

3

Vibrações na perfuração de poços de petróleo

A coluna de perfuração tem papel fundamental na perfuração de poços de petróleo. Falhas podem adicionar custo demasiado ao processo de extração. São sistemas complexos dinâmicos com inúmeros parâmetros, os quais variam bastante e até mesmo desconhecidos pelo fato de sofrerem alterações à medida que a coluna avança na formação. Esta interação da coluna com o poço e os diferentes tipos de atrito, variando de acordo com os componentes presentes nesta, traz uma grade ampla de comportamento dinâmico complexo. Este comportamento normalmente leva a falhas e/ou queda da performance ótima esperada. Vibrações mecânicas e os efeitos associados a este fenômeno sofridos pela coluna de perfuração são exemplos de uma dinâmica que não é desejada durante esta atividade, pois é uma das maiores causas da falha de componentes.

Vibrações mecânicas em colunas de perfuração são inevitáveis. Seu grau de severidade e suas consequências ao processo dependem do projeto do *bottom-hole assembly* (BHA) – incluindo estabilizadores, tubos de perfuração e a broca – do tipo de formação a ser enfrentado e a seleção adequada dos parâmetros de perfuração, principalmente do peso aplicado na broca, o torque apresentado no sistema de rotação e as velocidades de rotação desenvolvidas pela broca e o sistema de rotação.

As vibrações são uma das principais causas de falhas da coluna de perfuração e seus equipamentos mais sensíveis possuem componentes eletrônicos em seu interior e estão próximos à broca. Estes componentes mais sensíveis sofrem danos devido as altas vibrações e caso venham a falhar já seria motivo suficiente para uma retirada da coluna e troca das ferramentas, pois hoje não é mais possível realizar a perfuração de poços com uma ausência de informações providas por estas ferramentas. Importante ressaltar que este fenômeno também tem sua contribuição na redução da taxa de penetração, influência negativa na orientação da direção do poço, compromete a estabilidade da parede do poço devido a choques laterais e dissipa a energia mecânica inicialmente empregada no corte através da interação broca e formação.

Monitorar os parâmetros de fundo permite uma maior efetividade no controle da dinâmica de perfuração. Por exemplo, uma redução do torque de fundo devido a um enceramento (argila da formação está aderida à broca) de broca ou um aumento dos níveis de vibração que não podem ser vistos em superfície, pois a energia se dissipa até que se chegue à superfície. Este monitoramento das condições próximas da broca permite observar se alterações nos parâmetros aplicados na superfície efetivamente chegaram ao fundo ou o quanto de peso sobre broca e rotação está sendo aplicado na broca. Caso sejam necessárias alterações destes em detrimento a uma tentativa de redução de níveis de vibração, os sensores de fundo vêm a ajudar uma vez que estão muito próximos da broca e é possível observar rapidamente se as alterações foram realmente efetivas. Além de controle da vibração, este monitoramento também é benéfico à taxa de penetração, pois a otimização busca os melhores parâmetros para os diferentes tipos de formação encontrados preservando a broca e aumentando a taxa de penetração.

A ideia de utilizar modelos dinâmicos para otimizar as condições de operação tem sido um desafio desde a década de 50. Diferentes modelos têm sido utilizados, entretanto, estes modelos falharam em descrever o comportamento complexo dinâmico da coluna de perfuração. Devem reproduzir o fenômeno mais relevante e ser simples o suficiente para que seja capaz de análise e controle.

A complexidade das colunas de perfuração de poços de petróleo e práticas de perfuração tornam inviável o uso de metodologias de controle automáticas, que tem o intuito de suprimir o fenômeno de oscilações não desejáveis. Antes de iniciar a operação o modelo de controle proposto pode ajudar o projetista de perfuração a encontrar uma referência de parâmetros de perfuração por profundidade. O projetista de perfuração busca, segundo (LOPEZ, Eva 2010), três principais objetivos de controle durante: obter uma velocidade constante de rotação no topo do sistema de rotação e na broca, reduzir ao máximo as vibrações mecânicas e manter as condições ótimas de operação onde se entende a preservação da estabilidade e com poucos choques entre o BHA e a parede do poço. Em outras palavras este profissional busca um processo de perfuração robusto e controlado.

