

5

Análise dos modelos

Neste capítulo, a formulação do problema direto, que neste caso utiliza os modelos de rocha consolidada e não consolidada apresentados no capítulo 4, é submetida a uma análise paramétrica e a uma análise de sensibilidade, o que permite avaliar a relevância dos principais parâmetros de rocha, fluido e estado de tensões nos atributos sísmicos disponíveis para a previsão de pressão de poros (V_p e V_s).

5.1.

Análise paramétrica

A análise paramétrica da formulação do problema direto é realizada no espaço pressão diferencial *vs* atributo sísmico. (Observe que ao se variar a pressão diferencial, a pressão de poros é automaticamente variada, uma vez que a pressão confinante é mantida constante). A Tabela 2 apresenta os valores médios dos parâmetros considerados.

Tabela 2. Valores médios referentes à análise paramétrica.

| Parâmetro | Valor médio |
|-------------------|-------------|
| C | 0.15 |
| ϕ | 0.18 |
| $S_{\text{óleo}}$ | 0.5 |
| API (°) | 57 |
| T (°C) | 40 |
| s_{cs} (ppm) | 25000 |
| P_c (MPa) | 23 |

As propriedades dos minerais utilizadas seguem os valores obtidos por Goldberg e Gurevich (1998): $K_{\text{areia}} = 39$ GPa, $K_{\text{argila}} = 20$ GPa, $G_{\text{areia}} = 33$ GPa, $G_{\text{argila}} = 7.6$ GPa e $\rho_{\text{areia}} = \rho_{\text{argila}} = 2.65$ g/cm³.

5.1.1.

Influência do estado de consolidação

A primeira análise se dedica à comparação entre os modelos de rocha consolidada e não consolidada (Figura 10). De maneira geral, observa-se que as velocidades da rocha consolidada são maiores, o que pode ser explicado pelo fato desta apresentar uma maior união entre os grãos, o que facilita a propagação de ondas na rocha. Observa-se também que todas as curvas apresentam maiores variações em situações de baixas pressões diferenciais, o que está de acordo com as observações experimentais (Han et al., 1986).

