

5 Exemplos

O modelo numérico apresentado foi utilizado para a geração dos vários exemplos apresentados neste capítulo. Uma variedade de condições hidrodinâmicas foram simuladas. Inicialmente tem-se um exemplo onde o duto se encontra vazio, ou seja, sem cascalhos em seu interior e é mostrada a formação do leito no interior do mesmo. Em seguida é apresentado um exemplo onde se tem um leito formado e é mostrada a sua remoção. Foram ainda, simulados alguns exemplos que apresentam situações reais como, por exemplo, variação de condições iniciais como vazão e taxa de penetração ao longo do tempo. Para finalizar, foram realizadas algumas análises para avaliar a influência de diversos parâmetros no modelo proposto, como a influência de parâmetros geométricos como a excentricidade e a inclinação, dos parâmetros reológicos, parâmetros do modelo, como fator de atrito na interface e nas paredes e deslizamento entre as fases.

5.1. Formação do leito

Este exemplo simula um duto horizontal, inicialmente vazio, para uma taxa de penetração de 20 m/h e vazão de líquido de 0,0126 m³/s (250 gpm), sem cascalhos, e mostra o processo de formação de um leito de sólidos. As seções transversais e longitudinais do duto são mostradas nas figuras abaixo (Figura 5.1 e Figura 5.2).

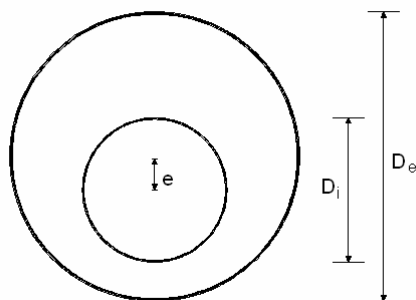


Figura 5.1 – Seção transversal do duto.

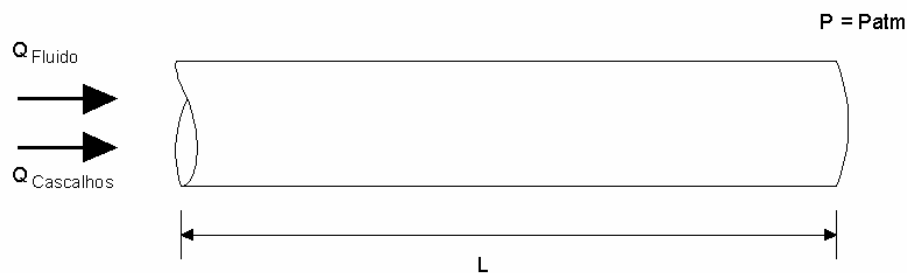


Figura 5.2 – Seção longitudinal do duto.

As propriedades do duto, do fluido e dos cascalhos são apresentadas na Tabela 5.1. Estas propriedades são utilizadas nos demais exemplos neste capítulo.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor	
	(SI)	(Unidades de campo)
Densidade do fluido	1198,26 kg/m ³	10 lb/gal
Diâmetro interno	12,7 cm	5 pol
Diâmetro externo	21,84 cm	8,6 pol
Excentricidade	2,83 cm	-
Inclinação com a vertical	90°	90°
Comprimento total	600 m	600 m
Pressão na saída	0 Pa	0 Pa
Diâmetro da partícula	0,508 cm	0,20 pol
Densidade da partícula	2516 kg/m ³	21,0 lb/gal
K	0,3699 Pa.s ⁿ	0.7725 lb/100 ft ²
n	0,68	0,68

As figuras abaixo mostram os resultados de uma simulação realizada em um tempo de 150 min, para intervalos de tempo de 10 minutos.

A Figura 5.3 mostra o comportamento do leito de cascalhos ao longo do tempo, em intervalos de 10 minutos. Neste exemplo, nota-se que o regime permanente foi alcançado em torno de 140 minutos, ou seja, após este tempo, a altura do leito permanece praticamente constante.

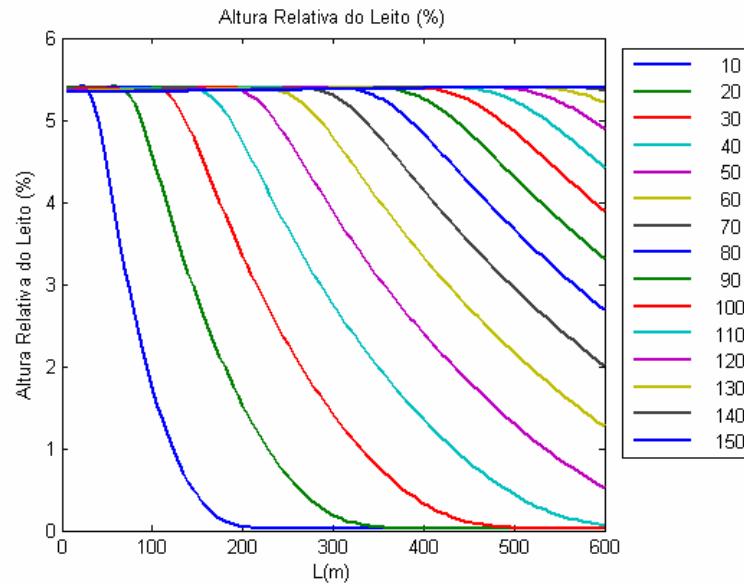


Figura 5.3 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

A Figura 5.4 mostra a evolução do leito ao longo do tempo para algumas seções do duto. Foram seleccionadas cinco seções: na entrada, a 25 % do comprimento (150 m), na metade do duto (300 m), a 75% do comprimento (450 m) e na saída (600 m). Da figura podemos ver o aumento da altura do leito ao longo do tempo até que o regime permanente é alcançado. A figura reproduz o comportamento esperado para este tipo de problema. A Figura 5.5 ilustra o comportamento descrito ao longo do tempo e do comprimento do duto. Pode-se observar claramente a formação do leito.

A Figura 5.6 mostra o comportamento da pressão no anular ao longo do comprimento do duto. Como se pode observar, um aumento na altura do leito de cascalhos leva a um aumento na pressão. Este comportamento é esperado, uma vez que os sólidos acumulados no interior do duto tendem a elevar a pressão.

A Figura 5.7 mostra o comportamento da pressão ao longo do tempo para algumas seções do duto (já descritas acima). Como se pode notar na figura, o comportamento é o esperado para este tipo de problema, ou seja, um aumento da pressão no anular à medida em que o leito é formado.

As figuras (Figura 5.8 e Figura 5.9) mostram o comportamento da velocidade do líquido e dos sólidos no leito ao longo do comprimento do duto, para diversos tempos. Como esperado, as velocidades do líquido e dos sólidos no leito diminuem à medida que o leito cresce. Este comportamento pode também ser observado na Figura 5.10 que mostra o perfil da velocidade do

líquido no leito ao longo do tempo para as seções do duto definidas anteriormente.

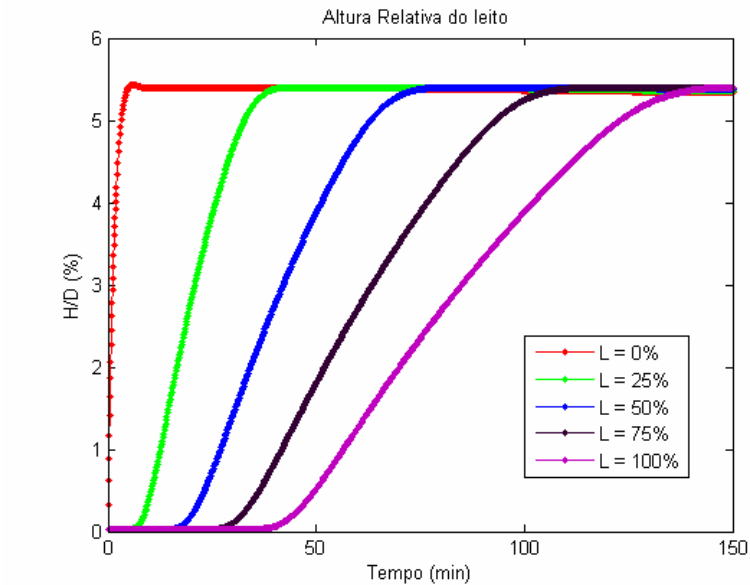


Figura 5.4 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.

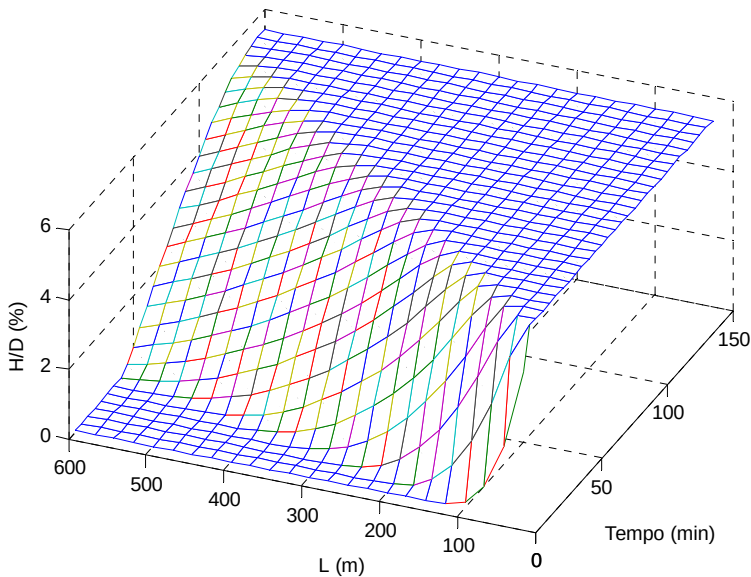


Figura 5.5 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

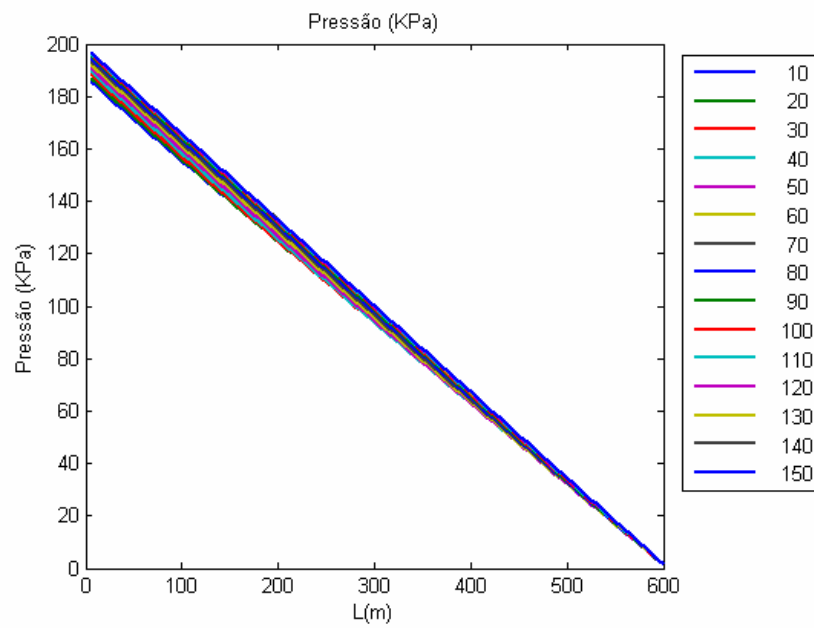


Figura 5.6 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

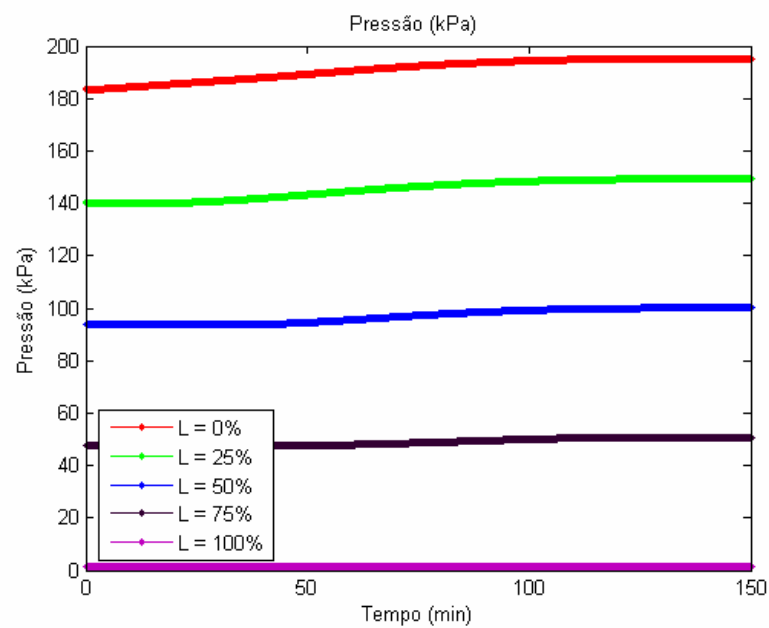


Figura 5.7 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.