Fadiga induzida por vibrações severas aparece ao lado de outros eventos, tais como manuseio inadequado de equipamentos, rotação e peso sobre broca

excessivos e ambiente corrosivo, como uma das principais causas de rompimento de colunas de perfuração (CHEVALLIER, 2000). O rompimento da coluna de perfuração é uma das situações mais indesejadas durante a perfuração de um poço. Trata-se de um grave problema não apenas por conta da perda material da coluna, mas principalmente por conta da perda de tempo de sonda, especialmente se levarmos em conta o cenário principal brasileiro, de campos em águas profundas e ultra profundas, nos quais os custos atualmente praticados para operação das sondas é muito alto. A ruptura da coluna representa, no mínimo, a perda de tempo em operações de pescaria que podem se estender por dias. Além disso, pode ocasionar também a necessidade de se efetuar um desvio no poço acima do ponto onde ficou a parte inferior da coluna, tornando-se um evento extremamente oneroso. (SANDOR 2009)

Os principais tipos de vibração podem ser observados na figura 3.1: lateral, torcional e axial. Suas principais características serão detalhadas a seguir.

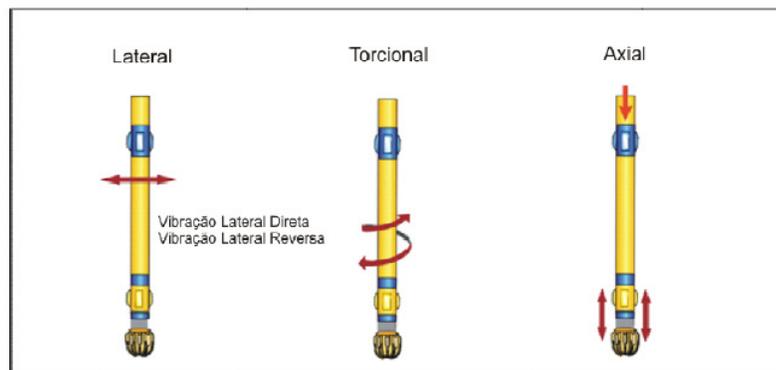


Figura 3.1. Modos de vibração em colunas de perfuração (ROCHA , AZUAGA , et al ., 2008)

3.1

Vibrações axiais

As vibrações do tipo axiais têm sido estudadas por mais de 50 anos e estão mais relacionadas com a interação das ferramentas presentes no BHA com a formação. Correspondem às vibrações com movimentos paralelos ao eixo da coluna. A broca desenvolve um movimento intermitente que a faz perder o contato com a formação e volta a ter contato, literalmente quica no fundo do poço.

Tem influência direta na taxa de penetração devido ao fato de que atua no peso aplicado sobre a broca. Pelo fato de ter um grande potencial de acoplamento com outros modos pode também produzir outras consequências de maneira direta, sendo comum gerar, por exemplo, deslocamentos laterais.

Casos severos de vibrações axiais podem ser observados na superfície, através de movimentos bruscos da coluna e até de “chicoteamento” dos cabos de aço da catarina. No entanto, há também relatos de casos em que colunas foram equipadas com sensores de medição de peso sobre broca de fundo de poço e vibrações axiais de alta amplitude ocorrendo no fundo que não foram detectadas na superfície (CHEVALLIER, 2000)

É um fato conhecido em campo que brocas de cones rolantes têm uma facilidade maior para gerar vibrações axiais do que brocas sem partes móveis. Isso se deve à forma como se dá a interação dos dentes da broca com a formação, quebrando a rocha por compressão, gerando desta forma forças axiais cíclicas. Esse efeito é ainda mais acentuado em poços verticais ou quase verticais. Nesses casos as interações com as paredes do poço, que geram amortecimento de vibrações por atrito, são muito fracas. Assim, a literatura especializada é muito mais rica no tratamento de vibrações axiais por conta de brocas de cones rolantes do que brocas PDC (SANDOR 2009).