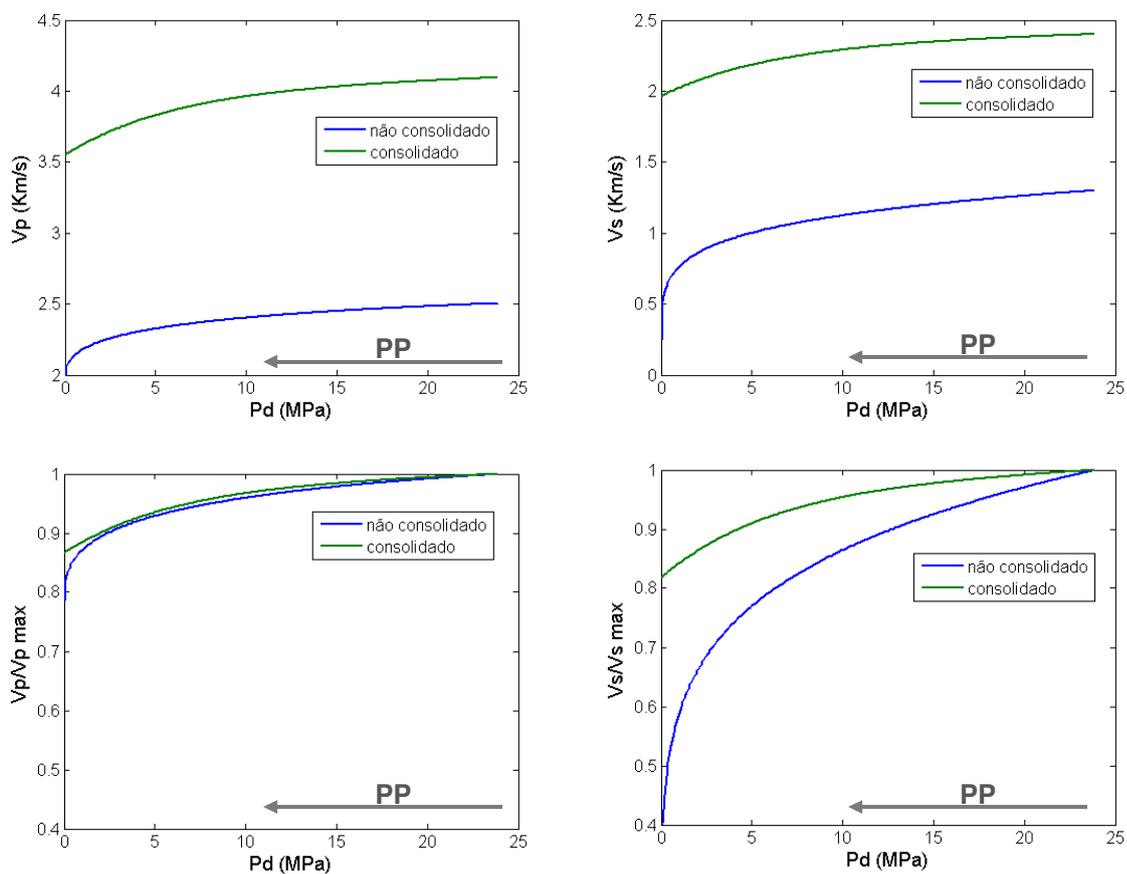


Figura 10. Comparação das relações V_p vs P_d e V_s vs P_d para os estado de rocha consolidado e não consolidado. Nas figuras superiores, comparação em termos absolutos. Nas figuras inferiores, comparação através de curvas normalizadas pelos respectivos valores máximos de velocidades. A variação de V_p com P_d é semelhante para os estados de rocha consolidada e não consolidada. Já a variação de V_s com P_d é muito mais sensível para o caso de uma rocha não consolidada.

Ao se comparar as curvas de V_p e V_s para rocha consolidada, observa-se que as variações dessas velocidades perante a variação de pressão diferencial são bastante similares entre si. Ao se realizar esta comparação para a rocha não consolidada, observa-se que V_s se mostra bem mais sensível à variação de pressão diferencial, o que torna o atributo V_s interessante para uma previsão de pressão de poros.

Observa-se também que em situações de pressões diferenciais muito baixas, a curva de V_s para rocha não consolidada é ainda mais sensível à variação de pressões diferenciais. Como foi dito no capítulo de revisão bibliográfica, baixas pressões diferenciais em uma rocha não consolidada fazem com que esta perca resistência ao cisalhamento, fazendo com que a onda cisalhante diminua sua velocidade, o que já não acontece em rochas consolidadas. Ao se plotar a relação V_p/V_s vs pressão diferencial, essa diferença entre o comportamento de rochas consolidadas e não consolidadas torna-se evidente (Figura 11).

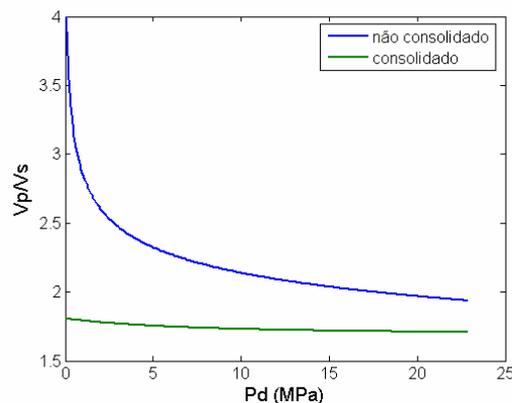


Figura 11. Comparação das relações V_p/V_s vs P_d para os estados de rocha consolidada e não consolidada. A relação V_p/V_s é mais sensível à variação de pressão diferencial em uma situação de rochas não consolidadas.

5.1.2.

Influência da porosidade

A segunda análise se dedica à influência da porosidade nas velocidades de rocha (Figura 12). Ao se analisar os resultados, observa-se que o atributo V_p é muito sensível a uma variação de porosidade, principalmente no caso de rocha consolidada. Ao se comparar as curvas relativas a V_p e V_s , observa-se que a influência da

porosidade em V_s é menor do que em V_p , sobretudo no caso de rocha não consolidada.