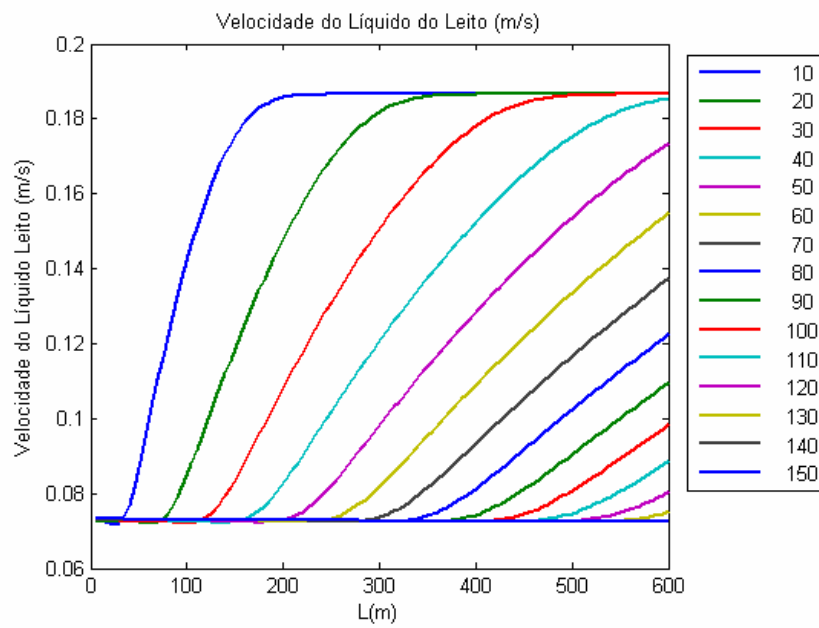


Figura 5.8 – Velocidade do fluido no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

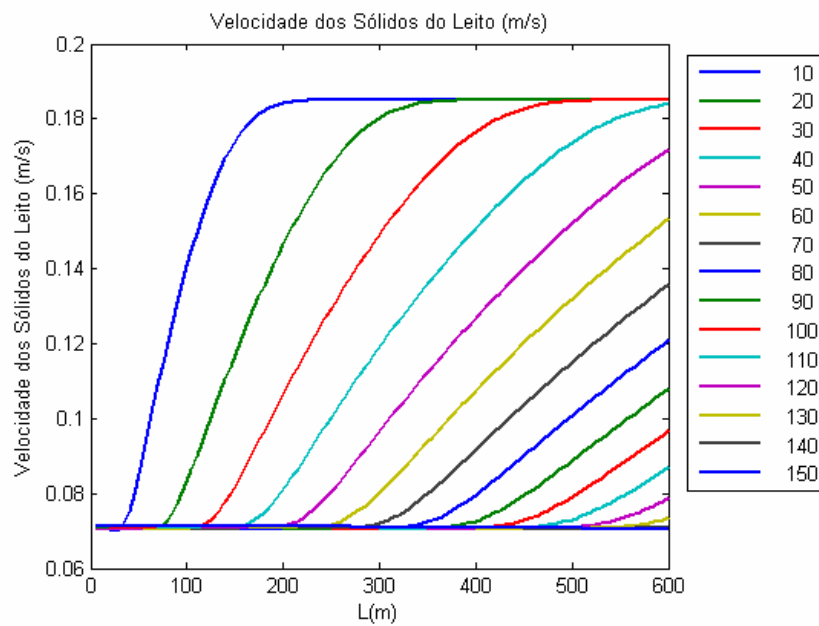


Figura 5.9 – Velocidade dos sólidos no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

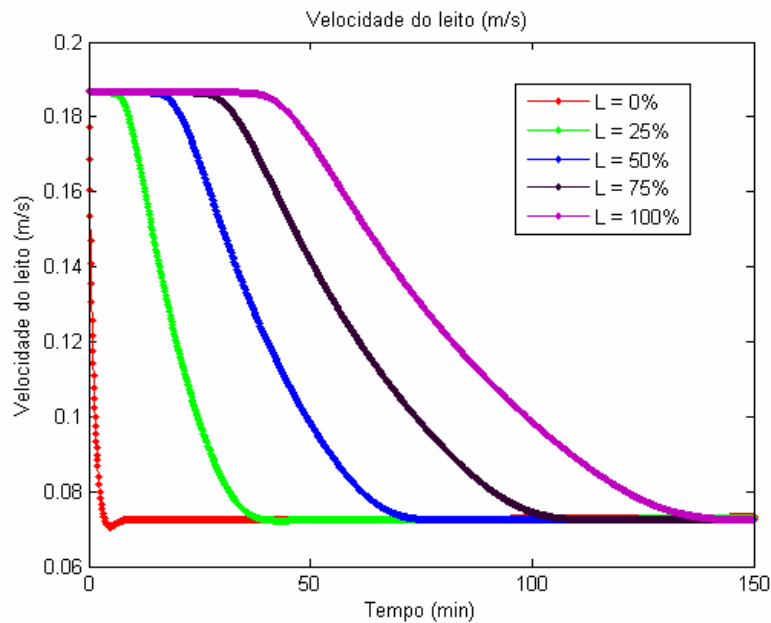


Figura 5.10 – Velocidade do líquido no leito ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.

As figuras (Figura 5.11 e Figura 5.12) mostram as velocidades do líquido e dos sólidos na suspensão ao longo do comprimento do duto para diversos tempos, em intervalos de 10 minutos. As velocidades do líquido e dos sólidos na suspensão aumentam à medida que o leito cresce; isto ocorre devido à redução da área da suspensão, aumentando assim as velocidades na suspensão. O resultado é também mostrado na Figura 5.13, que mostra o perfil de velocidade do líquido na suspensão ao longo do tempo para algumas seções do duto (descritas anteriormente).

A Figura 5.14 mostra o perfil de concentração média de sólidos na suspensão ao longo do comprimento do duto. Como esperado, observa-se um aumento gradativo da concentração ao longo do tempo em todas as seções.

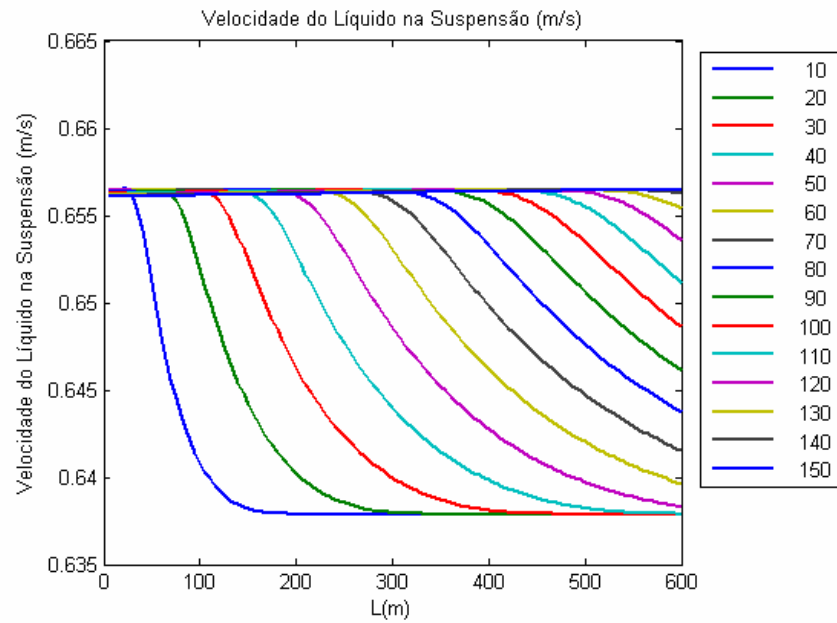


Figura 5.11 – Velocidade do fluido na suspensão ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

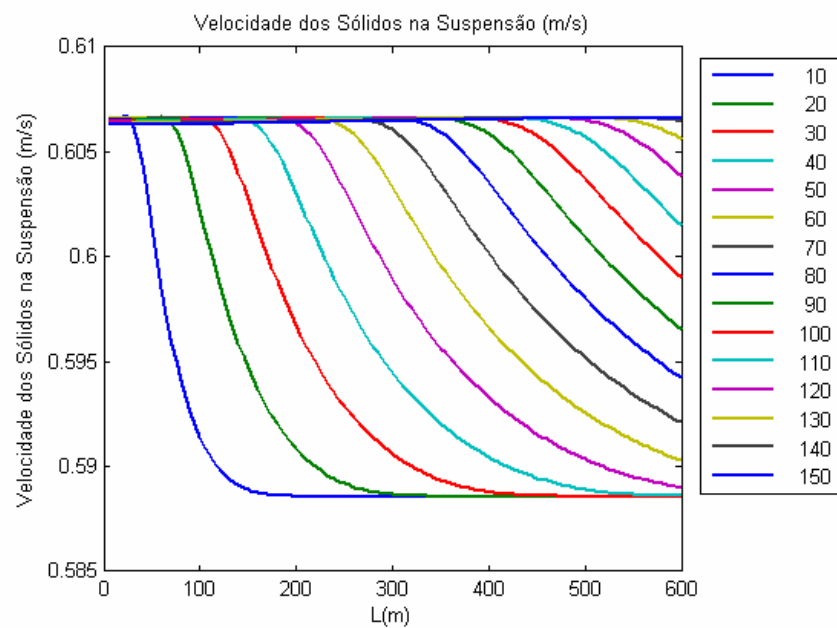


Figura 5.12 – Velocidade dos sólidos na suspensão ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

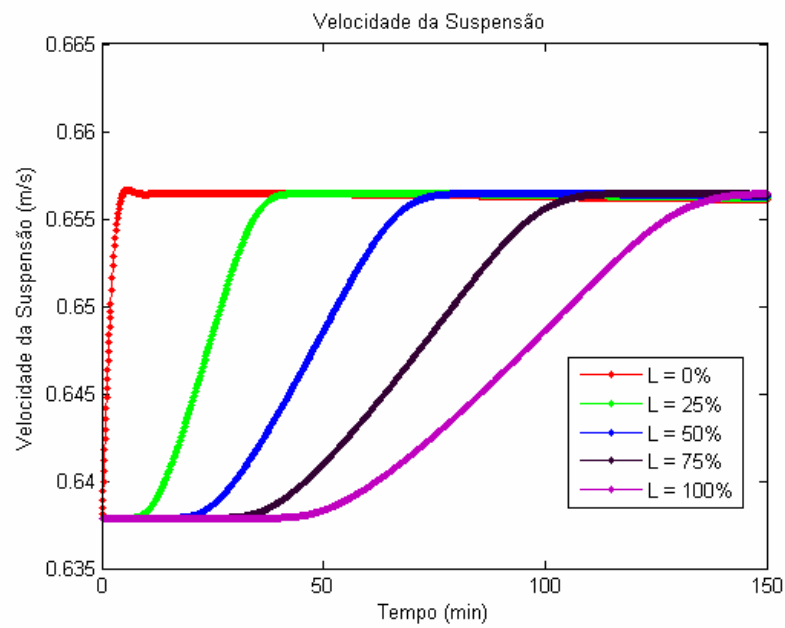


Figura 5.13 – Velocidade na suspensão ao longo do tempo para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h para cinco seções do duto.

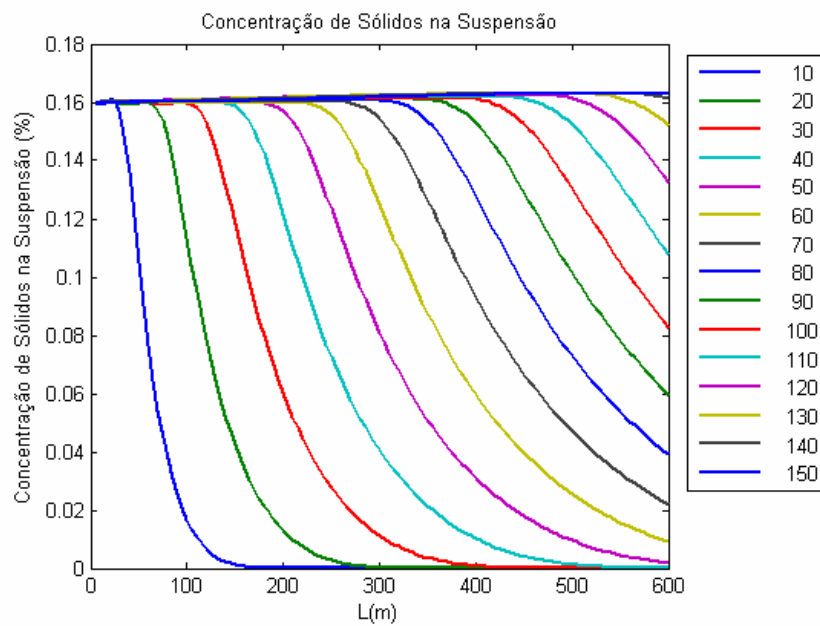


Figura 5.14 – Concentração de sólidos na suspensão, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de 250 gpm e taxa de penetração de 20 m/h.

