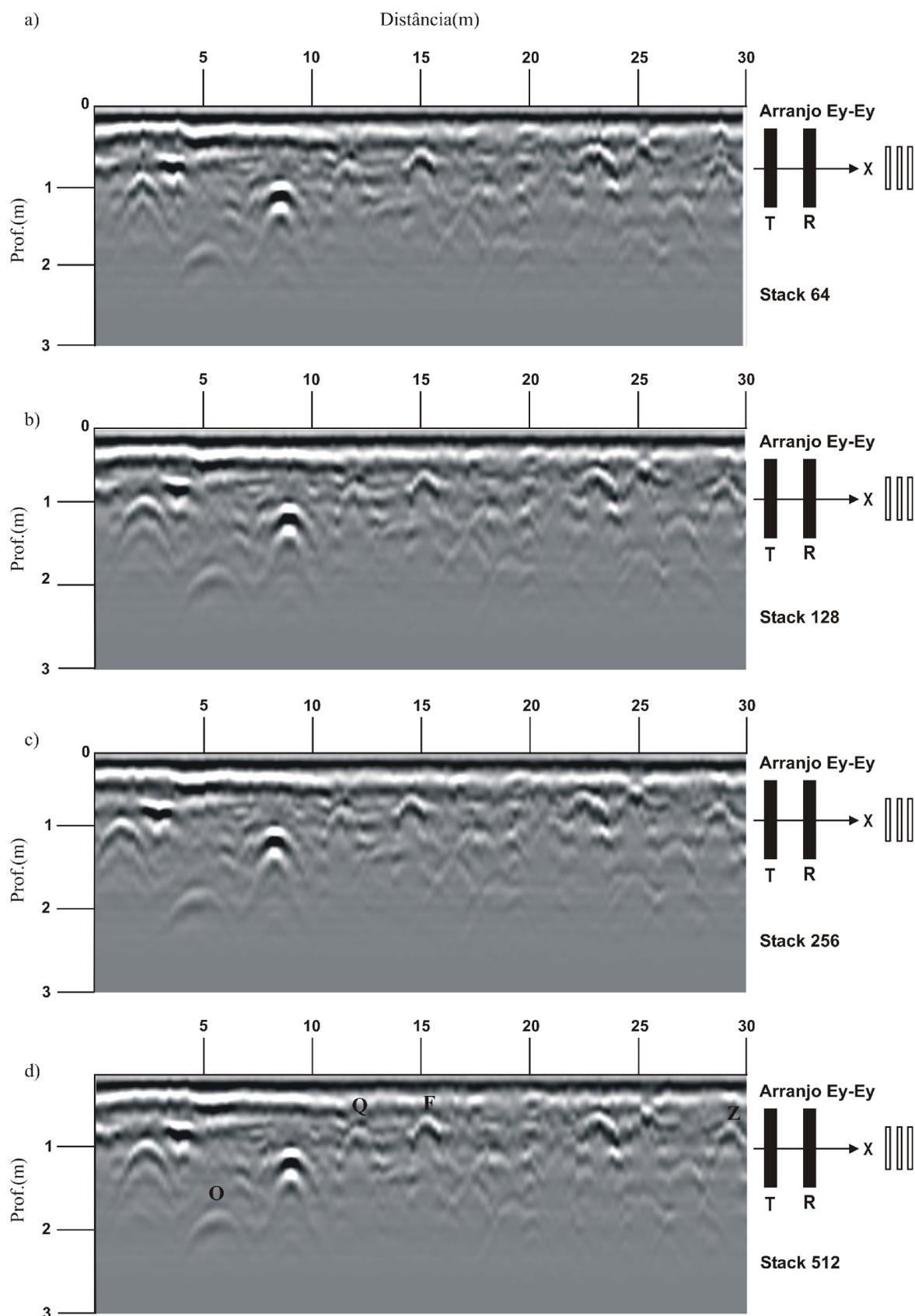


Figura 5.9 – Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços de 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

A Figura 5.10 apresenta os resultados das aquisições realizadas com modo contínuo, arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 200MHz, stacks variando de 4 a 32 e espaçamento entre traços de 0,2m. As Figuras 5.11 e 5.12 foram adquiridas com esses mesmos parâmetros, diferenciando-se, pelo fato de utilizarem espaçamentos entre traços iguais a 0,1m e 0,05m, respectivamente. Comparando-se as seções GPR com diferentes empilhamentos e mesmos espaçamentos entre traços, nota-se que a melhora no padrão de reflexão dos alvos é sutil com o aumento do stack. Este fato também ocorre quando se compara as seções adquiridas com o mesmo empilhamento e diferentes espaçamentos entre traços. No entanto, as manilhas Q e Z apresentaram um aumento significativo na resolução espacial à medida que o espaçamento entre traços foi diminuído, ou seja, à medida que mais traços foram adquiridos por unidade de comprimento.

Através, da comparação das características dos refletores adquiridos pelos modos, passo a passo e contínuo, ambos, com frequência de 200MHz, percebe-se que foram detectados os mesmos alvos, sendo eles, N, O, P, Q, F, R, S, V, X e Z, além dos dois buracos localizados nas posições 23m e 25m, os quais se mostraram nos perfis contínuos como duas hipérbolas bem definidas.

As próximas figuras mostram os resultados dos perfis adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto, utilizando-se os mesmos parâmetros discutidos anteriormente, porém os perfis foram adquiridos com o arranjo de antenas Ex-Ex. Estes perfis têm como objetivo avaliar a melhora na imagem dos alvos de subsuperfície baseado principalmente na polarização das antenas. Para tanto, foram realizadas aquisições de dados com o modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequências de 100MHz e 200MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 512. Devido, aos problemas logísticos de acoplamento das antenas com o arranjo Ex-Ex no “trenó” usado para a aquisição no modo contínuo, tais dados não foram adquiridos e, portanto, não são apresentados nessa pesquisa.

