

5

Análise para antenas em espiras inclinadas em relação ao eixo da ferramenta

5.1

Introdução

A análise de ferramentas de perfilagem eletromagnética que incorporem antenas em espiras inclinadas em relação ao eixo da ferramenta (*tilted-coils antennas*) é de grande interesse em aplicações relacionadas a exploração de petróleo [38, 39]. Ao contrário das ferramentas de perfilagem convencionais, que empregam antenas perpendiculares em relação ao eixo da ferramenta, a utilização de espiras inclinadas pode prover dados com sensibilidade azimutal, assim como estimativas da anisotropia da formação [40, 41, 42]. Em ferramentas LWD, por exemplo, a sensibilidade azimutal ao redor do eixo da ferramenta pode ser empregada para melhorar o geodirecionamento durante a perfuração direcional/horizontal de um poço [43]. Para a indústria petrolífera é interessante ter uma ferramenta de perfilagem capaz de geodirecionar poços em relação às fronteiras do reservatório, mesmo quando o poço não intercepta a fronteira. As ferramentas LWD convencionais não indicam se a fronteira do reservatório mais próximo está abaixo ou acima do poço [42].

Neste capítulo, analisa-se a resposta elétrica de sensores LWD com antenas em espiras inclinadas em formações homogêneas e em formações com leitos inclinados anisotrópicos. A formulação numérica no presente caso é a mesma que foi desenvolvida nos capítulos anteriores, diferindo apenas em dois pontos:

1. Segundo membro da equação (3-1b), que corresponde ao valor do fluxo de corrente da espira transmissora através das superfícies das células duais;
2. Determinação das tensões induzidas nas espiras receptoras.

A seguir, apresenta-se o procedimento adotado para o cálculo do fluxo da corrente da espira transmissora e da tensão induzida na espiras receptoras. Observa-se que este procedimento é o mesmo para formulação por campos ou por potenciais, para meios isotrópicos ou anisotrópicos.

5.2

Fluxo de corrente através das superfícies das células duais

Ao aplicar a lei de Ampère (3-1b) sobre as superfícies das células duais é necessário calcular o fluxo de corrente através de cada superfície. Nos capítulos anteriores, a fonte era uma antena em espiras perpendicular ao eixo da ferramenta LWD, de forma que o fluxo de corrente dava-se apenas sobre a superfície dual \tilde{S}_φ , cuja a área está definida em (3-6b). No caso presente, o fluxo de corrente da-se através das superfícies duais \tilde{S}_φ e \tilde{S}_z , cujas áreas estão definidas em (3-6b) e (3-6c). A geometria da antena está ilustrada na figura 5.1.

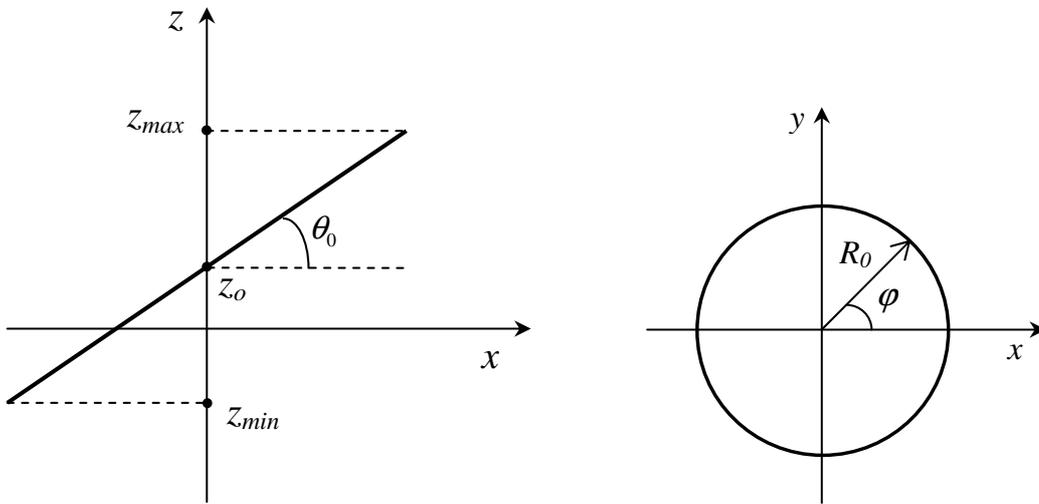


Figura 5.1: Geometria da antena em espiras inclinadas.