5.2. Erosão do leito

Este exemplo mostra a remoção de cascalhos em um duto com um leito previamente formado. Os resultados mostram o tempo necessário para a remoção dos cascalhos para uma vazão do fluido de $0,0189 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 gpm) e uma altura do leito de 7% do diâmetro externo do duto.

A Figura 5.15 mostra a altura do leito ao longo do comprimento em intervalos de 5 minutos. Nota-se a diminuição do leito ao longo do tempo. Neste caso o tempo necessário para a completa remoção do leito de cascalhos foi de aproximadamente 40 minutos. Este mesmo comportamento é observado na Figura 5.16 que mostra a redução da altura do leito ao longo do tempo para algumas seções do duto. A Figura 5.17 mostra a diminuição da altura do leito ao longo do tempo e do comprimento.

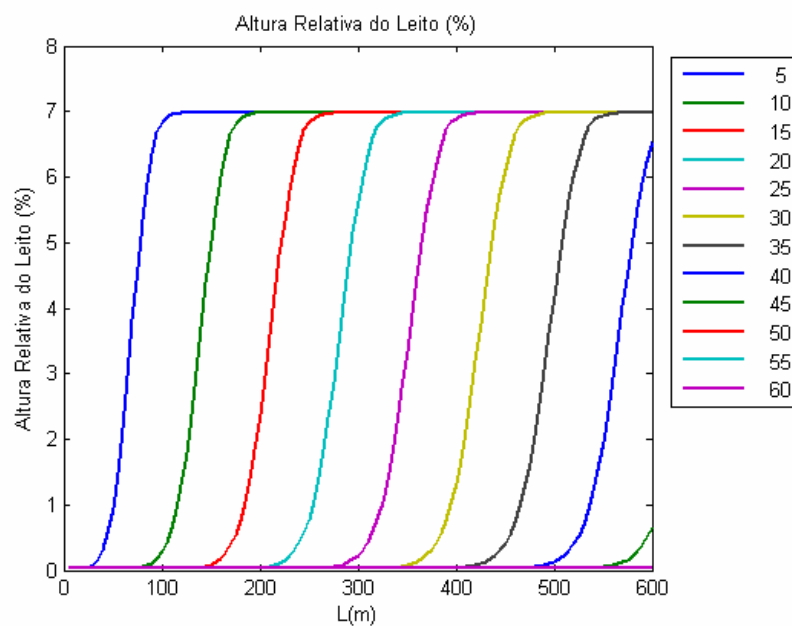


Figura 5.15 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

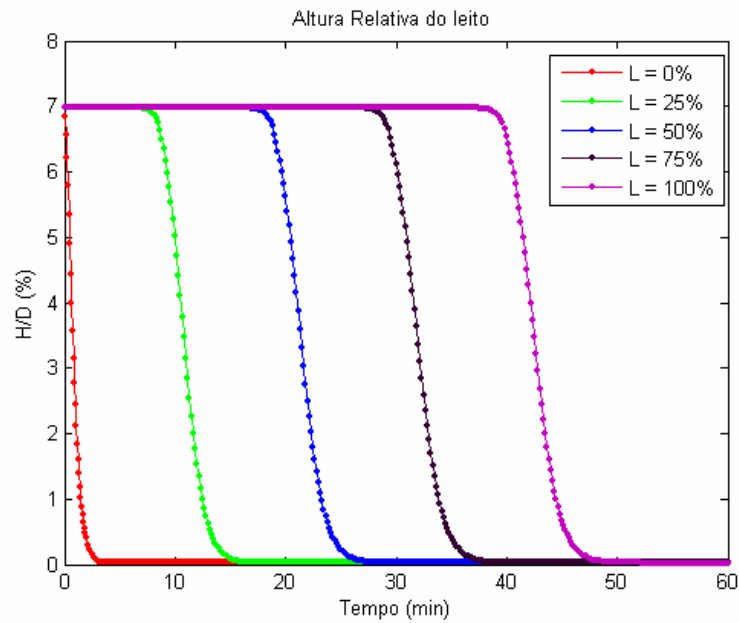


Figura 5.16 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto.

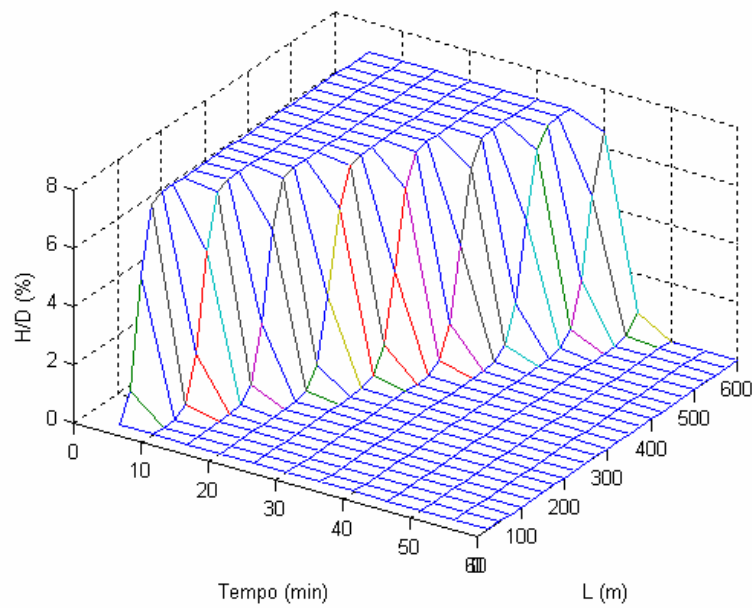


Figura 5.17 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm.

A Figura 5.18 mostra o comportamento da pressão ao longo do comprimento do duto para o caso de erosão (ou remoção) do leito. Como se pode observar, a pressão no anular diminui à medida que o leito vai sendo

removido. Este mesmo comportamento pode ser também observado na Figura 5.19 que mostra o comportamento da pressão no anular ao longo do tempo.

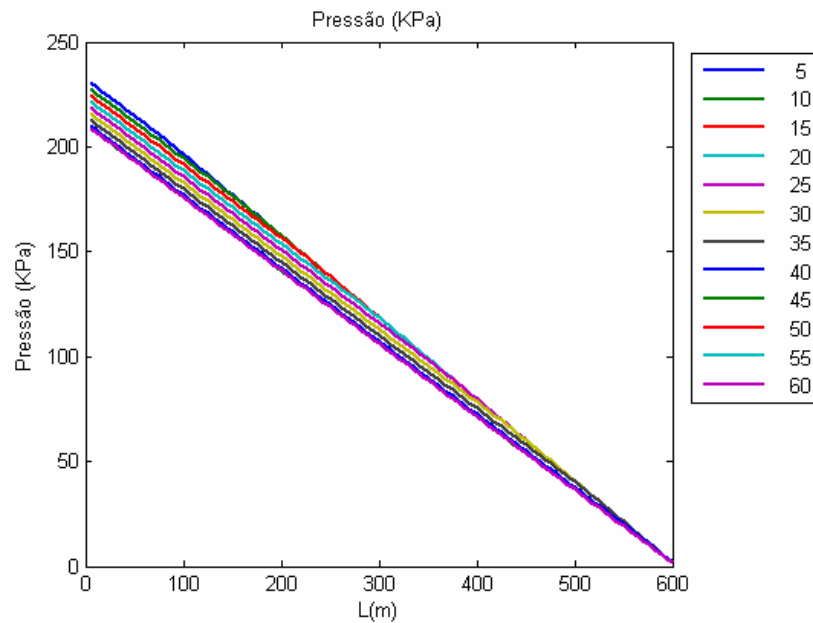


Figura 5.18 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

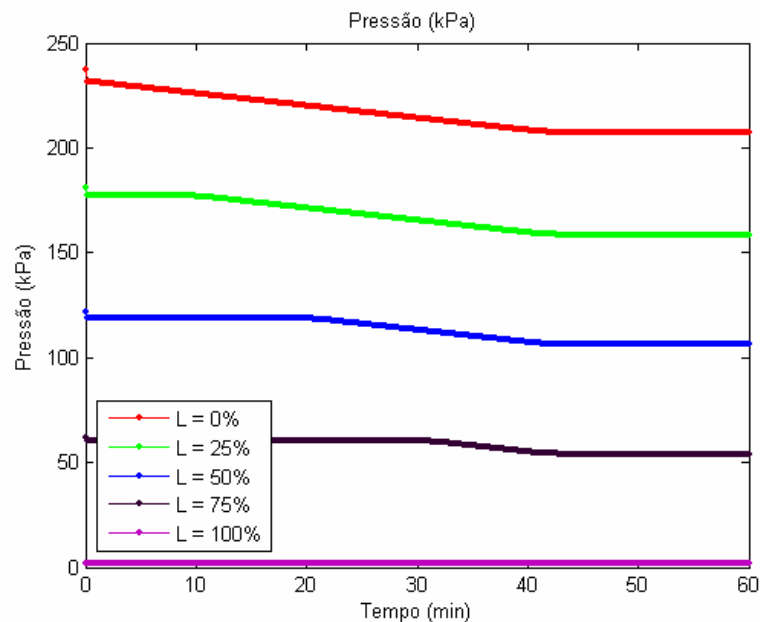


Figura 5.19 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto.

As figuras abaixo (Figura 5.20 e Figura 5.21) mostram as velocidades do líquido e do sólido no leito ao longo do comprimento do duto. Como se pode notar, o fluido e os cascalhos se movem praticamente à mesma velocidade. A Figura 5.22 mostra o comportamento da velocidade do fluido ao longo do tempo. O perfil de velocidades no leito comportou-se como esperado, ou seja, a velocidade do leito aumenta à medida que o leito vai sendo removido.

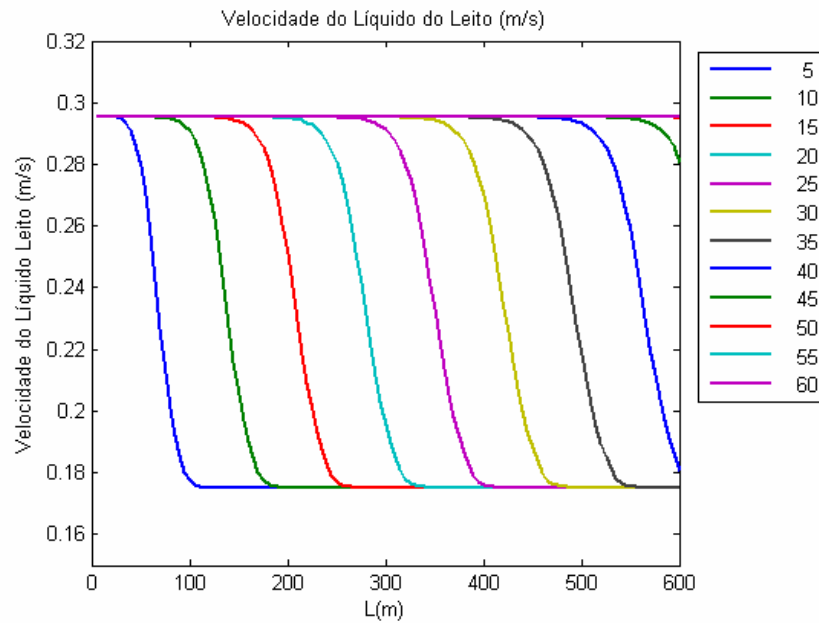


Figura 5.20 – Velocidade do líquido no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