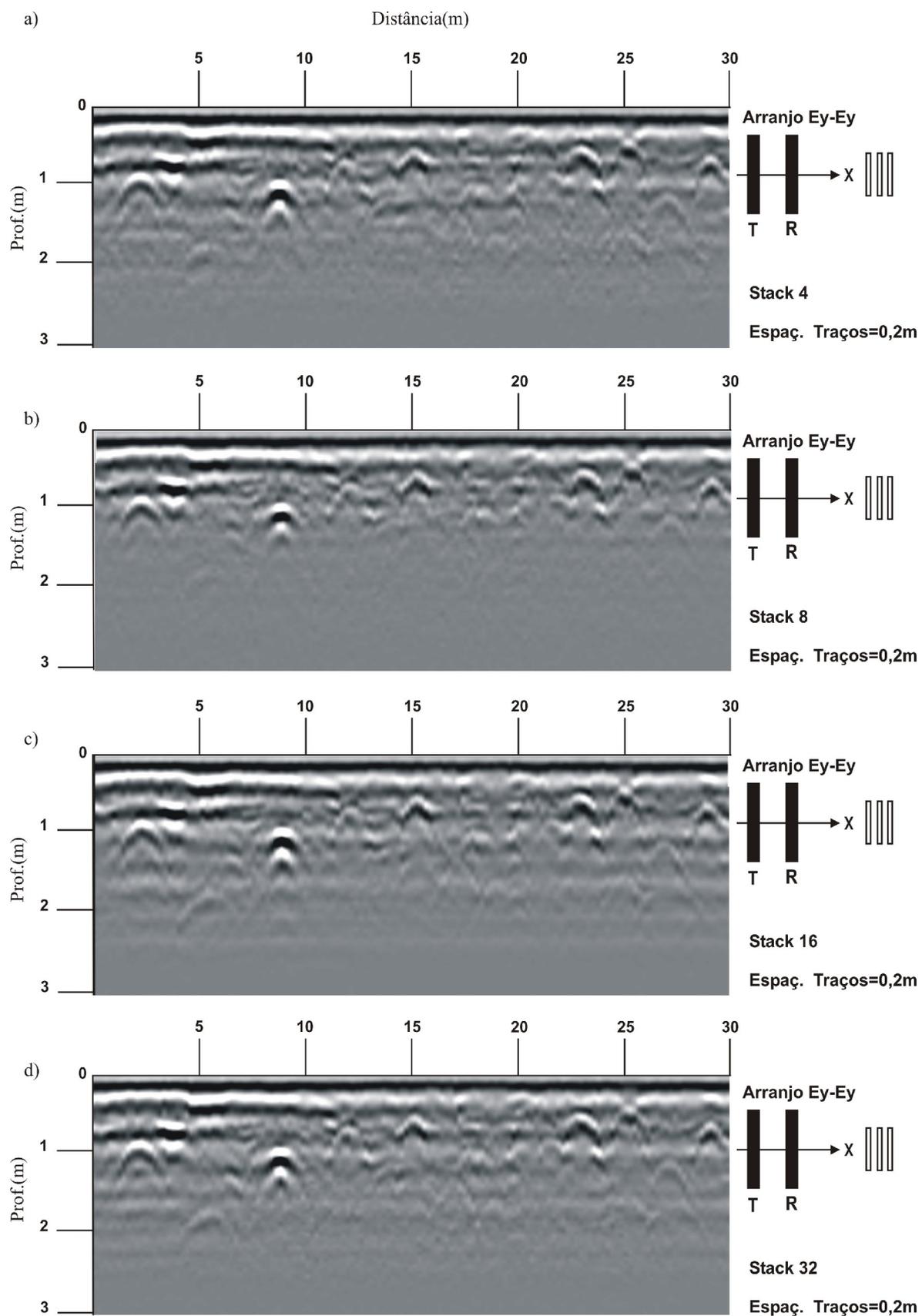


Figura 5.10 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

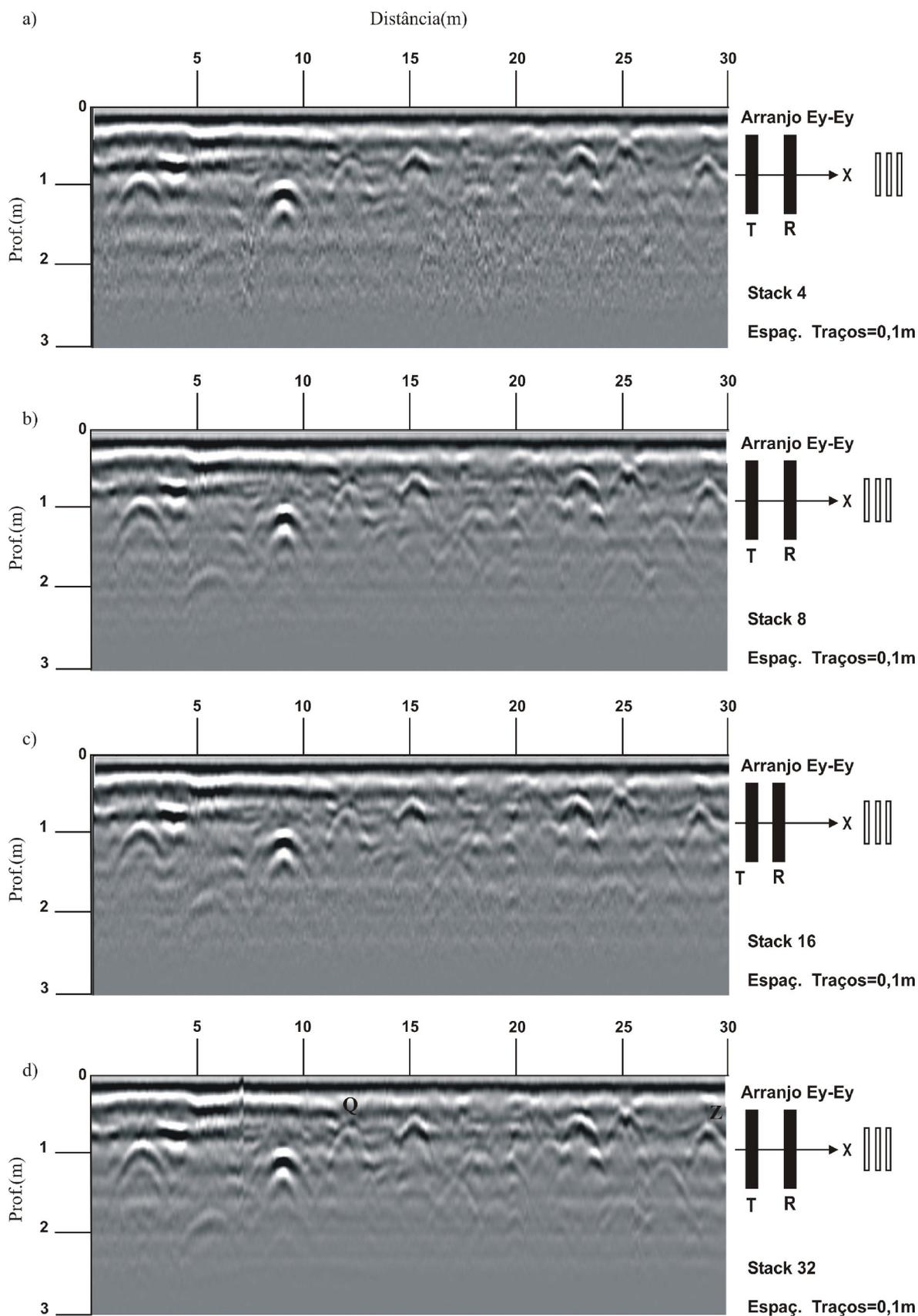


Figura 5.11 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,1m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