O vetor posição de um ponto sobre a espira é dado por:

$$\vec{r}' = R_0 \cos \varphi \vec{a}_x + R_0 \sin \varphi \vec{a}_y + (z_0 + R_0 \cos \varphi \tan \theta_0) \vec{a}_z \quad (5-1)$$

onde R_0 é o raio da projeção da espira sobre o plano xy e θ_0 é o ângulo de inclinação do plano da espira com o plano xy . z_0 é a coordenada z do centro da espira, que está localizado sobre o eixo z , como mostra a figura 5.1.

O vetor unitário tangente é definido por:

$$\vec{a}_T = \frac{\frac{d\vec{r}'}{d\varphi}}{\left\| \frac{d\vec{r}'}{d\varphi} \right\|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi \tan^2 \theta_0}} [-\sin \varphi \vec{a}_x + \cos \varphi \vec{a}_y - \sin \varphi \tan \theta_0 \vec{a}_z]. \quad (5-2)$$

A densidade de corrente da espira é dada por:

$$\vec{J}_s = I_0 \delta(\rho - R_0) \delta(z - (z_0 + R_0 \cos \varphi \tan \theta_0)) \vec{a}_T \quad (5-3)$$

onde I_0 é a amplitude de corrente de excitação.

Ao efetuar a integral de superfície do lado direito da lei de Ampère (3-24b) sobre as superfícies duais \tilde{S}_φ e \tilde{S}_z , tem-se:

- Para a superfície \tilde{S}_φ ($\varphi = \varphi_j$):

$$\iint_{\tilde{S}_\varphi} \vec{J}_s \cdot \vec{n} ds = \frac{I_0}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi_j \tan^2 \theta_0}} \quad (5-4)$$

onde $\vec{n} = \vec{a}_\varphi$. O valor do fluxo de corrente calculado em (5-4) é substituído no segundo membro da equação (3-33).

- Para a superfície \tilde{S}_z ($z = z_k$):

$$\iint_{\tilde{S}_z} \vec{J}_s \cdot \vec{n} ds = \frac{-I_0 \sin \varphi \tan \theta_0}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi \tan^2 \theta_0}} \quad (5-5)$$

onde $\vec{n} = \vec{a}_z$. O valor do fluxo de corrente calculado em (5-5) é substituído no segundo membro da equação (3-33).

Sendo, $z_k = z_0 + R_0 \cos \varphi \tan \theta_0$, resulta:

$$\cos \varphi = \frac{z_k - z_0}{R_0 \tan \theta_0}. \quad (5-6)$$

A equação acima fornece dois valores para φ , que correspondem às interseções dos ramos ascendente e descendente da espira.

5.3

Tensão induzida nas espiras receptoras

As respostas obtidas pelo sensor LWD são a taxa de amplitude e diferença de fase das tensões induzidas nas espiras receptoras, definidas em (2-1). A tensão induzida na espira receptora é obtida através do cálculo da força eletromotriz:

$$V = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_0^{2\pi} \vec{E} \cdot \frac{d\vec{r}}{d\varphi} d\varphi \quad (5-7)$$

onde

$$\begin{aligned} \vec{E} \cdot \frac{d\vec{r}}{d\varphi} &= [(E_\rho \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi) \vec{a}_x + (E_\rho \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi) \vec{a}_y + E_z \vec{a}_z] \cdot \\ &\quad [-R_0 \sin \varphi \vec{a}_x + R_0 \cos \varphi \vec{a}_y - R_0 \sin \varphi \tan \theta_0 \vec{a}_z] \\ &= R_0 (E_\varphi - \sin \varphi \tan \theta_0 E_z) \end{aligned} \quad (5-8)$$

Substituindo-se (5-8) em (5-7) e efetuando-se a integração, obtém-se a tensão induzida na espira receptora. A integração em (5-7) é feita somando-se as contribuições da integral de linha sobre cada célula e admitindo-se os

campos discretizados em cada célula. A contribuição de cada célula, V_c , é dada por:

$$V_c = R_0(\varphi_2 - \varphi_1)E_\varphi + R_0(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \tan \theta_0 E_z \quad (5-9)$$

onde φ_1 e φ_2 correspondem aos valores de φ das interseções da espira com as superfícies que definem o contorno da célula. E_φ e E_z são os valores médios das componentes φ e z do campo elétrico.