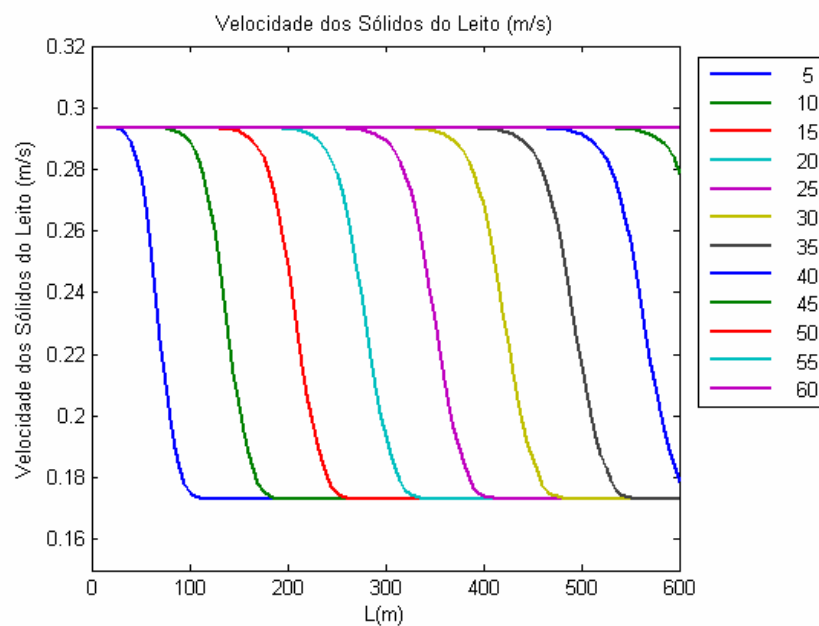


Figura 5.21 – Velocidade dos sólidos no leito ao longo do comprimento, em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

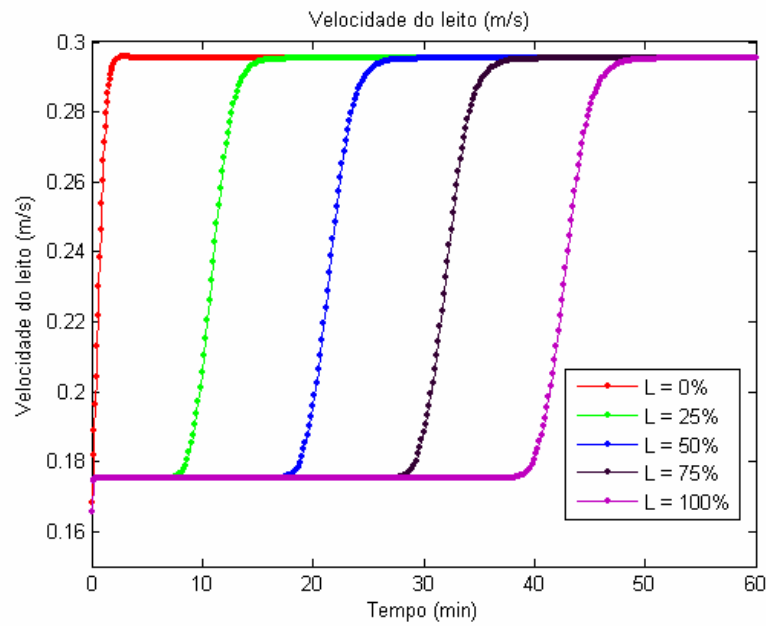


Figura 5.22 – Velocidade do líquido no leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto.

As figuras abaixo (Figura 5.23 e Figura 5.24) mostram as velocidades dos sólidos e do líquido na suspensão. Como se pode notar, existe uma pequena diferença entre as velocidades do sólido e do líquido na suspensão. Esta diferença é devido ao deslizamento entre as fases na suspensão.

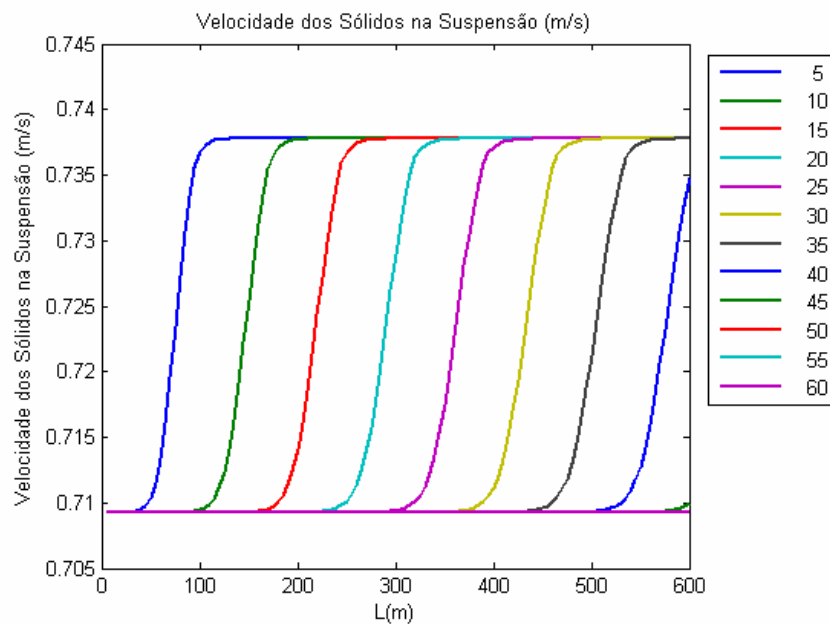


Figura 5.23 – Velocidade dos sólidos na suspensão ao longo do comprimento em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

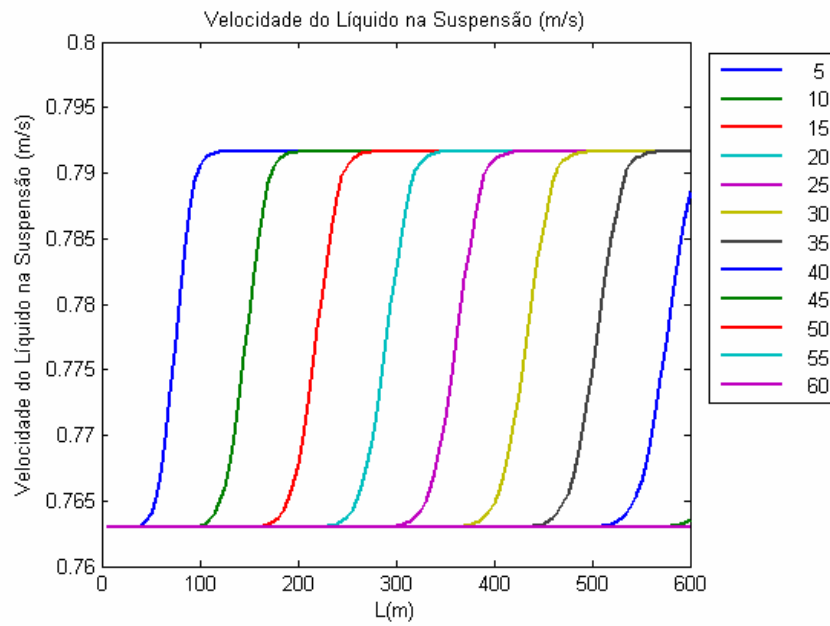


Figura 5.24 – Velocidade do líquido na suspensão ao longo do comprimento em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

A Figura 5.25 mostra a velocidade do líquido na suspensão ao longo do tempo. A velocidade do fluido decresce à medida que o leito de cascalhos vai sendo removido. Isto ocorre porque a área da suspensão aumenta, diminuindo assim, a velocidade do fluido nesta região.

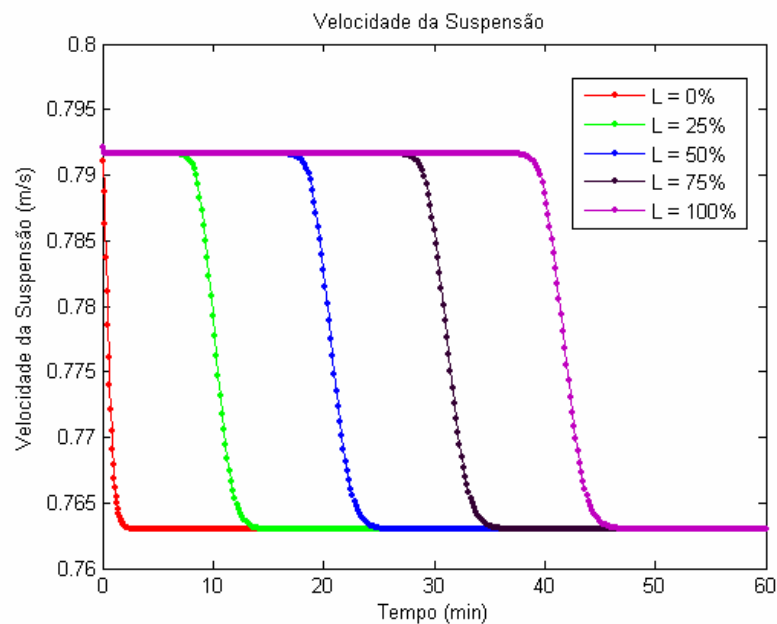


Figura 5.25 – Velocidade do líquido na suspensão ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 300 gpm, para cinco seções do duto.

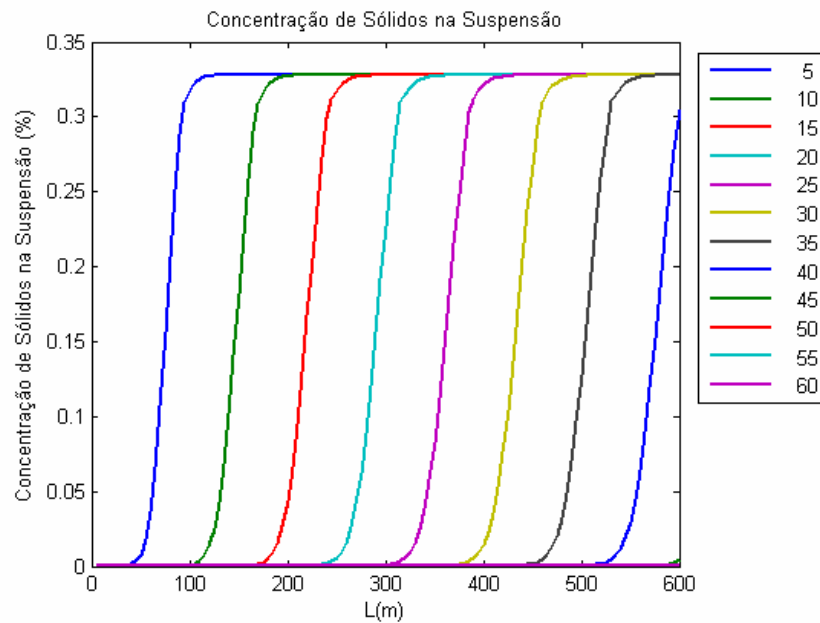


Figura 5.26 – Concentração de sólidos na suspensão em intervalos de 5 minutos, para uma vazão de fluido de 300 gpm.

5.3. Aumento da taxa de penetração

Neste exemplo, podemos observar uma situação onde a taxa de penetração é aumentada. Neste caso, a taxa de penetração sobe de 10 m/h para 20 m/h em um intervalo de tempo de 30 minutos, conforme mostrado na Figura 5.27. A vazão utilizada foi de 250 gpm. Esta é uma situação comum em casos reais, pois a taxa de penetração não é um parâmetro constante ao longo da perfuração.

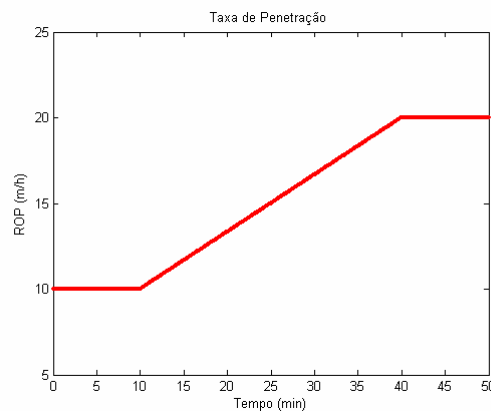


Figura 5.27 – Taxa de penetração ao longo do tempo.

A Figura 5.28 mostra o comportamento da altura do leito ao longo da seção do duto. O comportamento das curvas sofre uma modificação aos 10 minutos, momento este onde a taxa de penetração começa a aumentar de 10 para 20 m/h. Na Figura 5.29, onde é apresentada a curva de variação da altura do leito com o tempo, este comportamento pode ser visto mais claramente. A Figura 5.30 ilustra o comportamento ao longo do comprimento e do tempo.