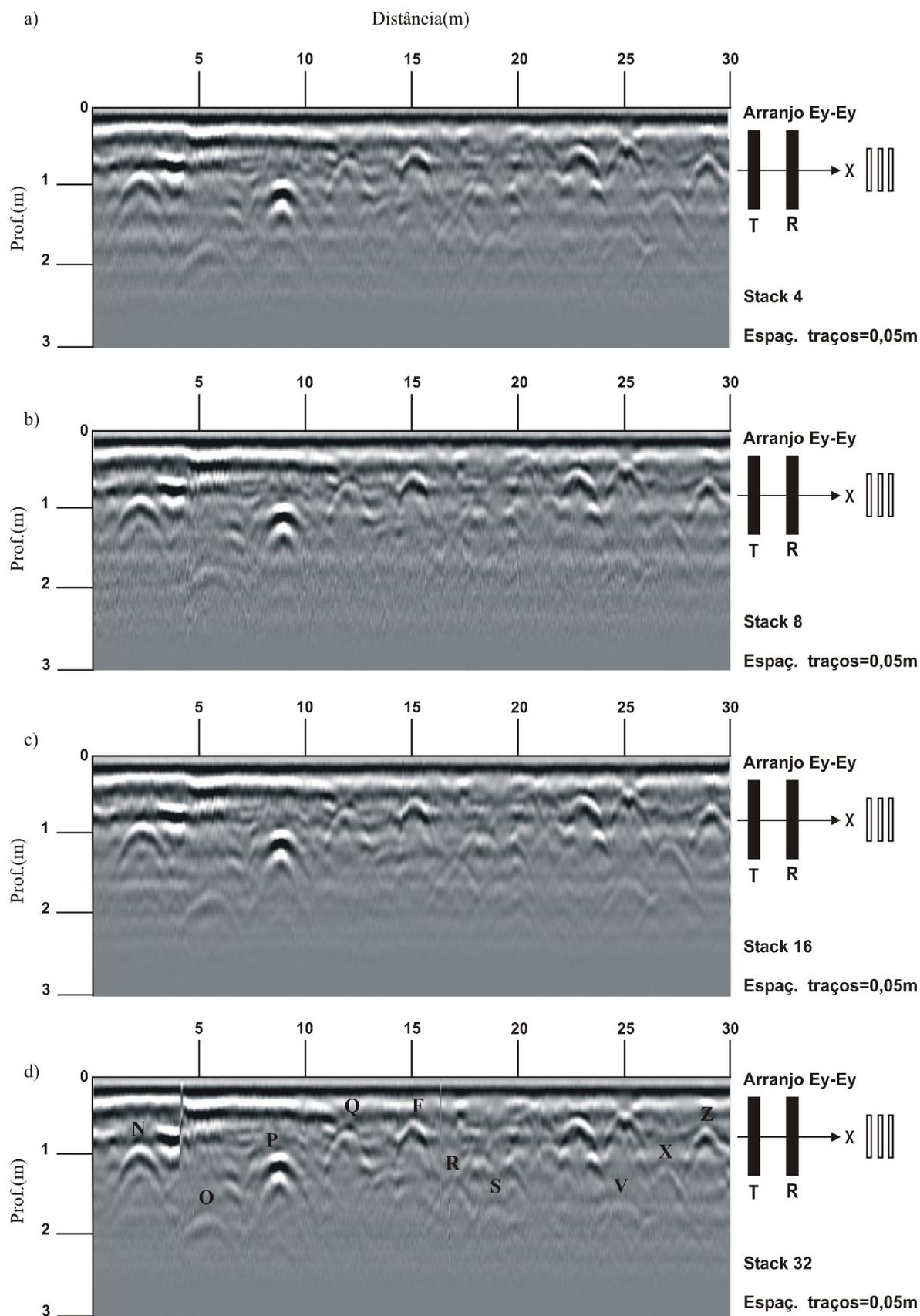


Figura 5.12 – Aquisições realizadas no modo contínuo, arranjo Ey-Ey, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,05m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

A Figura 5.13 mostra os dados adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto no modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 32 e a Figura 5.14 mostra as aquisições realizadas com stacks de 64 a 512. A análise comparativa destes perfis permite destacar que, à medida que, o stack é aumentado, mais nítida torna-se a seção ao longo da profundidade, uma vez que, a razão sinal/ruído é aumentada sucessivamente, possibilitando maiores chances de detecção dos alvos mais profundos. Também é mostrado que todas as manilhas de concreto são detectadas com boas amplitudes, exceto, para os alvos T, U e V, os quais possuem pequenos diâmetros e estão localizados à 2m de profundidade. Apesar disso, na Figura 5.14d todos os alvos enterrados nesta linha são nitidamente identificados. Um refletor que merece destaque é a manilha vertical P, a qual apresenta um refletor que o aproxima de sua disposição real. Vale salientar também, que para essa aquisição o tubo metálico guia não foi visualizado em nenhum dos perfis. Isto provavelmente ocorreu, devido o grande espaçamento entre traços (0,2m), quando comparado com o diâmetro do cano metálico (0,04m) e devido ao fato do padrão de radiação do arranjo Ex-Ex possuir uma pegada lateral menor do que o arranjo Ey-Ey fazendo com que a zona cega do padrão de radiação (ANNAN, 1992) seja maior para objetos localizados em pequenas profundidades.