É comprovado através de medições tanto de fundo de poço quanto aquelas realizadas em superfície que brocas tricônicas tendem a gerar excitação na direção axial do sistema em uma frequência igual a três vezes a frequência de rotação aplicada à coluna. A causa inicial pode ser um ponto de elevada resistência na formação, causando um deslocamento periódico da broca com uma frequência igual a três vezes a velocidade rotativa no fundo do poço. Se a força periódica resultante sobre a broca estiver quase em fase com o deslocamento imposto, a irregularidade no fundo do poço será amplificada, levando a um padrão de fundo de poço com três lóbulos e a uma vibração axial mantida com uma frequência típica entre 1 e 10Hz. Outros tipos de vibração axial ocorrem por causas como, por exemplo, flutuações de pressão na coluna de perfuração ou o processo de corte das brocas PDC (JANSSEN, 1993)

Vibração axial do BHA é diretamente associada à vibração axial da broca (bit bounce) e pode ser medida apenas pelo acelerômetro no eixo correspondente a esta vibração.

3.2

Vibrações Torcionais

Vibrações do tipo torcionais tem sido estudadas extensivamente nos últimos 20 anos. A maioria destes estudos está focado na análise e controle de oscilações do tipo *stick-slip*.

Existem duas principais causas para o aparecimento de *stick-slip* de oscilação periódica: primeiro a fricção entre a broca e a formação e a natureza do torque gerado nesta broca e segundo as características e tipos de brocas utilizadas. Predominante ocorrem em brocas do tipo PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*)

O fenômeno de *stick-slip* é a oscilação torcional do BHA, que causa uma parada ou redução da rotação aplicada (*stick*) e então a energia acumulada nesta torção é liberada rotacionando o conjunto a velocidades muito maiores que a inicial (*slip*), podendo chegar de três a dez vezes mais rápido que a rotação inicialmente aplicada. Estas rotações da coluna como um todo são “*setadas*” no top drive e o fenômeno identificado através de flutuações no parâmetro torque. Este fenômeno pode ter sua origem na fricção entre os componentes da coluna e a parede do poço ou pelo alto torque gerado durante a tentativa de corte na interação broca e formação. São oscilações torcionais que induzem torques friccionais não-lineares entre broca e a formação. Para um típico comprimento de poço da ordem de 5.000 metros, a perturbação torcional consiste em um pulso propagando-se através dos tubos que atinge até mesmo regiões próximas à mesa rotativa e retorna até a broca.

A vibração torcional pode ser manifestar de dois modos diferentes: transiente e estacionário. A transiente é aquela relacionada com variações repentinas das condições de perfuração como a heterogeneidade da formação e a resposta geralmente cai com o avanço do tempo de atividade. A do tipo estacionário é causada pela ressonância do BHA e é mais propensa a causar *stick-slip* durante a perfuração.

A presença do fluido de perfuração resulta no amortecimento deste tipo de vibração. O fluido atua como um amortecimento viscoso reduzindo as oscilações do BHA, o que se torna uma vantagem durante a atividade de perfuração

Este tipo é frequentemente apontado como um dos modos mais danosos enquanto perfurando a rotações baixas. Como consequência dos efeitos do *stick-slip* tem-se falha prematura dos componentes eletrônicos presentes nos equipamentos de LWD/MWD, desgaste acentuado nos cortadores da broca, redução da vida útil da broca, fadiga (tensões cíclicas) nas conexões dos *drill collars*, redução da taxa de penetração e instabilidade de poço.

Pode ser reconhecido tipicamente por flutuações no parâmetro de torque e rotação próxima a broca. Estes dois parâmetros de perfuração podem ser melhor identificados por sensores de fundo localizados próximos a broca.

