



**Mohara de Oliveira Nascimento**

**Integridade mecânica de revestimentos de poços e filtros  
de areia em intervalos de produção de sólidos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro  
Outubro de 2022



**Mohara de Oliveira Nascimento**

**Integridade mecânica de revestimentos de poços e filtros  
de areia em intervalos de produção de sólidos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof<sup>a</sup>. Deane de Mesquita Roehl**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Dr. Eleazar Cristian Mejia Sanchez**

Instituto Tecgraf / PUC-Rio

**Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Andreia Abreu Diniz de Almeida**

UFF

Rio de Janeiro, 3 de outubro de 2022.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

### **Mohara de Oliveira Nascimento**

Graduou-se em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA – Campus Monte Castelo em 2019. Durante a graduação, foi monitora das disciplinas Topografia Aplicada II e Resistência dos Materiais I. Participou de projetos de iniciação científica e tecnológica dentre eles o de “Análise Linear-Elastica de tensão em ponta de trinca utilizando o Método dos Elementos Finitos”. Ingressou na pós-graduação em março de 2019.

### Ficha Catalográfica

Nascimento, Mohara de Oliveira

Integridade mecânica de revestimentos de poços e filtros de areia em intervalos de produção de sólidos / Mohara de Oliveira Nascimento; orientadora: Deane de Mesquita Roehl. – 2022.

122 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Produção de Sólidos. 3. Estruturas Filtrantes. 4. Integridade Estrutural. 5. Elementos Finitos. 6. Poço I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Integridade mecânica de revestimentos de poços e filtros de areia em intervalos de produção de sólidos.

CDD: 624

## Agradecimentos

A Deus, por todo suporte, conforto e refúgio.

À minha família, em especial aos meus pais, Ivaneide de Oliveira Nascimento e Gilvan de Sousa Nascimento, por serem meus maiores apoiadores e incentivadores, por sempre acreditarem em mim e por todo o auxílio durante a caminhada. Aos meus irmãos, Ivanovick, Mahendra e Ana Vitória, por todo apoio e incentivo.

Ao meu esposo Vinicius Almada por ter compartilhado comigo toda a trajetória de graduação e mestrado, pela troca de conhecimentos e por todo o suporte emocional.

À minha orientadora, Profa. Deane Roehl, por ter me dado a oportunidade de ser sua orientanda, por sua disponibilidade, paciência e confiança. Além de todos os conhecimentos compartilhados, os quais foram essenciais para este trabalho.

Aos integrantes do Grupo de Modelagem e Simulação Multifísica do Instituto Tecgraf, em especial ao Pedro Alcides por ter me auxiliado desde o início da pesquisa sendo sempre solícito e paciente. A Cristian Mejía, Júlio Rueda e Nilthson Valverde, por sempre mostrarem disponibilidade e empenho em sanar minhas dúvidas.

Aos professores da pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial os da área de estruturas. A começar pelo Prof. Raul Rosas e Silva, agradeço por sempre acreditar no meu potencial e por apresentar uma excelente base teórica na disciplina de Teoria da Elasticidade. Ao Prof. Daniel Taissum, pela ótima didática e pelo grau de aprofundamento apresentado nas disciplinas. À Profa. Elisa, por instigar a compreensão da teoria e sua aplicação em problemas práticos. Ao Prof. Luiz Fernando Martha, por possibilitar o estudo e desenvolvimento de softwares para engenharia. Ao professor Luiz Carlos Wrobel, por sua paciência e disponibilidade. E ao Prof. Marcelo Bezerra, por sua orientação na disciplina de Estágio à Docência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



## Resumo

Nascimento, Mohara de Oliveira; Roehl, Deane de Mesquita (Orientadora). **Integridade mecânica de revestimentos de poços e filtros de areia em intervalos de produção de sólidos**. Rio de Janeiro, 2022. 122p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em face à crescente demanda por petróleo e gás e ao alto custo nos processos de exploração e exploração, é imprescindível que se garanta a segurança e a integridade das estruturas pertencentes ao poço. Neste contexto, existem reservatórios localizados em rochas pouco consolidadas ou com cimentação incompleta que presenciam um fenômeno conhecido como produção de sólidos, o qual consiste na desagregação de partículas que ao serem carregadas junto ao fluido de produção podem gerar problemas como a erosão de equipamentos e o entupimento do poço. Com o intuito de mitigar estes problemas é usual que se adotem técnicas de controle mecânicas, que fazem uso de estruturas filtrantes compostas por telas de aço e pacotes granulares. Essas estruturas têm o objetivo de impedir que as partículas produzidas adentrem no poço. O presente trabalho busca compreender o comportamento e a integridade de filtros de areia em situações de campo. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia de modelagem numérica que incorpora a interação rocha – filtro. O modelo foi aplicado a um ensaio efetuado em célula cúbica, onde os resultados foram comparados a fim de avaliar se as considerações adotadas estavam de acordo com a realidade. Como resposta desta análise percebeu-se que as propriedades do pacote granular não possuem um valor definido na literatura e que seria necessário efetuar uma calibração de acordo com as características do material. A calibração mostrou que o pacote granular tem um comportamento não-linear anisotrópico e gerou um conjunto de propriedades que levam a resultados em concordância com o ensaio. Por fim, foi simulado um poço em atividade com depleção, em que foram assumidas uma hipótese de propriedades para o pacote granular e três condições de interfaces entre os componentes, onde foi possível avaliar como essas considerações interferem na integridade mecânica das telas filtrantes e do conjunto de completação do poço.

## **Palavras-chave**

produção de sólidos; filtros de areia; integridade de revestimentos.

## Abstract

Nascimento, Mohara de Oliveira; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor). **Mechanical integrity of wellbore casings and sand screens in solid production intervals**. Rio de Janeiro, 2022. 122p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Due the growing demand for oil and gas and the high cost of exploration and exploitation processes, it is essential to guarantee the safety and the integrity of completion structures that compose a well. In this context, there are reservoir located in poorly consolidated or with incomplete cementation rocks, that experience a phenomenon known as Solid Production which consists in the desegregation of rock particle, that when carried with the production fluid can generate problems as equipment erosion and well plugging. In order to mitigate these problems, it is usual to adopt mechanical control techniques, with the use of sand control equipment as sand screen and gravel pack. These structures are intended to prevent the particles produced from entering the well. The present work seeks to understand the behavior and the mechanical integrity of sand control structures in field situations. With this purpose, a numerical modeling methodology was developed and incorporates the rock-screen interaction. The model was applied to a cubic cell test, where the results were compared in order to evaluate if the considerations were in accordance with reality. As a response to this analysis, it was noticed that the properties of the gravel pack do not have a literature defined value, and that it would be necessary to calibrate they properties in accordance to the characteristics of the material. The calibration showed that the gravel pack has an anisotropic non-linear behavior and, with this assumption, was generated a set of properties that lead to results in agreement with the test. Finally, an active well with depletion was simulated, where one hypothesis was assumed for gravel pack properties and three interface condition between the components were evaluate, as well as the mechanical integrity of the sand screen and the completion structures.

## Keywords

solids production; sand screen; casing integrity.

## Sumário

<b>1 Introdução .....</b>	<b>21</b>
1.1. Panorama Geral .....	21
1.2. Motivação e Justificativa .....	22
1.3. Objetivos.....	22
1.4. Organização da Dissertação.....	23
<b>2 Produção de Sólidos .....</b>	<b>24</b>
2.1. Introdução .....	24
2.2. Mecanismos de produção de sólidos .....	26
2.2.1. Ruptura por Cisalhamento .....	27
2.2.2. Ruptura por Tração .....	29
2.3. Problemas de Produção de Sólidos.....	30
2.4. Controle de Produção de Sólidos.....	32
2.4.1. Métodos não-mecânicos.....	33
2.4.2. Etapas típicas de poços .....	35
2.4.3. Métodos Mecânicos .....	38
2.4.4. Comparação entre os métodos .....	52
<b>3 Modos de falha em revestimentos e filtros de areia.....</b>	<b>55</b>
3.1. Modos de falha em revestimentos .....	55
3.1.1. Cisalhamento.....	55
3.1.2. Flambagem.....	59
3.1.3. Colapso e Rebentamento ( <i>Burst</i> ) .....	62
3.1.4. Tração e Compressão .....	66

3.1.5. Outros modos de falha .....	67
3.2. Modos de falha em filtros de areia .....	68
3.3. Casos notáveis .....	69
3.3.1. Falha por subsidência e compactação em Tyra (Dinamarca) .....	70
3.3.2. Falhas por compactação em arenitos com produção de sólidos no Golfo do México .....	72
<b>4 Modelagem do comportamento do pacote granular .....</b>	<b>73</b>
4.1. Modelagem de Ensaio com célula cúbica.....	73
4.1.1. Instrumentação do Ensaio .....	73
4.1.2. Sequência de carregamento.....	74
4.1.3. Resultado do Ensaio.....	75
4.1.4. Modelagem Numérica.....	76
4.1.5. Resultados .....	90
4.1.6. Sugestão para correção do modelo numérico .....	94
<b>5 Modelo de integridade mecânica do filtro de areia .....</b>	<b>96</b>
5.1. Contexto .....	96
5.2. Metodologia de modelagem .....	98
5.3. Estudo de Caso .....	100
5.3.1. Propriedades dos materiais.....	102
5.3.2. Propriedades dos elementos de interface .....	103
5.3.3. Considerações de modelagem .....	105
5.3.4. Resultados .....	106
<b>6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>112</b>
6.1. Conclusões.....	112
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	113

<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>115</b>
----------	---	------------

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Mecanismo de produção de sólidos (Mahmud et al., 2019). ....	25
Figura 2.2 – Variação das forças $F_h$ e $F_r$ de acordo com o fluxo do fluido, a linha sólida corresponde a $d_g = 100 \mu m$ e a tracejada a $d_g = 10 \mu m$ (Fjaer et al., 2008). ....	27
Figura 2.3 – Círculo de Mohr e tensões no poço: estável, em linha contínua preta e com falha após a depleção, em linha tracejada azul. ....	28
Figura 2.4 – Círculo de Mohr e tensões na parede do poço: estável, em linha contínua preta e com falha após a redução da tensão radial, em linha tracejada vermelha. ....	29
Figura 2.5 – Diagrama com as envoltórias de estabilidade de acordo com os valores de drawdown e gradiente de poropressão (Fjaer et al., 2008). ....	30
Figura 2.6 – Problemas de produção de sólidos: (a) erosão da válvula choke e (b) quantidade de sólidos produzidos em 72 horas no Campo Garon no Delta do Niger (Raghavendra et al., 2014; Ikporo & Sylvester, 2015). ....	31
Figura 2.7 – Etapas de consolidação química (Matanovic et al., 2012). ....	34
Figura 2.8 – Representação esquemática das múltiplas fases de um poço (Rocha e Azevedo, 2009). ....	36
Figura 2.9 – Tipos de completação quanto ao revestimento de produção (Zhu e Furui, 2018). ....	38
Figura 2.10 – Liner rasgado e os diferentes arranjos de furo (Jiménez, 2016; Matanovic et al., 2012). ....	39
Figura 2.11 – Formato dos furos do liner rasgado: (a) reto; (b) cônico (Hebei Shengkai Metal Mesh Cooperation, 2021). ....	40
Figura 2.12 – Telas não expansíveis: (a) wire-wrapped, (b) pre-packed (Bellarby, 2009). ....	41
Figura 2.13 – Tela não expansível do tipo premium (Bellarby, 2009). ....	42
Figura 2.14 – Tela expansível: (a) estado inicial; (b) expandida (Watson & Jones, 2009). ....	42
Figura 2.15 – Tela Endurance Hydraulic Screen: (a) estado inicial; (b) ativada (Coffin & Oddie, 2018). ....	43

Figura 2.16 – Completação com gravel pack, em ordem de apresentação: poço aberto e poço revestido, as setas mostram o fluxo do fluido (Matanovic et al., 2012). .....	45
Figura 2.17 – Efeito entre a razão dos diâmetros médios do gravel pack e formação na permeabilidade do pacote (Saucier, 1972 apud Matanovic et al., 2012). .....	46
Figura 2.18 – Completação com frac pack (Rackley, 2010). .....	49
Figura 2.19 – Estruturas de completação para poços com pacotes granulares (Moreno et al., 2009). .....	51
Figura 2.20 – Estruturas de completação em um poço com várias zonas de gravel pack (Burton et al., 2017). .....	52
Figura 2.21 – Determinação do método mecânico de acordo com as características da formação (Bellarby, 2009 apud Bennett & Gilchrist, 2000). .....	53
Figura 3.1 – Dogleg em revestimento devido ao deslizamento da formação (Dusseault et al., 1998). .....	55
Figura 3.2 – Compactação e cisalhamento induzido (Fjaer et al., 2008). .....	56
Figura 3.3 – Cisalhamento induzido por injeção, círculo em vermelho, e por depleção, círculo em azul. ....	57
Figura 3.4 – Cisalhamento induzido por processos termais em poços adjacentes não aquecidos (Dusseault et al., 1998). .....	58
Figura 3.5 – Cisalhamento no revestimento devido a reativação de falha induzida pelo fraturamento hidráulico (Li et al., 2019). .....	59
Figura 3.6 – Flambagem do revestimento devido a fluido de alta temperatura (Rechard & Schuler, 1983). .....	60
Figura 3.7 – Tipos de instabilidade do revestimento: (a) deformação plástica local; (b) flambagem; (c) flambagem em contato com a parede do poço; e (d) flambagem helicoidal (Adaptado de Rechard & Schuler, 1983). .....	61
Figura 3.8 – Ilustração do revestimento com pressões e características geométricas. ....	63
Figura 3.9 – Curva de colapso de revestimentos (Brechan et al., 2020). .....	65
Figura 3.10 – Falhas por excesso de pressão, externa e interna, no revestimento: (a) colapso; (b) rebentamento ou burst (Jerez, 2015). .....	66
Figura 3.11 – Falhas devido à compactação: (a) por tração; (b) e (c) por compressão (Taheri & Pak, 2020). .....	67



Figura 3.12 – Falhas em telas de controle: (a) erosão; (b) colapso (c) wrap failure (Hamid & Ali, 1997). .....	69
Figura 3.13 – Problemas devido à subsidência e compactação em Tyra: (a) e (b) distância reduzida entre a superfície do mar e a plataforma fixa; (c) e (d) redução do diâmetro do revestimento (Schutjens et al., 2019). .....	70
Figura 3.14 – Ovalização do revestimento com base na variação do seu diâmetro, inicialmente de 22 cm, ao longo do tempo (Schutjens et al., 2019). .....	71
Figura 4.1 – Célula cúbica do CENPES/PETROBRAS (Chavez, 2011). .....	73
Figura 4.2 – Materiais de ensaio: (a) arenito sintético; (b) Carbolite; (c) tubo de latão e (d) sistema de poço aberto com pacote granular (Chavez, 2011). .....	74
Figura 4.3 – Direções e sequência de aplicação de carga (Chavez, 2011). .....	75
Figura 4.4 – Pontos P1 e P2. ....	75
Figura 4.5 – Curvas de ensaio: carregamento versus deslocamento (Adaptado de Chavez, 2011). .....	76
Figura 4. 6 – Condições de contorno em cada fase de carregamento. ....	77
Figura 4.7 – Geometria do modelo. ....	78
Figura 4.8 – Malha de elementos finitos do modelo. ....	79
Figura 4.9 – Curvas de ensaio versus curvas dos Modelos 1, 2, 3 e 4. ....	81
Figura 4.10 – Aumento das forças de contato entre partículas em um pacote granular confinado: (a) estado inicial; (b) estado confinante (Chen et al., 2020). ....	82
Figura 4.11 – Comportamento anisotrópico do pacote granular provocado por tensão desviadora: (a) estado confinante; (b) estado anisotrópico de tensões (Chen et al., 2020). ....	83
Figura 4.12 – Variação da anisotropia em materiais granulares (Hicher & Chang, 2006). .....	84
Figura 4.13 – Variação da anisotropia induzida por carregamento (Hicher & Chang, 2006). ....	86
Figura 4. 14 – Valores de $E_v$ e $E_h$ em três regiões distintas do pacote granular. ....	88
Figura 4.15 – Concentração e deslocamento resultante dos grãos no pacote granular após o confinamento. ....	89

Figura 4.16 – Gráfico de deslocamentos dos pontos P1 e P2: resultado de ensaio x resultado do Modelo 5. ....	90
Figura 4.17 – Evolução das tensões $\sigma_v$ e $\sigma_h$ em função do carregamento aplicado em dois elementos (1 e 2) do pacote granular e a sua influência na variação dos módulos de elasticidade $E_v$ e $E_h$ .....	91
Figura 4.18 – Evolução das tensões $\sigma_v$ e $\sigma_h$ em função do carregamento aplicado em dois elementos (3 e 4) do pacote granular e a sua influência na variação dos módulos de elasticidade $E_v$ e $E_h$ .....	92
Figura 4.19 – Resultados: numéricos x ensaio. ....	93
Figura 5.1 – Contexto do poço (Zhang et al., 2019; Pocza & Ramnath, 2018). ....	97
Figura 5.2 – Geometria utilizada como base para a modelagem.....	98
Figura 5.3 – Geometria e condições de contorno do modelo proposto. ....	99
Figura 5.4 – Definições da malha de elementos finitos: (a) número de divisões; (b) detalhe dos componentes filtrantes e de completção. ....	105
Figura 5.5 – Compactação de rocha reservatório após depleção.....	106
Figura 5.6 – Compactação no topo da rocha reservatório do início ao fim da aplicação da depleção, na cota -7150 m. ....	107
Figura 5.7 – Deslocamento vertical das estruturas ao final da depleção nos Modelos AR, RI e BR, na cota -7150 m.....	108
Figura 5.8 – Tensões S11 e S22 na tela de controle ao longo da altura, na cota horizontal = 0,0425m.....	109
Figura 5.9 – Plastificação da tela de controle, na cota horizontal = 0,0425m.....	109
Figura 5.10 – Plastificação do revestimento e do cimento, nas cotas horizontais = 0,0825m e 0,1075 m, respectivamente. ....	110

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Materiais utilizados nos pacotes granulares (Campos et al., 2018; Guo et al., 2017). .....	47
Tabela 2.2 – Correlação entre o diâmetro do gravel pack e a largura das aberturas da tela de controle de sólidos (Renpu, 2011). .....	48
Tabela 2.3 – Método mecânico de controle apropriado de acordo com parâmetros granulométricos (Byrne et al., 2010 apud Tiffin et al., 1998). .....	53
Tabela 2.4 – Comparação entre métodos de controle de sólidos (Matanovic et al., 2012). .....	54
Tabela 3.1 – Fatores A, B e C para diferentes tipos de tubos (API BULL 5C3, 1994). .....	64
Tabela 3.2 – Fatores F e G para diferentes tipos de tubos (API BULL 5C3, 1994). ....	64
Tabela 4.1 – Propriedades da formação e da tela. ....	79
Tabela 4.2 – Propriedades do pacote granular de acordo com referências bibliográficas. ....	80
Tabela 4.3 – Propriedades do pacote granular para os Modelos 1, 2, 3 e 4. ....	80
Tabela 4.4 – Considerações assumidas em cada fase de carregamento. ....	85
Tabela 4.5 – Considerações assumidas em cada fase de carregamento. ....	87
Tabela 4.6 – Propriedades do pacote granular adotadas no Modelo 5. ....	88
Tabela 4.7 – Características do modelo numérico de Vargas et al. (2012) e do Modelo 5. ....	94
Tabela 5.1 – Peso específico dos materiais. ....	100
Tabela 5.2 – Pressão exercida nas estruturas. ....	101
Tabela 5.3 – Representação das forças e cálculo das pressões no liner. ....	101
Tabela 5.4 – Propriedades dos materiais do poço fechado. ....	102
Tabela 5.5 – Valores dos coeficientes de rigidez dos elementos de interface de acordo com referências bibliográficas. ....	103
Tabela 5.6 – Propriedade dos elementos de interface. ....	104

## Lista de Abreviaturas

3D	Tridimensional ou Três Dimensões
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BOP	<i>Blowout Preventor</i>
BULL	<i>Bulletin</i>
CENPES	Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
GC	<i>Good cement</i>
GeMA	<i>Geo Modelling Analysis</i>
PBR	<i>Polished Bore Receptacle</i>
PC	<i>Poor cement</i>
PRC	<i>Partial cement</i>
RP	<i>Recommended Practices</i>
SC	<i>Sorting Coefficient</i>
STD	<i>Standard</i>
TEP	Gerência de Tecnologia de Engenharia de Poços
TSR	<i>Tubing Seal Receptacle</i>
UC	<i>Uniformity Coefficient</i>