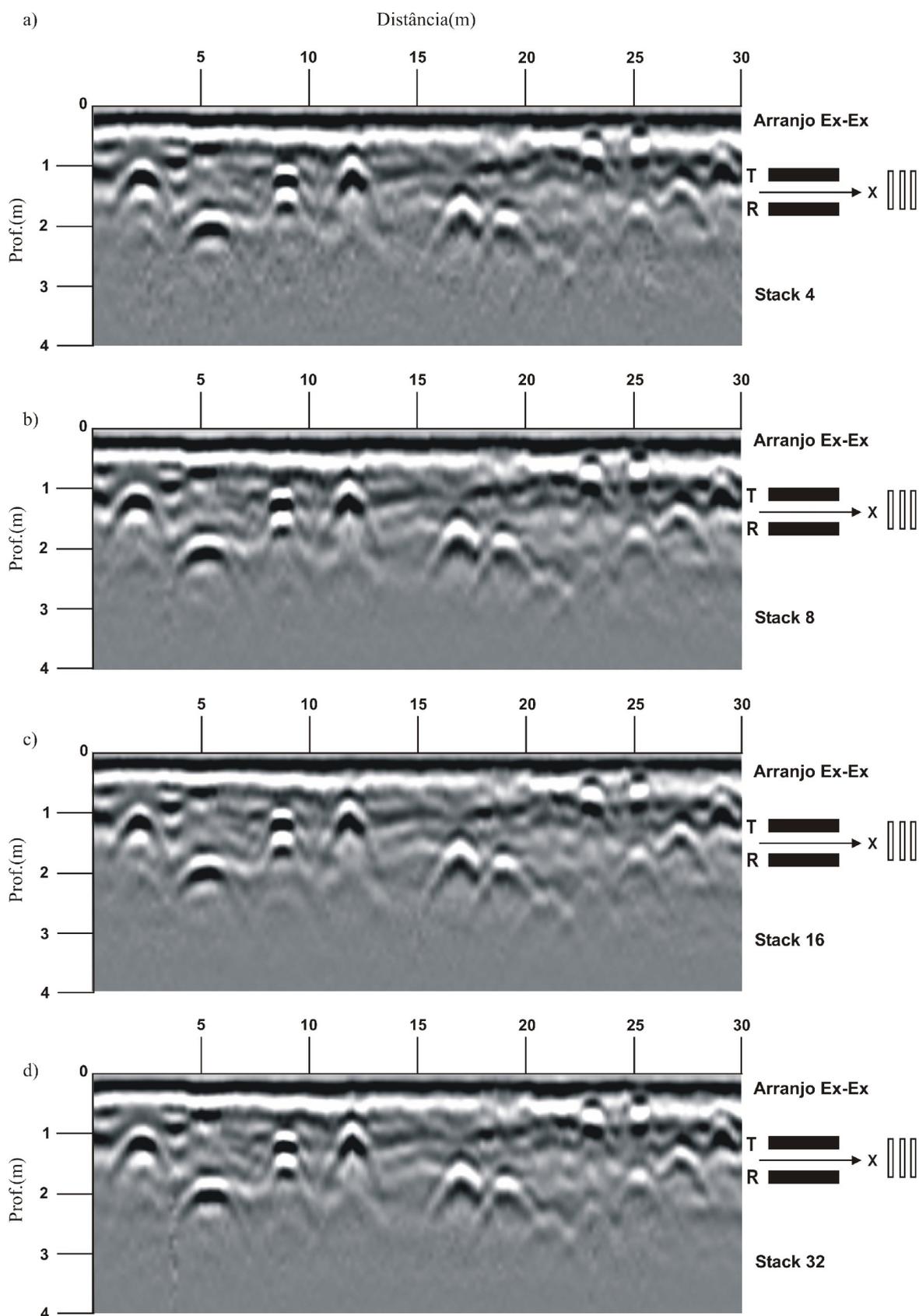


Figura 5.13 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

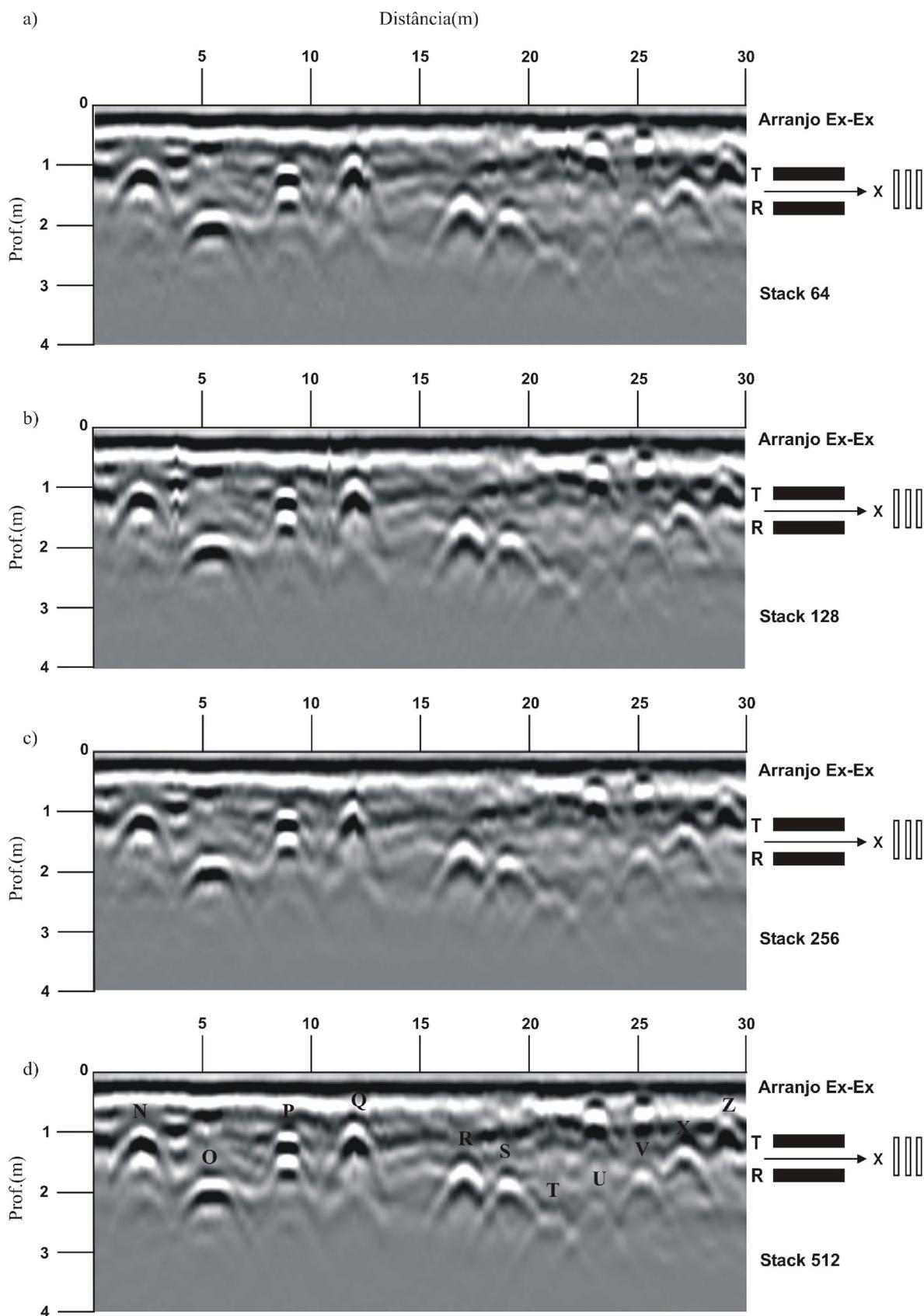


Figura 5.14 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 100MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

A seguir, são apresentadas as figuras correspondentes às aquisições no modo Ex-Ex com frequência de antenas de 200MHz, utilizando os mesmos parâmetros usados na aquisição com antenas de 100MHz. A Figura 5.15 mostra os dados adquiridos sobre a linha de manilhas de concreto no modo passo a passo, arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 200MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stacks variando de 4 a 32 e a Figura 5.16 mostra os resultados das aquisições com stacks de 64 a 512. Com base na análise comparativa dos perfis pode-se afirmar que os alvos em subsuperfície foram detectados com nitidez quando comparados com o arranjo das antenas Ey-Ey. Nota-se claramente que os refletores tornam-se mais nítidos à medida que os stacks são aumentados. Por exemplo, com o aumento do stack de uma seção para outra algumas estruturas passaram a ser visualizadas, como são os casos das manilhas T e U, de pequenos diâmetros, que não são identificadas na Figura 5.15a, porém, passam a ser, como mostrado na Figura 5.16d. Isso ilustra a importância do uso do empilhamento na detecção de estruturas com pequenos diâmetros e localizadas em áreas relativamente profundas.

Devido, ao aumento da frequência de 100MHz para 200MHz o cano metálico guia (alvo F), que não foi identificado nas aquisições com frequência de 100MHz e arranjo de antenas Ex-Ex passa a ser identificado em todas as seções adquiridas com as antenas de 200 MHz, através de um refletor discreto localizado na posição 15m. Isto se tornou possível, devido, à diminuição do comprimento de onda de aproximadamente 0,7m para 0,35m, o qual permitiu maior detalhamento dessa estrutura, i.e., por meio do aumento da resolução vertical. Apesar, das aquisições dos perfis realizados com as antenas de 200MHz no modo Ex-Ex terem sido bem eficientes, os perfis adquiridos com as antenas de 100MHz permitiram detectar com mais nitidez os alvos em subsuperfície por apresentarem melhor capacidade de penetração.

Dessa maneira, pode-se dizer, que através da comparação entre todos os perfis

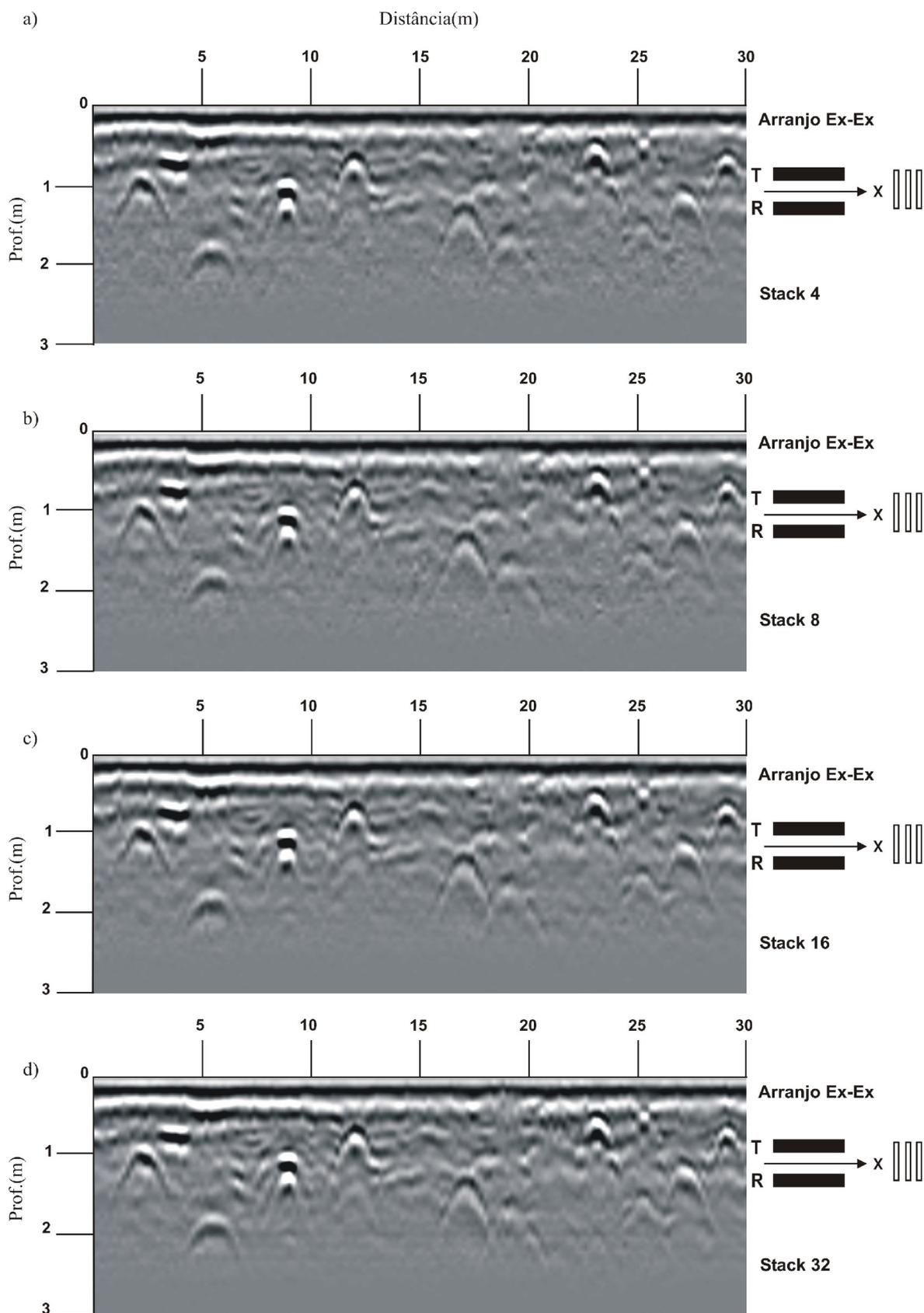


Figura 5.15 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 4, b) stack 8, c) stack 16 e d) stack 32.