5.4 Simulações numéricas

Ao contrário da ferramenta LWD convencional, que emprega antenas em espiras perpendiculares ao eixo da ferramenta, ferramentas LWD com antenas em espiras inclinadas, também conhecidas como ferramentas LWD direcionais, podem prover dados com sensibilidade azimutal e estimativa da anisotropia da formação. A seguir, dois cenários são considerados: (i) formações homogêneas e (ii) Formações anisotrópicas não homogêneas. O primeiro cenário é utilizado para validação do algoritmo nas formulações por campos e por potenciais. O segundo cenário é utilizado para comparar a sensibilidade das ferramentas LWD convencionais e direcionais em relação à anisotropia da formação.

A configuração básica da ferramenta LWD direcional é dada na figura 5.2.

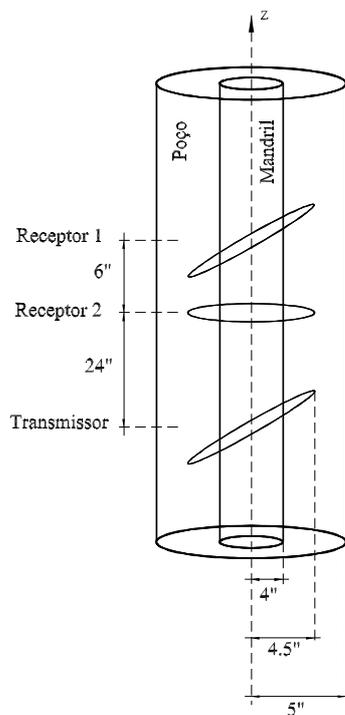


Figura 5.2: Configuração básica da ferramenta LWD direcional.

A ferramenta tem um mandril de ferro de 4 polegadas de raio. O sistema de antenas reside dentro de um poço de perfuração de 5 polegadas de raio. As antenas receptoras estão localizadas a uma distância de 30 polegadas e 24 polegadas a partir da antena transmissora. A ferramenta LWD direcional emprega antenas em espiras inclinadas, que assumem uma forma elíptica. Neste caso, o eixo menor das elipses é igual a 4,5 polegadas e o eixo maior aumenta com o ângulo de inclinação. Assim como na ferramenta LWD convencional, os parâmetros medidos pelo sensor são a taxa de amplitude e a diferença de fase entre as tensões induzidas nas antenas receptoras.

5.4.1

Formações homogêneas

Para validar o algoritmo proposto, os resultados obtidos pelo FVM de uma simulação em formações homogêneas são comparados com soluções pseudo-analíticas [43]. A figura 5.4 ilustra a taxa de amplitude em função do ângulo de inclinação das espiras receptoras. As duas espiras receptoras estão inclinadas na mesma direção. A antena transmissora permanece perpendicular ao eixo da ferramenta. O domínio computacional é discretizado utilizando uma grade cilíndrica $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (40, 30, 300)$. O tamanho das células é uniforme na direção z , com $\Delta z = 2,54$ cm e na direção radial varia de 0,635 a 7,12 cm. Dois casos são considerados: (i) O poço é preenchido por um fluido a base de óleo, cuja a condutividade é igual a 5×10^{-4} S/m e a formação tem condutividade igual 1 S/m; (ii) O poço é preenchido por um fluido a base de água, cuja a condutividade é igual a 10 S/m e a formação tem condutividade igual 0,1 S/m. Os resultados mostram uma concordância excelente entre o FVM e a solução pseudo-analítica, em ambos os casos.

