

6

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou como objetivo principal estudar e propor um novo mecanismo para aumentar a taxa de penetração em perfuração de rochas duras.

A vibração axial ou longitudinal é mais severa na perfuração com broca tricônica, sendo essa a broca ideal para se induzir vibração axial à coluna de perfuração. A causa dessa vibração está no fato de que as brocas tricônicas geram uma superfície de corte característica (lóbulos), durante a perfuração, excitando a coluna de modo axial.

No capítulo 2 foi apresentado um modelo da dinâmica axial da coluna de perfuração, proposto por Dareing em 1968 [8]. A partir deste modelo, foi possível compreender o comportamento axial dos tubos de perfuração e do BHA separadamente. Através deste modelo, concluiu-se que a vibração axial da coluna de perfuração é gerada basicamente pelos tubos de perfuração, uma vez que a rigidez dos mesmos é muito menor que a rigidez do BHA.

No capítulo 3 foi apresentada uma breve revisão sobre impacto, apresentando as diferentes abordagens e os principais modelos de impacto utilizados atualmente. Neste capítulo procurou-se focar na proposta de um modelo analítico que descrevesse satisfatoriamente o comportamento do dispositivo, bem como executar um estudo numérico do RIMD. Um modelo de 2 graus de liberdade com amortecimento e impactos foi utilizado para descrever o dispositivo, e a sua eficiência foi comparada com um similar modelo de 2 graus de liberdade sem impacto. O modelo de impacto utilizado é proposto por Hunt e Crossley [16].

A partir da análise do sistema de vibroimpacto, foi mostrado que a presença de impactos alterou a frequência natural do sistema, fato esperado uma vez que impactos alteram a resposta dinâmica de um sistema. Um fato inesperado aconteceu, consistindo no fato de que a presença de impacto fez com que a primeira frequência natural desaparecesse. Numa primeira abordagem os resultados com impacto foram satisfatórios. Na fase de otimização dos parâmetros do RIMD, tornou-se claro que a

força de impacto poderia ser aumentada se a rigidez do dispositivo fosse diminuída. Entretanto, foi mostrado uma transição no comportamento da força de impacto, onde o sistema, numa determinada região de frequência de excitação, migrou de uma condição em período-1 para período-0.5 (um impacto a cada dois ciclos), passando por uma condição de período-1 transitória. Além disso, a força de impacto é maximizada quando a folga também é aumentada. Entretanto, a valor da folga que fornece o valor máximo da força de impacto encontra-se fora do range de aplicação do dispositivo (limitações físicas de forma a construir um dispositivo portátil).

Do ponto de vista teórico, como o sistema é não-linear e não-suave, pode apresentar alguns comportamentos não observáveis em sistemas suaves. Expandindo os valores dos parâmetros para faixas diferentes da encontrada no experimento, a simulação numérica torna-se uma poderosa ferramenta de análise não-linear.

No capítulo 4, foram apresentados a descrição da bancada sobre a qual foram desenvolvidos os ensaios experimentais, as considerações na aquisição e processamento dos sinais, a descrição dos ensaios realizados e os resultados experimentais em si. O aparato experimental procurou representar o comportamento axial da coluna de perfuração e a sua influência no dispositivo de impacto (RIMD), de acordo com as simplificações propostas nos capítulos anteriores.

Para o caso sem impacto, constatou-se que o modelo numérico de 2 graus de liberdade estudado no capítulo 3 foi satisfatório para descrever a dinâmica da bancada experimental dentro da faixa de frequências estabelecida (0 - 50 Hz).

Para o caso com impacto, ao estudar a característica da força de impacto, varrendo a frequência de excitação, percebeu-se que, em todas as configurações, existiu um certo padrão de comportamento do sistema, que pôde ser dividido em faixas de frequência. Nas primeiras frequências de excitação, o impacto caracterizou-se de período-1 (1 impacto por ciclo), passando pela primeira frequência natural. Conforme variou-se a frequência de excitação, além da magnitude da força de impacto variar, a diferença de fase entre a força de excitação (F_0) e a força de impacto (F_i) também variou. Notou-se também que, nesta faixa de frequência, a única variação relevante de aceleração foi causada pelo impacto. Quando não houve impactos entre o RIMD e a superfície, as acelerações observadas foram muito pequenas.

Numa segunda faixa de frequência, o sistema passou por uma mudança de comportamento de impacto, isto é, de período-1 passou para período-0.5 (1 impacto a cada 2 ciclos). Entretanto, as forças de impacto desenvolvidas

nesta faixa de frequência foram muito baixas, levando em conta a ordem de grandeza da força de excitação. Além disso, nesta transição, o sistema passou por um comportamento caótico, quando foi possível verificar intervalos de tempo, em que não houve impacto algum ou vários impactos num único período de oscilação. A segunda ressonância do sistema geralmente apresentou impactos em período-0.5 (1 impacto a cada dois ciclos). Por último, após a segunda frequência natural, a força de impacto tornou-se muito pequena, de forma que os fenômenos observados na segunda faixa de frequência (comportamento caótico), reapareceram aqui.