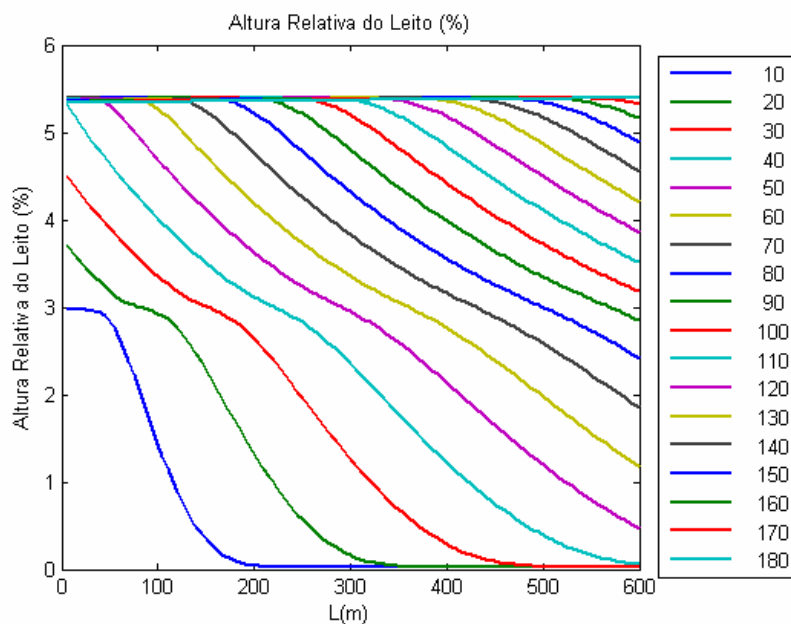


Figura 5.28 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de fluido de 250 gpm.

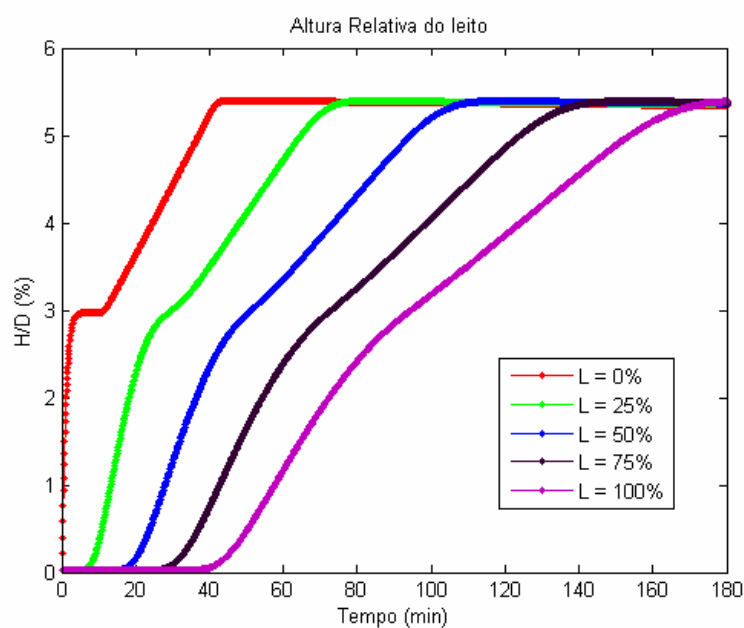


Figura 5.29 – Altura de leito ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 250 gpm, para cinco seções do duto.

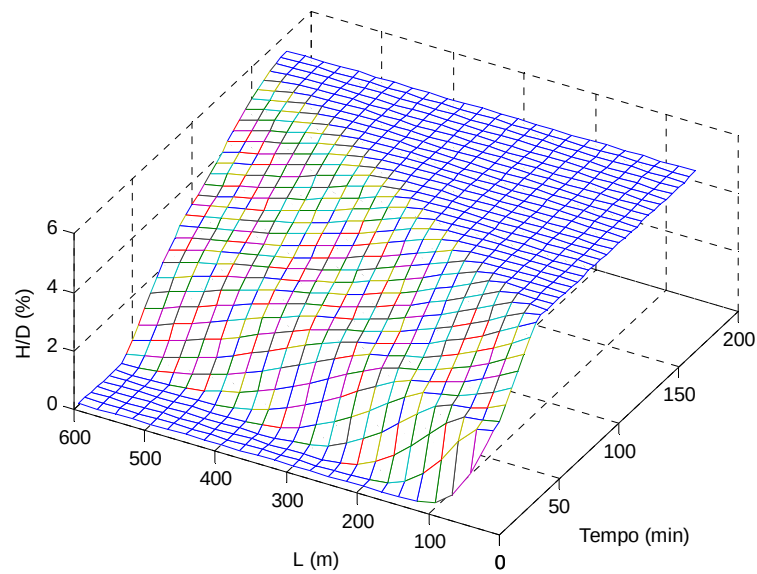


Figura 5.30 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo.

A Figura 5.31 apresenta a variação de pressão ao longo do comprimento e como esperado, mostra o aumento da pressão na medida em que o leito cresce. A Figura 5.32 mostra este comportamento ao longo do tempo para as diversas seções já definidas anteriormente.

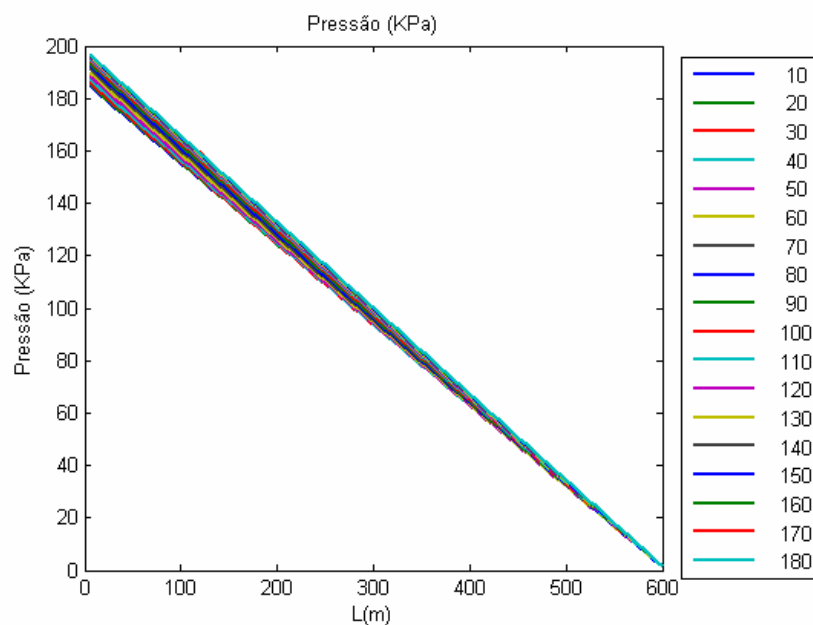


Figura 5.31 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para uma vazão de fluido de 250 gpm.

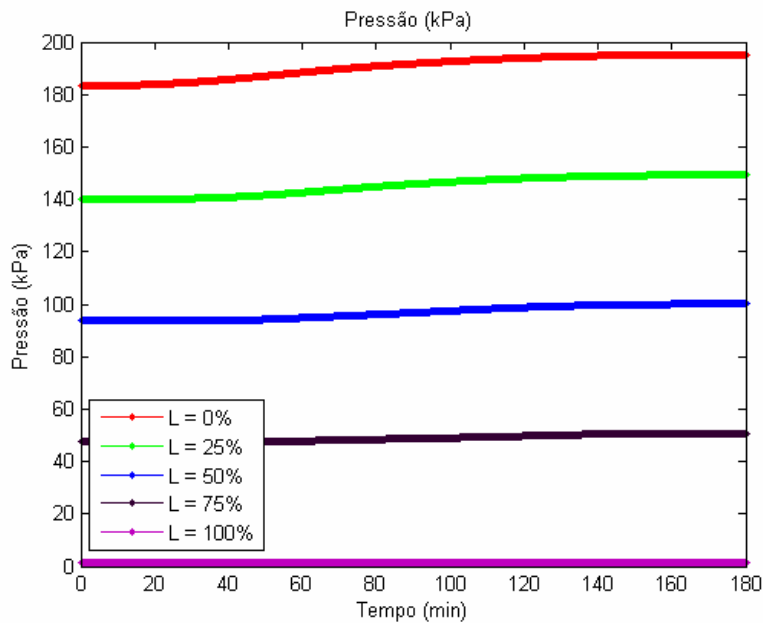


Figura 5.32 – Pressão no anular ao longo do tempo para uma vazão de fluido de 250 gpm, para cinco seções do duto.

5.4.

Aumento da taxa de penetração e da vazão do fluido

Este exemplo mostra um caso onde a taxa de penetração é aumentada de 10 para 20 m/h e a vazão do fluido de 250 para 300 gpm. O aumento da taxa de penetração ocorreu em um intervalo de 30 minutos, enquanto o aumento da vazão aconteceu em 10 minutos. A Figura 5.33 mostra o comportamento da taxa de penetração e da vazão ao longo do tempo.

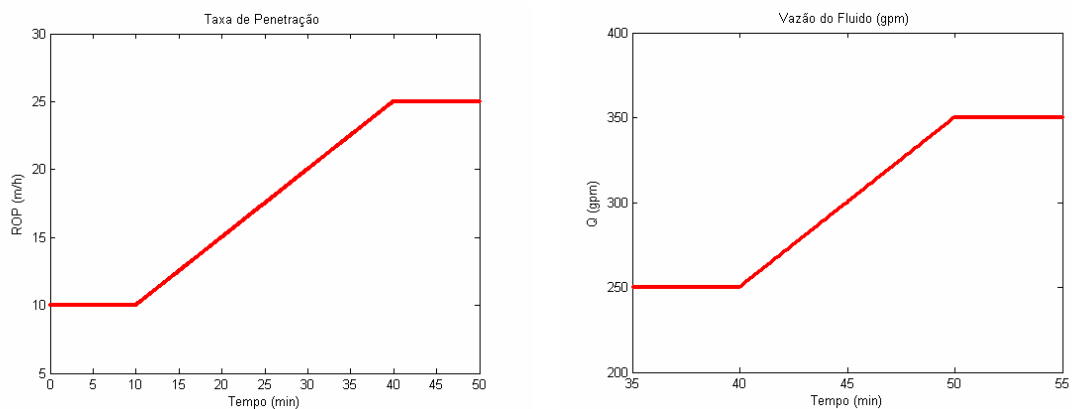


Figura 5.33 – Variação da taxa de penetração e da vazão do fluido ao longo do tempo.

Na Figura 5.34 pode-se observar o comportamento do leito ao longo do comprimento do duto. Nota-se a mudança de comportamento quando a taxa de penetração aumenta (a partir de 10 minutos) e uma mudança maior quando a vazão do fluido cresce (a partir de 40 minutos). Na Figura 5.35 estas mudanças nos parâmetros de entrada são observadas mais claramente. Pode-se notar cada uma das variações impostas ao problema.

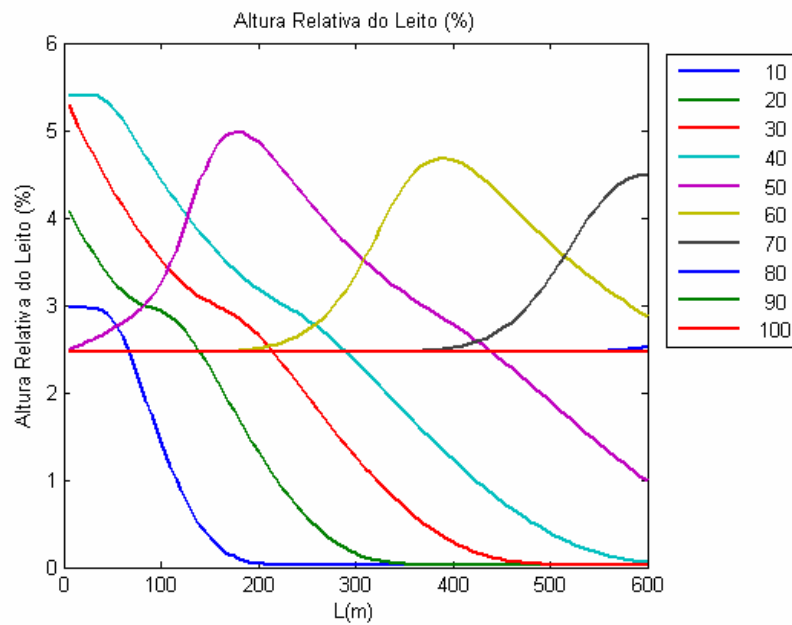


Figura 5.34 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm.