Soluções para entendimento, simulação e previsão têm origem na formulação de modelos dinâmicos utilizando parâmetros de perfuração. São realizados através de representações físicas e matemáticas destes parâmetros com uma relação única entre as forças ou excitações de vibração e as respostas do sistema vibratório. Estes modelos incluem o contato entre o BHA e a parede do poço e, em sua maioria, utilizam o método de elementos finitos para solução dos casos.

As vibrações do tipo torcionais estão presentes em 50% do tempo de perfuração (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)

3.3

Vibrações Laterais

A vibração lateral (*whirling*) da coluna de perfuração pode ser descrita como uma rotação anormal da broca ou da coluna de perfuração. Nesse caso, a broca ou a coluna não giram apenas ao longo do seu próprio eixo. Sua rotação é uma combinação de rotação em torno da linha de centro do poço e em torno eixo. Sendo assim, a vibração lateral é um movimento complexo no qual são gerados deslocamentos laterais, choques e atrito com a parede do poço (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Durante a perfuração, o BHA sofre compressão, estando assim suscetível a flambagem e vibrações laterais. As vibrações laterais no topo da coluna podem ser facilmente detectadas por movimentos laterais da catarina conhecidos como “chicotadas” (*whipping*). (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Diferentemente do movimento de “chicotadas”, as vibrações laterais no BHA são um movimento difícil de ser detectado. Durante o fenômeno de vibrações laterais no BHA, os componentes do mesmo sofrem grandes deslocamentos laterais, gerando tensões devido à flexão. Quando tais deslocamentos se tornam muito grandes, ocorre o contato entre partes dos componentes do BHA e a parede do poço, gerando choques laterais. Às vezes, ocorre também um contato praticamente contínuo com a parede do poço, resultando em aumento nas taxas de desgaste da coluna. Todos esses fenômenos aumentam drasticamente a fadiga dos componentes do BHA e, principalmente, de suas conexões. Como o fenômeno é difícil de ser detectado, ocorre um acúmulo de fadiga durante a perfuração, podendo ocorrer a falha de um dos componentes do BHA, fazendo necessária a custosa operação de “pescaria”. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

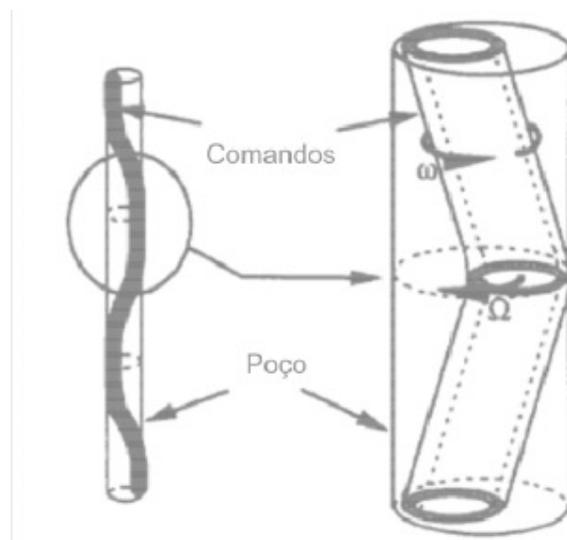


Figura 3.2. Representação esquemática da coluna de perfuração durante a ocorrência de vibrações laterais (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Quando ocorrem as vibrações laterais, o BHA flamba, assumido uma forma do tipo sinuosa, conforme pode ser observado na Figura 3.2. Nesta figura é mostrado em detalhe um pequeno trecho do BHA. A coluna gira com uma velocidade angular ω , mas a sua linha de centro gira a uma velocidade angular Ω . A variável ω corresponde à velocidade angular instantânea da coluna. Sua média temporal é igual à velocidade angular (constante) em superfície RPM (rotações

por minuto). A velocidade angular pode estar no mesmo sentido de ω ou no sentido contrário. No primeiro caso, trata-se de vibração lateral direta (em inglês, *forward whirling*) enquanto no segundo caso de vibração lateral reversa (em inglês, *backward whirling*) (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997).