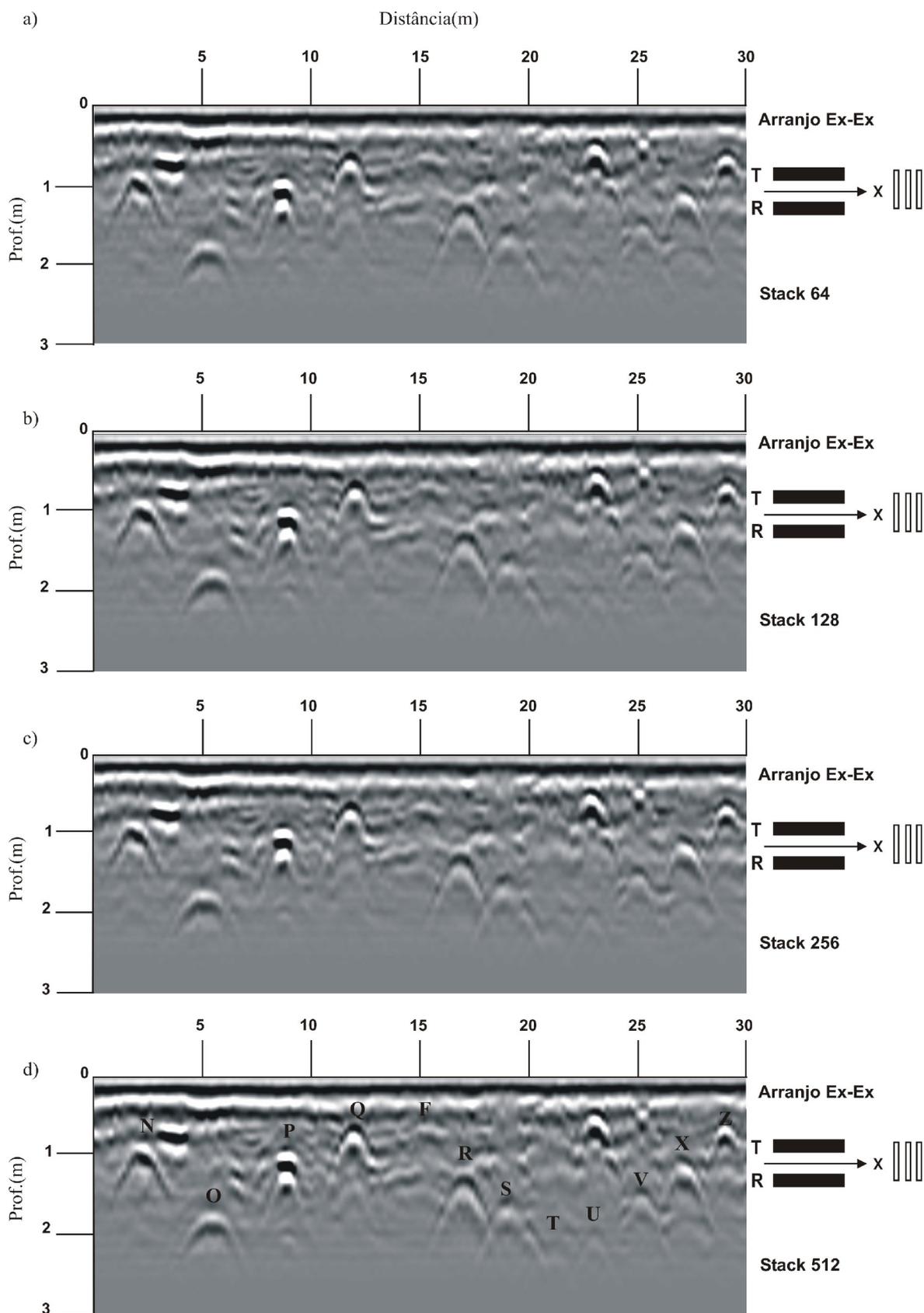


Figura 5.16 - Aquisições realizadas no modo passo a passo, arranjo Ex-Ex, frequência de 200MHz e espaçamento entre traços igual a 0,2m. a) stack 64, b) stack 128, c) stack 256 e d) stack 512.

apresentados (Figura 5.3 à 5.16) para a detecção das manilhas de concreto, os parâmetros ótimos para aquisição dos dados foram: i) modo passo a passo: arranjo de antenas Ex-Ex, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,2m e stack 512, pois este último permite uma maior nitidez da imagem ao longo da profundidade e ii) modo contínuo: arranjo de antenas Ey-Ey, frequência de 100MHz, espaçamento entre traços de 0,05m e stack 32.

Para os perfis adquiridos com arranjos Ex-Ex e frequência de 100MHz todas as manilhas de concreto foram identificadas, independentemente dos diâmetros dos alvos e das profundidades em que se encontram. Como pode ser visto, devido a esse arranjo os alvos T e U passaram a ser identificados, apesar dos refletores serem de baixas amplitudes, fato que, até então não tinha ocorrido. Isso se deve em grande parte à boa profundidade de penetração que a onda eletromagnética gerada por essa antena possui e à melhor combinação entre as polarizações do pulso emitido pela antena transmissora em relação à disposição do alvo e a polarização da antena receptora.

Os resultados com arranjo de antenas Ex-Ex e frequência de 200MHz, também foram satisfatórios, pois também permitiram identificar todos os alvos, principalmente os alvos mais rasos, devido ao comprimento de onda gerado ser menor do que o da antena de 100MHz. No entanto, os alvos mais profundos, como as manilhas, R, S, T, U e V geraram reflexões mais fracas, quando comparadas às reflexões geradas pelas aquisições com antenas de 100MHz. O alvo F, correspondente ao cano metálico guia, foi detectado com a frequência de 200MHz e caracterizado como um refletor discreto. Isto foi possível devido à diminuição do comprimento de onda, o que possibilitou o aumento da resolução vertical.

Comparando-se os resultados dos dados reais e dos dados modelados, nota-se que, em ambos, o arranjo de antenas Ex-Ex com frequência de 100MHz apresentou os melhores padrões de refletores, imageando o mesmo conjunto de alvos, detectando até mesmo os alvos T e U que possuem pequenos diâmetros e estão localizados na profundidade de 2m. No

entanto, pode ser visto no perfil GPR modelado que, a base da manilha P, disposta verticalmente, foi detectada. Isso se deve ao fato do espaçamento entre traços utilizado na modelagem ser muito pequeno, o que contribui significativamente para o detalhamento da estrutura. Também pode ser visto no resultado modelado, que o tubo metálico guia foi bem visualizado, isso se deve, ao pequeno espaçamento entre traços, porém, esse refletor não foi visualizado nos dados de campo devido ao espaçamento entre os traços.

Os dados reais adquiridos nos modos Ey-Ey e Ex-Ex mostraram que as aquisições GPR realizadas com menor espaçamento entre traços aumentaram a resolução espacial, i.e., o detalhamento lateral e o aumento do stack permitiu obter uma imagem mais nítida da subsuperfície, na qual os alvos mais profundos puderam ser identificados com maior clareza.

Quanto aos padrões de reflexões dos alvos em subsuperfície através dos arranjos Ey-Ey e Ex-Ex, se deu pelos arranjos de antenas empregados, os quais proporcionaram diferentes combinações entre as polarizações do pulso emitido pela antena transmissora, a disposição do alvo em relação as posições das antenas e a polarização da antena receptora. Contudo, outros fatores também exerceram sua significância para o sucesso da detecção dos alvos, como, a geometria das estruturas, as suas dimensões (principalmente o diâmetro, para estruturas cilíndricas), o contraste entre as propriedades elétricas do background e do alvo estudado, a profundidade onde os objetos se encontram e o padrão de radiação das antenas (RADZEVICIUS, 2001).