## Lista de Símbolos e Variáveis

$A_g$	Área da seção do grão
$A_s$	Área da seção do tubo
$\pi$	Constante matemática pi
$c$	Coesão
$c'$	Coesão efetiva
$C_p$	Volume de compressibilidade dos poros
$d_g$	Diâmetro do grão
$d_{50}$	Diâmetro médio dos grãos
$D_{50}$	Diâmetro médio dos grãos do pacote granular
$D_e$	Diâmetro externo do cilindro
$D_i$	Diâmetro interno do cilindro
$\varepsilon_a$	Deformação axial
$E$	Módulo de Elasticidade
$E_h$	Módulo de Elasticidade Horizontal
$E_v$	Módulo de Elasticidade Vertical
$E_1$	Módulo de Elasticidade da Direção 1
$E_2$	Módulo de Elasticidade da Direção 2
$E_3$	Módulo de Elasticidade da Direção 3
$E_{sf}$	Menor módulo de elasticidade dentre dois materiais
$F$	Força normal
$FVI$	Variável usada para definir a variação da subrotina no ABAQUS
$F_h$	Força hidrodinâmica
$F_r$	Foça de ruptura
$F_y$	Força crítica axial que leva à falha por escoamento
$G_{vh}$	Módulo de Cisalhamento das direções vertical e horizontal

$G_{12}$	Módulo de Cisalhamento das direções 1 e 2
$G_{13}$	Módulo de Cisalhamento das direções 1 e 3
$G_{23}$	Módulo de Cisalhamento das direções 2 e 3
$G_{sf}$	Menor módulo de cisalhamento dentre dois materiais
$h$	Altura da camada reservatório
$I$	Momento de Inércia
$K$	Fator que determina o comprimento efetivo de flambagem
$K_{sl}$	Rigidez da mola
$K_{sl_1}$	Rigidez da mola 1
$K_{sl_2}$	Rigidez da mola 2
$K_n$	Coefficiente de rigidez normal da interface
$K_t$	Coefficiente de rigidez tangente da interface
$L$	Comprimento do tubo
$M_1$	Material 1
$M_2$	Material 2
$n_f$	Viscosidade dinâmica
$\pi$	Constante matemática pi
$P_{ce}$	Pressão externa crítica que leva ao colapso elástico do tubo
$P_{cp}$	Pressão crítica que leva ao colapso plástico do tubo
$P_{cr}$	Carga crítica de flambagem
$P_{ct}$	Pressão crítica que leva ao colapso de transição do tubo
$P_{cy}$	Pressão crítica que leva ao colapso por escoamento do tubo
$P_e$	Pressão externa no cilindro
$P_i$	Pressão interna no cilindro
$P_p$	Poropressão
$P_i$	Pressão crítica de rebentamento do tubo
$P_{la}$	Pressão do <i>liner</i> na seção A
$P_{ls}$	Pressão do <i>liner</i> superior
$P_{lt}$	Pressão total do <i>liner</i>
$P_{wa}$	Pressão exercida pelo fluido de completação

$P_{wc}$	Pressão exercida no cimento
$P_{wr}$	Pressão exercida na rocha capeadora
$Q$	Taxa de fluxo
$R$	Reações de apoio
$r$	Raio
$r_e$	Raio externo do cilindro
$r_i$	Raio interno do cilindro
$t$	Espessura do cilindro
$t$	Espessura do elemento de interface
$T$	Temperatura
$T_0$	Resistência à tração
$\tau$	Tensão cisalhante
$\mu$	Coefficiente de atrito interno
$\nu$	Coefficiente de poisson
$\nu_{hh}$	Coefficiente de poisson entre as direções horizontais
$\nu_{vh}, \nu_{hv}$	Coefficiente de poisson entre as direções horizontal e vertical
$\nu_{12}, \nu_{21}$	Coefficiente de poisson entre as direções 1 e 2
$\nu_{13}, \nu_{31}$	Coefficiente de poisson entre as direções 1 e 3
$\nu_{23}, \nu_{32}$	Coefficiente de poisson entre as direções 2 e 3
$\alpha$	Ângulo de inclinação do poço
$\beta$	Coefficiente de Biot
$\varphi$	Ângulo de atrito interno
$\psi$	Ângulo de dilatação
$\theta$	Ângulo do plano de ruptura
$\phi$	Porosidade
$\sigma$	Tensão normal
$\sigma_1$	Tensão principal máxima
$\sigma_3$	Tensão principal mínima
$\sigma_c$	Tensão confinante
$\sigma_d$	Tensão desviadora

$\sigma_h$	Tensão horizontal
$\sigma_v$	Tensão vertical
$\sigma_y$	Tensão de escoamento do aço
$\sigma_{HMAX}$	Tensão horizontal máxima
$\sigma'$	Tensão normal efetiva
$\sigma'_1$	Tensão principal máxima efetiva
$\sigma'_3$	Tensão principal mínima efetiva
$\sigma'_\theta$	Tensão tangencial efetiva
$\sigma'_{\theta A}$	Tensão tangencial efetiva no ponto A
$\sigma'_r$	Tensão radial efetiva
$\sigma'_z$	Tensão axial efetiva
$\Delta h$	Compactação
$\Delta P$	Depleção
$\Delta T$	Variação de Temperatura
A, B, C,	Fatores de pressão de colapso dependentes do tipo de tubo utilizado
F, G	como revestimento do poço
bar2	Elemento unidirecional com dois nós
CPE4	Elemento contínuo, quadrilateral com quatro nós, no estado plano de deformações e integração completa 2x2
int2dl4	Elemento de interface contínuo, quadrilateral com quatro nós
quad4	Elemento contínuo, quadrilateral com quatro nós



# 1

## Introdução

### 1.1. Panorama Geral

A produção de sólidos é um tema recorrente no âmbito da indústria de petróleo e gás, uma vez que grande parte dos reservatórios de hidrocarbonetos do mundo estão alojados em arenitos e calcários, materiais suscetíveis à desagregação. O motivo destas rochas apresentarem esse comportamento está relacionado ao processo químico conhecido como cimentação, o qual é responsável por agrupar e unir as partículas em forte uma ligação até formar a rocha, quando esse processo ocorre de forma incompleta é comum que a rocha fique com pouca ou nenhuma consolidação, o que resulta na baixa rigidez à compressão do maciço.

De maneira que, atividades como a perfuração para exploração de hidrocarbonetos podem facilmente provocar a ruptura da rocha e levar ao desprendimento de partículas que passam a ser carreadas junto do fluido de produção para dentro do poço. Os efeitos decorrentes desse fenômeno, vão desde a erosão das estruturas do poço até o seu fechamento. Dessa forma, medidas que mitiguem esses problemas são amplamente adotadas e estudadas. Dentre elas está a utilização de estruturas de controle como os filtros de areia.

Cardenas & Twynam (2004) estimam que, em poços de óleo e gás, 10 bilhões de dólares são gastos por ano devido a produção de sólidos, tais custos englobam tanto a manutenção, limpeza e troca de equipamentos quanto o transporte de sólidos para um local seguro. Assim sendo, os esforços para compreender e gerenciar esse processo são cada vez mais requeridos e sofisticados.

## **1.2. Motivação e Justificativa**

Diante da fragilidade das rochas que presenciam a produção de sólidos, faz-se necessário conhecer e avaliar as situações em que ela deixa de ser controlável e passar a ser um problema. Para isso, é essencial compreender a origem e a forma como ela se manifesta, dado que a atividade de exploração em sua natureza já provoca mudanças na região em que é localizada.

É comum que após a produção de hidrocarbonetos a camada reservatório que antes ocupava fluido/gás em seus espaços porosos sofra compactação, quando isso ocorre as estruturas que compõem o poço também são afetadas, um exemplo disso é o revestimento (tubo de aço) que com o movimento vertical da camada pode vir a flambar ou sofrer cisalhamento, a depender da sua posição.

Assim como o revestimento, as estruturas filtrantes utilizadas para controlar a produção de sólidos também estão suscetíveis a essas movimentações, sendo de extrema importância realizar o estudo do seu comportamento.

## **1.3. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é compreender o comportamento das estruturas filtrantes utilizadas em poços com intervalos de produção de sólidos e avaliar a integridade mecânica desses elementos. Para isso, será feito um estudo aprofundado das características dos revestimentos, dos filtros de areia, e da interação entre maciço rochoso e esses componentes, de maneira a definir a estratégia de modelagem a ser utilizada, com o auxílio do Método dos Elementos Finitos.

Os objetivos específicos desta pesquisa são: calibrar os parâmetros do filtro de areia/pacote granular (*Gravel Pack*) através de dados de ensaios da literatura; definir uma metodologia de modelagem para análise de um poço fechado em intervalo de produção de sólidos; modelar e analisar um poço em atividade de depleção.

Com o intuito de cumprir com esses objetivos será realizada vasta revisão bibliográfica, a partir da qual será escolhido o modelo constitutivo a ser adotado no

filtro de areia e no pacote granular. Também serão realizadas análises para definir a interação entre as estruturas do poço, com materiais e comportamentos diferentes.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, conforme apresentado a seguir.

O presente capítulo, tem por objetivo apresentar uma visão geral do que será tratado na pesquisa e do que se espera obter com ela.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a produção de sólidos. Com abordagem sobre as características das rochas sujeitas a esse processo, os mecanismos de produção e os problemas gerados. O capítulo também descreve os métodos de controle de sólidos, com suas particularidades e usabilidade.

O Capítulo 3 aborda os modos de falha em revestimentos e filtros de areia, através da exposição de formulações clássicas, exemplos de situações campo e a discussão de casos notáveis de falha por fenômenos de compactação e subsidência.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos modelos numéricos baseados em duas aplicações com estruturas filtrantes, a primeira delas é um ensaio em célula cúbica onde será feita a calibração das propriedades do pacote granular e a segunda é a simulação de um poço durante a atividade de depleção, a partir do qual será feito um estudo das interfaces de contato entre os componentes estruturais.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho, assim como as sugestões para trabalhos futuros no tema.

## 2 Produção de Sólidos

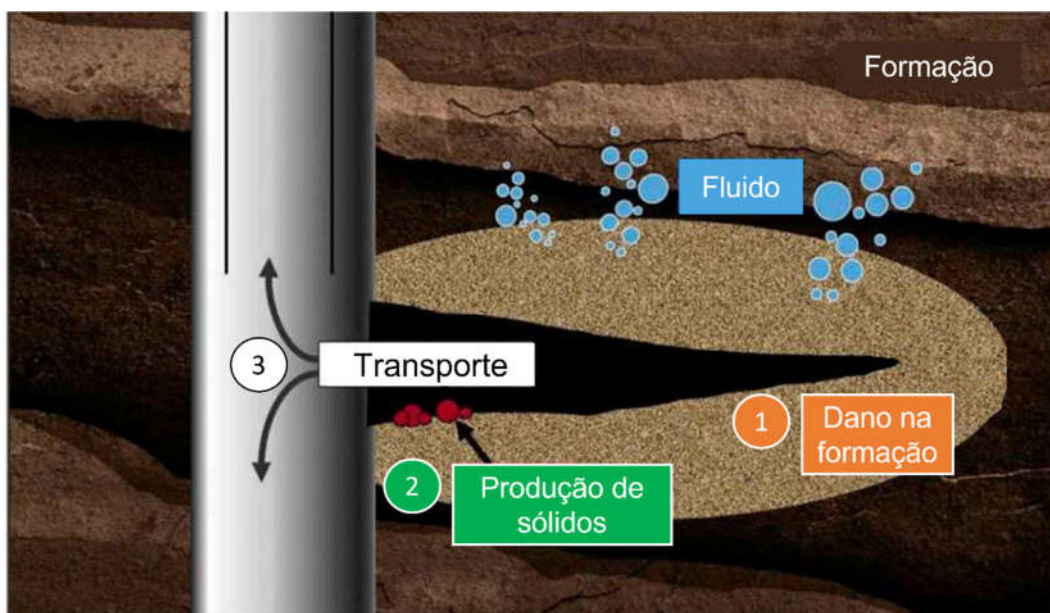
### 2.1. Introdução

A produção de sólidos é descrita por Subbiah et al. (2020) como o fenômeno que ocorre quando partículas sólidas são carreadas junto com o fluido de produção para dentro do poço. Caso essas partículas não sejam transportadas de forma adequada para a superfície, podem surgir problemas como: desgaste das estruturas de completação, perda de integridade, instabilidade e tamponamento do poço (*fill up* ou *sand up*).

Diante disso, é imprescindível identificar os fatores que influenciam na produção de sólidos, dentre os quais estão: atividades tectônicas, força de arraste do fluido de produção, variação da poropressão, pressão de sobrecarga e pressão durante a perfuração. Quando esses fatores induzem as tensões *in situ* a atingirem valores acima da resistência da formação tem-se a falha da rocha, que resulta na separação das partículas e permite o transporte de sólidos para o interior do poço. Tal mecanismo pode ser visualizado na Figura 2.1 (Mahmud et al., 2019).

De forma que, a produção está intimamente ligada à aspectos como: características do fluido de reservatório (viscosidade e velocidade), permeabilidade, saturação, condições de carregamento e resistência da formação, além das operações realizadas no poço (Morita et al., 1989).

É comum atrelar esse processo a formações sedimentares jovens com pouca profundidade do período terciário, como arenitos e calcários, uma vez que, nessas condições a cimentação pode não ter sido completa e as rochas têm pouca ou nenhuma consolidação, resultando em uma formação com baixa resistência à compressão (Allen & Roberts, 1989).



**Figura 2.1 – Mecanismo de produção de sólidos (Mahmud et al., 2019).**

Por ser predominantemente relatado em arenitos pouco consolidados é usual encontrar na literatura o termo *sand production* (produção de areia) para se referir a esse fenômeno. Entretanto, a produção pode ocorrer também em calcários e carbonatos, o que faz com que o termo genérico *solid production* (produção de sólidos) seja mais adequado (Fjaer et al., 2008).

Em relação à sua classificação, Veeken et al. (1991) a divide em três grupos:

- Produção transiente: refere-se à concentração de sólidos decrescente ao longo do tempo sob condições constantes do poço, tipicamente observada quando se tem a realização da limpeza no poço e quando há injeção de água.
- Produção contínua: trata-se da condição em que a taxa de produção é relativamente constante, observada em um número elevado de poços.
- Produção catastrófica: verifica-se na existência de taxas elevadas de produção o que pode levar ao fechamento do poço, pode ocorrer após produção contínua em excesso.

## 2.2.

### Mecanismos de produção de sólidos

Conforme visto no tópico anterior, a produção de sólidos ocorre após o dano da formação. Sendo assim, a força ( $Fr$ ) necessária para dar início à produção é formada pela soma de duas forças que induzem à falha, uma por cisalhamento e outra por tração, de acordo com a Equação 2.1 (Fjaer et al., 2008).

$$F_r = \pi \left( \frac{d_g}{2} \right)^2 [4c + \mu(2\sigma'_z + 2\sigma'_\theta) + T_0] \quad (2.1)$$

onde  $d_g$  é o diâmetro do grão,  $c$  é a coesão,  $\mu$  é o coeficiente de atrito interno,  $\sigma'_z$  é a tensão axial efetiva,  $\sigma'_\theta$  é a tensão tangencial efetiva e  $T_0$  é a resistência à tração.

Para comprovar que a força hidrodinâmica gerada pelo fluido de produção não é capaz de arrancar os grãos de uma rocha intacta, Fjaer et al. (2008) realizaram cálculos comparativos entre a força  $Fr$ , apresentada na Equação 2.1, e a força hidrodinâmica ( $Fh$ ), dada pela Equação 2.2. Em uma rocha frágil com coesão igual a 1 MPa, tensões axiais e tangenciais nulas, coeficiente de atrito interno de 0.5, resistência à tração nula, viscosidade dinâmica igual a 1 cP e porosidade de 0.2.

$$F_h = 30\pi\eta_f \left( \frac{1-\phi}{\phi^3} \right) \left( \frac{Q}{A_g} \right) d_g \quad (2.2)$$

onde  $\eta_f$  é a viscosidade dinâmica,  $\phi$  é a porosidade,  $Q$  é a taxa de fluxo e  $A_g$  é a área da seção do grão.

Como resultado eles obtiveram o gráfico da Figura 2.2 o qual mostra que, mesmo com o aumento do fluxo do fluido, a força hidrodinâmica não atinge o valor de  $Fr$ , logo, não é suficiente para separar os grãos da rocha. Dessa forma, o que levará à falha da rocha, em um momento inicial, não será o fluido, mas sim as condições de tensões ao redor do poço, as quais podem ser analisadas em função do gradiente de poropressão e do valor de *drawdown*, este último corresponde à diferença entre a poropressão da formação e a pressão interna do poço. Quando esse diferencial atinge determinado valor crítico tem-se o início da produção de sólidos.

É importante ressaltar que os valores críticos de *drawdown* variam de acordo com a resistência à compressão da rocha, o estágio de uso do poço, a estabilidade das cavidades produtoras e das zonas de dano da formação. Outro fator determinante é o

tipo de mecanismo de produção, o qual pode ser separado em dois grupos: o de ruptura por cisalhamento e o de ruptura por tração (Morita et al., 1989).

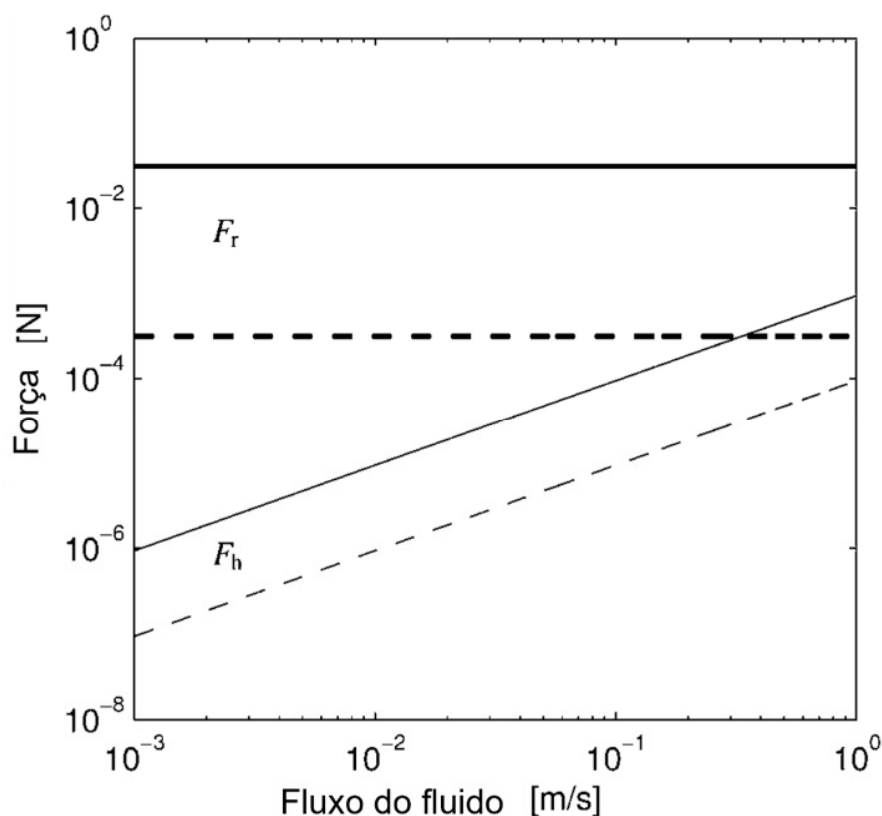


Figura 2.2 – Variação das forças  $F_h$  e  $F_r$  de acordo com o fluxo do fluido, a linha sólida corresponde a  $d_g = 100 \mu\text{m}$  e a tracejada a  $d_g = 10 \mu\text{m}$  (Fjaer et al., 2008).

### 2.2.1. Ruptura por Cisalhamento

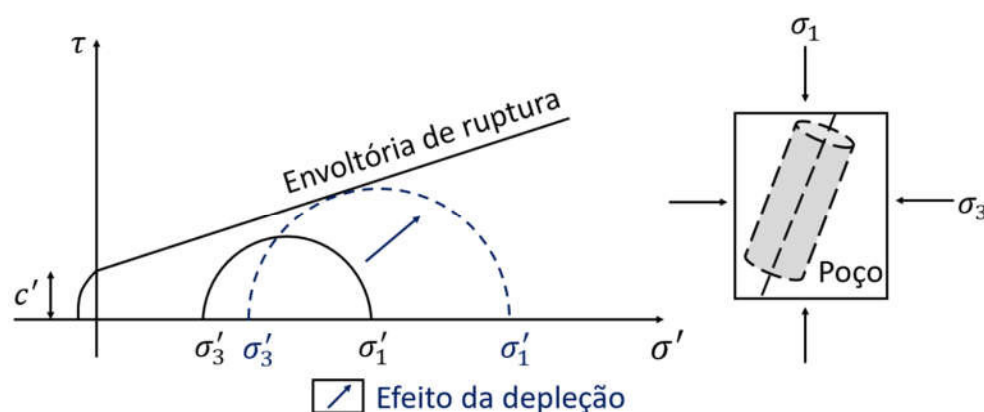
À medida que o poço entra em produção e ocorre a consequente depleção do reservatório, tem-se um aumento da tensão vertical efetiva, devido à diminuição da poropressão. Em decorrência disso, as tensões horizontais também diminuem e são elevadas as chances de falha por cisalhamento da rocha (Zhong, 2014). Tais considerações podem ser verificadas a partir de modelos constitutivos como o de Mohr-Coulomb, no qual o critério de falha é definido pela reta da Equação 2.3, escrita em termos das tensões principais na Equação 2.4.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi \quad (2.4)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $c$  é a coesão da rocha,  $\sigma$  é a tensão normal,  $\varphi$  é o ângulo de atrito interno,  $\sigma_1$  é a tensão principal máxima,  $\sigma_3$  é a tensão principal mínima.