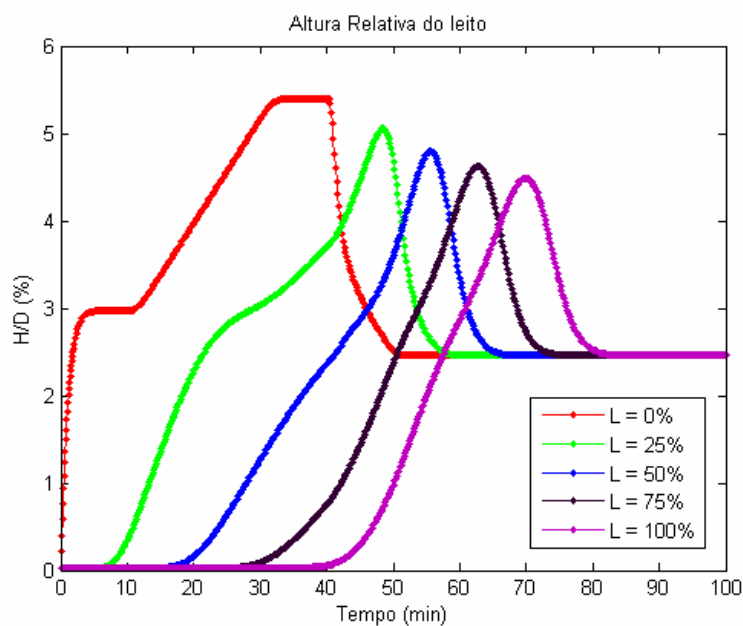


Figura 5.35 – Altura de leito ao longo do tempo para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm para cinco seções do duto.

A Figura 5.36 mostra o comportamento descrito ao longo do comprimento e do tempo.

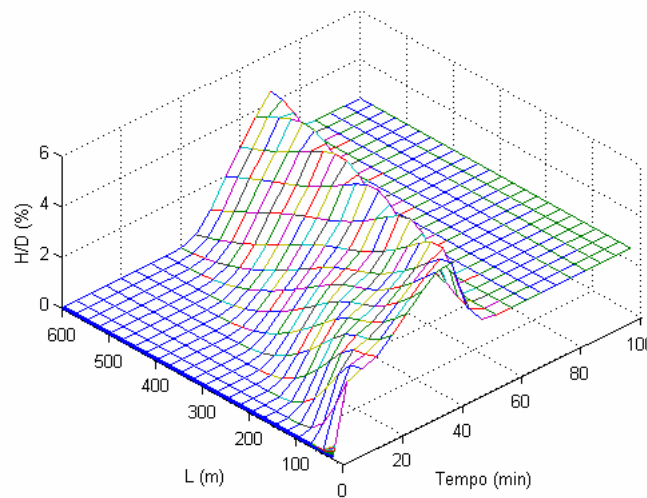


Figura 5.36 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo para um aumento da taxa de penetração de 10 para 20 m/h e da vazão do fluido de 250 para 350 gpm.

A Figura 5.37 apresenta o comportamento da pressão ao longo do comprimento do duto e mostra que um aumento na vazão de fluido provoca um aumento considerável na pressão comparado ao aumento provocado pelo acréscimo da taxa de penetração. Este comportamento pode também ser observado na Figura 5.38 que mostra a variação da pressão ao longo do tempo para diversas seções do duto.

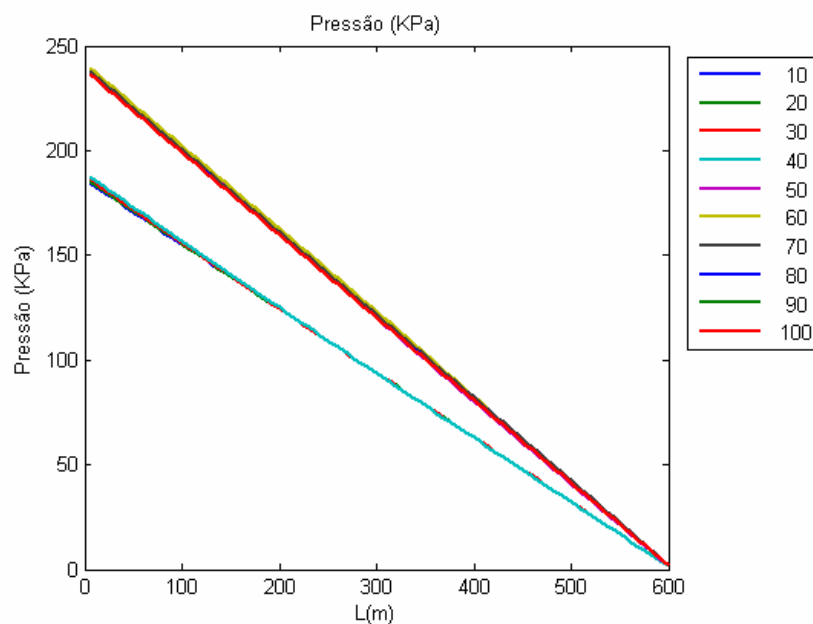


Figura 5.37 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm.

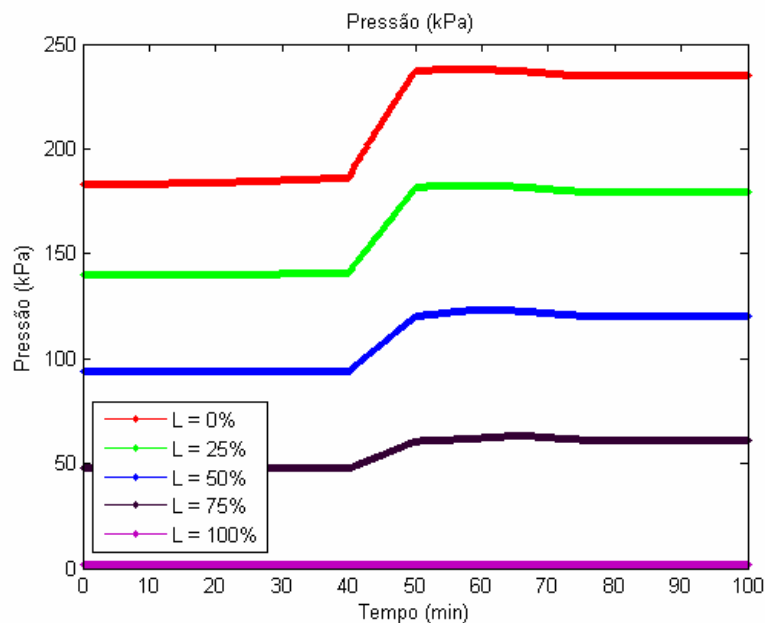


Figura 5.38 – Pressão no anular ao longo do tempo para taxa de penetração de 10 e 20 m/h e vazão do fluido de 250 e 300 gpm para cinco seções do duto.

5.5.

Aumento da taxa de penetração e circulação do fluido

Este exemplo mostra o aumento da taxa de penetração de 10 para 20 m/h, com uma vazão do fluido de 250 gpm. Após 20 minutos, iniciou-se uma operação conhecida como circulação do poço, onde o avanço da broca é interrompido e somente o fluido de perfuração circula, promovendo uma remoção dos cascalhos que estavam depositados. A Figura 5.39 mostra o comportamento da taxa de penetração com o tempo.

A Figura 5.40 mostra o comportamento da altura do leito ao longo do comprimento do duto e a Figura 5.41 ao longo do tempo. Como se pode observar, o leito aumenta enquanto a taxa de penetração está crescendo até que começa a estabilizar, em seguida, começa a decrescer, o que corresponde ao período em que a taxa de penetração está decrescendo e continua com este comportamento até que é totalmente removido.

A Figura 5.42 mostra este comportamento ao longo do comprimento e do tempo.

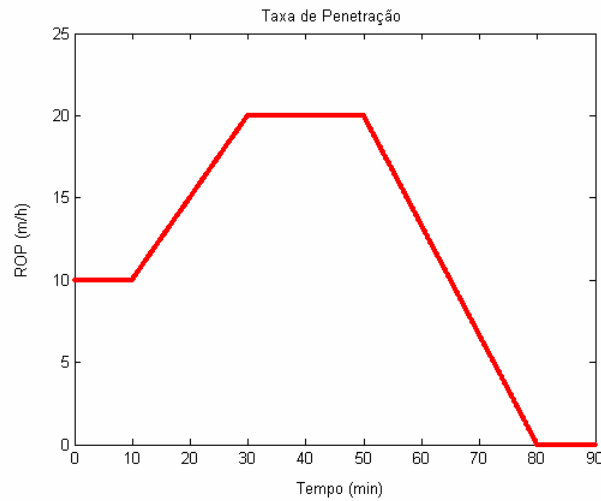


Figura 5.39 – Variação da taxa de penetração ao longo do tempo.

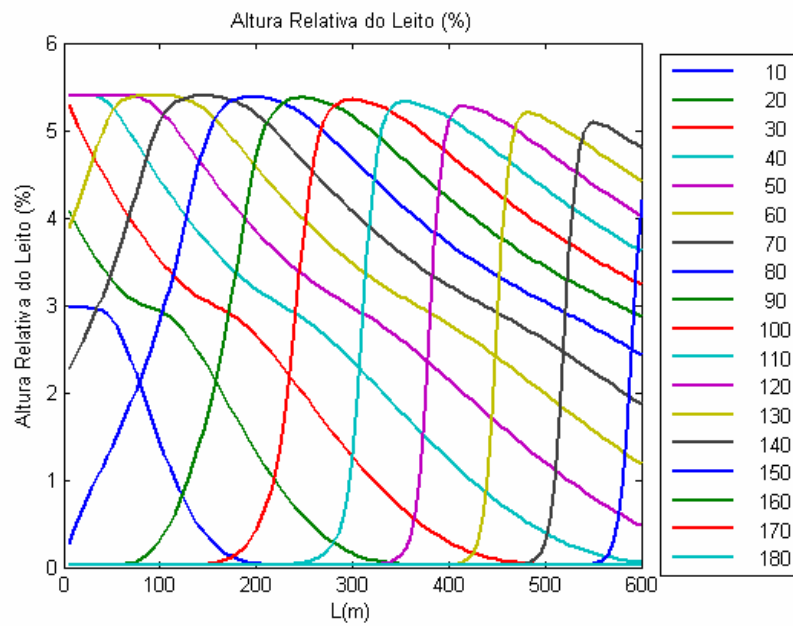


Figura 5.40 – Altura de leito ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.

As figuras (Figura 5.43 e Figura 5.44) mostram a resposta da pressão a estas variações na taxa de penetração ao longo do comprimento e ao longo do tempo. Como se pode notar há um aumento na pressão à medida que o leito está crescendo e um decréscimo à medida que o leito está decrescendo.

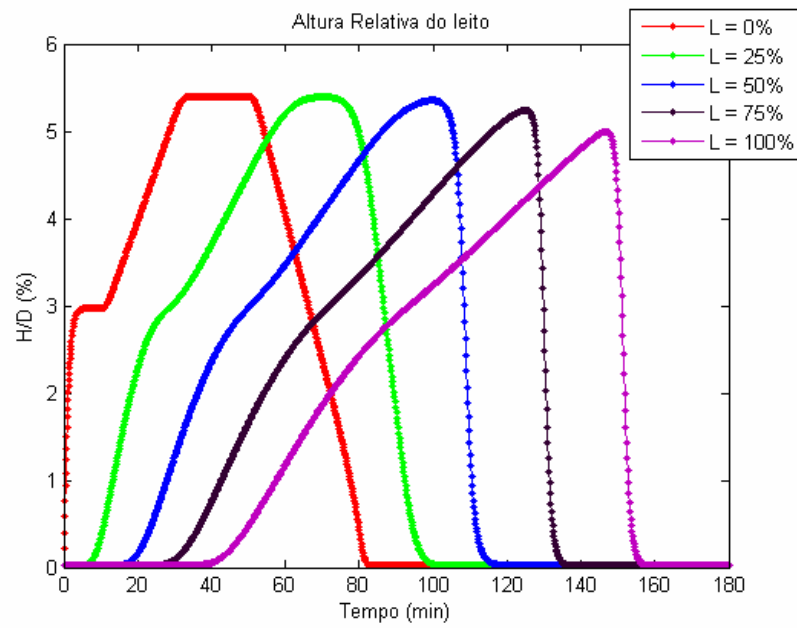


Figura 5.41 – Altura de leito ao longo do tempo variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero para cinco seções do duto.