Deve-se aqui relembrar que as conclusões obtidas nessas análises pressupõem a validade dos “modelos” apresentados, sobretudo ao que se refere ao modelo de rocha não consolidada. Observa-se que ensaios realizados em amostras formadas por pacotes de esferas de vidro demonstram que pelo menos nesse tipo de material, a porosidade influi realmente menos em V_s do que em V_p (Zimmer et al., 2002). Se a pequena influência da porosidade nas velocidades cisalhantes corresponde à realidade de rochas não consolidadas (ou pouco consolidadas), estamos diante de mais um apelo ao uso de V_s para a previsão de pressão de poros neste tipo de rocha, uma vez que este atributo é ao mesmo tempo mais sensível à variação de pressões diferenciais e menos sensível à porosidade da rocha.

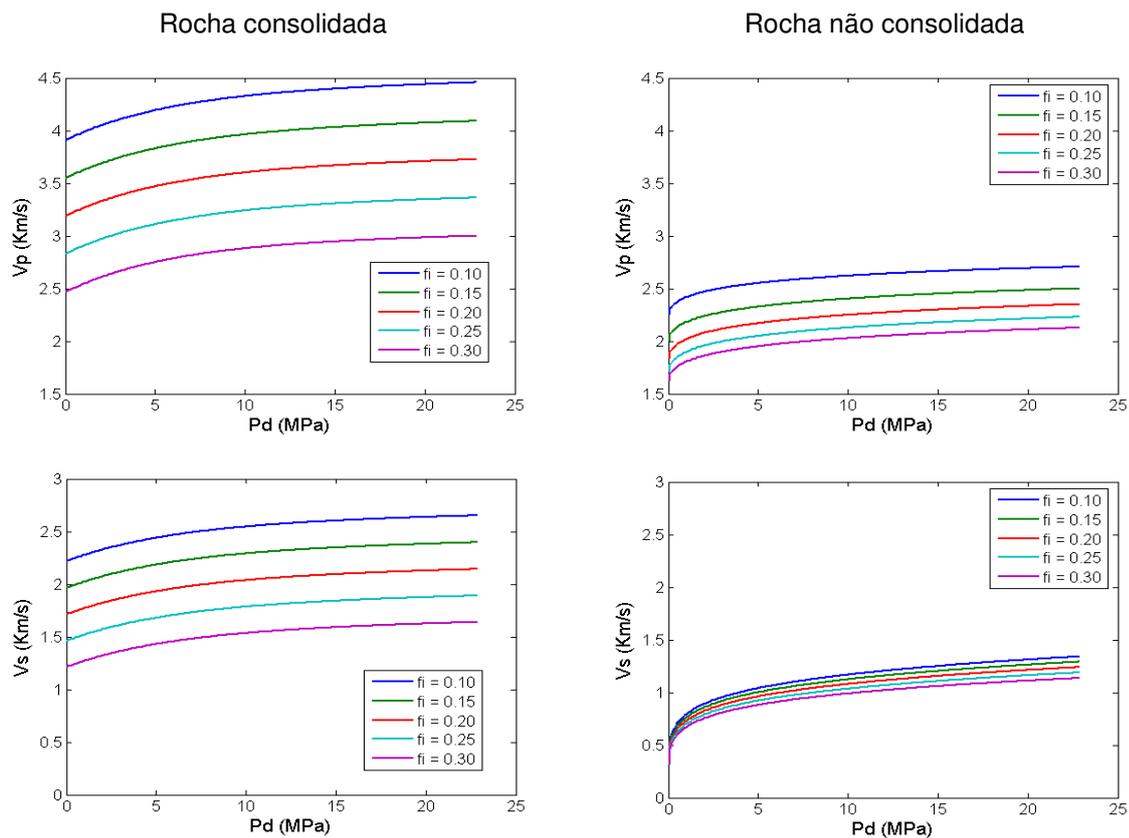


Figura 12. Influência da porosidade (f_i , na legenda) nas relações V_p vs P_d e V_s vs P_d para os estados de rocha consolidada (figuras à esquerda) e não consolidada (figuras à direita). A influência da porosidade é menor para as rochas não consolidadas, ainda mais na relação entre V_s vs P_d .