Para avaliar o estado de tensões da rocha consideram-se as três tensões principais no sistema cartesiano: uma vertical e duas horizontais, onde a tensão vertical corresponde à tensão principal máxima e a menor tensão horizontal corresponde à tensão principal mínima. O raio do círculo de Mohr é definido em função da diferença entre essas duas tensões, de forma que, em atividades como a depleção, por conta do aumento da tensão vertical efetiva e da diminuição das tensões horizontais efetivas, o diferencial assume um valor maior e o círculo de Mohr se move em direção à envoltória de ruptura. Conforme representado na Figura 2.3, que apresenta dois cenários, um com o círculo em linha contínua quando há estabilidade no poço e o outro com um círculo em linha tracejada quando ocorre a falha por cisalhamento.



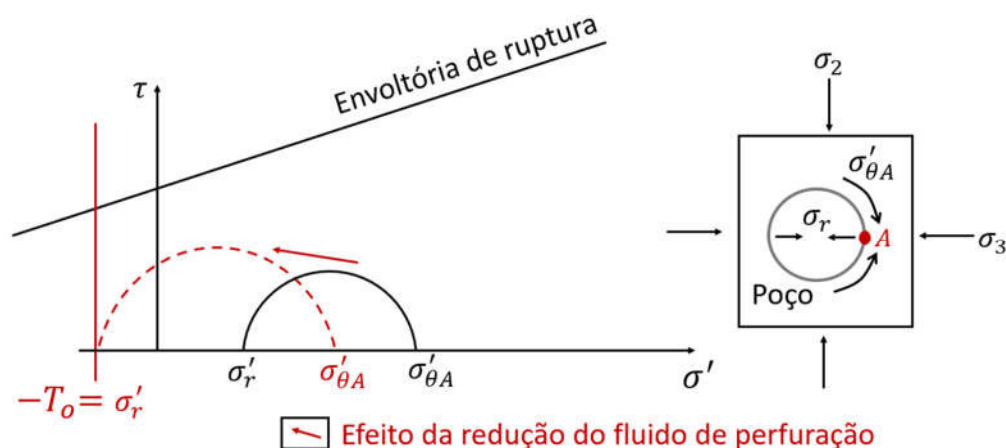
**Figura 2.3 – Círculo de Mohr e tensões no poço: estável, em linha contínua preta e com falha após a depleção, em linha tracejada azul.**

Um estudo feito por Yan et al. (2013) compara a predição de falha por cisalhamento que leva à produção de sólidos, após a depleção, por três critérios: Mohr-Coulomb, Drucker-Prager e Mogi-Coulomb. Ao fim das comparações os autores inferem que o primeiro critério é o mais conservador, enquanto o segundo não é totalmente confiável e o terceiro é o que mais se adequa aos dados de campo. As formulações de *drawdown* crítico para os três modelos podem ser encontradas na referência citada. Para o presente trabalho não há necessidade de aprofundamento.



### 2.2.2. Ruptura por Tração

Outro processo capaz de gerar esse tipo de ruptura é o pistoneio, vivenciado após a retirada da coluna de perfuração, que provoca a diminuição da tensão radial na parede do poço. Caso essa tensão seja reduzida significativamente ela pode alcançar a resistência à tração da rocha, o que leva ao desmoronamento da parede do poço e à produção de sólidos, esse fenômeno pode ser observado com o auxílio do círculo de Mohr na Figura 2.4 (Rocha e Azevedo, 2009).



**Figura 2.4 – Círculo de Mohr e tensões na parede do poço: estável, em linha contínua preta e com falha após a redução da tensão radial, em linha tracejada vermelha.**

Em resumo, os dois parâmetros que governam os tipos de ruptura são: o valor de *drawdown* e o gradiente de poropressão, onde a falha por cisalhamento é mais sensível à variação do primeiro e a falha por tração à variação do segundo. A Figura 2.5 mostra a relação entre as envoltórias de falha e os parâmetros citados.



**Figura 2.5 – Diagrama com as envoltórias de estabilidade de acordo com os valores de drawdown e gradiente de poropressão (Fjaer et al., 2008).**

Morita & Boyd (1991) apresentam casos típicos de produção de areia para poços de diferentes regiões e os mecanismos associados. Dentre eles estão:

- Alasca: com formação de arenito não consolidado e produção através de falha por cisalhamento devido ao *drawdown* crítico;
- Mar do Norte, entre Noruega e Dinamarca: composta por arenito consolidado com produção decorrente da falha por cisalhamento após a depleção;
- Califórnia, próximo a falha de San Andreas: com formação consolidada e produção devido à falha resultante da alta força horizontal atrelada a atividades tectônicas.

### 2.3. Problemas de Produção de Sólidos

O transporte de partículas em determinadas taxas e condições resulta no aumento da produtividade do poço, conforme observado por Geilikman et al. (1994), os quais relatam que, em reservatórios de óleo com alta viscosidade e baixa velocidade do fluido, o carregamento de sólidos aumenta de 8 a 10 vezes a taxa de produção de óleo. Entretanto, quando essas partículas são produzidas em excesso e têm função estrutural na formação, geram problemas como (Aborisade, 2011; Fjaer et al., 2008):

- Erosão de equipamentos do fundo do poço e da superfície: devido à abrasividade das partículas de quartzo, predominantes em arenitos, os

equipamentos do poço tornam-se propensos a sofrerem erosão, a qual é agravada à medida que a velocidade do fluido aumenta. Por essa ótica, poços de gás, caracterizados por apresentarem alta velocidade de fluido, tendem a manifestar erosão em taxas de produção de sólidos menores que os poços de óleo;

- Entupimento do poço: em casos em que a produção se dá em altas taxas, do tipo catastrófica, corre-se o risco de fechamento e abandono do poço, decorrente do colapso das cavidades produtoras e da parede do poço;
- Acúmulo de sólidos nos equipamentos: se dá tanto nos equipamentos da superfície como nos do fundo do poço, no primeiro caso as partículas se alojam, por exemplo, em separadores o que prejudica a capacidade do equipamento de diferenciar óleo, gás e água, sendo necessário realizar a limpeza dos mesmos o que resulta no atraso do cronograma de produção. Já no segundo caso, os sólidos se instalam em estruturas de completação como revestimentos e conectores, de forma a comprometer a produção de hidrocarbonetos.
- Poluição: os sólidos carregados para a superfície e retirados na plataforma expõem o local à poluição, sendo necessário o seu descarte, o que resulta em gastos com transporte e precauções com restrições ambientais.

A Figura 2.6 apresenta exemplos de alguns dos problemas mencionados, os quais acarretam gastos com limpeza, manutenção e troca de equipamentos, além dos custos referentes ao atraso da produção.



**Figura 2.6 – Problemas de produção de sólidos: (a) erosão da válvula choke e (b) quantidade de sólidos produzidos em 72 horas no Campo Garon no Delta do Niger (Raghavendra et al., 2014; Ikporo & Sylvester, 2015).**

De acordo com Ocando (2020) o período em que a produção do poço é interrompida por razões como: reparo de equipamentos, falha das estruturas e instabilidade do poço; corresponde a 20% ou mais do tempo gasto com aluguel de materiais. Para representar esse impacto ele cita o custo por dia do aluguel dos equipamentos de perfuração que varia de 10 a 27 mil dólares na América do Norte e de 15 a 45 mil dólares no Oriente Médio.

## **2.4.**

### **Controle de Produção de Sólidos**

Diante dos efeitos negativos da produção de sólidos torna-se essencial a aplicação de medidas para mitigação de danos, as quais derivam de duas abordagens: (1) evitar que ocorra a produção de sólidos, com métodos não mecânicos; (2) controlar a produção de sólidos com elementos filtrantes, através de métodos mecânicos (Dusseault, 1997 *apud* Civan, 2007).

Em conformidade com o discutido no tópico de mecanismos de produção, sabe-se que o estado de tensões na formação, a estabilidade das cavidades produtoras e as forças de arrasto do fluido são determinantes para que ocorra produção de sólidos. Sendo assim, a abordagem não mecânica busca traçar estratégias de controle dessas forças e tensões, assim como almeja fortificar a formação para que a falha que leva a produção de sólidos não ocorra.

Por outro lado, os métodos mecânicos fazem uso de elementos filtrantes como telas de aço e pacotes granulares que têm por objetivo reter os sólidos carregados com o fluido de produção e impedir que estes invadam o poço, tais estruturas são preferíveis em situações críticas. Porém, apresentam uma aplicação complexa e em sua maioria dispendiosa, não recomendadas para formações consolidadas (Waltman et al., 2010).

## **2.4.1. Métodos não-mecânicos**

### **2.4.1.1. Seleção de Intervalos e orientação do Canhoneio**

Esses dois métodos podem ser agrupados em um único tópico por apresentarem sistemática semelhante. Eles consistem na seleção de intervalos de canhoneio em regiões que apresentem maior resistência mecânica ou na escolha da orientação dos furos em direções que desfavoreçam a ocorrência de falha. O uso dessas técnicas é eficaz em rochas consolidadas e em formações heterogêneas, onde a rocha reservatório, ainda que frágil, é seguida de uma rocha com boa resistência, de forma a permitir que os fluidos sejam drenados de uma rocha à outra para que ocorra a produção de hidrocarbonetos (Bellarby, 2009).

As desvantagens relacionadas a esses métodos são notáveis, principalmente porque a produção de óleo e gás será restrita a apenas alguns intervalos, os quais têm a chance de não serem os mais produtivos.

### **2.4.1.2. Controle do fluido de produção**

Considerado o método mais simples e barato, o controle do fluido de produção se dá com base em predições para produção de sólidos, através da análise das características da rocha, do tipo de fluido e do valor de *drawdown*. A premissa desse método é variar a taxa de produção de fluido, a depender da situação do poço, na etapa inicial com o poço estável essa taxa é aumentada gradualmente até que ocorra a produção de sólidos, a partir da qual a taxa é reduzida para que o poço volte a situação de estabilidade. A principal desvantagem desse processo é a restrição do potencial de produção de fluidos, o que pode afetar na economicidade do poço, com produções abaixo do esperado (Matanovic et al., 2012).

### 2.4.1.3. Consolidação Química

O objetivo dessa aplicação é fortalecer as ligações entre grãos, com materiais que sejam compatíveis com as características da formação, de maneira a aumentar a consolidação da rocha sem afetar a porosidade do reservatório. Com essa finalidade são utilizadas resinas do tipo: termofísicas (epóxi, fenol, furano) ou termoplásticas (polietileno, policloreto de vinila, polipropileno).

A técnica se dá pela injeção de resinas nos espaços canhoneados, os quais devem ser isolados do resto do poço para evitar contaminação ou perda de fluido. As etapas de execução desse tratamento se dão de acordo com a ilustração da Figura 2.7, onde cada letra corresponde a (Matanovic et al., 2012):

- Água da formação a ser retirada e substituída por solventes químicos compatíveis com as resinas a serem injetadas;
- Adição de solventes que ocupam o espaço da água, mas mantêm a permeabilidade;
- Injeção da resina que ocupa os espaços porosos por capilaridade;
- Retirada do excesso de resina e consolidação da formação.

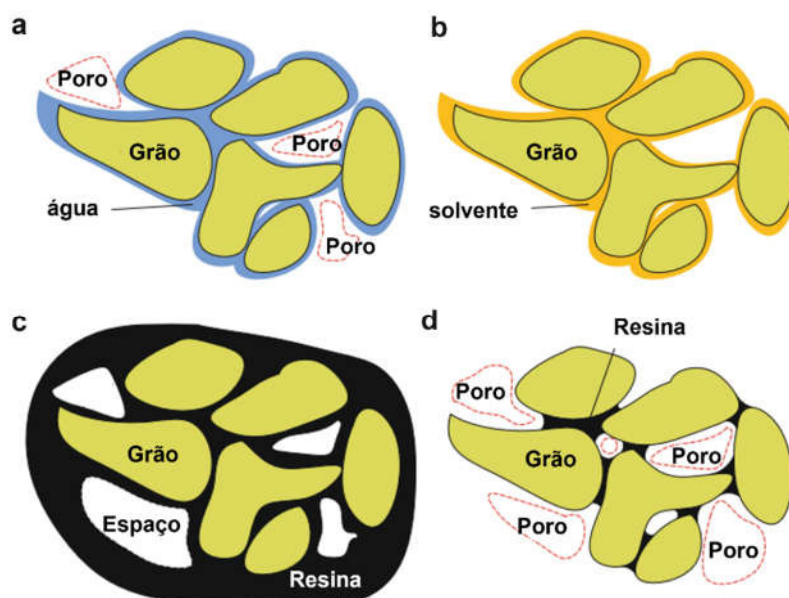


Figura 2.7 – Etapas de consolidação química (Matanovic et al., 2012).

Após esse processo, a rocha obterá maior resistência o que retardará o início da produção de sólidos. Apesar de ser uma técnica bastante confiável, a consolidação química possui custo de instalação elevado e só é permitida em pequenos intervalos por conta do risco de contaminação devido aos agentes químicos utilizados.

## **2.4.2. Etapas típicas de poços**

Antes de adentrar nas estruturas filtrantes é preciso conhecer as estruturas típicas de um poço, a fim de compreender as suas funcionalidades e entender como as estruturas de controle de sólidos se encaixam nesse sistema. Diante disso, a seguir, serão apresentadas resumidamente as etapas fundamentais para construção e operação de um poço, a começar pela perfuração.

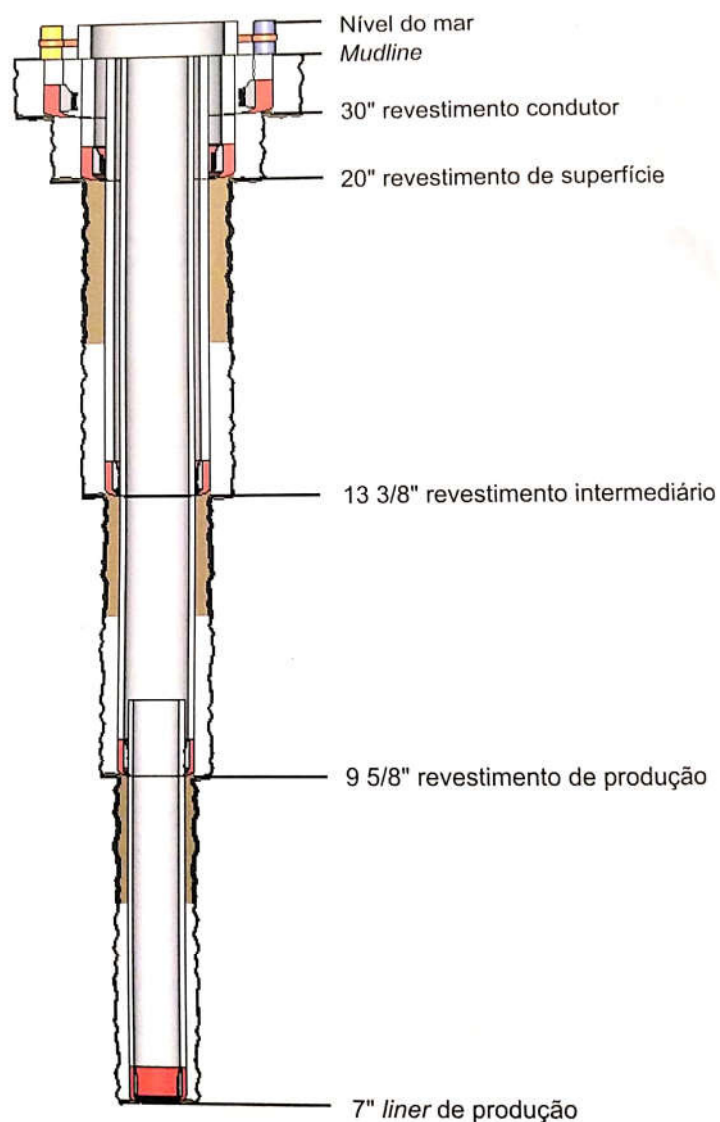
### **2.4.2.1. Perfuração**

Segundo Silva (2013) a perfuração se assemelha à construção de uma estrada, a qual terá por objetivo encaminhar os hidrocarbonetos das rochas-reservatórios à superfície. Tal atividade pode ser feita por dois sistemas: por percussão ou por rotação, o primeiro ocorre através do içamento e queda da coluna de perfuração que em conjunto com o giro da ferramenta, faz com que a broca esmague a rocha e forme o furo circular.

Já o segundo atua através da rotação e aplicação de peso na broca, localizada na extremidade da coluna de perfuração, que em conjunto com o fluido, comumente conhecido como lama de perfuração, realiza a escavação e limpeza das camadas, além de manter a estabilidade da parede do poço (Iramina, 2016). A perfuração por rotação se destaca em relação à perfuração por percussão, devido à sua capacidade de atingir grandes profundidades e fornecer maior estabilidade à rocha. Sendo preferível e largamente utilizada na indústria de petróleo e gás.

À medida que a perfuração avança, elementos estruturais devem ser instalados para garantir o isolamento do poço e a proteção da formação. Para isso, o poço é dividido em fases em que cada uma exige determinado diâmetro da broca ou alargador. Ao final de cada fase é instalada uma coluna de revestimento (tubulação de aço) e feita

a cimentação do espaço anular entre a coluna e a parede do poço. A Figura 2.8 mostra de maneira representativa os revestimentos correspondentes a cada fase de perfuração (Rocha e Azevedo, 2009).



**Figura 2.8 – Representação esquemática das múltiplas fases de um poço (Rocha e Azevedo, 2009).**

Cada revestimento tem uma função específica, explicadas a seguir, em ordem de construção (Rocha e Azevedo, 2009):

- Revestimento Condutor: tem por objetivo isolar o poço das zonas não consolidadas;



- Revestimento de Superfície: é um revestimento estrutural que além de isolar o poço, suporta o peso do *Blowout Preventor* (BOP) e protege reservatórios de água;
- Revestimento Intermediário: tem como principais funções proteger as zonas da perda de circulação, isolar as formações de hidrocarbonetos e isolar as zonas de alta ou baixa pressão;
- Revestimento de Produção: permite a condução dos hidrocarbonetos à superfície de forma segura e econômica, além de abrigar a coluna de produção.
- *Liner*: visa cobrir a parte do poço aberto podendo ser utilizado para substituir o revestimento de produção e é ancorado acima da extremidade inferior do último revestimento.

#### 2.4.2.2. Completação

A etapa de completção consiste em uma série de operaões realizadas após a perfuraão, com o intuito de habilitar o poço para a produão de hidrocarbonetos ou para injeão de fluidos no reservatório. Ela corresponde à instalaão de equipamentos no interior e exterior do poço que garantam a conexão entre o reservatório e a unidade estacionária de produão, de maneira segura e eficiente (Silva, 2013).

De acordo com Thomas (2001) a completção pode ser classificada de três formas: quanto ao posicionamento da cabeça do poço (completção seca ou molhada), quanto ao revestimento de produão (poço aberto, com *liner* rasgado, com *liner* canhoneado ou com revestimento canhoneado) e quanto ao número de zonas explotadas (simples ou múltipla).

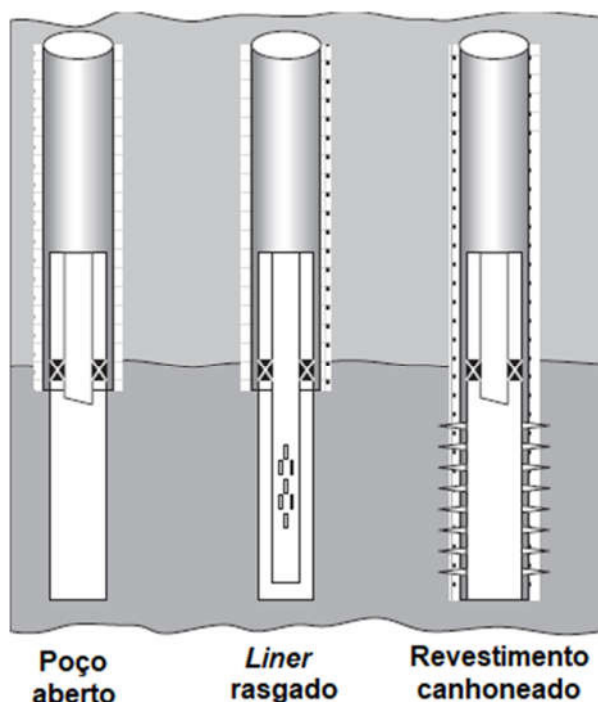
A forma de classificaão de maior interesse para o presente trabalho é a que se refere ao tipo de revestimento de produão, o qual está diretamente ligado ao nível de consolidaão da zona produtora e à possibilidade ou não de desmoronamento da formaão.