A interpretação física que represente os fenômenos reais dessas respostas, através, de equações analíticas físico-matemáticas é muito complexa, devido a vários motivos, tais como, o comportamento dos campos eletromagnéticos com as heterogeneidades do meio e das estruturas estudadas, o controle dos ruídos presentes no momento da aquisição, a estabilidade do sistema GPR, etc. Sendo assim, vários pesquisadores desenvolveram estudos de modelagens, visando obter o entendimento dos padrões de reflexões e espalhamentos do sinal

eletromagnético nas estruturas cilíndricas em subsuperfície. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de (ROBERTS; DANIELS, 1996) e (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000). Esses trabalhos foram utilizados e serviram de referência para a justificativa dos padrões de refletores encontrados nessa pesquisa.

Esses autores estudaram o comportamento das magnitudes dos campos espalhados por alvos cilíndricos em função do ângulo de espalhamento e da razão, r/λ (raio do alvo/comprimento de onda incidente), para diferentes meios e diferentes alvos, os quais foram caracterizados através de valores de condutividade elétrica e permissividade dielétrica. Vale ressaltar que, devido ao pequeno offset normalmente empregado nas aquisições GPR, o ângulo de espalhamento da onda eletromagnética captada pela antena receptora é aproximadamente igual à 180° (backscattering) e essa é uma das condições que são estabelecidas para a análise da magnitude do espalhamento para os modos Ey-Ey e Ex-Ex (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000).

Para comparar os resultados reais desta pesquisa com os dos trabalhos referidos, é apresentada a Tabela 5.2 com os valores das relações, r/λ (raio/comprimento de onda), para os três diâmetros das manilhas e as duas frequências de antenas utilizadas. Cabe salientar, que para determinar os valores de λ foi estabelecida a constante dielétrica igual a 18, pois esta foi a que melhor posicionou os alvos nos radargramas com relação às suas profundidades reais.

Tabela 5.2 – Valores de diâmetro d e da relação r/λ , para as três diferentes manilhas de concreto, frequências de 100MHz e 200MHz e razão da constante dielétrica ϵ (cilindro/solo)

d (m) Manilhas de concreto	r/λ para freq. 100MHz	r/λ para freq. 200MHz	ϵ (cilindro/solo)
0,7	0,5	1	0,27
0,48	0,35	0,69	0,27
0,26	0,18	0,37	0,27

Para melhor visualização dos resultados, as relações r/λ são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18, através de linhas coloridas, sendo elas, 0,5 (linha azul cheia), 0,35 (linha azul tracejada), 0,18 (linha amarela), 0,37 (linha vermelha cheia), 0,69 (linha vermelha tracejada) e a relação r/λ igual a 1 não é apresentada nos gráficos por ser um valor discrepante.

Comparando-se o comportamento das magnitudes das bandas de espalhamento das Figuras 5.17 e 5.18, em função dos ângulos de espalhamento e da razão r/λ , nota-se que, à medida que, a razão r/λ é diminuída, mais constantes se tornam os valores de banda de espalhamento para o modo Ey-Ey, no entanto, no modo Ex-Ex, ocorre o contrário, ou seja, os valores de banda de espalhamento se tornam mais constantes, à medida que a razão r/λ é aumentada. Para os valores de espalhamentos de r/λ , da Tabela 5.2, as razões 0,5; 0,35 e 0,18, correspondentes aos refletores adquiridos com frequência de 100MHz, referentes às manilhas de diâmetros, 0,70m, 0,48m e 0,26m, respectivamente, apresentam maior banda de espalhamento relacionadas ao arranjo de antenas Ex-Ex, quando examinadas no ponto do espalhamento igual à 180° . Esse fato está de acordo com os resultados das aquisições sobre as linhas de manilhas de concreto, as quais, revelaram que os refletores que possuíam maiores resoluções espaciais e amplitudes foram àqueles adquiridos com arranjo de antenas Ex-Ex e frequência de 100MHz, como foi mostrado nos perfis GPR das Figuras 5.13 e 5.14.

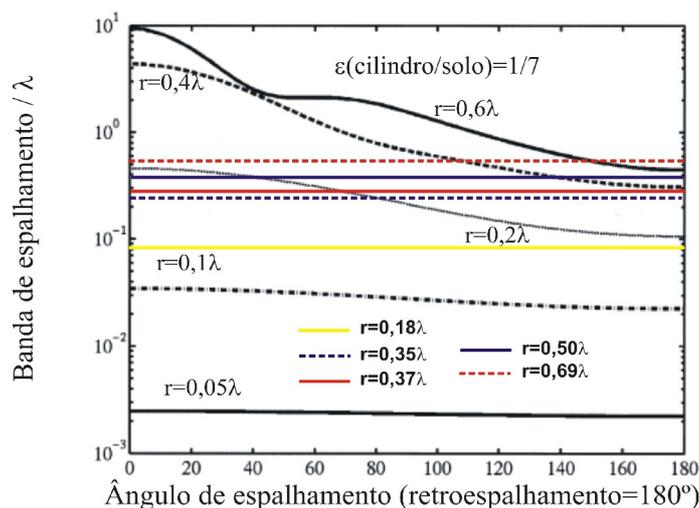


Figura 5.17 – Banda de espalhamento em função do ângulo espalhado para arranjo Ey-Ey.(Modificada de Radzevicius e Daniels, 2000)

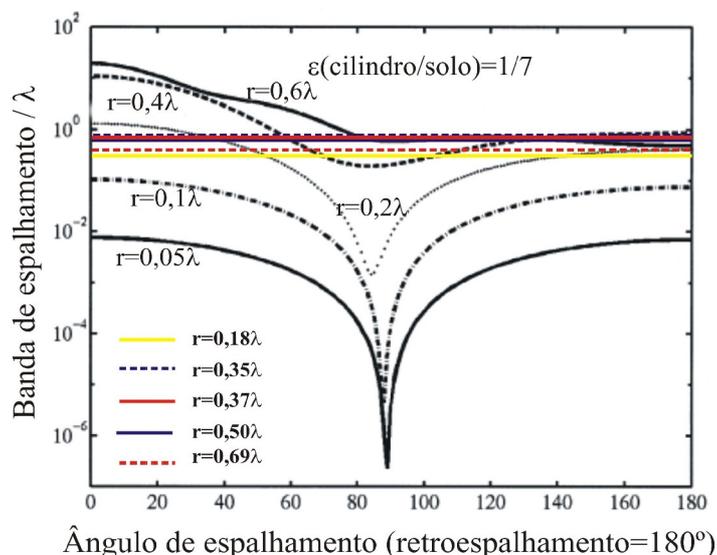


Figura 5.18 – Gráfico da banda de espalhamento em função do ângulo espalhado para o arranjo Ex-Ex. (Modificada de Radzevicius; Daniels, 2000)

Os valores r/λ iguais a 0,37 e 0,69, correspondentes aos refletores adquiridos com frequência de 200MHz, referentes às manilhas com diâmetros de 0,26m e 0,48m, respectivamente, também apresentaram valores de banda de espalhamento maiores para a modelagem com aquisição Ex-Ex, quando estes são examinados no ponto do retroespalhamento (180°). No entanto, cabe ressaltar que os alvos mais profundos (em 2m de profundidade) relacionados a esses refletores, foram visualizados, através, de refletores muito sutis, devido principalmente ao fato da atenuação da onda eletromagnética ser dependente da profundidade e se dar com maior intensidade para ondas EM de maiores frequências.

A última relação r/λ igual a 1 não pode ser enquadrada nos resultados desses modelos, no entanto, por se tratar dos refletores correspondentes às manilhas de concreto de maiores diâmetros, observa-se que os resultados foram excelentes.

Apesar dos modelos apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18 terem sido realizados para tubos de pvc com diâmetro de 0,076m, (RADZEVICIUS; DANIELS, 2000) estes puderam ser aplicados de maneira satisfatória para a grande maioria das manilhas de concreto.