5.1.3.

Influência do conteúdo de argila

Neste item, a influência do conteúdo de argila nos modelos é avaliada. De modo geral, observa-se que o conteúdo de argila impacta as velocidades da rocha de forma parecida com que a porosidade impacta, porém com uma menor intensidade. Como a porosidade, este parâmetro também se apresenta muito mais influente no caso de rochas consolidadas do que no caso de rochas não consolidadas (Figura 13).

Observa-se também, nas curvas relativas ao estado consolidado, que existe uma maior variação ao se aumentar o conteúdo de argila de 0% para 10% do que ao se aumentar de 10% para 20%, o que está de acordo com as observações feitas por Han et al. (1986). Já para o modelo de rochas não consolidadas, essa diferença não foi observada.

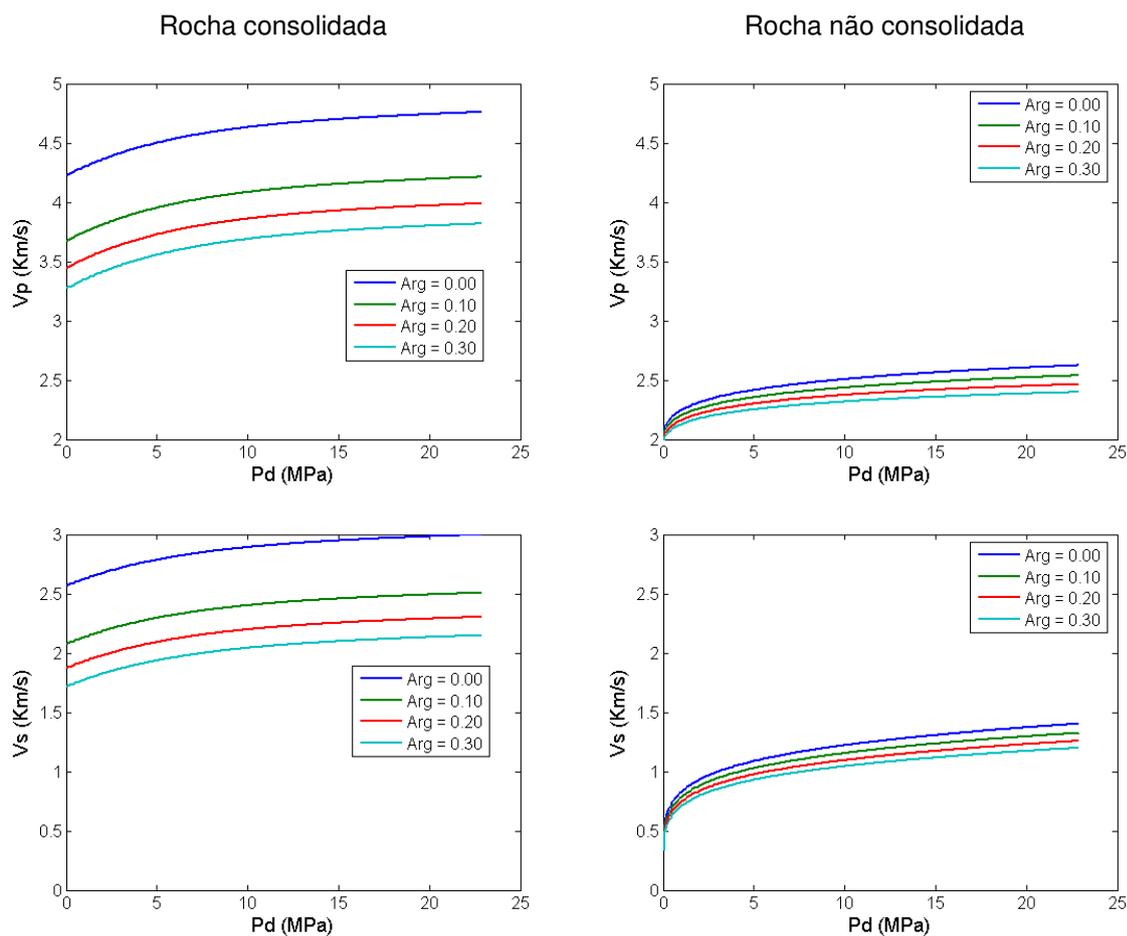


Figura 13. Influência do conteúdo de argila (Arg, na figura) nas relações V_p vs P_d e V_s vs P_d para os estados de rocha consolidada e não consolidada. A influência se mostrou menor para o modelo de rocha não consolidada.