Para camadas bem consolidadas é indicado o uso do **poço aberto**, sem revestimento e sem canhoneio o que permite uma economia de custos e um aumento

da área aberta ao fluxo. Já para formações com riscos de desmoronamentos é recomendado o uso de **liner rasgado**, que consiste em um tubo com furos longitudinais realizados com equipamento a laser, ou **liner canhoneado**, o qual é composto por um tubo com furos circulares gerados pela atividade de canhoneio a qual consiste no disparo de projéteis que perfuram tanto o tubo quanto suas camadas adjacentes (como cimento e formação), esses dois tipos de *liners* possibilitam a sustentação da parede do poço e evitam um eventual colapso.

Finalmente, quando se deseja obter maior controle da produção ou injeção de fluidos, assim como melhor gerenciamento das atividades de estimulação e restauração, opta-se pela aplicação do **revestimento canhoneado**.

Os tipos de completação supracitados podem ser vistos na Figura 2.9.



**Figura 2.9 – Tipos de completação quanto ao revestimento de produção (Zhu e Furui, 2018).**

### 2.4.3. Métodos Mecânicos

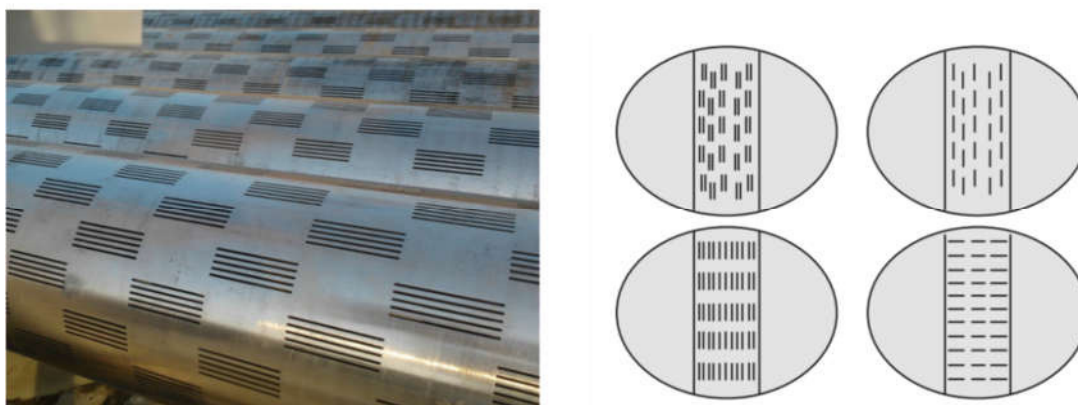
Tendo em vista as estruturas típicas de um poço, os métodos mecânicos se farão presentes na fase de completação, onde o poço será preparado para produção de

hidrocarbonetos com o adequado controle da produção de sólidos, por meio de técnicas e estruturas que serão discutidas a seguir.

#### 2.4.3.1. Liner Rasgado (Slotted liner)

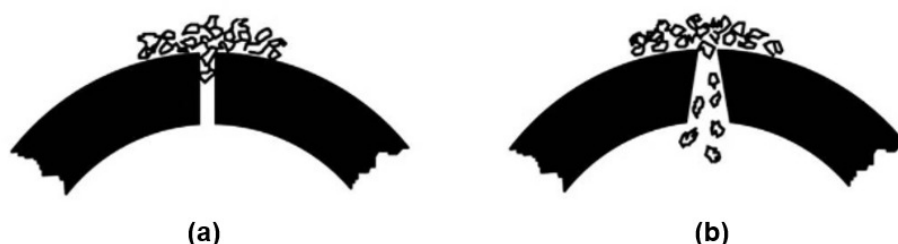
Referente ao controle de sólidos, o *liner* rasgado tem como principal vantagem o fato de ser uma tela de baixo custo e simples instalação, com a possibilidade de aplicação em formações com partículas grossas ou em poços com fluidos de alta viscosidade, sendo comum em poços horizontais. Entretanto, seu uso é limitado, devido à baixa área de fluxo e à dificuldade de conceber furos pequenos o bastante que evitem a passagem de sólidos finos, uma vez que o custo é elevado quando as ranhuras são menores que meio milímetro (Bellarby, 2009).

Com o intuito de preservar o máximo de resistência mecânica, as aberturas do *liner* são paralelas e alternadas, conforme representado na Figura 2.10. A largura dessas aberturas deve respeitar o valor limite de até duas vezes o diâmetro médio efetivo ( $D_{10}$ ) da formação (Renpu, 2011).



**Figura 2.10 – Liner rasgado e os diferentes arranjos de furo (Jiménez, 2016; Matanovic et al., 2012).**

Outro importante aspecto de projeto é a adoção do formato cônico das ranhuras em detrimento do formato reto, para evitar o entupimento dos furos, de acordo com o apresentado na Figura 2.11. A instalação desse tipo de tela pode ser feita de forma isolada ou aliada a outras estruturas como pacotes granulares.



**Figura 2.11 – Formato dos furos do liner rasgado: (a) reto; (b) cônico (Hebei Shengkai Metal Mesh Cooperation, 2021).**

#### 2.4.3.2.

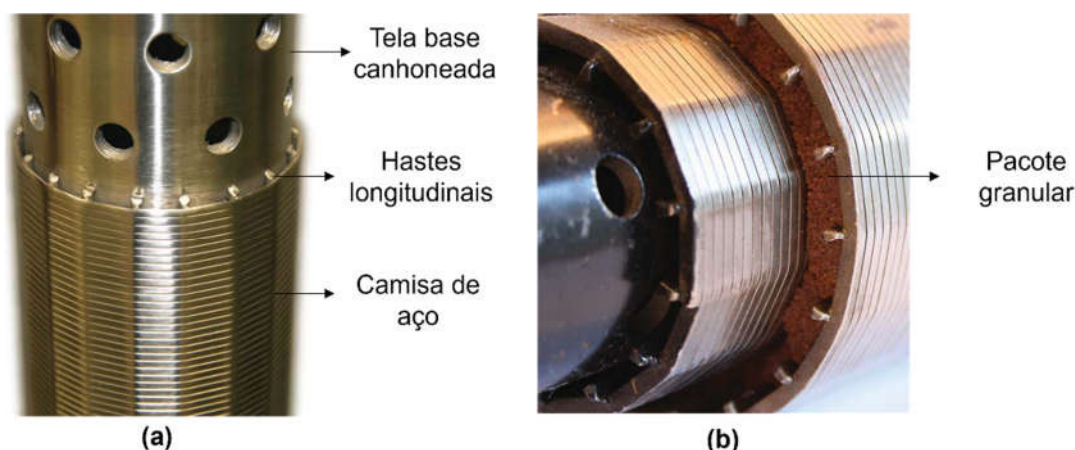
##### **Telas de controle de sólidos (*Sand Screens*)**

Mais sofisticadas que o *liner* rasgado, as telas de controle de sólidos são conhecidas como telas de areia (*Sand Screens*) e se dividem em dois grupos: expansíveis e não expansíveis. Quando utilizadas de forma independente, sem o acréscimo de outras estruturas de controle, passam a ser chamadas de telas de areia auto suportadas (*Standalone Screens*).

##### ➤ Não Expansíveis

Existem três tipos de telas não expansíveis: *wire-wrapped*, *pre-packed* e *premium*. O primeiro tipo é composto por três estruturas (tela de base canhoneada, hastes longitudinais e camisa de aço); já o segundo segue a estrutura do *wire-wrapped* com a adição de uma camada de hastes longitudinais e uma camisa de aço, além de ter o novo espaço preenchido com partículas filtrantes, conforme visualizado na Figura 2.12.

Cada componente citado tem sua funcionalidade, a começar pela tela base que corresponde a um revestimento canhoneado com o intuito de facilitar o fluxo de fluidos para o interior do poço; seguida das hastes longitudinais que têm por objetivo adicionar rigidez ao sistema e servir de suporte para a camisa de aço, a qual, assim como o pacote granular, tem a função de filtrar as partículas sólidas.



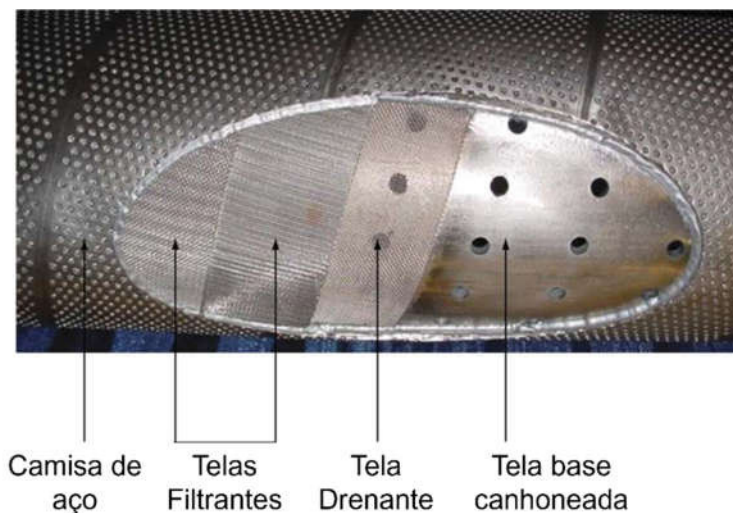
**Figura 2.12 – Telas não expansíveis: (a) wire-wrapped, (b) pre-packed (Bellarby, 2009).**

Em comparação com os *liners* rasgados, as telas do tipo *wire-wrapped* tem maior capacidade de retenção de partículas finas. Outra vantagem é o formato triangular das hastes longitudinais, que diminuem as chances de tamponamento da estrutura. O conjunto tem também uma maior área de fluxo, assim como maiores resistências (mecânica e à corrosão). Ademais, a largura das aberturas na camisa de aço pode seguir, assim como o *liner* rasgado, o critério de Coberly (1937) ou o critério de Gillespie et al. (2000) com largura menor que duas vezes o diâmetro médio das partículas da formação ( $d_{50}$ ). Seu uso ocorre tanto em poços horizontais quanto em verticais e pode ser feito em conjunto com o pacote granular (Ahad et al., 2019).

Adicionalmente tem-se as telas pré-empacotadas (*pre-packed*) que contam com um pacote granular filtrante de alta porosidade e permeabilidade que mantêm a pressão do fluido de produção no interior do sistema. Contudo, o uso dessa estrutura facilita a obstrução e erosão das camisas de aço, com custo relativamente elevado. Sua utilização torna-se desejável em poços inclinados, sendo comuns em poços abertos ou revestidos (Matanovic et al., 2012).

O último tipo de tela leva o nome de *premium*, também conhecida como *woven screen* ou *metal mesh*, sendo composta por várias telas de aço com diferentes aberturas e funcionalidades, que intercalam entre si em camadas de filtros e drenos, de acordo com o observado na Figura 2.13. Em função da robustez do sistema, o custo de aplicação é o mais alto dentre as telas citadas, em compensação é a estrutura que possui maior resistência à erosão e melhor comportamento em situações extremas de alta

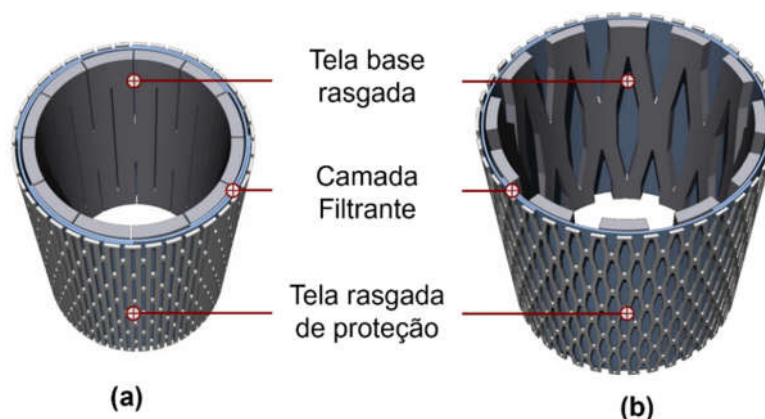
pressão e de alta taxa de fluxo, preferíveis em reservatórios com compactação ou em poços horizontais longos (Bellarby, 2009).



**Figura 2.13 – Tela não expansível do tipo premium (Bellarby, 2009).**

#### ➤ Expansíveis

Introduzidas em 1999, as telas expansíveis são formadas por duas telas rasgadas e uma camada intermediária filtrante, descidas em seu estado inicial até a profundidade de aplicação, onde se deformam com o auxílio de um equipamento no interior do tubo e se adequam ao diâmetro do poço perfurado. A Figura 2.14 mostra os dois estados da tela: inicial e após a expansão.

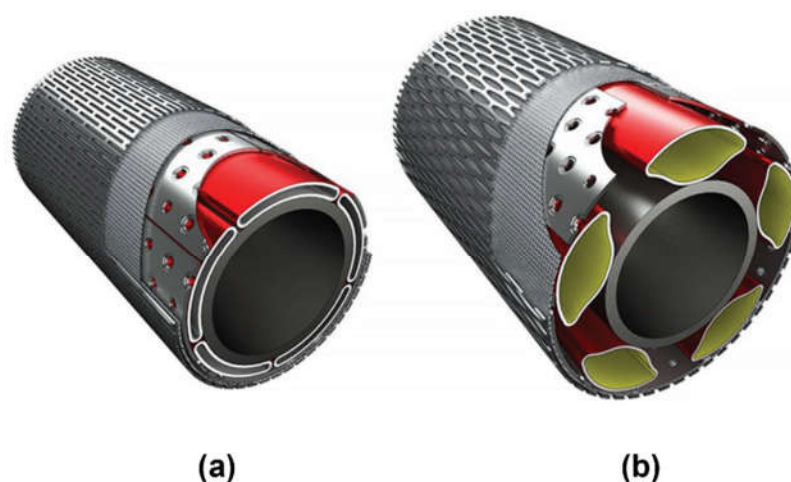


**Figura 2.14 – Tela expansível: (a) estado inicial; (b) expandida (Watson & Jones, 2009).**

Por meio desse processo, o espaço anular entre a tela e a formação é reduzido, as partículas soltas em seu entorno são confinadas e a parede do poço se beneficia com

maior estabilidade (Bellarby, 2009). O uso desse sistema tem como vantagem a instalação facilitada e a produtividade semelhante à de poços que utilizam pacotes granulares. Sendo amplamente empregado e preferível, por vezes, no lugar de poços abertos ou revestidos com pacote granular.

Para finalizar pode-se citar a tela *Endurance Hydraulic Screen* lançada em 2015, com características análogas às das telas *premium* e expansíveis, vista como a junção desses dois tipos, conforme observado na Figura 2.15. Onde os tubos expansíveis, diferente do convencional, são ativados por meio de pressurização. De forma que, a instalação do sistema elimina a necessidade de equipamentos tradicionais de expansão e mantém benefícios relacionados à redução do espaço anular. Com a possibilidade de ser aplicado em reservatórios rasos e profundos, de produção ou injeção, em situações de alta pressão e alta temperatura (Coffin & Oddie, 2018).



**Figura 2.15 – Tela Endurance Hydraulic Screen: (a) estado inicial; (b) ativada (Coffin & Oddie, 2018).**

#### **2.4.3.3. Pacotes Granulares**

Os métodos que envolvem o emprego de pacotes granulares consistem na utilização de areia ou de material cerâmico com maior granulometria que a da formação, para servirem de filtro e impedirem a entrada de partículas no poço. Sua aplicação deve ser aliada à telas de contenção (*Sand Screens*) dimensionadas



apropriadamente para permitirem o fluxo do fluido sem que o material do pacote granular seja carregado (Bellarby, 2009).

A seguir serão discutidos os tipos de pacotes granulares utilizados: *Gravel Pack* e *Frac Pack*; e serão apresentados alguns dos seus elementos de completção.

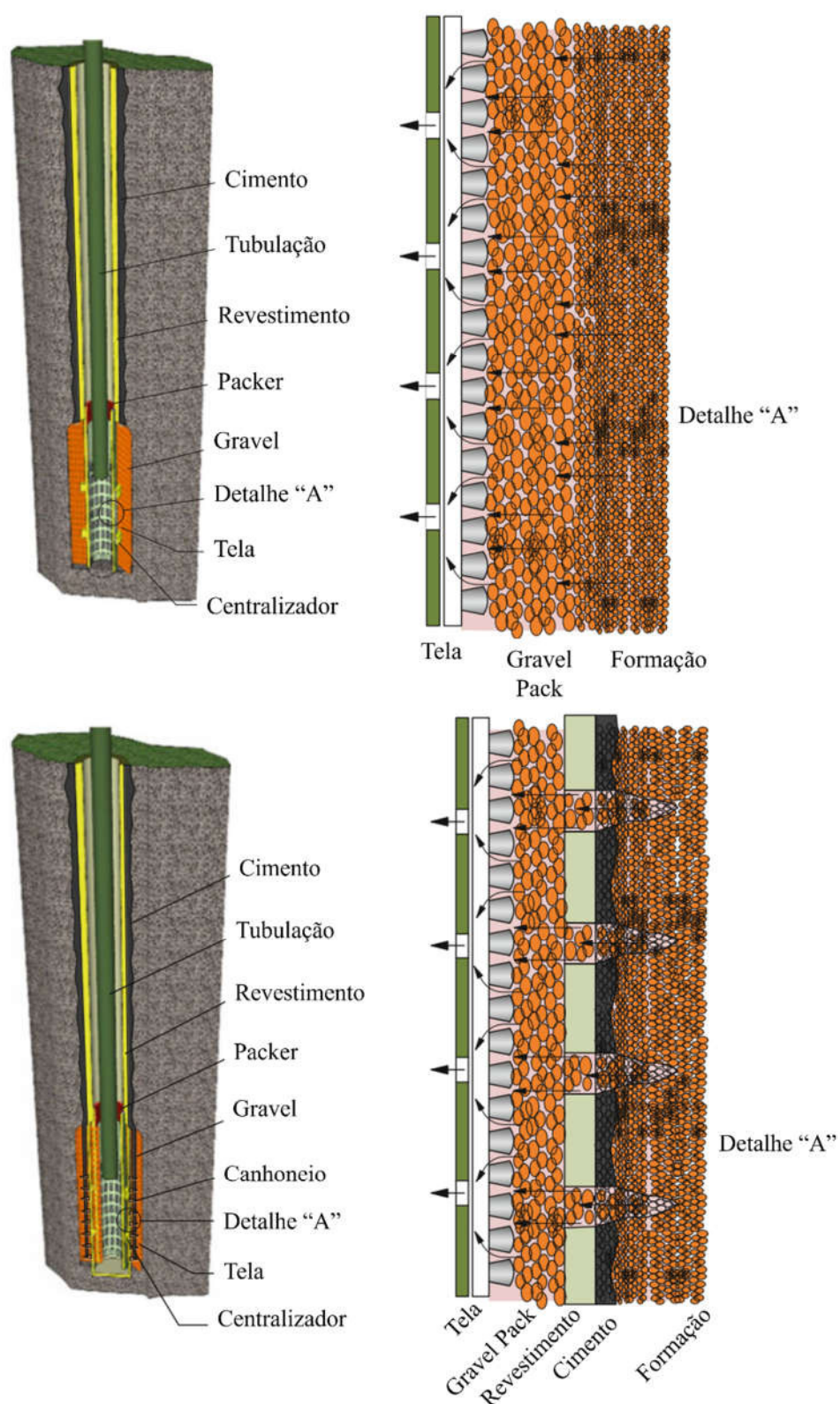
#### ➤ Gravel Pack

Dentre os problemas existentes nas telas de controle estão a possibilidade de erosão da estrutura e de obstrução das aberturas, o que resulta na limitação do fluxo do fluido de reservatório. Diante disso, uma das soluções é a utilização do pacote granular (*Gravel Pack*) que além de reter os sólidos, propicia estabilidade à parede do poço através do confinamento da formação (Ali et al., 2001).

Inicialmente implantado em poços verticais e inclinados, esse sistema teve sua aplicação expandida para poços horizontais, com bons resultados em formações com pouca ou nenhuma consolidação (Waltman et al., 2010). Sendo adotado em campos brasileiros, formados em sua maioria de arenitos não consolidados, como os da Bacia de Campos. Farias et al. (2005) citam como motivos de escolha do *gravel pack* nesses campos a maior longevidade em relação ao uso isolado de telas de controle (*Standalone*), o alto custo de manutenção das telas caso fossem obstruídas (uma vez que os poços são profundos) e a eficiência do método em poços abertos horizontais (os quais são predominantes na região).

Outra área que faz uso do *gravel pack* é a do Golfo do México que aplica essa técnica em sua maioria em poços revestidos, os quais garantem maior isolamento e são ideais para formações com grãos muito finos e de baixa permeabilidade (Bellarby, 2009). A Figura 2.16 mostra dois possíveis cenários de uso do *gravel pack*, em ordem de apresentação: em poço aberto e em poço revestido.