5.4.2

Formações anisotrópicas não homogêneas

Para comparar as respostas obtidas pelas ferramentas LWD convencional e direcional, simula-se a perfuração de um poço em uma formação anisotrópica não homogênea com um leito inclinado. Nesta simulação, a ferramenta LWD direcional possui a antena transmissora perpendicular ao eixo da ferramenta, assim como a primeira antena receptora. A segunda antena receptora tem uma inclinação de 45° . A discretização utiliza uma grade cilíndrica com $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (80, 10, 350)$ células. O tamanho das células é uniforme na direção z , com $\Delta z = 2,54$ cm e na direção radial varia de 0,635 a 5,03 cm. O poço é preenchido por um fluido a base de óleo, cuja condutividade é igual a $\sigma = 5 \times 10^{-4}$ S/m. A formação considerada neste exemplo está esquematizada

na figura 5.3, onde as condutividades perpendicular e paralela da camada inferior, intermediária e superior são dadas respectivamente por: $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 2,0$ S/m; $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 3,0$ S/m e $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 4,0$ S/m.

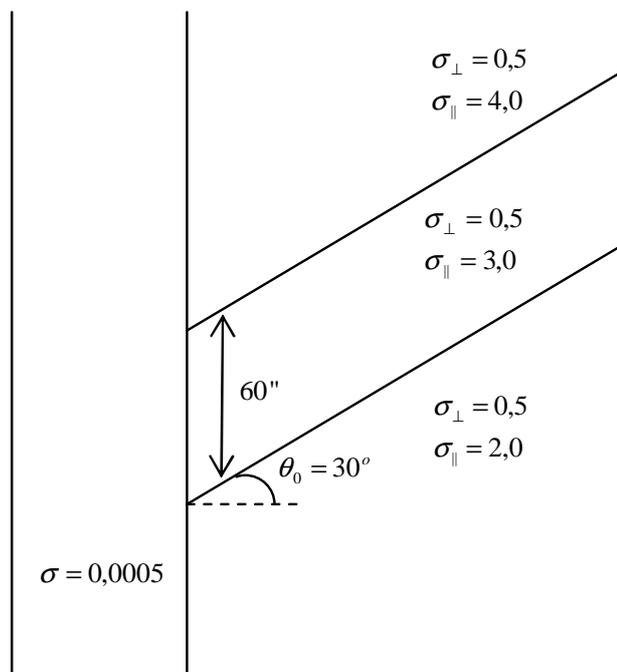


Figura 5.3: Formação anisotrópica não homogênea. Neste exemplo, a condutividade perpendicular de todas as camadas é igual a $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m. A ferramenta LWD convencional pode errar na avaliação deste tipo de formação.

Em seguida, realiza-se a mesma simulação em uma formação semelhante com taxas de anisotropias mais altas, onde os valores das condutividades perpendicular e paralela da camada inferior, intermediária e superior são dadas respectivamente por: $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 2,0$ S/m; $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 6,0$ S/m e $\sigma_{\perp} = 0,5$ S/m e $\sigma_{\parallel} = 10,0$ S/m. Todos os parâmetros de discretização são iguais aos da simulação anterior. A figura 5.5 mostra as respostas das ferramentas LWD convencional e direcional. Pode-se observar que a ferramenta convencional possui uma sensibilidade à anisotropia do meio muito baixa, apresentando um perfil típico de formações homogêneas. Ao elevar a taxa de anisotropia, observa-se uma pequena variação na resposta da ferramenta. A resposta da ferramenta LWD direcional, entretanto, apresenta variações no perfil do poço, indicando que tipo de ferramenta é capaz de identificar as anisotropias presentes na formação. A ferramenta LWD convencional pode errar na avaliação deste tipo de formação.