5.1.4.

Influência da fração de óleo

Em todos os exemplos analisados até aqui, a rocha estava saturada com uma mistura homogênea de óleo e salmoura na proporção 1/1. Nas análises seguintes, essa proporção é variada, estudando-se o impacto que a fração de óleo provoca nos atributos sísmicos. Observa-se que o valor da porosidade neste tipo de análise é muito influente. Sendo assim, optou-se por considerar uma porosidade de 30%, o que permite ressaltar os efeitos do fluido. Na Figura 14 encontram-se os resultados.

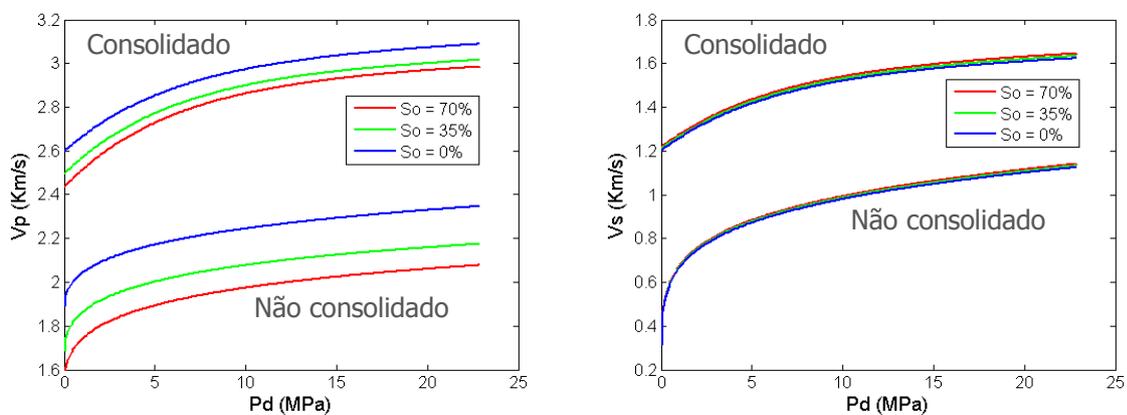


Figura 14. Influência da fração de óleo (S_o , na figura) nas relações V_p vs P_d e V_s vs P_d para os estados de rocha consolidada e não consolidada.

Ao se analisar a influência da fração de óleo em V_p , observa-se que essa influência é maior para uma rocha não consolidada, o que é muito intuitivo, desde que a rigidez de uma rocha pouco rígida deva sofrer uma maior influência da rigidez do fluido contido em seus poros.

Ao se analisar a influência da fração de óleo em V_s , observa-se que esse atributo é praticamente insensível à variação de fração de óleo, o que é explicado pelo fato do módulo cisalhante da rocha não depender do fluido contido nos poros (ver equação (41)). Observe que esta característica faz com que o atributo V_s se apresente ainda mais interessante para a previsão de pressão de poros, isto considerando os casos em que existem grandes incertezas associadas ao fluido de saturação no campo.

5.1.5.

Influência do grau API do óleo

A variação que o grau API do óleo provoca nas velocidades da rocha é parecida com a variação provocada pela mudança da fração de óleo na mistura óleo-salmoura, que foi analisada no item anterior. Ou seja, este parâmetro praticamente não influencia em V_s , enquanto que em V_p , a influência maior se dá nos casos de rocha não consolidada (Figura 15). As conclusões são as mesmas apresentadas no item anterior.