Segundo Radzevicius; Daniels, 2000, outro parâmetro interessante a ser analisado refere-se à banda de espalhamento em função do parâmetro r/λ . A Figura 5.19 mostra essa relação considerando as polarizações das antenas Ey-Ey (linha cheia) e Ex-Ex (linha tracejada). Como pode ser visto, essa modelagem confirma dois resultados importantes mostrados pelos perfis GPR. O primeiro é que quanto menor a relação r/λ , ou seja, quanto menor o raio do alvo cilíndrico em relação ao comprimento de onda incidente sobre sua superfície sua detecção se torna mais dependente da polarização dos arranjos das antenas e isso pode ser comprovado nos perfis GPR, principalmente, através dos refletores das manilhas de pequeno diâmetro, as quais são melhores detectadas pelo arranjo de antenas Ex-Ex. A segunda é que, à medida que, essa relação vai aumentando, ou seja, à medida que, o raio do alvo cilíndrico se torna mais próximo ou maior do que o comprimento de onda incidente sobre sua superfície, menos dependente da polarização são essas estruturas, pois, ambos os arranjos passam a apresentar bandas de espalhamento similares, sendo assim, facilmente identificados, sendo que, isso pode ser observado nos dados reais, através dos refletores provenientes das manilhas grandes (0,70cm de diâmetro) em ambos arranjos de antenas.

Dessa maneira, observa-se que, de modo geral, para a maioria dos alvos cilíndricos investigados nesta pesquisa o arranjo de antenas Ex-Ex possui bandas de espalhamentos maiores do que o arranjo de antenas Ey-Ey, permitindo então, que os alvos sejam melhores identificados com as antenas no modo Ex-Ex. Para realçar esse fato, a seguir são apresentados alguns espectros de amplitudes para os refletores N, Q e Z, adquiridos com frequência de 100MHz e arranjos Ex-Ex e Ey-Ey.

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os espectros de amplitudes dos dados brutos, referentes a um traço de radar 12 do topo da manilha de concreto N, adquiridos com frequência de 100MHz para os arranjos Ey-Ey e Ex-Ex, respectivamente. Como pode ser

notado, o traço GPR que possui maior valor de amplitude é o adquirido com arranjo de antenas Ex-Ex, chegando ao valor de amplitude de aproximadamente 3×10^5 .

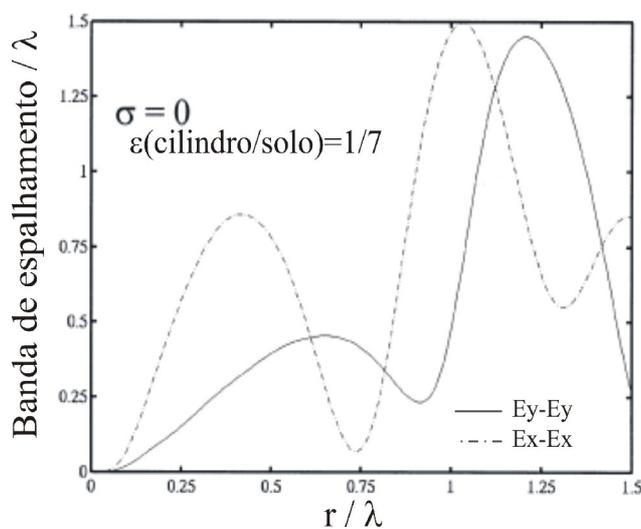


Figura 5.19 - Gráfico da banda de espalhamento em função da relação r/λ . (Modificada de Radzevicius, 2000).

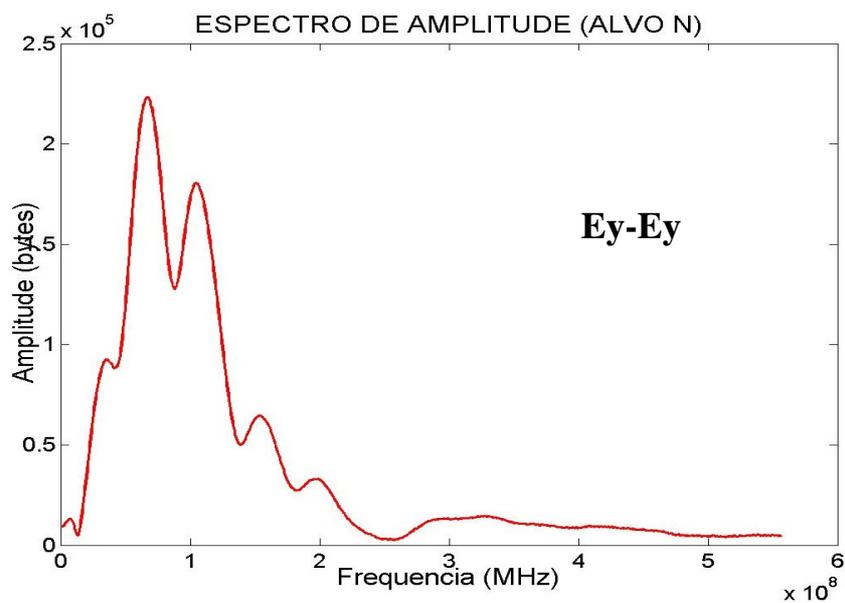


Figura 5.20 – Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha N de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

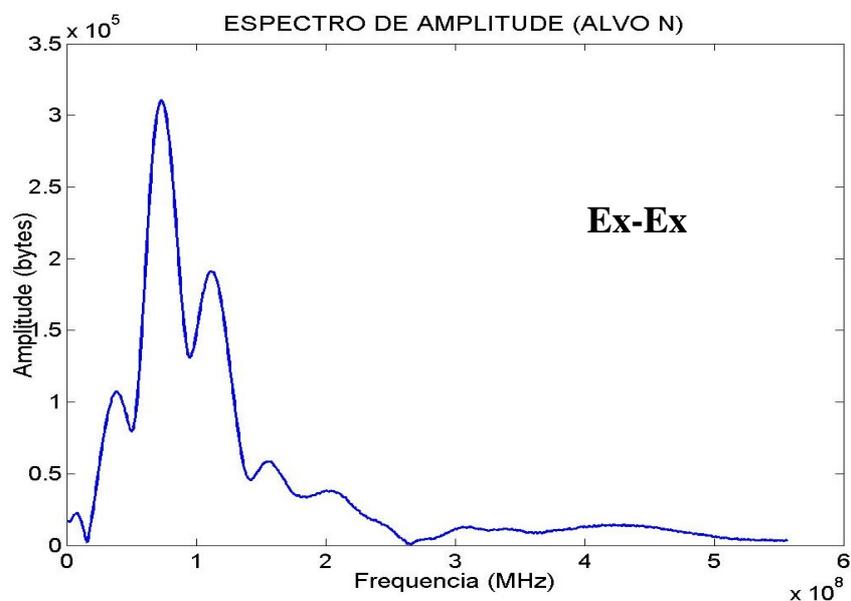


Figura 5.21 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha N de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

O mesmo comportamento pode ser visto nas Figuras 5.22 e 5.23, referentes aos espectros GPR do traço 61 do topo do refletor Q adquirido com frequência de 100MHz, onde o modo Ex-Ex apresenta um valor de amplitude de aproximadamente $2,7 \times 10^5$.

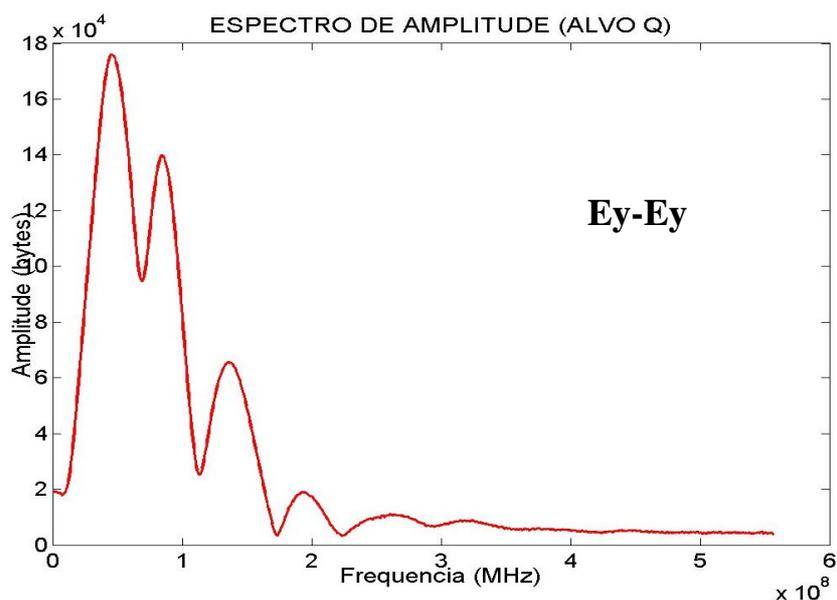


Figura 5.22 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Q de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