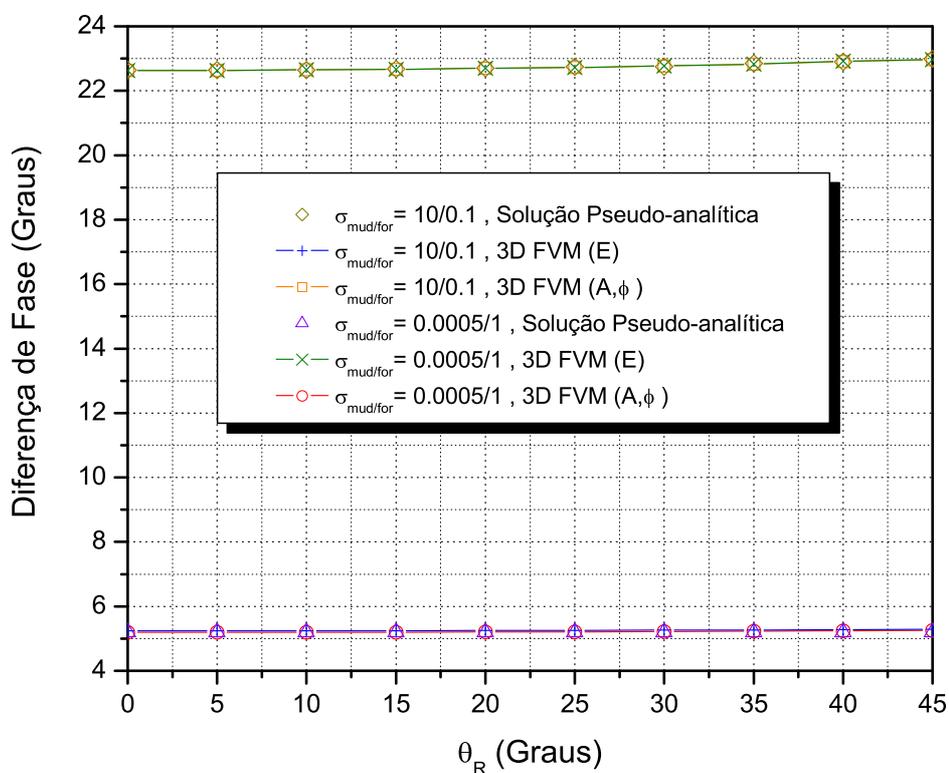
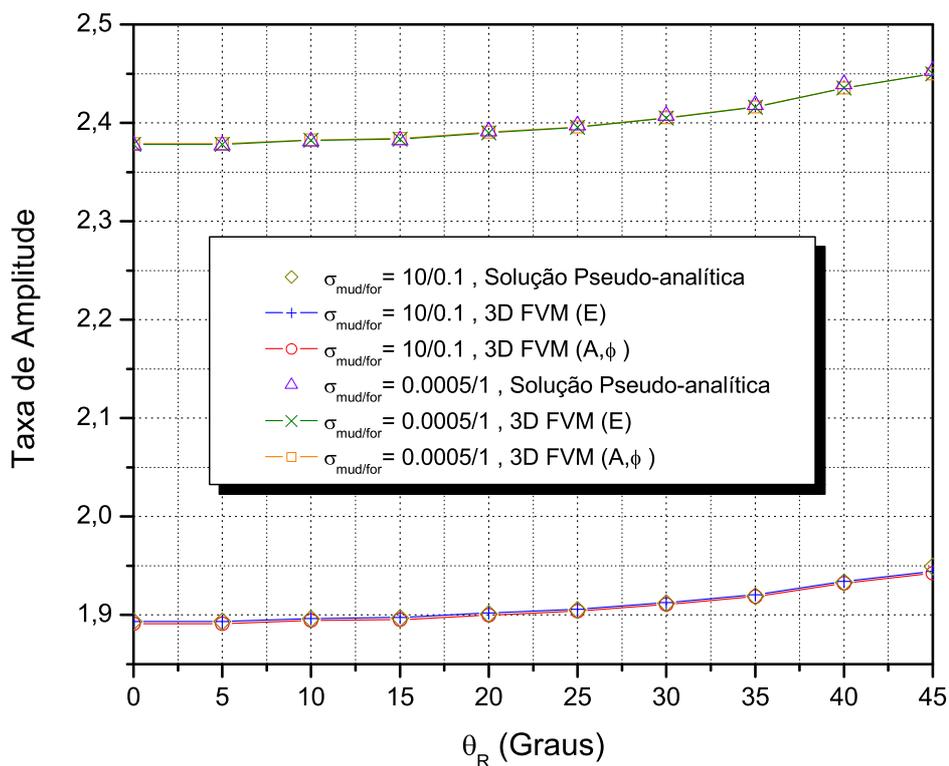


Figura 5.4: Resposta elétrica da ferramenta LWD direcional em uma formação homogênea.