Para o primeiro modo, praticamente, não houve influência do sistema sobre o *shaker*, fato confirmado pela forma da curva da força de excitação F_0 no domínio do tempo. Entretanto, na faixa de frequência em torno da segunda ressonância, a influência do sistema sobre a excitação tornou-se relevante, levando, inclusive, a fenômenos não esperados, como o de dois impactos consecutivos a cada aproximação do RIMD contra a superfície de contato (4.59).

Por fim, foram comparados os resultados de cada configuração de forma a obter a condição ótima de impacto para cada modo de vibração. E a partir da experiência adquirida com o experimento, recomendou-se trabalhar sempre com a primeira frequência natural do sistema, para aplicações em campo, pois, apesar de desenvolver forças impulsivas menores que no segundo modo, o primeiro modo possui maior estabilidade.

No capítulo 5 foi realizada a comparação numérico-experimental do RIMD. Primeiramente, foram identificados os parâmetros de impacto, a partir de um experimento simples. Em seguida, foi realizada uma análise qualitativa do modelo numérico. Por fim, as simulações foram comparadas com os resultados experimentais, para validação do modelo numérico.

Durante a identificação dos parâmetros de impacto, verificou-se que, o modelo numérico consegue estimar satisfatoriamente o valor máximo da força. Entretanto, o modelo numérico apresenta dois fatores negativos. O primeiro diz respeito à energia retirada do sistema durante o processo de impacto, isto é, a área sob a curva da força de impacto no tempo. O modelo numérico utilizado não é capaz de representar o modelo experimental a partir do momento que a força de impacto passa pelo seu valor máximo.

Outro fato importante diz respeito ao intervalo entre impactos consecutivos. Em ambos os casos (condição inicial de 5 e 7mm), o impacto do caso experimental ocorreu antes do previsto pelo modelo numérico, sendo a diferença de tempo entre o instante do segundo impacto (experimental *versus* numérico) de 0.05s. Esta escala de tempo é muito maior que a

duração do impacto, que é em torno de 0.002s. Portanto, a justificativa para tal fato não reside numa inconsistência do modelo da força de impacto, mas que no sistema real (sistema contínuo), após o choque, a força de impacto (impulsiva) induz vibrações em todos os modos de vibração da viga. Com isso, a energia total do sistema fica distribuída nos diversos modos de vibração, fato este não considerado no modelo numérico, que considera somente um único modo de vibração do sistema.

Analisando os gráficos qualitativamente, tendo como base os resultados experimentais encontrados no capítulo 4, verificamos que o modelo numérico é capaz de reproduzir alguns dos fenômenos encontrados experimentalmente, entre eles: as duas ressonâncias, a diferença entre as forças de impacto máximas para cada modo de vibração, a transição da primeira frequência natural conforme a mudança da folga e a não variação da segunda frequência natural com a folga.

Também verificou-se que a resposta numérica, de certa forma, acompanha os dados experimentais, embora os resultados numéricos aparentam estar “defasados” dos resultados experimentais. Para a primeira ressonância, o modelo numérico consegue reproduzir satisfatoriamente o valor máximo da força de impacto. Entretanto, para o segundo modo, os resultados numéricos não reproduzem o experimento.

Uma outra característica que o modelo não reproduz é o salto não linear [24] da força de impacto após a ressonância, nos casos de folga não nula.

Conforme mencionado no capítulo 4, seguindo a experiência adquirida com a bancada, recomendou-se trabalhar sempre com a primeira frequência natural do sistema, uma vez que, apesar de desenvolver forças impulsivas menores que no segundo modo, o primeiro modo possui maior estabilidade. Com isto, o modelo numérico, embora apresente uma forte simplificação ao considerar somente 2 graus de liberdade, é satisfatório no âmbito de aplicação ao qual estamos interessados.

6.1

Trabalhos futuros

Em ambas as análises, numérica e experimental, a força de impacto encontra-se não embarcada no sistema, isto é, o impacto ocorre sempre contra uma superfície fixa. Entretanto, esta não é a situação real, visto que, uma vez que o RIMD será instalado no BHA da coluna, as forças de impacto estarão agindo no próprio sistema. Numa próxima análise,

o dispositivo de impacto encontrar-se-á embarcada no sistema, mais precisamente impactando contra a viga principal.

No tocante à análise teórica, seria interessante procurar novos modelos de impacto, com o intuito de melhor representar os resultados experimentais. Além disso, é possível melhorar também o modelo que descreve a bancada, incluindo maiores graus de liberdade ao sistema, ou considerando uma modelagem contínua. Por fim, pode-se realizar uma análise não-linear, tanto do modelo numérico, quanto da bancada experimental, utilizando as ferramentas clássicas da área não-linear: diagramas de bifurcação, mapas de Poincaré, bacias de atração etc.