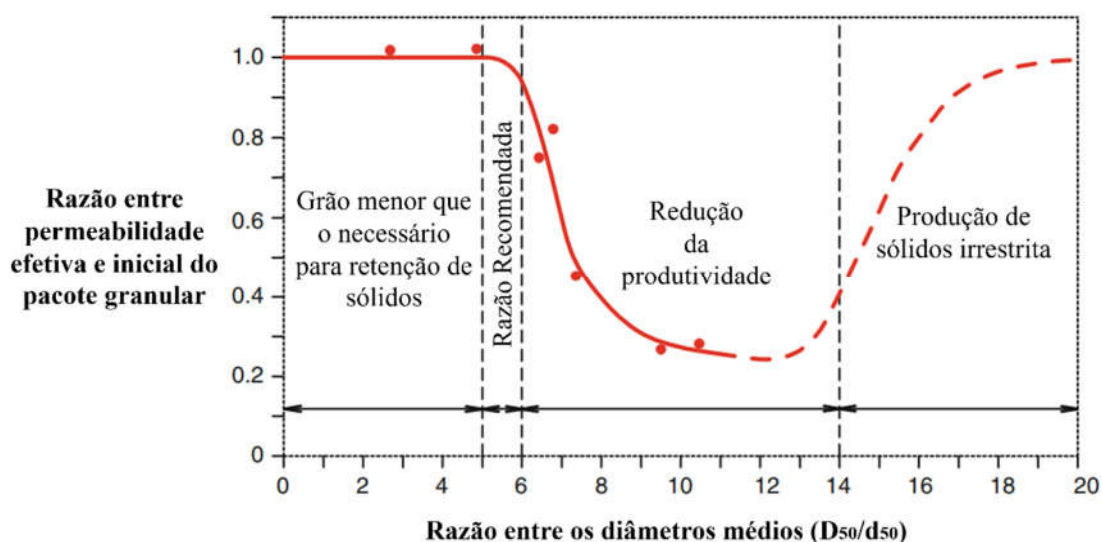




**Figura 2.16 – Completação com gravel pack, em ordem de apresentação: poço aberto e poço revestido, as setas mostram o fluxo do fluido (Matanovic et al., 2012).**

Para que o pacote granular seja colocado entre a tela e a formação ou entre a tela e o revestimento faz-se uso de um fluido que deve ser capaz de transportar de maneira uniforme as partículas para o fundo do poço, ter vazão suficiente para ocupar o espaço anular e/ou a área canhoneada, e não ser prejudicial a permeabilidade da rocha reservatório (Absatdarov, 2014).

Quanto aos grãos é recomendado que tenham esfericidade e arredondamento maior ou igual a 0,6, baixa solubilidade aos ácidos clorídrico (HCl) e fluorídrico (HF) e diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 5 a 6 vezes o diâmetro médio da formação ( $d_{50}$ ). Esse último parâmetro foi definido por Saucier em 1972, através de um estudo comparativo que levou ao resultado do gráfico da Figura 2.17 que mostra a influência da razão entre os diâmetros médios e a permeabilidade do *gravel pack* (Matanovic et al., 2012).



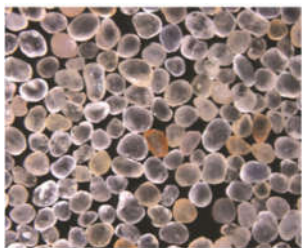
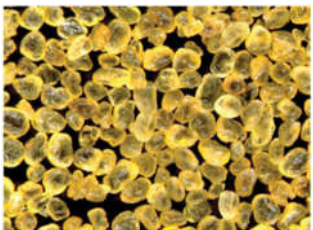

**Figura 2.17 – Efeito entre a razão dos diâmetros médios do gravel pack e formação na permeabilidade do pacote (Saucier, 1972 apud Matanovic et al., 2012).**

A fim de controlar a qualidade dos materiais empregados no pacote granular, foi desenvolvida a API RP 58 (1995) posteriormente substituída pela API STD 19C (2018) a qual apresenta especificações, metodologias e procedimentos para avaliação de características como: solubilidade a ácidos, tamanho médio das partículas, densidade e resistência ao esmagamento. Em conformidade com o especificado pode-se listar três tipos principais de materiais aplicados tanto no *gravel pack* quanto no *frac pack* os

quais são: areias naturais, areias tratadas com resina e propantes cerâmicos (bauxita, caulim, silicato de magnésio, dentre outros).

Por ter maior disponibilidade na natureza, a areia pura é a mais adotada e a que possui menor custo, porém, suas partículas são irregulares e seu conjunto apresenta menor resistência ao esmagamento. Já a areia tratada com resina tem sua resistência aumentada assim como o seu custo, ao passo que nos propantes cerâmicos destaca-se a alta resistência, o formato uniforme das partículas, a melhor condutividade e o maior custo dentre todos. A Tabela 2.1 traz imagens e características desses materiais.

**Tabela 2.1 – Materiais utilizados nos pacotes granulares (Campos et al., 2018; Guo et al., 2017).**

MATERIAL		DENSIDADE ESPECÍFICA (G/CM <sup>3</sup> )	RESISTÊNCIA À TENSÃO DE FECHAMENTO (PSI)
	Areia natural	2,65	< 6000 (~41 MPa)
	Areia tratada com resina	2,55	< 8000 (~55 MPa)
	Cerâmica de resistência intermediária	2,7-3,3	5000-10000 (~34-69 MPa)
	Cerâmica de resistência elevada	3,4	> 10000 (~69 MPa)
	Bauxita	2,00	> 7000 (~48 MPa)

Após definir as características do pacote granular é necessário escolher telas de controle com aberturas pequenas o suficiente que impeçam a entrada dos grãos do *gravel pack* no interior do poço, para isso Renpu (2011) determina que a largura dessas aberturas esteja no intervalo entre a metade e dois terços do diâmetro do menor grão do pacote granular, a Tabela 2.2 mostra essa correlação.

**Tabela 2.2 – Correlação entre o diâmetro do gravel pack e a largura das aberturas da tela de controle de sólidos (Renpu, 2011).**

GRANULOMETRIA DO <i>GRAVEL PACK</i>		ABERTURA DA TELA DE CONTROLE DE SÓLIDOS	
Malha	Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Largura (in)
40~60	0,419~0,249	0,15	0,006
20~40	0,834~0,419	0,30	0,012
16~30	1,190~0,595	0,35	0,014
10~20	2,010~0,834	0,50	0,020
10~16	2,010~1,190	0,50	0,020
8~12	2,380~1,680	0,75	0,030

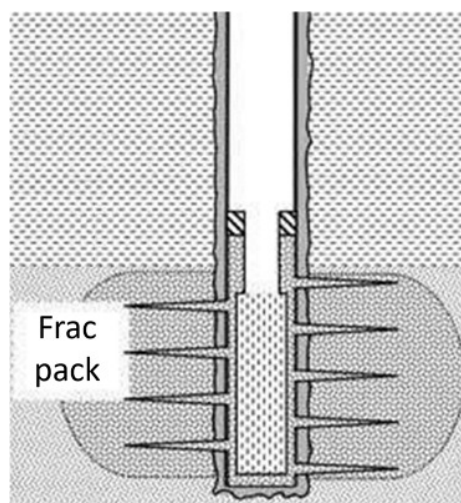
#### ➤ Frac Pack

O último método a ser abordado será o *frac pack* que nada mais é que a junção de uma conhecida técnica de estimulação (fraturamento hidráulico) com uma técnica de controle de sólidos (*gravel pack*). Referente ao fraturamento hidráulico sabe-se que este consiste no bombeamento de um fluido, composto por água e produtos químicos, com pressão acima da pressão de fraturamento da rocha, cujo intuito é alongar os espaços canhoneados e criar novos caminhos de fluxo. Junto a esse fluido estão agentes de sustentação (areias ou propantes) que tem a função de manter o espaço fraturado aberto durante a produção de hidrocarbonetos (Thomas, 2001).

Quando aliada ao *gravel pack* essa técnica traz vantagens como: criação de áreas de fluxo com alta permeabilidade, menor movimentação de partículas finas e redução do diferencial de pressão que poderia levar a falhas por cisalhamento, o que torna o

*frac pack* ideal para formações frágeis, de baixa permeabilidade ou pouco consolidadas, como arenitos e xistos.

Entretanto, seu uso não é recomendado para intervalos próximos a aquíferos pela possibilidade de entrada de água na zona produtora ou de contaminação do aquífero pelos produtos químicos presentes no fluido de fraturamento (Matanovic et al., 2012 apud MESSE et al., 1994). Diferente do *gravel pack* esse método só pode ser aplicado em poços revestidos, de acordo com o ilustrado na Figura 2.18.



**Figura 2.18 – Completação com frac pack (Rackley, 2010).**

#### ➤ Completação com pacotes granulares

Existem estruturas de completção típicas à poços que empregam pacotes granulares, as quais tem a função de isolar e controlar o intervalo onde o material do *gravel pack* ou do *frac pack* serão aplicados. Assim, para melhor compreensão, algumas dessas estruturas serão apresentadas e discutidas a seguir (Thomas, 2001; Moreno et al., 2009):

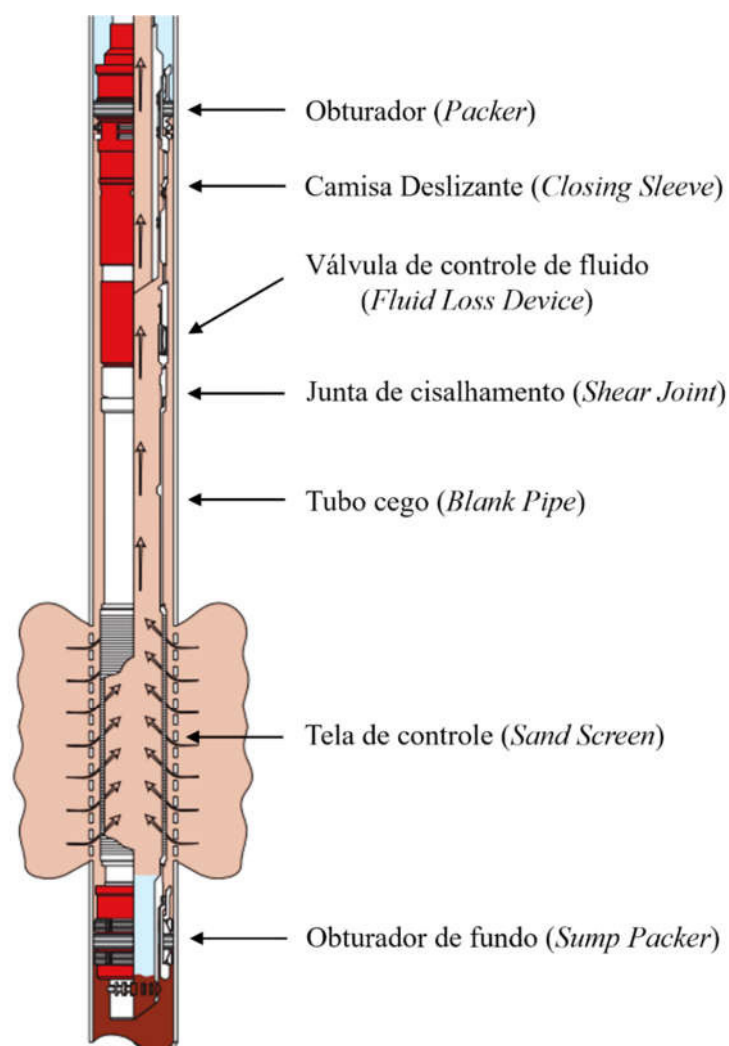
- Obturador (*Packer*): é uma estrutura composta por borrachas de vedação, pinos de cisalhamento e cunhas de ancoragem que tem como objetivo vedar o espaço anular entre a coluna de produção e o revestimento, além de isolar as zonas de aplicação e proteger as estruturas acima dele contra pressões da formação e fluidos corrosivos;
- Junta telescópica (*telescoping joint, tubing seal receptacle - TSR* ou *polished bore receptacle - PBR*): é um dispositivo expansível localizado acima do *packer*

(TSR) ou acoplado a este (PBR), cujo intuito é absorver os movimentos de expansão ou contração da coluna de produção, os quais podem ser gerados por mudança de temperatura, flambagem, injeção e produção de fluidos; serve também para retirar a coluna de produção sem que seja necessário retirar o *packer*;

- Unidade selante (*Seal bore*): é um equipamento que tem como função vedar o *packer* ou o *sump packer*, localizado abaixo do primeiro e acima do segundo;
- Camisa deslizante (*Sliding Sleeve* ou *Closing Sleeve*): é uma estrutura que possui um sistema de abre e fecha, cujo intuito é permitir a comunicação da coluna de produção com o espaço anular, aberto o sistema possibilita o bombeamento do fluido com material granular para o local de aplicação e fechado evita que o material retorne para a coluna de produção;
- Válvula de controle de fluido (*Fluid Loss Control*): é um dispositivo que controla a perda de fluido do interior do poço e isola a formação, o que evita que o fluido de completação altere as propriedades hidráulicas da rocha reservatório;
- Junta de cisalhamento (*Shear Joint* ou *Shear Out Safety Joint*): é um equipamento de segurança que permite que as estruturas superiores e inferiores sejam vedadas e separadas caso ocorra algum problema, possibilitando a recuperação dos equipamentos;
- Tubo cego (*Blank Pipe*): é uma tubulação localizada entre a junta de cisalhamento e a tela de controle que, assim como esta, terá seu espaço anular preenchido com material granular, de forma a garantir que o material permaneça acima da tela com certa margem de segurança, para que, caso haja uma eventual concentração de material na parte inferior, a tela continue circundada com o pacote granular;
- Tela de controle de sólidos (*Sand Screen*): é uma tubulação metálica do tipo *liner* rasgado, *wire-wrapped*, *pre-packed* ou *premium*, que tem por objetivo impedir a entrada do material do pacote granular no poço;
- *Tell tale screen*: é uma tela de referência para aplicação do pacote granular que fica antes ou depois da tela de controle;

- Obturador de fundo (*Sump Packer*): é uma estrutura selante localizada no último intervalo de aplicação do pacote granular, é comum em poços revestidos e assim como o *packer* também é constituído de borrachas de vedação, pinos de cisalhamento e cunhas de ancoragem;
- *Bull plug*: é um equipamento sólido que fica na extremidade da tubulação para que esta seja fechada.

A Figura 2.19 mostra um sistema típico de estruturas adotadas em poços revestidos canhoneados com pacote granular, com alguns dos equipamentos abordados.

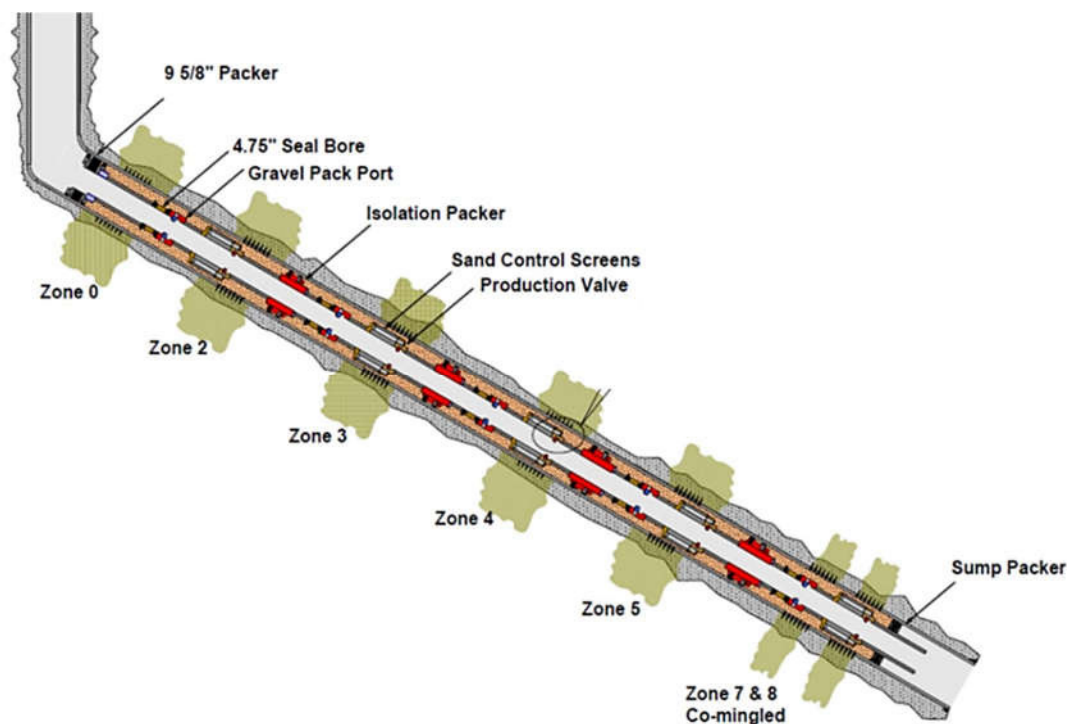


**Figura 2.19 – Estruturas de completção para poços com pacotes granulares (Moreno et al., 2009).**

Como o poço pode ter vários intervalos de produção o sistema da Figura 2.20 deverá se repetir, com a divisão da extensão do poço em zonas, onde cada uma delas



deve ser separada por *packers* e unidades selantes, conforme observado na Figura 2.20. Essa esquematização também é válida para poços abertos, entretanto, é importante ressaltar que as estruturas podem mudar de um poço a outro, a depender da complexidade do projeto.



**Figura 2.20 – Estruturas de completção em um poço com várias zonas de gravel pack (Burton et al., 2017).**

#### **2.4.4. Comparação entre os métodos**

Após a compreensão dos métodos de controle é necessário determinar qual deles é o ideal para atender à formação e aos propósitos do poço. Para isso, alguns aspectos devem ser levados em consideração, tanto do sistema (durabilidade e custo) quanto da rocha (resistência e granulometria). A começar pelos dados da formação, pode-se citar três parâmetros granulométricos determinantes para a escolha de um método mecânico, os quais são: o *Sorting Coefficient* (SC), dado pela razão entre os diâmetros das peneiras em que passam, respectivamente, 10% e 95% do solo; a percentagem de grãos finos menores que 44 micrometros e o *Uniformity Coefficient* (UC), referente a razão



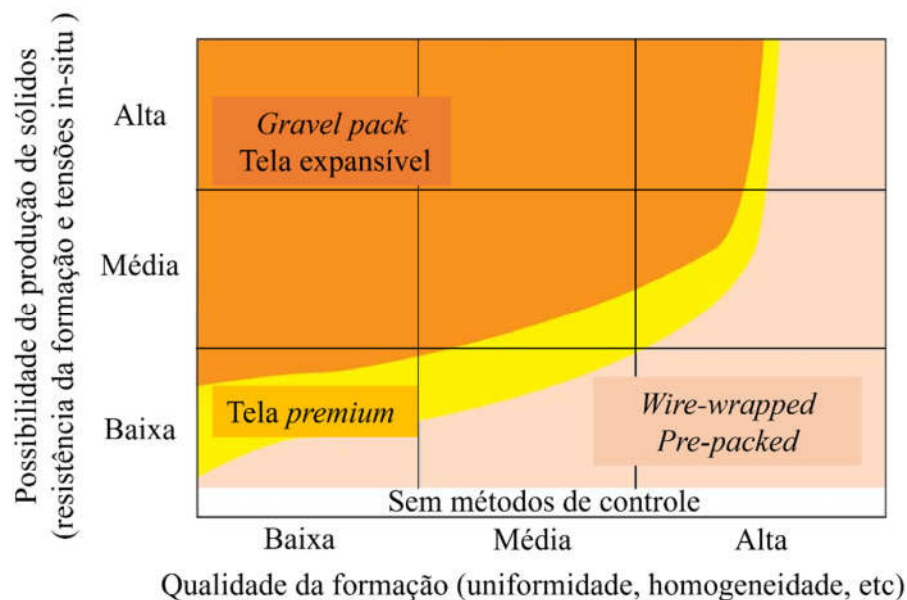
entre os diâmetros das peneiras em que passam, respectivamente, 40% e 90% da amostra.

A partir desses índices Byrne et al. (2010 apud Tiffin et al., 1998) estabelecem as relações apresentadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Método mecânico de controle apropriado de acordo com parâmetros granulométricos (Byrne et al., 2010 apud Tiffin et al., 1998).**

CARACTERÍSTICAS DA FORMAÇÃO			MÉTODO MECÂNICO APROPRIADO
SC	UC	Finos (< 44 µm)	
< 10	<3	<2	<i>Wire-wrapped screens</i>
< 10	> 3 e < 5	> 2 e < 5	<i>Premium screens</i>
> 10 e < 20	< 5	> 5 e < 10	<i>Gravel Pack</i> ou Tela expansível

É importante notar que quanto menores os coeficientes SC e UC mais homogênea e uniforme será a formação. Por essa ótica, a Figura 2.21 traz um gráfico demonstrativo em que mostra a melhor solução para poços do Golfo do México e do Mar Norte de acordo com a qualidade da formação e a possibilidade de produção de sólidos.