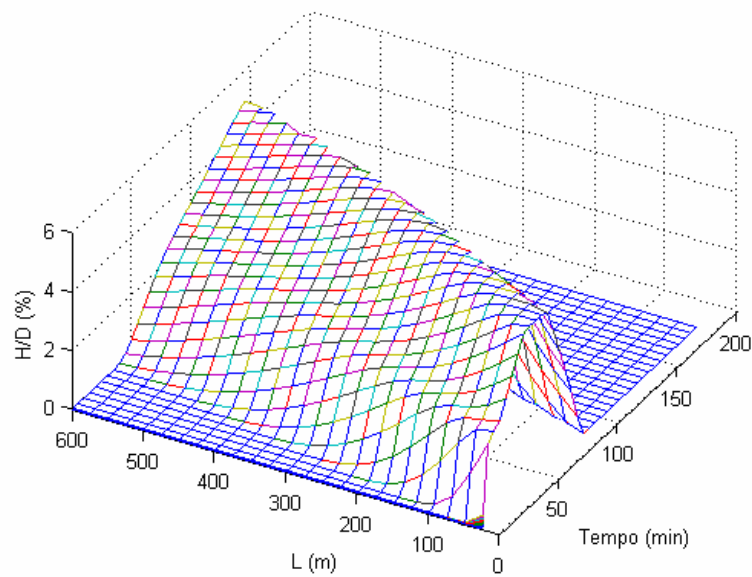


Figura 5.42 – Altura de leito ao longo do comprimento e do tempo, para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.

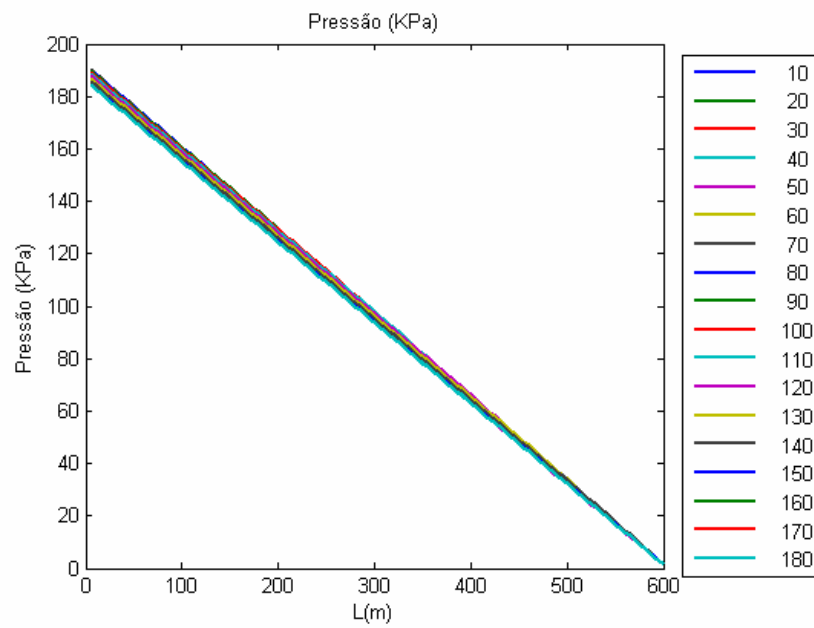


Figura 5.43 – Pressão no anular ao longo do comprimento, em intervalos de 10 minutos, para taxa de penetração de variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero.

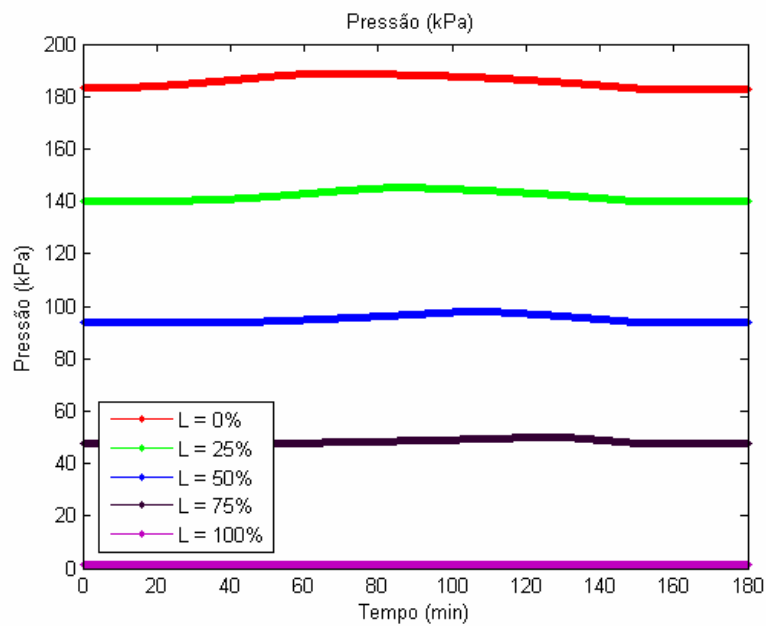


Figura 5.44 – Pressão no anular ao longo do tempo para taxa de penetração variando de 10 a 20 m/h e de 20 m/h a zero para cinco seções do duto.

5.6. Influência da excentricidade da coluna

Como mencionado anteriormente, a excentricidade da coluna de perfuração possui um grande impacto na solução do problema. Assim, da Figura 5.45 pode-se observar esta influência. Quando a excentricidade da coluna é igual à unidade, isto quer dizer, a coluna de perfuração está totalmente encostada no revestimento, a altura do leito cresce consideravelmente quando comparada às demais excentricidades. Estas variações na altura do leito são totalmente esperadas, uma vez que à medida que a coluna vai deixando de se apoiar no revestimento, vai permitindo que a velocidade no leito seja maior e seja capaz de carrear os cascalhos que tendem a se depositar.

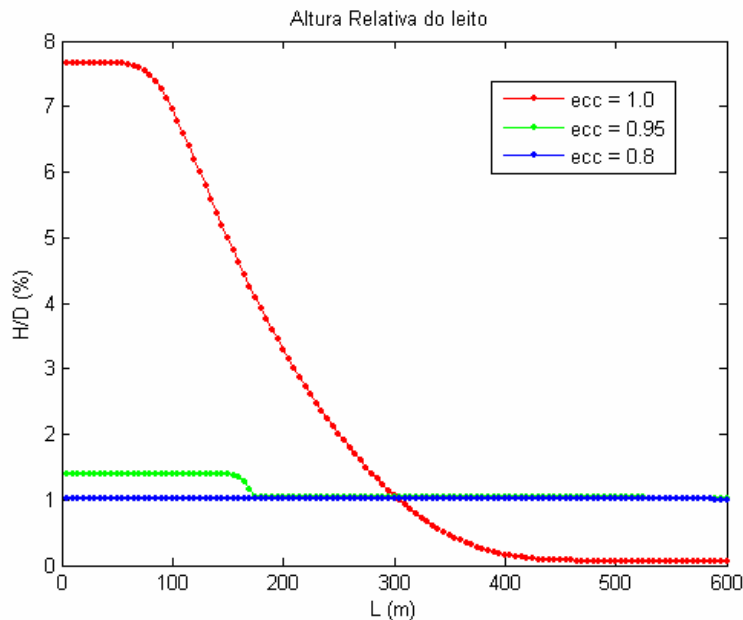


Figura 5.45 – Influência da excentricidade da coluna na altura do leito.

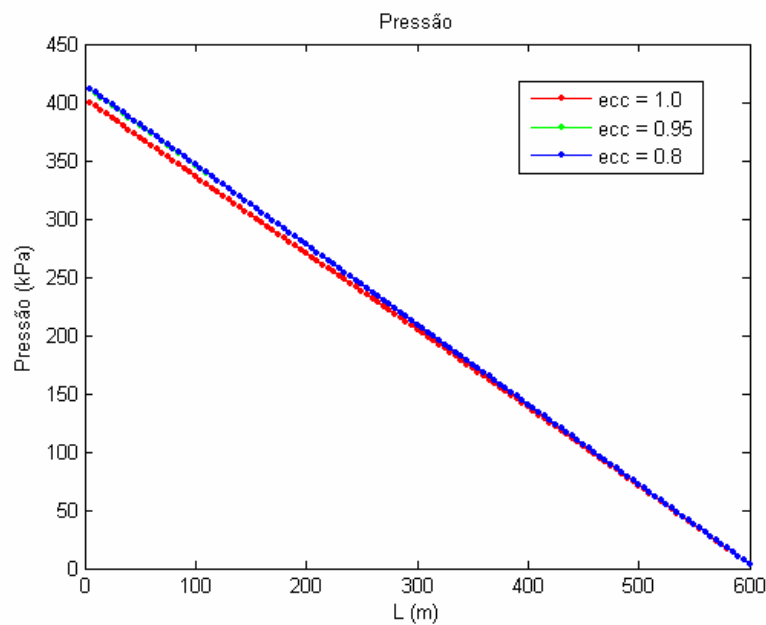


Figura 5.46 – Influência da excentricidade da coluna na pressão.

5.7.

Influência da inclinação do duto

A inclinação do duto é um parâmetro que possui uma influência significativa na altura do leito. A Figura 5.47 mostra as inclinações do duto consideradas neste exemplo e a Figura 5.48 ilustra a variação da altura do leito à medida que o duto vai variando a inclinação. Como se pode observar quanto maior a inclinação do duto, maior a capacidade de remoção dos cascalhos,

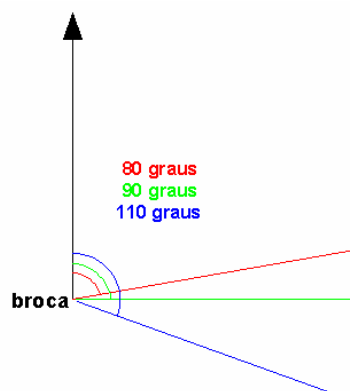


Figura 5.47 – Inclinações do duto.

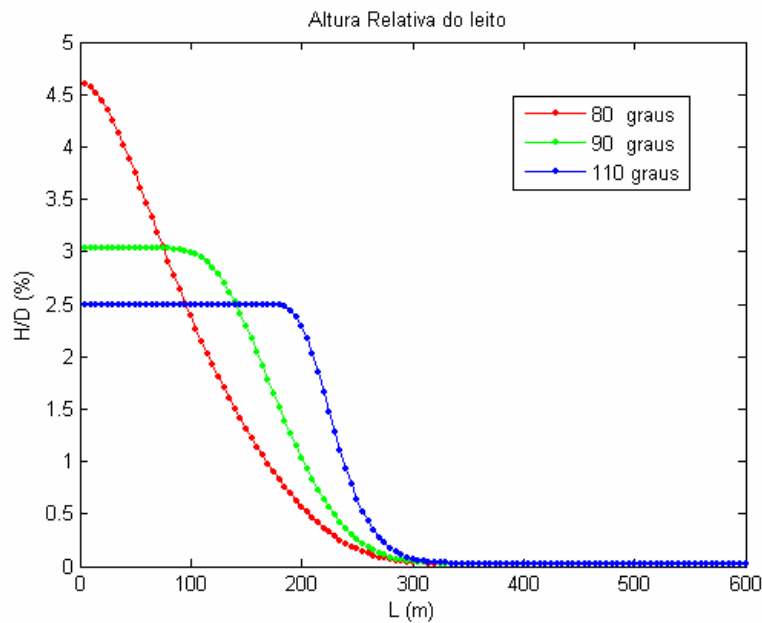


Figura 5.48 – Influência da inclinação do duto na altura do leito.

5.8. Influência do deslizamento sólido líquido

Este exemplo mostra a influência do deslizamento sólido-líquido no leito e na suspensão. Este exemplo foi gerado considerando os parâmetros da Tabela 5.1, vazão do fluido de 250 gpm. As simulações foram realizadas considerando e não o deslizamento entre as fases sólido-líquido. Como se pode notar na Figura 5.49 há uma pequena diferença entre os resultados. A altura do leito é um pouco maior no caso em que se considera o deslizamento. Podemos dizer então que é mais favorável à segurança considerar o deslizamento entre as fases. Por outro lado, esta diferença é muito pequena e pode não justificar o esforço computacional desta consideração.

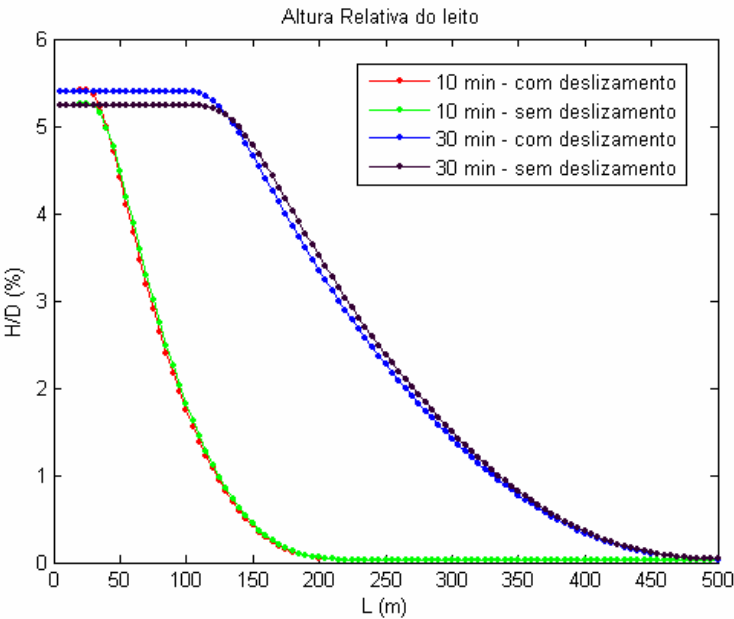


Figura 5.49 – Influência do deslizamento entre as fases na altura do leito.