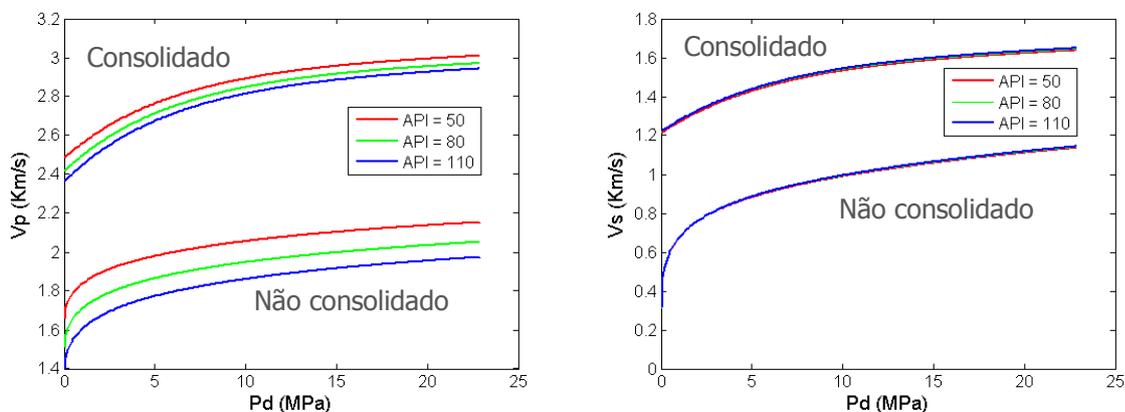


Figura 15. Influência do grau API do óleo nas relações V_p vs P_d e V_s vs P_d para os estados de rocha consolidada e não consolidada. Em V_s , o fluido influencia muito pouco.

Em V_p , a influência do fluido é maior em um estado de rocha não consolidada.

5.1.6.

Influência da temperatura e da salinidade da salmoura

Os parâmetros temperatura e salinidade da salmoura apresentaram mudanças muito pequenas nas curvas de velocidade vs pressão diferencial (isto considerando variações de temperatura entre 35 e 45 graus e de salinidade entre 20000 e 30000 ppm). A apresentação de figuras tornou-se desnecessária.

5.2.

Análise de sensibilidade

Para se complementar o estudo paramétrico do modelo desenvolvido, apresenta-se uma análise de sensibilidade. Esta análise consiste em variar os principais parâmetros do modelo de forma independente, avaliando o impacto que essas variações impõem às velocidades da rocha saturada. A variação estabelecida foi de +10% dos valores médios de cada parâmetro, que são os mesmos apresentados na Tabela 2. Novamente as propriedades dos minerais são dadas por Goldberg e Gurevich (1998).

Observe que a pressão de poros utilizada corresponde a um alto valor (18 MPa), o que resulta em uma situação de baixa pressão diferencial (3 MPa), onde as rochas são mais sensíveis à variação de pressão diferencial. Em um cenário de menor pressão de poros, a importância deste parâmetro pode ser menor do que a observada nas análises seguintes (Figura 16 para rocha não consolidada e Figura 17 para rocha consolidada).

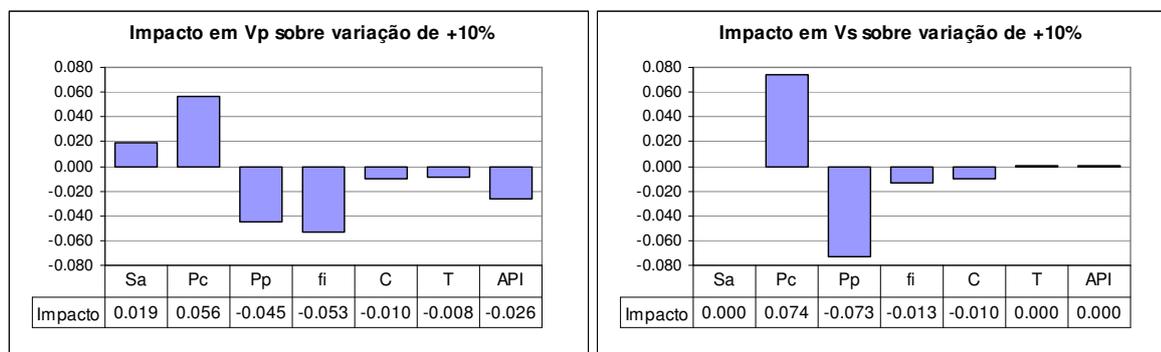


Figura 16. Análise de sensibilidade, caso de rocha não consolidada. Os parâmetros relacionados com o estado de tensão (pressão de poros e pressão confinante) são parâmetros importantes, sobretudo na velocidade cisalhante.