**Figura 2.21 – Determinação do método mecânico de acordo com as características da formação (Bellarby, 2009 apud Bennett & Gilchrist, 2000).**

Diante disso, é possível concluir que o *gravel pack* e a tela expansível são os métodos mecânicos que possuem maior variedade de aplicação, sendo preferíveis em

situações críticas onde a qualidade da formação é baixa e a produção de sólidos é alta. Já em relação aos métodos não mecânicos, destaca-se a estratégia de consolidação química a qual pode ser adotada em rochas frágeis com baixa cimentação, enquanto o método de seleção de intervalos e orientação de canhoneio só pode ser adotado em rochas de alta resistência mecânica e o de controle de fluido traz o encargo da rocha ter que estar em constante monitoramento. Para resumir e comparar as características dos diferentes métodos será apresentada a Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Comparação entre métodos de controle de sólidos (Matanovic et al., 2012).**

	CONFIABILIDADE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Controle do fluido de produção</b>	Baixa	Execução simples e o mais barato dentre os métodos	Exige constante monitoramento e limita a capacidade de produção
<b>Seleção de Intervalos e Orientação do canhoneio</b>	Limitada a formações resistentes ou heterogêneas	Eficaz em formações heterogêneas e resistentes	Problemas em formações homogêneas
<b>Consolidação Química</b>	Alta	Mais barato que o <i>gravel pack</i> e adequado a altas pressões	Só pode ser aplicado em pequenos intervalos
<b>Telas de Controle de Sólidos</b>	Boa, exceto em formações heterogêneas	Alta produtividade	Entupimento, colapso e erosão
<b>Poço aberto com <i>Gravel Pack</i></b>	Boa	Extensa aplicabilidade	Alto custo de instalação
<b>Poço revestido com <i>Gravel Pack</i></b>	Boa	Confiabilidade e eficiência	Alto custo de instalação e complexidade
<b><i>Frac Pack</i></b>	Alta	Aumento da área de fluxo e permeabilidade	Alto custo

### 3

## Modos de falha em revestimentos e filtros de areia

### 3.1.

#### Modos de falha em revestimentos

#### 3.1.1.

##### Cisalhamento

O mecanismo de cisalhamento do revestimento está intimamente ligado ao cisalhamento da rocha, logo, é primordial que se compreenda o funcionamento deste. De acordo com Dusseault et al. (1998): “por conta do comportamento não homogêneo e isotrópico dos geomateriais, e por apresentarem amolecimento (*strain-weakening*), a deformação por cisalhamento da rocha tende a se concentrar em planos”. Estes planos geralmente se manifestam em interfaces de materiais com diferentes rigidezes ou em descontinuidades.

Quando que esses planos atravessam o revestimento é comum que se tenha a falha mostrada na Figura 3.1 em que o revestimento desenvolve a chamada perna de cão (*dogleg*).

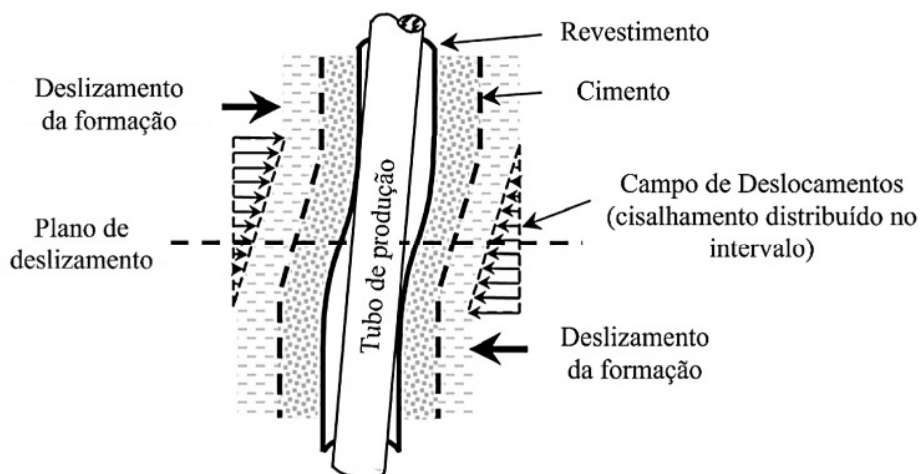


Figura 3.1 – Dogleg em revestimento devido ao deslizamento da formação (Dusseault et al., 1998).

Diversos são os fatores e cenários em que o cisalhamento pode ocorrer. Para elucidá-los e compreender a relação entre as mudanças no estado de tensões da rocha e o comportamento do revestimento, eles serão apresentados individualmente a seguir.

### 3.1.1.1.

#### Cisalhamento induzido por compactação

A compactação de um reservatório tem como origem a diminuição da poropressão da rocha, ocasionada por atividades como produção e depleção que mudam o estado de tensões do reservatório e provocam a redução da sua porosidade. O princípio de Terzagui da tensão efetiva, apresentado na Equação 3.1, auxilia na compreensão desse fenômeno.

$$\sigma' = \sigma - P_p \quad (3.1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão total,  $\sigma'$  é a tensão efetiva e  $P_p$  é a poropressão.

Conforme pode ser visto, a presença da poropressão na formação faz com que a tensão total (ou tensão de sobrecarga) gerada pelas camadas acima do reservatório seja aliviada, de forma que esta fique sujeita apenas à tensão efetiva. Entretanto, quando a poropressão é reduzida, parte do suporte à tensão deixa de existir o que resulta no aumento da tensão efetiva e no movimento dos grãos para preencherem os espaços antes ocupados por fluidos, dando início ao processo de compactação.

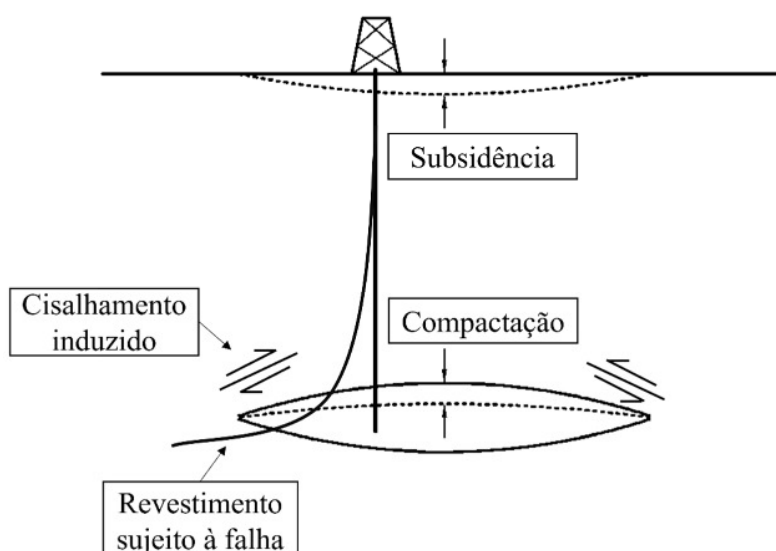


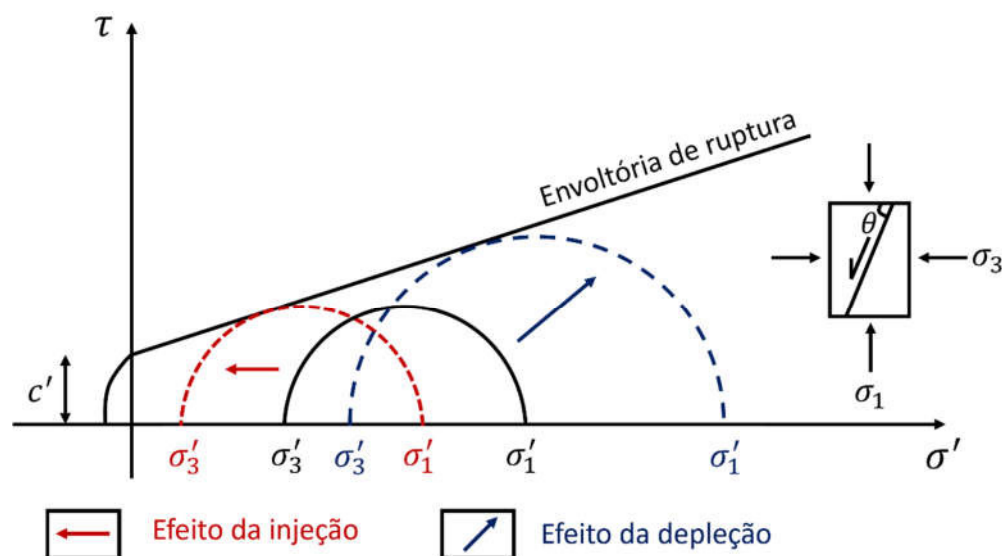
Figura 3.2 – Compactação e cisalhamento induzido (Fjaer et al., 2008).

Em geral na compactação as tensões são distribuídas e seguem o efeito arco com concentração nas laterais, onde ocorre o cisalhamento induzido na rocha e o revestimento fica mais suscetível à falha, de acordo com o observado na Figura 3.2.

### 3.1.1.2.

#### Cisalhamento induzido por injeção

O processo de injeção de fluidos tem efeito contrário ao da depleção, pois provoca o aumento da poropressão e resulta na diminuição das tensões efetivas. Essa redução acaba por facilitar o cisalhamento da rocha, de acordo com o observado na Figura 3.3, onde o círculo de Mohr é movimentado para a esquerda se aproximando da envoltória de ruptura. Para efeito comparativo a figura traz também a alteração das tensões quando ocorre o processo de depleção, de maneira a elucidar como o acréscimo ou decréscimo de poropressão induz à falha por cisalhamento.



**Figura 3.3 – Cisalhamento induzido por injeção, círculo em vermelho, e por depleção, círculo em azul.**

Além desse comportamento característico, a injeção também provoca a expansão da formação, o que resulta no cisalhamento em regiões de interface, isso ocorre porque as rochas adjacentes apresentam resistência ao movimento por não terem passado pela mesma mudança de tensões que a rocha reservatório. Assim, os revestimentos a serem monitorados devem ser, principalmente, os contidos nas interfaces ou próximos a

falhas que tendem a ser reativadas em decorrência da redução da tensão normal (Dusseault et al., 1998).

### 3.1.1.3.

#### Cisalhamento induzido por processos termais

Ao se deparar com um poço cujo óleo tem viscosidade alta o bastante para impedir a produção recorre-se a métodos termais como a injeção de vapor que, segundo McLeroy e Caudle (2021), reduzem em 10 vezes a viscosidade do óleo a cada 50°C adicionados e viabilizam a produção. Contudo, esse processo leva ao aumento da poropressão, à diminuição da tensão efetiva e principalmente à expansão térmica da rocha devido ao acréscimo de temperatura que, em geral, é maior que 250°C.

De maneira que, semelhante ao que ocorre na injeção de fluidos, as regiões críticas são as de interface onde há um grande diferencial de temperatura, conforme exposto na Figura 3.4.

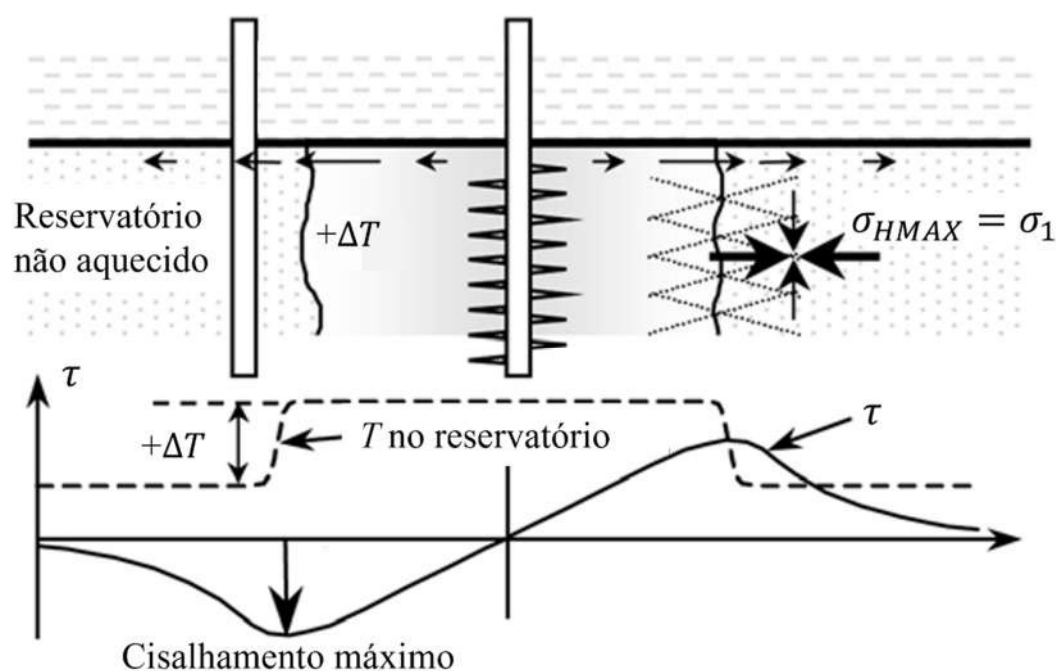
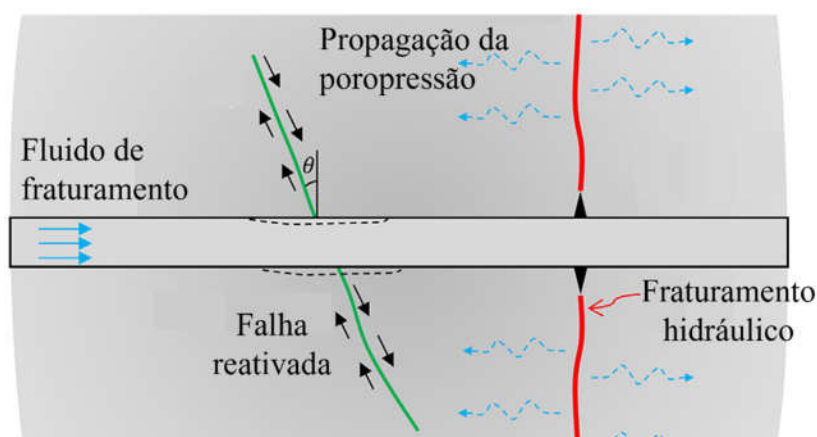


Figura 3.4 – Cisalhamento induzido por processos termais em poços adjacentes não aquecidos (Dusseault et al., 1998).

#### 3.1.1.4.

#### Cisalhamento induzido por fraturamento hidráulico

Apesar de pouco relatado em campos do continente americano, o cisalhamento induzido por fraturamento hidráulico tem sido uma das grandes preocupações no que se refere à produção de gás em folhelhos do território Chinês. Isso se deve à presença de falhas naturais que são reativadas em decorrência do fluido de fraturamento que, quando injetado, leva ao aumento da poropressão e à diminuição das tensões efetivas (Zhao et al., 2018; Li et al., 2019). Com essa reativação, a formação se movimenta e provoca a deformação no revestimento de acordo com o apresentado na Figura 3.5.



**Figura 3.5 – Cisalhamento no revestimento devido a reativação de falha induzida pelo fraturamento hidráulico (Li et al., 2019).**

#### 3.1.2.

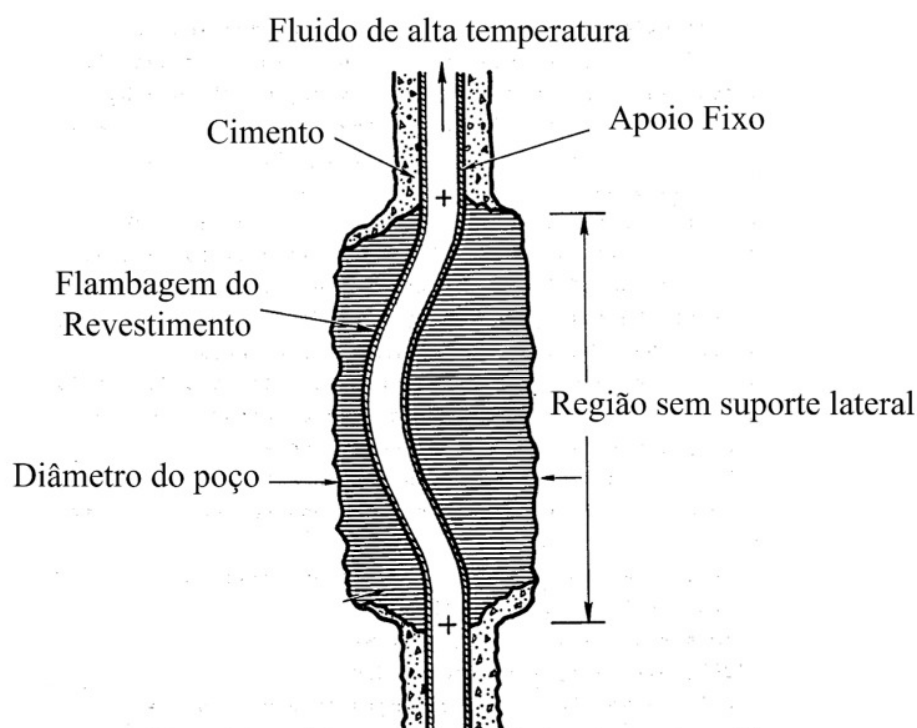
#### Flambagem

O estudo de flambagem em estruturas convencionais leva em consideração três aspectos principais: a carga de compressão aplicada, as características geométricas da seção e os tipos de apoio nas extremidades da coluna. Porém, no caso de revestimentos de poços, devido a sua condição confinada, outro aspecto deve ser observado: o nível de restrição lateral.

Essa restrição depende tanto da existência e qualidade da cimentação no espaço anular entre a formação e o revestimento, quanto da estabilidade da rocha. De maneira

que, intervalos não cimentados ou com produção de sólidos tornam-se suscetíveis a esse fenômeno.

Pode-se destacar duas formas comuns de induzir a flambagem do revestimento: a redução da poropressão na formação e o aumento de temperatura no tubo. Onde, no primeiro caso, a flambagem se dá pela carga axial provocada pela compactação do reservatório devido a redução da poropressão. E no segundo caso, a tubulação tende a se expandir e presenciar a flambagem em regiões de baixo suporte lateral que acabam por absorver o movimento de expansão impedido nas regiões com boa restrição lateral, o que pode ser visto na Figura 3.6.

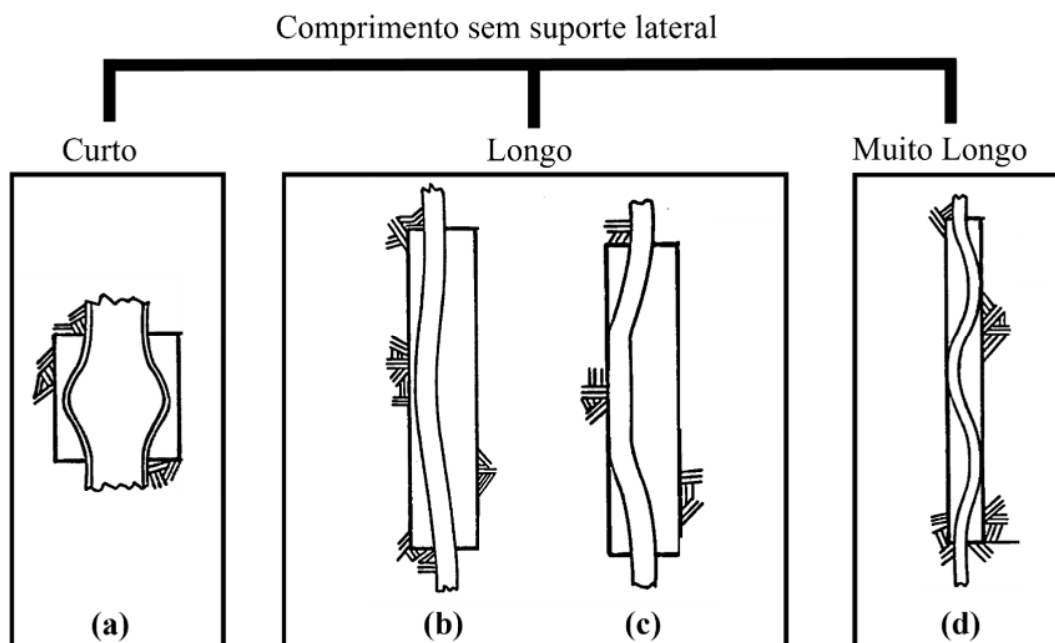


**Figura 3.6 – Flambagem do revestimento devido a fluido de alta temperatura (Rechard & Schuler, 1983).**

Rechard & Schuler (1983) dividem as formas de instabilidade do revestimento gerado pelo carregamento térmico em quatro categorias, sendo três delas devido à flambagem, as quais também podem ser estendidas para os casos em que há compactação, são elas: (a) deformação plástica local; (b) flambagem; (c) flambagem em contato com a parede do poço com possível deformação plástica; e (d) flambagem



helicoidal. Um dos fatores determinantes para essa divisão é o comprimento em que o tubo fica sem suporte lateral, conforme exposto na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Tipos de instabilidade do revestimento: (a) deformação plástica local; (b) flambagem; (c) flambagem em contato com a parede do poço; e (d) flambagem helicoidal (Adaptado de Rechard & Schuler, 1983).**

Para estimar as cargas críticas para os casos de flambagem correspondentes às configurações mostradas na Figura 3.7 (em b, c e d) utiliza-se o critério de Euler, descrito na Equação 3.2.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} \quad (3.2)$$

onde  $P_{cr}$  é a carga crítica de flambagem,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $I$  é o momento de inércia,  $L$  é o comprimento entre apoios e  $K$  é um fator que depende da condição de apoio do revestimento na região em que ocorre a flambagem.