5.9.
Influência dos parâmetros reológicos

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos parâmetros reológicos **K** (índice de consistência do fluido) e **n** (índice de fluxo) para o fluido que se comporta segundo o modelo de Potência. O valor de **K** indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento, ou seja, quanto maior o valor de **K**, mais “consistente” o fluido será e o valor de **n** indica fisicamente o afastamento do fluido do modelo Newtoniano. Se o valor de **n** se aproxima da unidade, então o fluido está próximo do comportamento de um fluido Newtoniano.

Tabela 5.2 – Parâmetros reológicos considerados.

	K (Pa.s ⁿ)	n (adm)
Reologia 1	0,3699	0,68
Reologia 2	0,5484	0,68
Reologia 3	0,8108	0.68

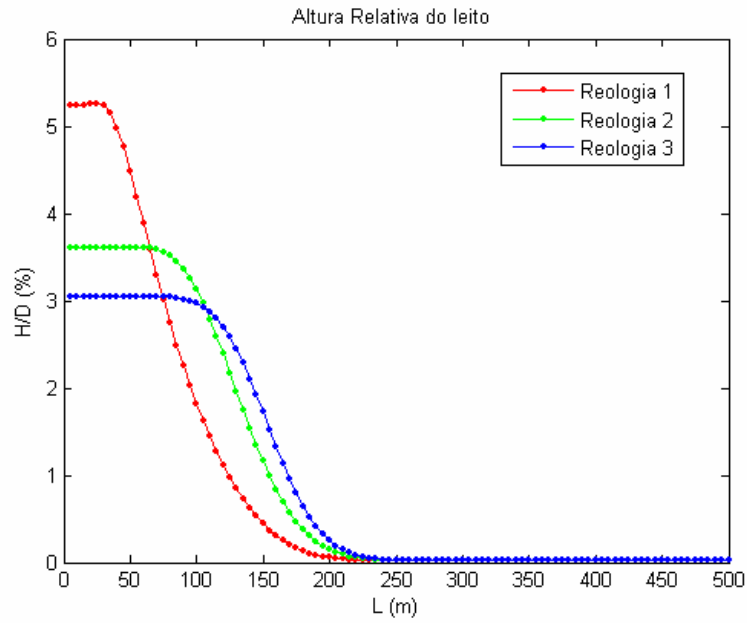


Figura 5.50 – Influência da reologia do fluido na altura do leito.

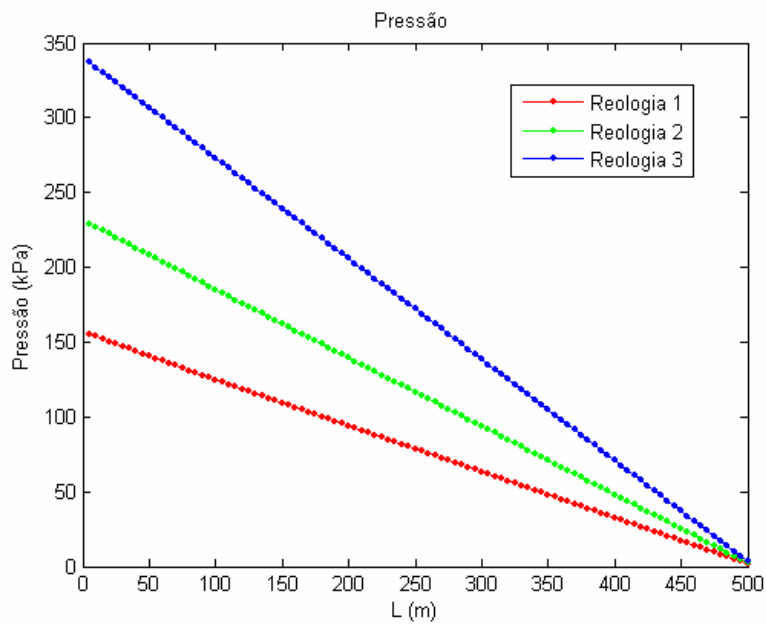


Figura 5.51 – Influência da reologia do fluido na pressão.

Como se pode observar da Figura 5.50 a remoção dos cascalhos é melhor para o fluido mais viscoso, o que nos leva, em uma primeira análise a afirmar que quanto mais viscoso o fluido, melhor a remoção dos sólidos. Mas este tipo de análise não pode ser feita analisando somente a quantidade de sólidos removidos, porque como se pode observar na Figura 5.51, o aumento na viscosidade do fluido eleva consideravelmente as pressões no anular. Desta

forma pode-se dizer que o estudo do fluido deve levar em conta outros fatores além da eficiência em remover os sólidos.

5.10. Influência do fator de atrito nas paredes

Este exemplo mostra como o fator de atrito entre as fases e a parede do duto influencia na altura de leito e na pressão. Foram realizadas quatro análises considerando os parâmetros descritos na Tabela 5.1 e variando somente o fator de atrito de fanning considerado na equação de perda de carga. Os valores do fator de atrito e os resultados são mostrados nas figuras abaixo (Figura 5.52 e Figura 5.53).

O fator de atrito nas paredes influencia muito pouco na altura do leito (Figura 5.52), mas possui um impacto considerável na distribuição da pressão (Figura 5.53). Este comportamento é esperado considerando que este fator de atrito influencia diretamente no cálculo das perdas de carga no anular.

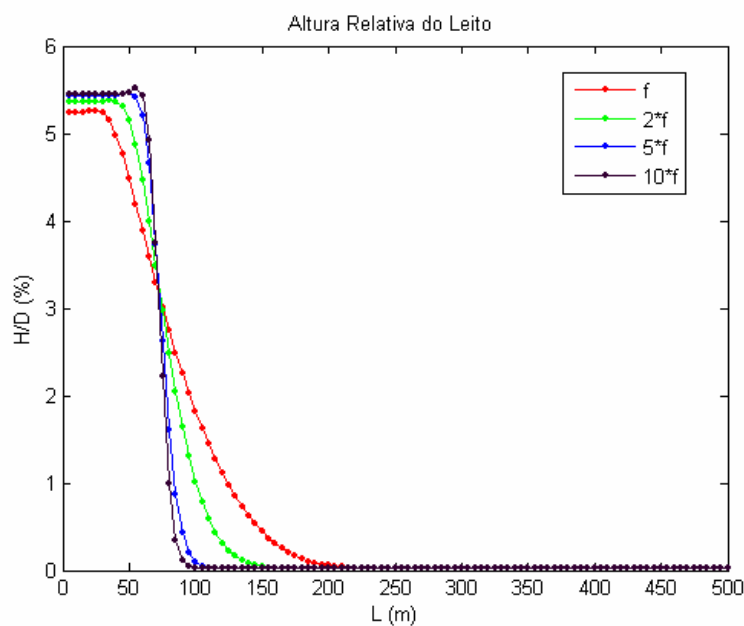


Figura 5.52 – Influência do fator de atrito nas paredes na altura do leito.

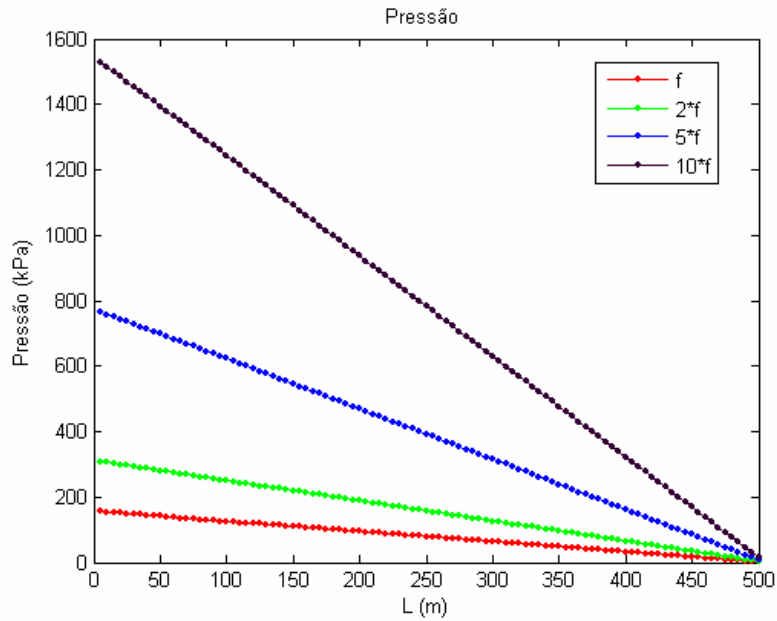


Figura 5.53 – Influência do fator de atrito nas paredes na pressão.

5.11. Influência do fator de atrito na interface

O exemplo mostra a influência do fator de atrito na interface na altura do leito e na pressão. A Figura 5.54 mostra que este parâmetro influencia consideravelmente a altura do leito. Quanto maior o fator de atrito na interface entre as camadas, maior será a capacidade do líquido de arrastar o sólido.

Por outro lado, este parâmetro não possui influência considerável na pressão, conforme indicado pela Figura 5.55.

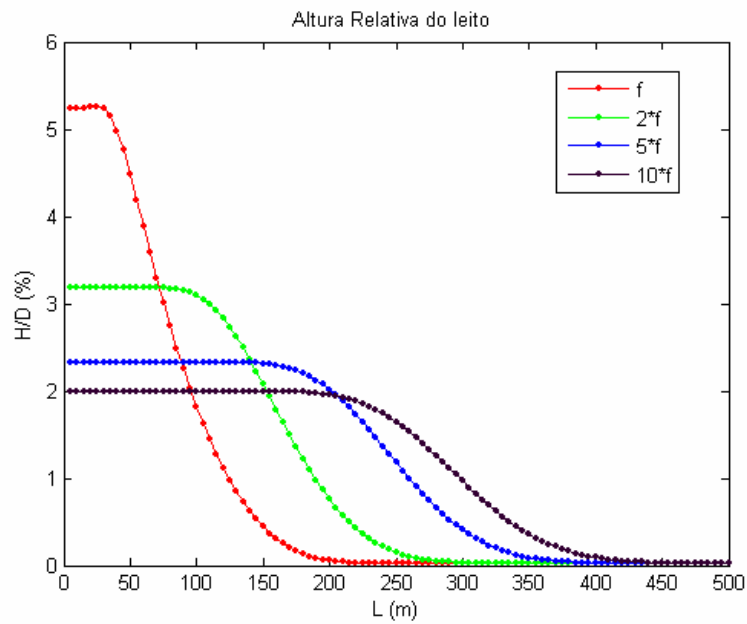


Figura 5.54 – Influência do fator de atrito na interface na altura do leito.

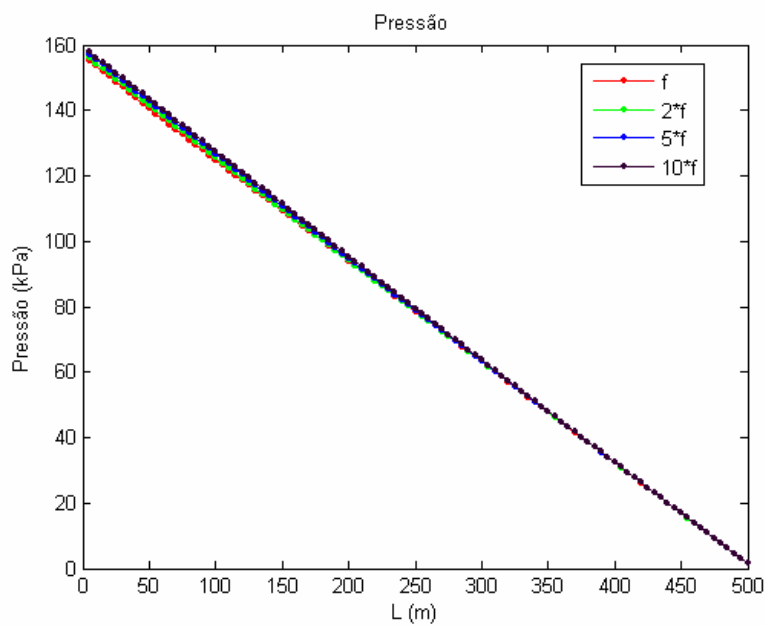


Figura 5.55 – Influência do fator de atrito na interface na pressão.