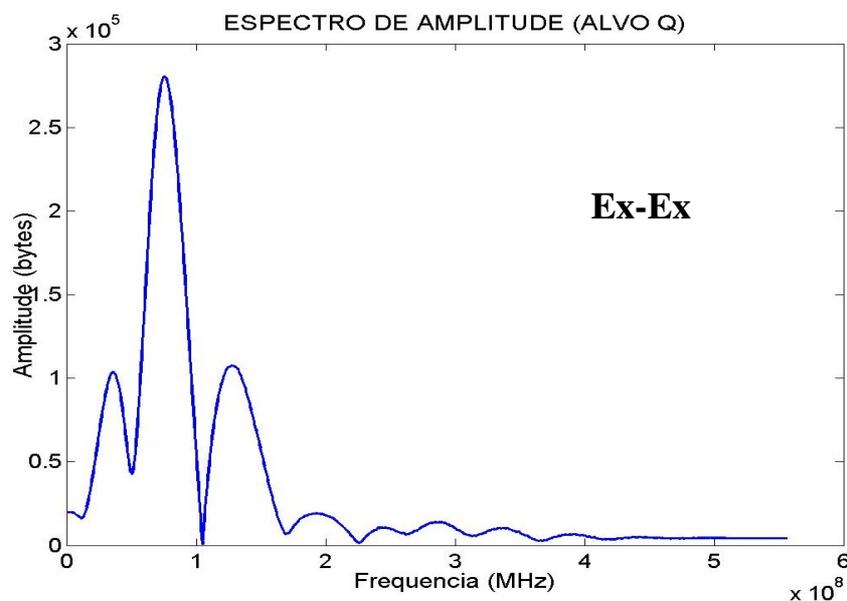


Figura 5.23 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Q de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

Nas Figuras 5.24 e 5.25, referentes ao traço GPR 146 do refletor do topo da manilha Z, pode-se perceber que apesar dos valores de amplitudes serem próximos, o modo Ex-Ex espalha maior conteúdo de frequências do que o modo Ey-Ey, o que aumenta as chances de visualização desses alvos, os quais representam as menores estruturas das linhas de manilhas de concreto.

Portanto, pode se afirmar que, o fator que apresenta maior relevância na detecção de estruturas cilíndricas é o arranjo de antenas empregado na aquisição dos dados, devido à combinação entre as polarizações da onda eletromagnética emitida pela antena transmissora, a disposição do objeto, uma vez que, este atua como objeto espalhador e a polarização da antena receptora.

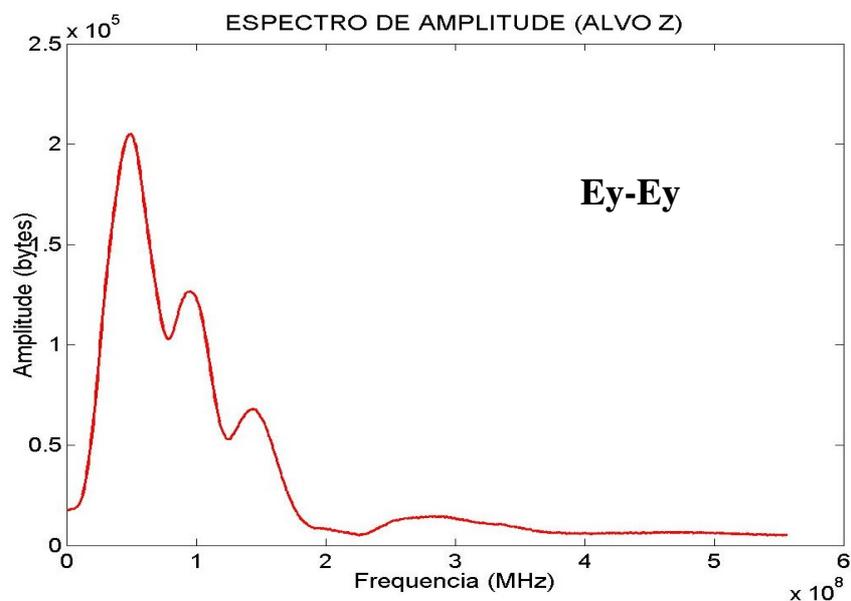


Figura 5.24 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ey-Ey

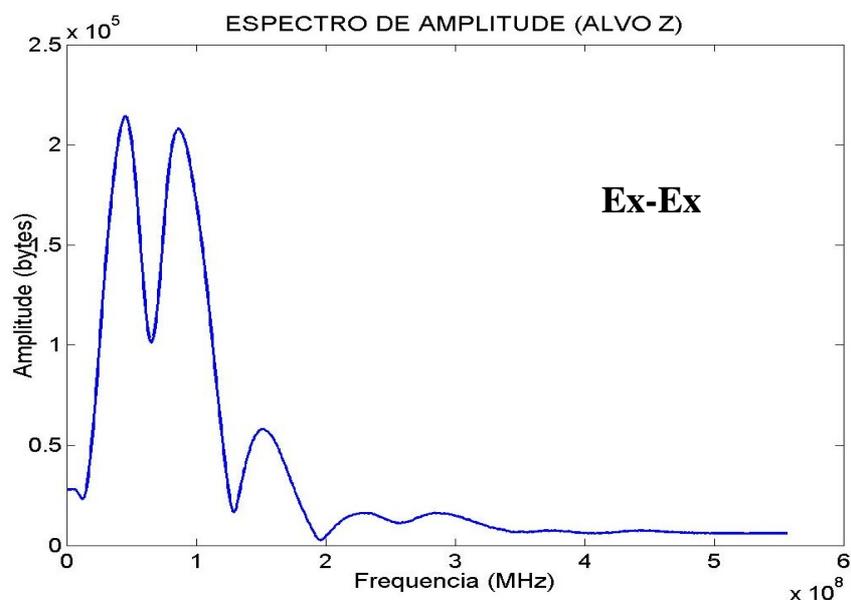


Figura 5.25 - Espectro de amplitude de um traço GPR referente ao topo do refletor da manilha Z de frequência 100MHz para o arranjo Ex-Ex

No entanto, há outras razões que influenciam na geração dos padrões de refletores, tais como, a perda por espalhamento no alvo, ou seja, quando um objeto possui uma dimensão menor que o comprimento da onda eletromagnética que incide sobre sua superfície, há uma

grande perda devido ao grande ângulo de abertura com que as frentes de ondas são espalhadas, fazendo com que grande parte da energia refletida não seja captada pela zona de Fresnel. Outro fator importante, e que é indiferente para quaisquer geometrias de interfaces é a atenuação da onda eletromagnética pelo meio que é dada em função da profundidade, ou seja, os alvos localizados em regiões mais profundas possuem, naturalmente, menores chances de serem identificados. Desse modo, quando estes fatores se aplicam às estruturas de pequenos diâmetros, então, as chances destas serem localizadas são mínimas. Isso explica o fato dos alvos mais profundos da linha de manilhas de concreto serem os que possuem os padrões de reflexões com menores amplitudes.

Um fator que também influencia na detecção das manilhas é a sua composição, por exemplo, as manilhas de concreto com 0,70m de diâmetro (possuem uma malha de ferro em sua estrutura) e as manilhas com 0,48 e 0,26m de diâmetros são feitas apenas por cimento. Neste caso, os campos eletromagnéticos atuam de formas diferentes em objetos condutores e dielétricos, e as manilhas com maiores diâmetros, i.e., com ferro, apresentam refletores com maior amplitude. Por exemplo, apesar das manilhas N, O e P serem consideradas dielétricas, elas possuem em sua estrutura, uma malha de ferro, e que certamente exerce influências nos padrões das respostas desses refletores. Quando estas manilhas são submetidas à determinada polarização incidente, através dos arranjos de antenas, pode haver a amplificação do sinal eletromagnético incidente em sua superfície, fazendo com que o sinal captado pela antena receptora seja de maior intensidade.