Um movimento de giro descompassado da coluna e da broca ocorre quando a broca gira fora de seu eixo vertical. Os acelerômetros nas direções transversais (X e Y) medem a componente do vetor de aceleração lateral respectivamente.

O movimento de sentido contrário à rotação da coluna em uma broca PDC se caracteriza por ser um dos maiores fatores de falha prematura deste tipo de broca. Assumindo-se que o a coluna rotaciona como um corpo rígido com a broca, então esta frequência pode ser monitorada com os acelerômetros nos eixos X e Y

Vibrações laterais excessivas podem vir a ocasionar impactos no BHA com a parede do poço. Estima-se que 40% profundidade total perfurada mundialmente é afetada negativamente por vibrações laterais (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)

3.4

Modelos de interação entre broca e a formação rochosa

Segundo TUCKER e WANG (1999b), um dos aspectos que causam mais danos em perfurações é a vibração torcional do conjunto de perfuração ou *stick-slip*. O *stick-slip* é uma das fontes de falhas que reduz a taxa de penetração e aumenta os custos de operação (LOPEZ e SUAREZ, 2004)

PLÁCIDO, SANTOS e GALEANO (2002) identificam os fatores responsáveis pela perda de eficiência no processo de fadiga da coluna, redução da vida da broca, mudança no trajeto de perfuração de poço, e aumento do diâmetro da abertura do poço. Estes são consequência de vibrações durante o processo de perfuração em especial para vibrações torcionais.

Apesar da propagação dos distúrbios torcionais serem governados por equações de ondas lineares, a interação entre broca e superfície rochosa apresenta uma condição de contorno não-linear que pode ser uma das causas de penetração não uniforme (TUCKER e WANG, 2003). O estado de vibração torcional

associado ao torque de atrito, que é função da velocidade angular e do peso da broca, induz a liberação da broca na fase de *slip*.

Um estudo específico feito por SPANOS et al. (1995) desenvolveu um modelo contínuo de interação entre broca e formação para estudar o levantamento da broca nos casos em que ela perde o contato com o solo e entender a modulação de amplitude na formação superficial de corte.

RITTO, SOIZA e SAMPAIO (2009) estudaram a interação não linear entre a broca e formação através de um modelo estocástico em elementos finitos. O modelo considera as principais forças que agem no sistema e com ele são analisadas respostas que representam a condição de perfuração.

Alguns modelos estudados no intuito de trabalhar na melhoria do desempenho do sistema foram desenvolvidos como o utilizado por TRUCKER e WANG (199b) que faz uso de um modelo contínuo para a coluna em contribuição ao atrito entre broca e formação que é função do movimento relativo. Já para o estudo de JANSEN e VAN DEN STEEN (1995) um modelo de atrito simplificado foi utilizado.

Baseado em medições recentes de perfuração em condições estáveis, TRUCKER e WANG (2003) estabelecem correlações para a taxa de penetração, profundidade de corte, torque na broca e rotação na broca. A contribuição do torque de atrito e de corte na broca é função da velocidade e carga na broca segundo o modelo utilizado.

Um estudo mais recente de LOPEZ e SUAREZ (2004) utiliza um modelo de atrito que é o principal diferencial de seu trabalho, adicionando torque viscoso ao torque na broca como alternativa na fase de escorregamento. Desta forma analisa respostas para modelos em função das forças de atrito seco do peso na broca.

Grande parte dos trabalhos citados utilizam modelos contínuos para relacionar o torque na interface broca formação com a velocidade angular da broca. Estes modelos são bastante irrealistas em baixas velocidades, ou seja, na fase *stick* ou na transição entre a fase *stick* e a fase *slip*. Portanto, modelos descontínuos, como aquele utilizado por LOPEZ e SUAREZ (2004), e que levam em conta o equilíbrio na interface durante estas fases críticas, podem trazer importantes contribuições na análise do efeito do *stick-slip* no desempenho do sistema.