Para o caso bi apoiado da Figura 3.7b, onde todo o trecho está sem suporte lateral, tem-se que  $K = 1$ , já para os casos em que o revestimento tem contato com a formação como nas Figuras 3.7c e 3.7d os fatores são de, respectivamente,  $K = \frac{1}{9.09} = 0.11$  e  $K = \frac{1}{34.15} = 0.029$ . Estes dois últimos foram deduzidos por Huang et al. (2016) de maneira a levar em consideração o contato contínuo do revestimento com a formação em alguns pontos ao longo do comprimento de flambagem.

### 3.1.3. Colapso e Rebentamento (*Burst*)

Nesta seção serão apresentados os modos de falha conhecidos como colapso e rebentamento (*burst*) que dependem do equilíbrio entre as pressões, interna e externa, atuantes no revestimento. A começar pelo colapso, sabe-se que ele corresponde à falha quando a pressão externa excede a pressão interna, podendo ser calculado a partir da tensão de escoamento do material e do índice de esbeltez da seção.

Em função desses dois parâmetros, a falha por colapso é dividida em quatro tipos, os quais são (Mitchell, 2006):

- Colapso por escoamento: é característico de tubos com baixo índice de esbeltez (cuja razão diâmetro/espessura é menor que 15) e apresenta o maior valor de resistência sendo quantificado a partir das formulações de Lamé para cilindros de paredes grossas;
- Colapso plástico: junto ao colapso de transição, é típico de tubos com índice de esbeltez intermediário, quantificado a partir de análises de regressão com dados de 2488 testes realizados em revestimentos dos tipos K-55, N-80 e P-110;
- Colapso de transição: foi categorizado com o intuito de apurar as falhas que ocorriam entre os colapsos plástico e elástico, através de uma curva de ajuste entre estes;
- Colapso elástico: identificado em tubos de parede fina (com a razão diâmetro/espessura maior que 25), representa a falha por instabilidade do revestimento sendo o único que independe da tensão de escoamento do material.

O Instituto Americano de Petróleo traz na API BULL 5C3 (1994) as formulações das pressões de colapso para cada um deles. Em relação ao colapso por escoamento a API utiliza como base as equações de Lamé (Timoshenko & Goodier, 1951) aplicadas a cilindros de paredes grossas, de acordo com as Equações 3.3 e 3.4 que mostram as tensões radiais e tangenciais, respectivamente.

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 \cdot r_e^2 (P_e - P_i)}{r_e^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.3)$$

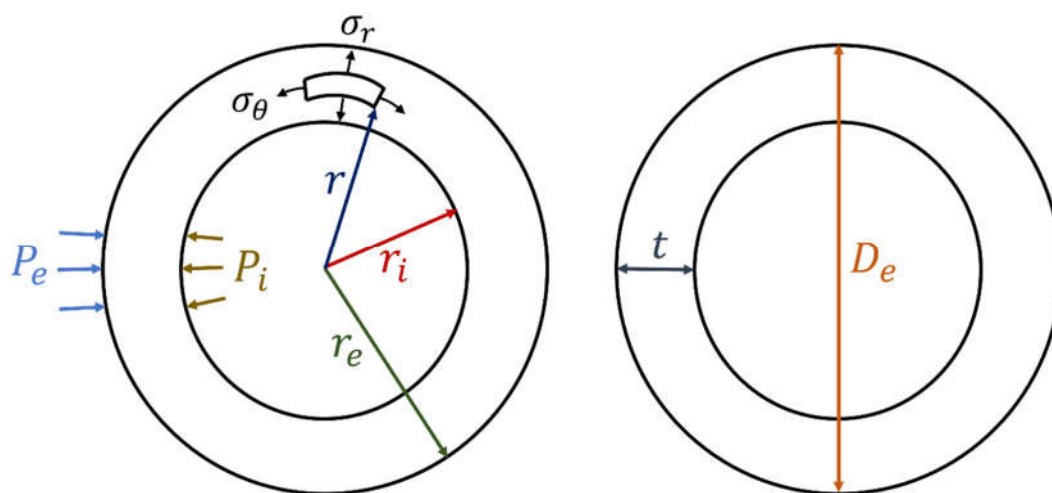
$$\sigma_{\theta} = - \frac{r_i^2 \cdot r_e^2 (P_e - P_i)}{r_e^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.4)$$

onde  $\sigma_r$  é a tensão radial,  $\sigma_{\theta}$  é a tensão tangencial,  $P_i$  é a pressão interna,  $P_e$  é a pressão externa,  $r_i$  é o raio interno,  $r_e$  é o raio externo e  $r$  é a distância entre o centro do tubo e o elemento diferencial de interesse.

Para expressar a situação crítica, considera-se que o revestimento está sujeito apenas à pressão externa e que a tensão que resiste ao colapso será a tangencial cujo valor máximo é obtido no elemento diferencial da face interna do tubo, logo:  $P_i = 0$ ,  $r = r_i$ . Com essas considerações a Equação 3.4 se reduz à Equação 3.5.

$$\sigma_{\theta} = \frac{-2 \cdot P_e \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (3.5)$$

Após isso, os raios podem ser expressos em função do diâmetro externo e da espessura do tubo. Visto que o raio externo é igual a metade do diâmetro externo ( $D_e$ ) e o raio interno é igual à diferença entre a metade do diâmetro externo e a espessura ( $t$ ), em conformidade com o exposto na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Ilustração do revestimento com pressões e características geométricas.**

Ao isolar a pressão externa e considerar o valor absoluto da Equação 3.5 (sem o sinal negativo), substitui-se o valor da tensão tangencial pela tensão de escoamento do material ( $\sigma_y$ ). E através de manipulações matemáticas chega-se na Equação 3.6 correspondente à pressão crítica que leva ao colapso por escoamento ( $P_{cy}$ ).

$$P_{cy} = \frac{2 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{D_e}{t} - 1\right)}{\left(\frac{D_e}{t}\right)^2} \quad (3.6)$$

Já a formulação da pressão que leva ao colapso plástico ( $P_{cp}$ ), foi feita por meio de análises de regressão com testes de colapso de 1440 revestimentos de modelo N-80, 402 de modelo K-55 e 646 de modelo P-110. Sendo expressa na Equação 3.7.

$$P_{cp} = \sigma_y \cdot \left( \frac{A}{D_e/t} - B \right) - C \quad (3.7)$$

Em que os fatores A, B e C seguem a Tabela 3.1, os valores apresentados devem ser interpolados e extrapolados para os outros modelos de tubos não contemplados na tabela, com base nisso a API fornece uma tabela mais completa para fins de consulta.

**Tabela 3.1 – Fatores A, B e C para diferentes tipos de tubos (API BULL 5C3, 1994).**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>K-55</b>	2,991	0,0541	1205
<b>N-80</b>	3,071	0,0667	1955
<b>P-110</b>	3,181	0,082	2855

A seguir, a Equação 3.8 traz a pressão de colapso de transição, baseada no ajuste entre as curvas de colapso plástico e elástico.

$$P_{ct} = \sigma_y \cdot \left( \frac{F}{D_e/t} - G \right) \quad (3.8)$$

Assim como os fatores A, B e C, os fatores F e G também dependem do tipo de tubo e são obtidos com base na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Fatores F e G para diferentes tipos de tubos (API BULL 5C3, 1994).**

	<b>F</b>	<b>G</b>
<b>K-55</b>	1,989	0,0360
<b>N-80</b>	1,998	0,0434
<b>P-110</b>	2,066	0,0532

Finalmente, segundo a API, a pressão de colapso elástico tem origem na formulação teórica expressa na Equação 3.9, contida em um artigo de 1939 intitulado “*A Rational Expression for the Critical Collapsing Pressure of Pipe Under External Pressure*” do autor W. O. Clinedinst. O qual relaciona a pressão de colapso com o módulo de elasticidade ( $E$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e a esbeltez do revestimento.

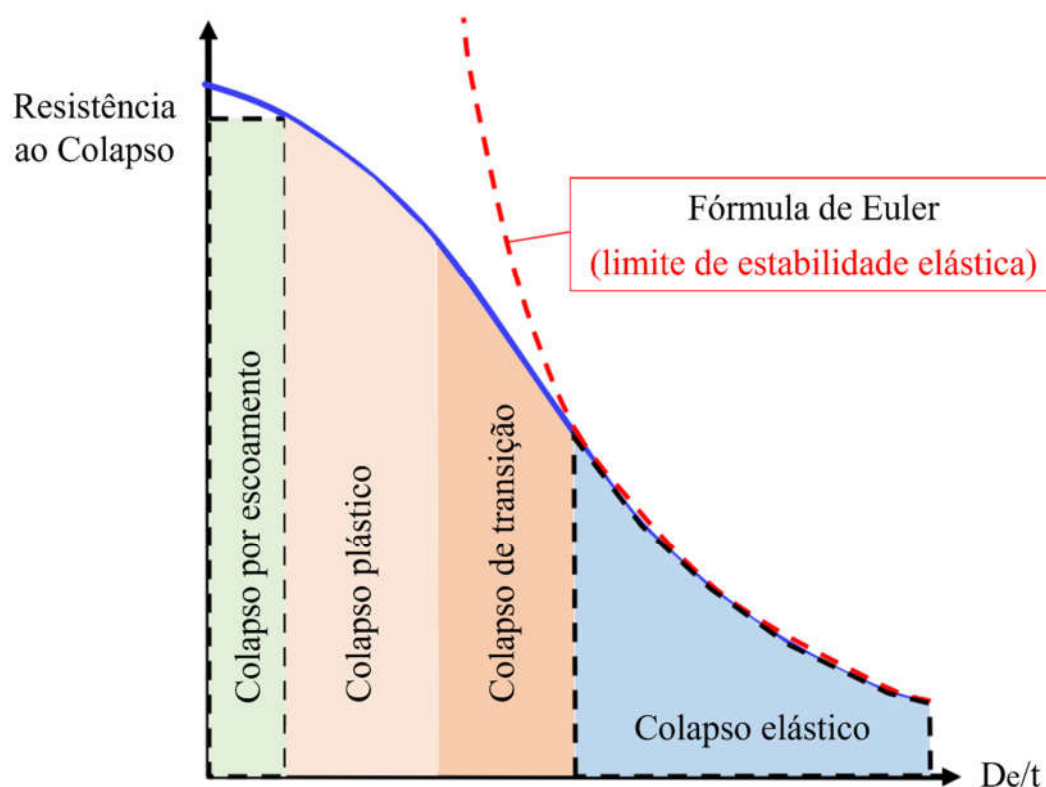
$$P_{ce} = \frac{2 \cdot E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{1}{(D_e/t)[(D_e/t) - 1]^2} \quad (3.9)$$

onde  $P_{ce}$  é a pressão externa crítica para o colapso elástico.

Em caráter normativo, a API adotou inicialmente  $E = 30 \cdot 10^6$  psi e  $\nu = 0,3$ , após substituí-los na Equação 3.9, foi realizada uma análise da curva teórica onde identificou-se a necessidade de corrigi-la com um fator de 0.712, como resultado a pressão de colapso elástico ( $P_{ce}$ ) foi representada pela Equação 3.10.

$$P_{ce} = \frac{46,95 \cdot 10^6}{(D_e/t)[(D_e/t)-1]^2} \quad (3.10)$$

Brechan et al. (2020) traz na Figura 3.9 uma curva resumo dos quatro tipos de colapso discutidos, em que o eixo horizontal é dado pela relação de esbeltez da seção (diâmetro externo/espessura) e o eixo vertical representa a resistência ao colapso, os autores relatam também que a curva de colapso elástico se assemelha à curva de Euler para instabilidade de colunas.



**Figura 3.9 – Curva de colapso de revestimentos (Brechan et al., 2020).**

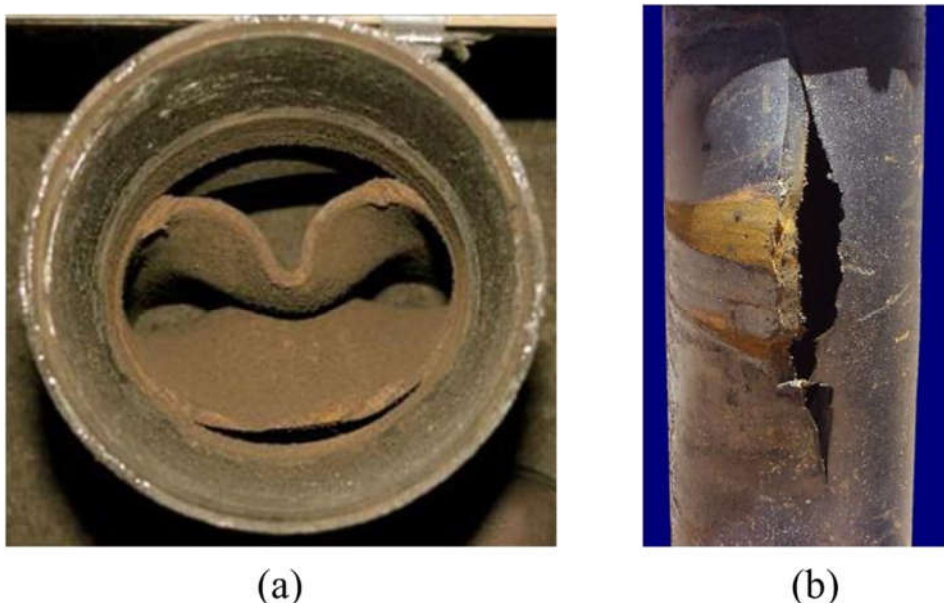
Contrário ao colapso, o rebentamento ocorre quando a pressão interna do tubo ultrapassa a pressão externa. E é calculado através da fórmula de Barlow (Stewart, 2016) que relaciona a pressão interna com a tensão tangencial e as características da seção, por meio da Equação 3.11.

$$P_i = \frac{2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot t}{D_e} \quad (3.11)$$

Na qual a tensão tangencial é substituída pela tensão de escoamento em conjunto com um fator de segurança que leva em conta apenas 87,5% dessa tensão, para cobrir possíveis falhas de fabricação. Dessa forma a pressão de rebentamento ( $P_{rebentamento}$ ) é dada pela Equação 3.12.

$$P_{rebentamento} = 0.875 \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot t}{D_e} \quad (3.12)$$

Referente ao comportamento do revestimento, observa-se que no colapso o tubo tende a se estreitar e no rebentamento tende a se expandir, conforme exposta na Figura 3.10.

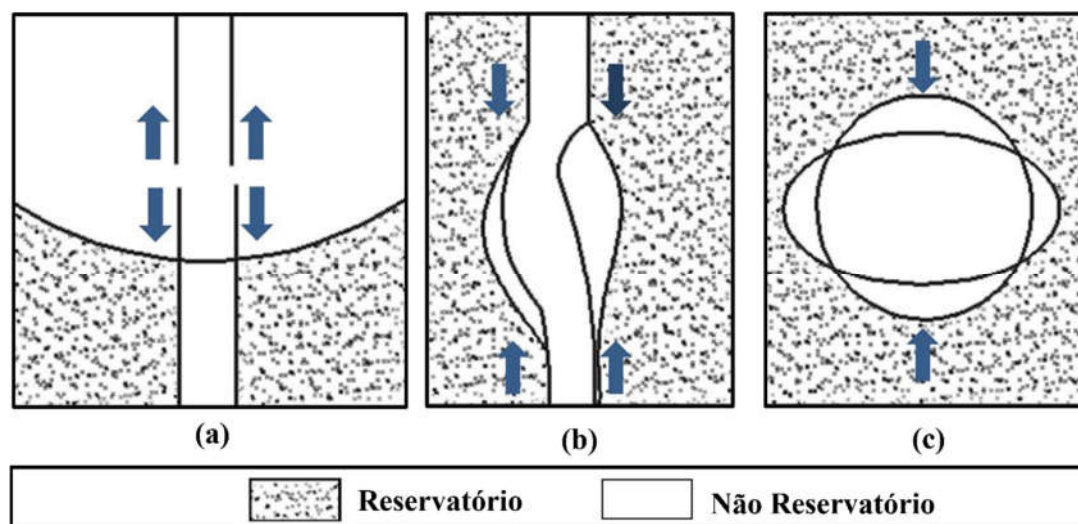


**Figura 3.10 – Falhas por excesso de pressão, externa e interna, no revestimento: (a) colapso; (b) rebentamento ou *burst* (Jerez, 2015).**

#### **3.1.4. Tração e Compressão**

Além da falha por flambagem, o esforço axial pode resultar na falha do revestimento tanto por tração quanto por compressão as quais podem ser ocasionadas pela movimentação da rocha em processos como o de compactação. Neste caso, dois cenários são observados, a compressão do revestimento contido na camada reservatório (com possível flambagem) e a tração da tubulação presente na camada acima dele, a

qual é forçada a acompanhar o movimento de compactação, a Figura 3.11 exemplifica essa situação com as possíveis formas de falha.



**Figura 3.11 – Falhas devido à compactação: (a) por tração; (b) e (c) por compressão (Taheri & Pak, 2020).**

Além da falha no sentido longitudinal, o revestimento também pode falhar lateralmente devido ao aumento das tensões confinantes, com consequente ovalização. Para a determinação do esforço crítico axial recorre-se à relação básica entre força e tensão, mostrada na Equação 3.13.

$$F = \sigma \cdot A_s \quad (3.13)$$

onde  $F$  é a força,  $\sigma$  é a tensão e  $A_s$  é a área da seção do tubo.

Ao particularizar essa equação, com a adoção da tensão de escoamento e da área da seção do revestimento encontra-se a Equação 3.14.

$$F_y = \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_y \cdot (D_e^2 - D_i^2) \quad (3.14)$$

onde  $F_y$  é a carga crítica axial,  $\sigma_y$  é a tensão de escoamento,  $D_e$  é o diâmetro externo e  $D_i$  é o diâmetro interno do revestimento.

### 3.1.5. Outros modos de falha

Outros modos de falha que podem ser citados são: a fadiga (decorrente de carregamentos cíclicos), a corrosão (provocada por componentes químicos) e a erosão

(devido ao atrito de partículas da formação com o revestimento). Em relação à fadiga tem-se que ela geralmente ocorre quando o poço presencia alterações de temperatura e pressão, induzidas por atividades de estimulação como a injeção de vapor e o fraturamento hidráulico, ou ainda quando o comportamento dinâmico do mar é transferido para as estruturas de completação (Mohammed et al., 2019).

Quanto à corrosão Rahman & Chilingarian (1995) listam um conjunto de componentes presentes nos fluidos de perfuração e de produção que levam à esse fenômeno, os quais são: oxigênio, dióxido de carbono, sulfato de hidrogênio, sais e ácidos orgânicos. Já no que diz respeito à erosão sabe-se que esta é ocasionada pelo atrito entre partículas com o revestimento, tais partículas podem ser tanto da formação, após a produção de sólidos, quanto do pacote granular adotado em soluções como o *gravel pack* e o *frac pack*.

### **3.2.**

#### **Modos de falha em filtros de areia**

Enquanto o revestimento assume uma função estrutural, os filtros de areia (telas de controle de sólidos) têm como principal finalidade a retenção de sólidos. De forma que, além dos modos típicos de falha vistos anteriormente, as telas de controle presenciam falhas devido ao contato ou ao excesso de sólidos produzidos pela formação.

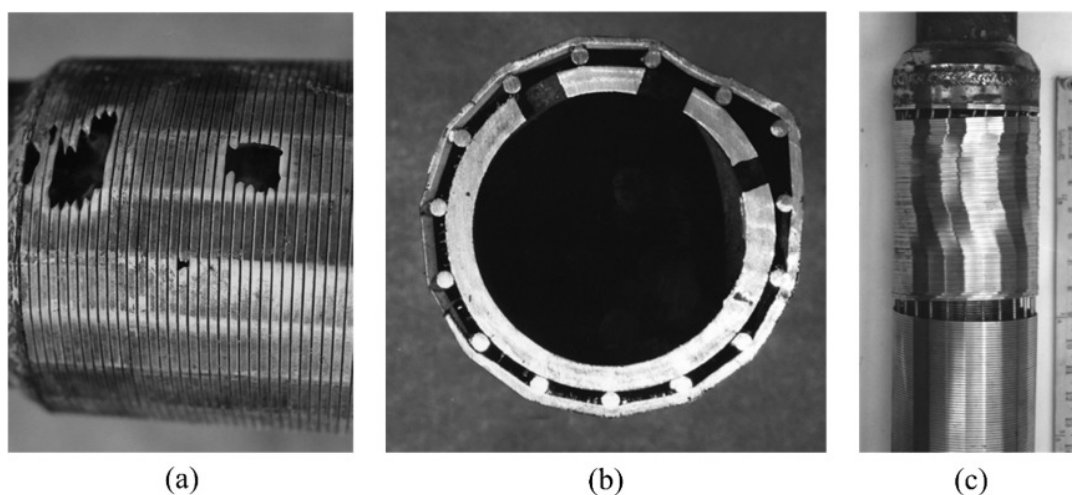
Hamid & Ali (1997) citam os seguintes tipos de falha em filtros de areia:

- Erosão: ocorre devido ao atrito das partículas (do *gravel pack* ou da formação) com a tela de controle, através da passagem de fluidos de alta velocidade característicos da produção em poços de gás e da completação pelo processo de *high rate water pack* que faz uso de um fluido de alta pressão para realizar a colocação do *gravel* no espaço anular;
- Colapso: acontece quando as pressões atuantes na tela ultrapassam a resistência ao colapso desta, o que pode ser provocado pela fragilização da tela após, por exemplo, a erosão em excesso;



- Entupimento: está atrelado à alta taxa de produção de sólidos, entretanto, também pode ocorrer, com menos frequência, em decorrência do fluido de completção;
- Falha na camisa de aço (*wrap failure*): ocorre em regiões onde a solda não foi bem executada entre a camisa de aço e as hastes longitudinais, é um tipo de falha menos frequente entre as demais;
- *Premature Bridging*: é observado quando, durante a colocação do *gravel*, as partículas criam uma “ponte” entre si e impedem que parte do espaço anular seja preenchido de forma que, no decorrer do tempo, a região vazia que deveria estar preenchida sofre com golpe de aríete, onde a tela é atingida com altas pressões e vem à falhar por colapso.