Ao se analisar a Figura 16 (caso de rocha não consolidada) observa-se que pressão confinante, porosidade e pressão de poros apresentam-se como os parâmetros mais influentes na velocidade compressional. Como parâmetros de influência secundária, apresentam-se os parâmetros relacionados ao fluido de saturação: fração de salmoura (Sa) e grau API do óleo. Temperatura e conteúdo de argila se apresentam pouco influentes. Ao se analisar a influência dos parâmetros na velocidade cisalhante, observa-se que a influência da pressão de poros e da pressão

confinante são muito maiores do que as influências dos outros parâmetros. Observe também que a porosidade é pouco influente. Ao se comparar o impacto da pressão de poros em V_p e em V_s , observa-se que este impacto é maior em V_s . Como já foi dito, essa grande sensibilidade de V_s à variação da pressão de poros, sobretudo em situações de altas pressões de poros, faz com que este atributo se apresente muito interessante para a previsão de pressões de poros (caso de rochas não consolidadas). Observe mais uma vez que se pressupõe a validade do modelo de Hertz-Mindlin (item 4.1).

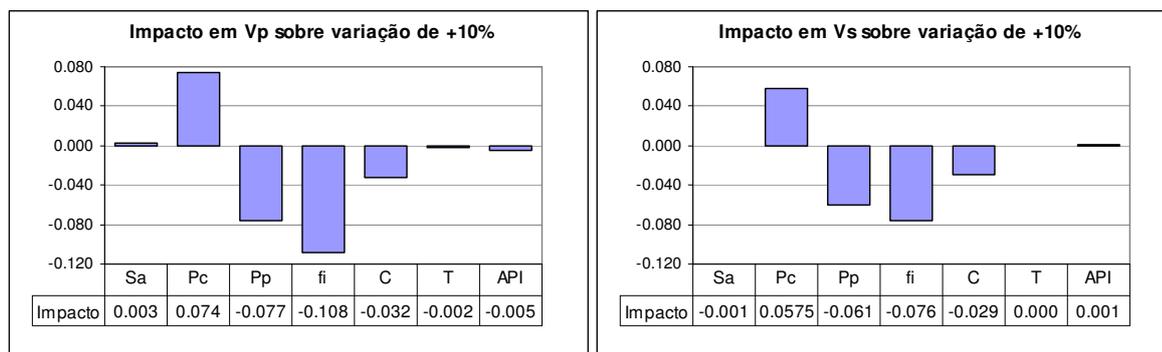


Figura 17. Análise de sensibilidade, caso de rocha consolidada. Tanto para V_p quanto para V_s , os parâmetros que mais influenciam são porosidade, pressão confinante e pressão de poros.

Ao se analisar a Figura 17 (caso de rocha consolidada), observa-se, que também para este estado de consolidação, os parâmetros porosidade, pressão de poros e pressão confinante são os mais influentes na velocidade compressional. Ao se analisar a influência dos parâmetros do fluido (fração de salmoura (Sa) e grau API do óleo), observa-se que estes não são importantes, diferentemente do caso de rocha não consolidada. Ao se analisar a influência dos parâmetros em V_s , observa-se que a pressão de poros e a pressão confinante são parâmetros influentes, mas não como no caso de rocha não consolidada (compare a Figura 16 com a Figura 17). Observa-se também que a influência da porosidade em V_s é muito maior no caso de rocha consolidada, onde esta chega a exercer uma influência maior do que os parâmetros pressão confinante e pressão de poros.

Observa-se mais uma vez que essas análises foram obtidas para uma situação de pressão de poros alta (baixa pressão diferencial), onde as rochas são mais sensíveis à

variação de pressão diferencial. Em um cenário de menores pressões de poros, a importância deste parâmetro é menor.