3.5

Modelos dinâmicos de perfuração

A modelagem do processo de perfuração de poços de petróleo deve levar em consideração geometrias e propriedades dinâmicas assim como endereçar as vibrações inerentes do processo. Porém, em função das variáveis a serem consideradas, o estudo pode se tornar muito complexo e de alto custo.

Estudos existentes para identificar e corrigir problemas de perfuração utilizam diversos modelos dinâmicos para representar o conjunto BHA e broca. Estes modelos dinâmicos podem ser classificados por seu grau de aproximação e complexidade em função do número de graus de liberdade.

ELSAYED, DREING e VONDERHEIDE (1997) utilizam um modelo torcional e axial para estudar o efeito de vibrações torcionais na estabilidade do sistema através da análise de frequência para algumas condições.

RICHARD, GERMAY e DETOURNAY (2004) também investigaram as oscilações torcionais auto excitáveis, *stick-slip*, no sistema de perfuração com um modelo torcional e axial com dois graus de liberdade. Neste caso, foi estudada uma função que representa o atraso no movimento através do acoplamento dos modos torcionais e axiais, isto pelas leis de interação entre broca e formação rochosa do atrito de contato e processo de corte.

Outro trabalho que estudou o efeito do acoplamento das vibrações torcionais e axiais no desempenho de perfuração foi realizado por TRINDADE e SAMPAIO (2005). Neste caso, com um modelo de elementos finitos, o estudo objetivou avaliar a minimização torcional de *stick-slip* além de analisar estratégias de controle para minimizar o efeito de vibração torcional.

TRUCKER e WANG (199b) investigaram os estados complexos de vibração com o objetivo de controlar o potencial construtivo e destrutivo do sistema. Este estudo utiliza um modelo com seis variáveis contínuas independentes. O modelo é usado para estudar a estabilidade de configurações assimétricas em perfuração vertical com perturbações axiais, torcionais e laterais.

Um modelo contínuo acoplado axial, lateral e torcional, para estudar e controlar vibrações causadas por atrito foi estudado por CHRISTOFOROU e YIGIT (2003).

Alguns estudos focados em estratégias para minimizar a ocorrência de *stick-slip* são encontrados na literatura. Um deles, desenvolvido por LOPEZ e SUAREZ (2004), utiliza um modelo torcional de dois graus de liberdade para reproduzir o fenômeno em diferentes condições de operação com o objetivo de analisar respostas para determinados controles.

Outros dois trabalhos procuram entender a resposta do sistema mediante aplicação de determinadas leis de controle. Um deles foi utilizado por JANSEN e VAN DEN STEEN (1995) faz uso de um modelo torcional de dois graus de liberdade para aplicação de controle através dos parâmetros elétricos do sistema de potência. Outro trabalho foi de TRUCKER e WANG (2003) que estuda formas de aperfeiçoar o desempenho através de um modelo também torcional mostrando os estados de vibração que podem ser vistos com o modelo.

A maioria dos trabalhos trata de propostas que reduzem a vibração torcional, uma vez que esta é a maior causadora de problemas de desempenho. Com isso, técnicas de controle podem ser aplicadas aos modelos e validadas com o objetivo de avaliar seu desempenho na minimização de problemas de vibrações.

3.6

Zona ótima

O grande desafio enfrentado pelos projetistas de perfuração é conseguir maximizar a taxa de penetração com a broca e BHA estáveis. WU, PAEZ e AGNIHOTRI (2010) identificaram que existe uma tendência da coluna de perfuração em unir as ocorrências de vibrações laterais e torcionais. Essa união é fruto de uma escolha inapropriada da broca e de interações indesejadas entre broca, BHA e a formação a ser perfurada. Foi verificado que para um conjunto broca-formação existem valores críticos de peso sobre broca e rotação da coluna que induzem ao fenômeno de vibração lateral e torcional e estes valores podem ser pré-determinados se assumirmos que outras condições de perfuração são conhecidas e fixadas. Os valores críticos que representam as fronteiras de parâmetros de perfuração estável podem ser expostos em um gráfico cartesiano, com rotação da coluna (RPM) no eixo das abcissas e peso sobre broca (WOB) no eixo das ordenadas (vide figura 3.3).