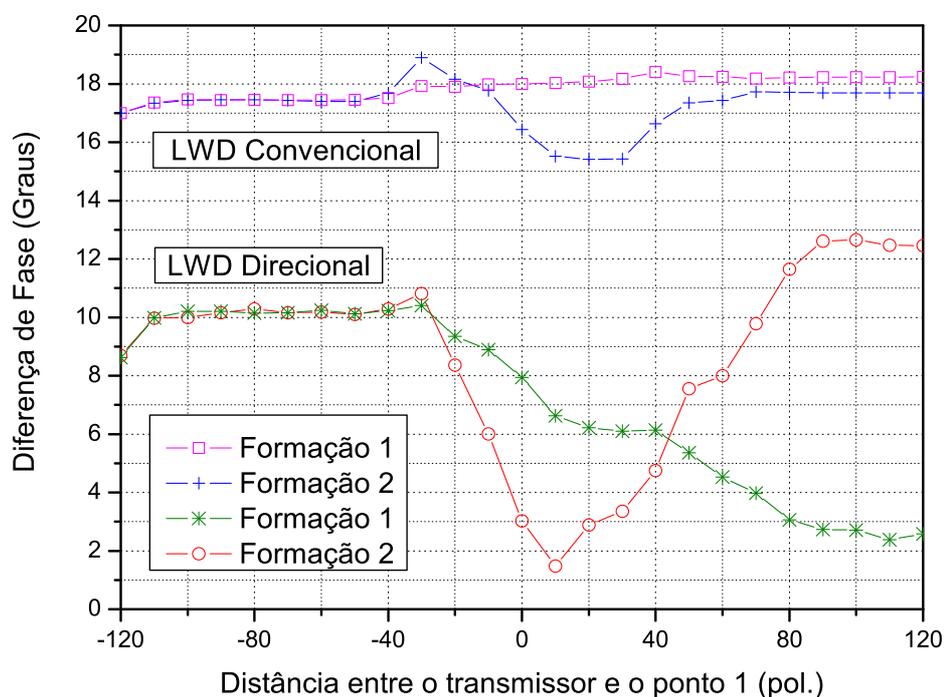
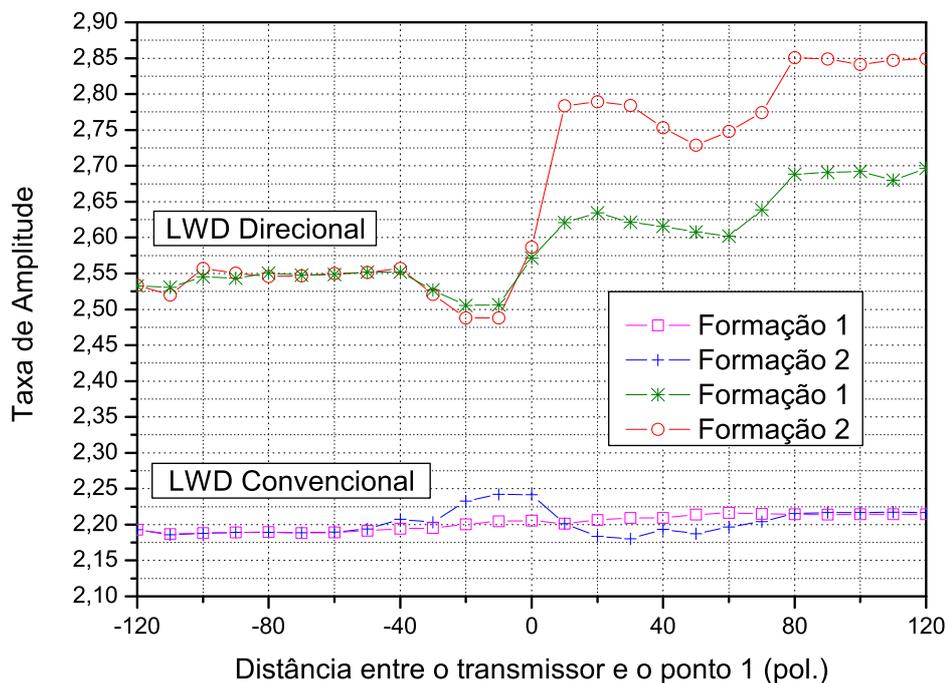


Figura 5.5: Resposta elétrica da ferramenta LWD direcional em uma formação anisotrópica homogênea. Neste exemplo, a condutividade perpendicular de todas as camadas é igual a $\sigma_{\perp} = 0,5 \text{ S/m}$.