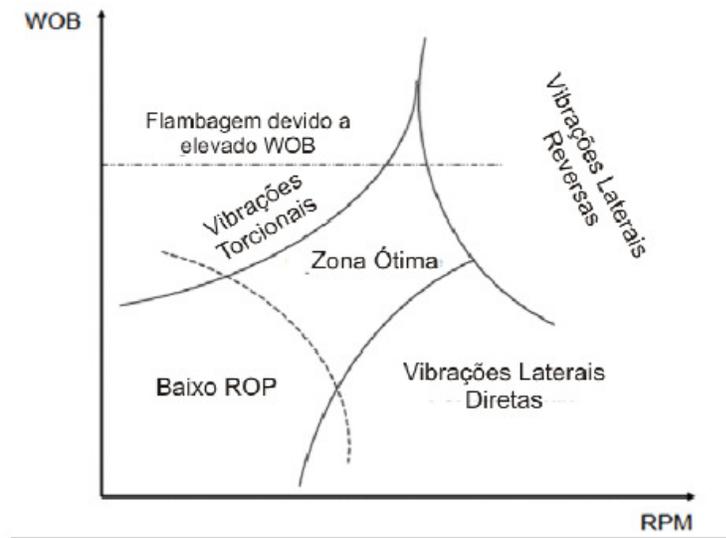


Figura 3.3. Esquemático da zona ótima (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)

Juntas, estas fronteiras delimitam um domínio fechado conhecido como zona ótima. Os parâmetros de peso e rotação dentro desta zona teoricamente garantem estabilidade. A extensão desta zona ótima depende da broca sendo utilizada e das propriedades mecânicas da formação a ser perfurada. A dinâmica da coluna de perfuração reduz esta zona ao criar interações entre a broca e o BHA. Em casos mais extremos estas interações podem fazer com que as fronteiras representando as vibrações laterais e torcionais se cruzem tornando a zona ótima limitada (figura 3.4) ou até mesmo inexistente. Sob estas condições as tentativas de se mitigar as vibrações através da variação de parâmetros de perfuração tende a não obter sucesso.

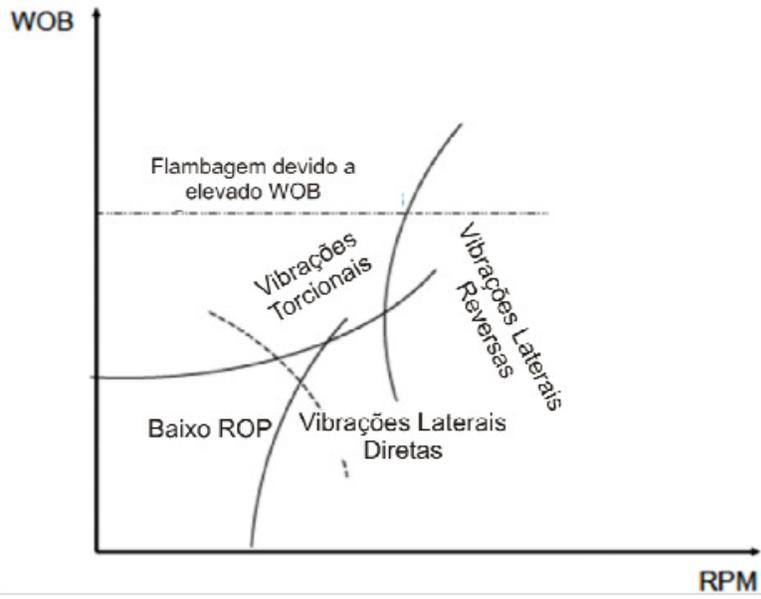


Figura 3.4. Estreitamento da zona ótima (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)