A Figura 3.12, a seguir, traz telas que sofreram com alguns desses modos de falha.



**Figura 3.12 – Falhas em telas de controle: (a) erosão; (b) colapso (c) wrap failure (Hamid & Ali, 1997).**

### 3.3. Casos notáveis

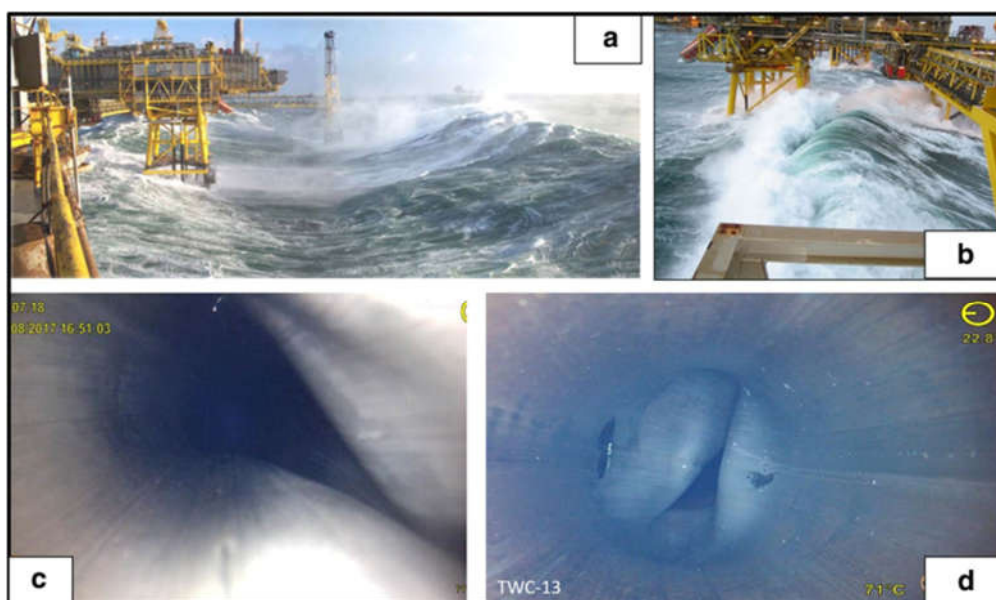
Tendo em vista os modos de falha apresentados, faz-se necessário compreender e analisar como eles se dão em poços reais. Para isso, a seguir, serão discutidos dois casos notáveis focados na falha devido à compactação após atividades como a depleção, o primeiro caso visa avaliar o efeito da qualidade da cimentação e da inclinação do poço no comportamento do revestimento; o segundo tem como foco

analisar a partir de qual porcentagem de deformação axial um poço tem mais chances de falhar.

### 3.3.1.

#### Falha por subsidência e compactação em Tyra (Dinamarca)

Responsável por 90% da produção de gás da Dinamarca, o campo de Tyra tem sofrido constantemente com problemas devido à compactação e subsidência, que além de trazerem danos às estruturas de completação, reduzem a distância entre a plataforma fixa e a superfície do mar (Schutjens et al., 2019; Total Energies, 2021), o que pode ser observado na Figura 3.13.



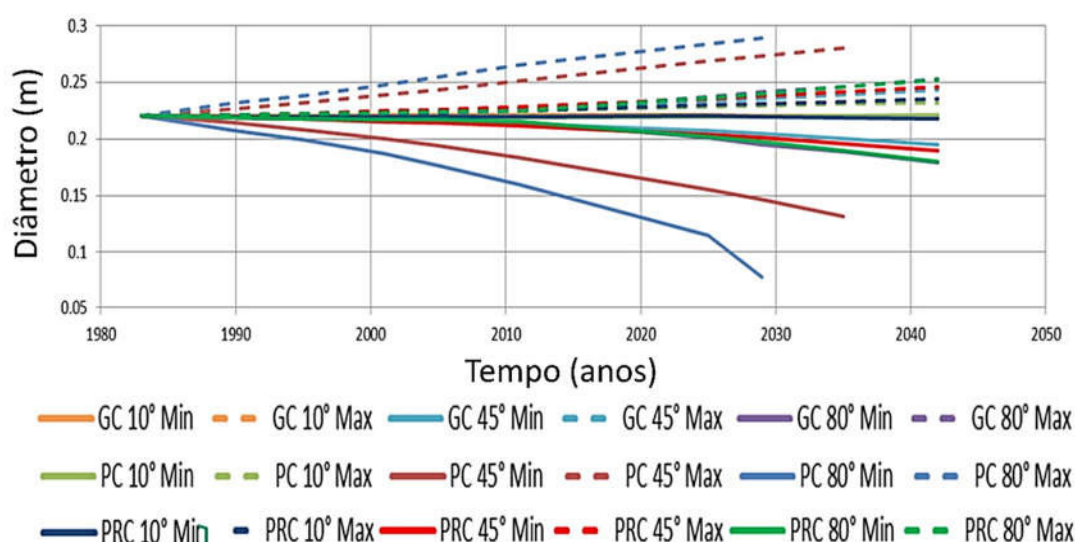
**Figura 3.13 – Problemas devido à subsidência e compactação em Tyra: (a) e (b) distância reduzida entre a superfície do mar e a plataforma fixa; (c) e (d) redução do diâmetro do revestimento (Schutjens et al., 2019).**

Uma vez que o campo é composto por rochas calcárias altamente porosas e pouco consolidadas, a depleção tornou-se o principal motivo para que houvesse a compactação. Após mais de 30 anos de produção e diversos reforços estruturais, a subsidência foi tanta que se tornou inviável continuar com o mesmo sistema de plataformas, assim, para que a produção voltasse a ser lucrativa foi idealizado um

projeto de ampliação e instalação de novas estruturas e poços produtores, nomeado de *Tyra Future* com previsão de início em 2022.

Para avaliar o comportamento e a viabilidade dos futuros poços dessa região, Schutjens et al. (2019) realizaram a modelagem 3D de poços com três configurações de inclinação ( $10^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $80^\circ$ ) e três condições de cimentação (boa, parcialmente boa e ruim), para isso eles utilizaram a ferramenta de elementos finitos, desenvolvida pela Shell, denominada GEOMECH. Com o objetivo de simular as condições de campo, foi imposto um deslocamento vertical no revestimento que gerasse uma deformação de 15% correspondente à compactação provocada pela depleção durante a vida útil do poço, além disso foram distribuídos planos de falha pelo modelo e foi considerado um período de tempo que vai desde o ano de início da produção, em 1984, ao ano em que se prevê que seja o fim da vida útil do poço em 2042.

Como conclusão, os autores constataram que os revestimentos de poços com inclinação de  $10^\circ$  e  $80^\circ$  apresentam, respectivamente, problemas de enrugamento e ovalização, sendo estes independentes da qualidade da cimentação. Já os revestimentos de poços com inclinação de  $45^\circ$  apresentam enrugamento quando a qualidade da cimentação é boa (GC) ou parcialmente boa (PRC) e ovalização quando a cimentação é ruim (PC). A Figura 3.14 mostra a variação do diâmetro do revestimento (com ovalização) ao longo dos anos de acordo com a inclinação e a qualidade da cimentação.



**Figura 3.14 – Ovalização do revestimento com base na variação do seu diâmetro, inicialmente de 22 cm, ao longo do tempo (Schutjens et al., 2019).**

Outra importante constatação foi que para todas as inclinações o revestimento está mais suscetível ao colapso e ao cisalhamento quando a cimentação é ruim, uma vez que parte do suporte lateral que deveria ser garantido pelo cimento não existe.

### 3.3.2.

#### **Falhas por compactação em arenitos com produção de sólidos no Golfo do México**

Composto por diversos tipos de rocha como dolomita, calcário, lamito e arenito, o Golfo do México é um dos principais produtores de petróleo e gás dos Estados Unidos. Visto que parte das atividades de produção ocorrem em arenitos não consolidados, as companhias responsáveis pela exploração nessas áreas adotam sistemas de controle de sólidos como *frac pack* e *gravel pack*, contudo, devido a recorrente compactação do reservatório parte dessas estruturas vêm a falhar (Tjioe et al., 2019; Galloway, 2009).

Para quantificar e mapear os motivos que levam a isso Tjioe et al. (2019) avaliaram dados de 87 poços profundos em arenitos não consolidados do Golfo do México onde 27 deles mostraram falha nas suas estruturas de controle de sólidos (*gravel pack/frac pack*). Como metodologia, os autores calcularam a deformação axial a partir da Equação 3.15.

$$\varepsilon_a \approx \Delta P \cdot C_p \cdot \phi \cdot \cos^2(\alpha) \quad (3.15)$$

onde  $\varepsilon_a$  é a deformação axial,  $\Delta P$  é a depleção,  $C_p$  é o volume de compressibilidade dos poros,  $\phi$  é a porosidade do reservatório e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do poço. A partir desse cálculo, eles puderam relacionar a porcentagem de deformação axial com as chances de falha por compactação, além de analisarem os riscos de flambagem de acordo com a inclinação do poço.

Como resultado Tjioe et al. (2019) citam que 25% dos poços falharam quando a deformação axial foi menor que 4% e 52,5% falharam quando a deformação foi maior que 4%. Já referente à influência da inclinação do poço os autores constataram que enquanto 39% das falhas se deram em poços com inclinação até 45°, apenas 17,9% dos poços falharam quando o ângulo era maior que 45°. Ou seja, quanto menor a deformação e axial e quanto maior o ângulo do poço, menores são as chances de falha.

## 4

### Modelagem do comportamento do pacote granular

#### 4.1.

##### Modelagem de Ensaio com célula cúbica

No presente tópico será discutida a modelagem de um poço aberto com pacote granular, cujos objetivos são: avaliar o comportamento dos elementos filtrantes e analisar como as propriedades do material granular interferem na resposta da tela de contenção de sólidos. Para isso, será utilizado o ensaio realizado por Chavez (2011).

##### 4.1.1.

##### Instrumentação do Ensaio

O ensaio de referência foi executado em um equipamento chamado de célula cúbica, apresentado na Figura 4.1, que contém seis pistões de aplicação de carga e está localizado na Gerência de Tecnologia de Engenharia de Poços (TEP) do CENPES/PETROBRAS.

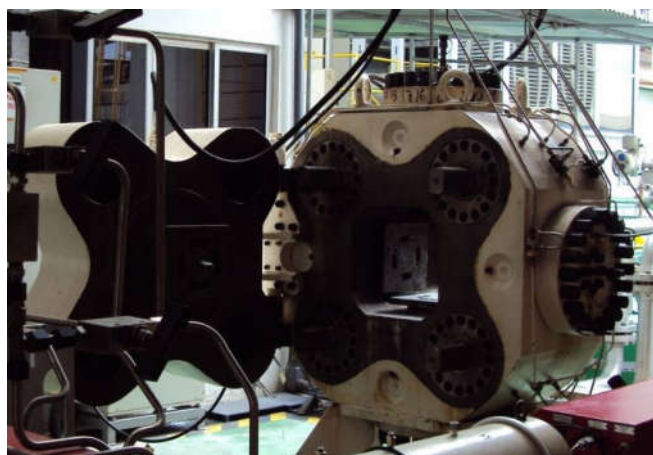
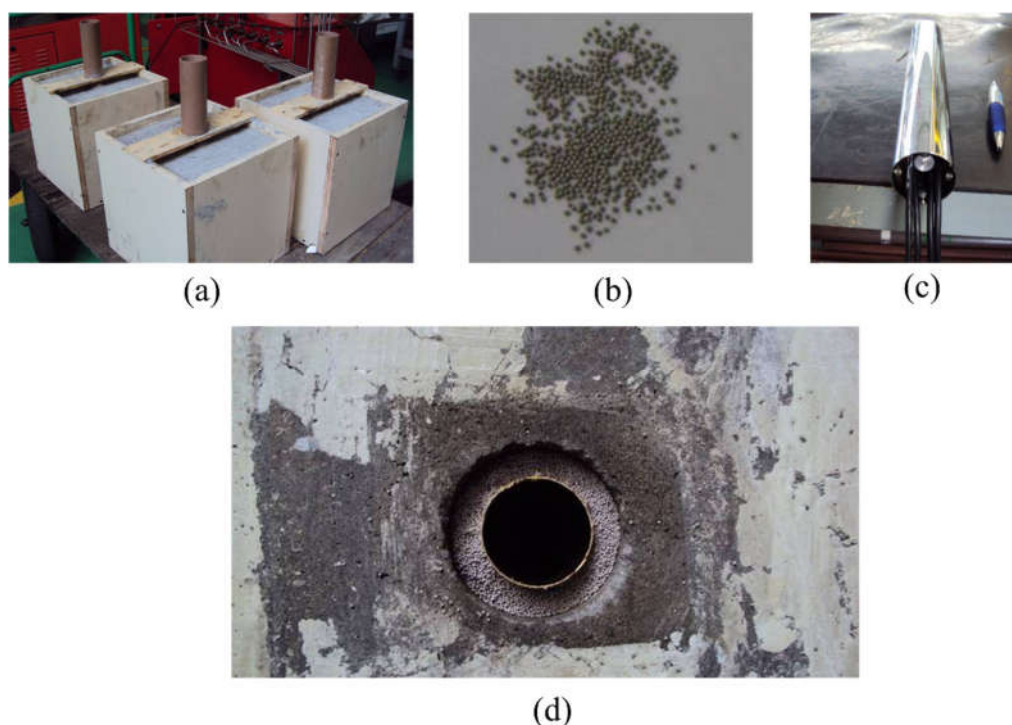


Figura 4.1 – Célula cúbica do CENPES/PETROBRAS (Chavez, 2011).

Para simular um poço aberto com pacote granular, Chavez (2011) utilizou corpos de prova cúbicos com um furo central parcialmente preenchido por material granular e uma tela de controle de sólidos. A fim de representar a formação, o autor confeccionou blocos de arenito sintético compostos de areia, água e cimento. Já para o pacote granular, ele utilizou o material cerâmico *Carbolite* com malha 16/20, arredondamento e circularidade de 0,9 e peso específico aparente igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup>. E para a tela de controle foi adotado um tubo de latão com diâmetro de 38 mm e espessura de 0,52 mm. A Figura 4.2 traz os três materiais separadamente e o conjunto que simula o poço aberto com pacote granular.



**Figura 4.2 – Materiais de ensaio: (a) arenito sintético; (b) Carbolite; (c) tubo de latão e (d) sistema de poço aberto com pacote granular (Chavez, 2011).**

#### **4.1.2. Sequência de carregamento**

Dentre os blocos de ensaiados por Chavez (2011) optou-se por modelar o **Bloco A-3** pois, para a condição de tela centralizada, foi o que apresentou maior estabilidade e onde foi garantida a calibração dos transdutores (medidores de deslocamentos radiais



da tela). A sequência de aplicação de carga desse ensaio segue o apresentado da Figura 4.3.

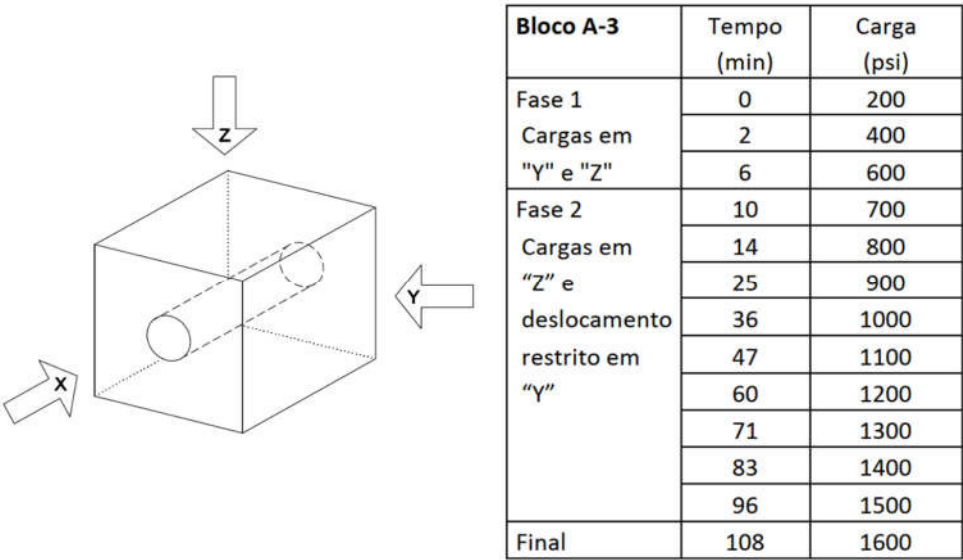


Figura 4.3 – Direções e sequência de aplicação de carga (Chavez, 2011).

4.1.3. Resultado do Ensaio

A fim de compreender o comportamento da tela, Chavez (2011) instalou um transdutor de deslocamentos que coletou os resultados dos pontos P1 e P2, localizados nas extremidades vertical e horizontal da tela, conforme visto na Figura 4.4.

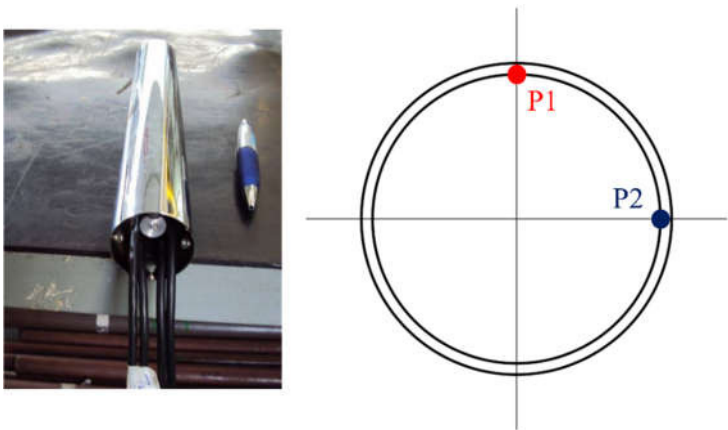
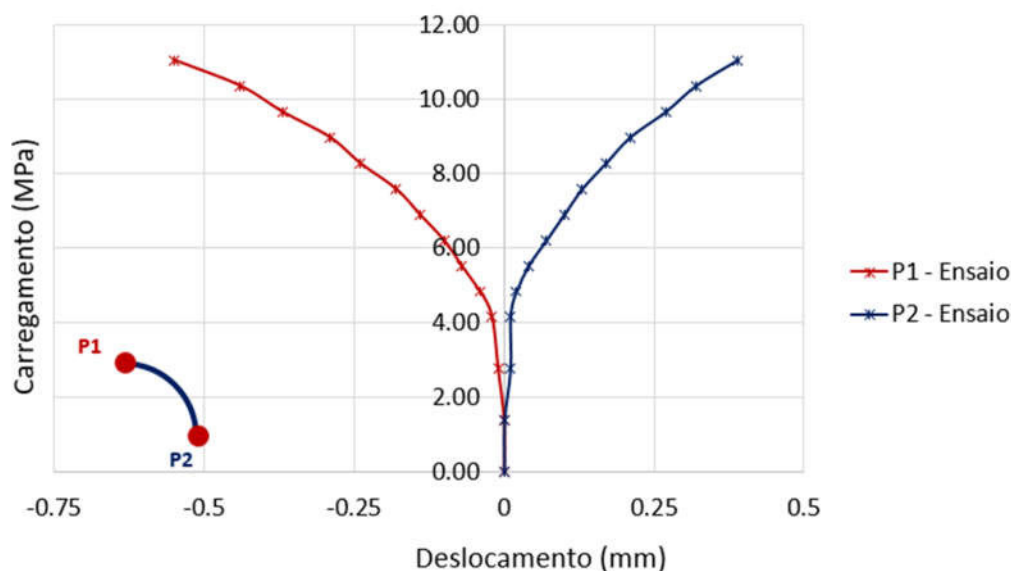


Figura 4.4 – Pontos P1 e P2.

Com os dados do transdutor, construiu-se as curvas expostas na Figura 4.5 que relacionam os deslocamentos resultantes com as tensões aplicadas, os valores

utilizados para construir este gráfico foram retirados do Apêndice A do trabalho de Chavez (2011). É válido ressaltar que se definiu como positivos os deslocamentos para a direita ou para cima e os carregamentos de ensaio foram convertidos de psi para MPa.



**Figura 4.5 – Curvas de ensaio: carregamento versus deslocamento (Adaptado de Chavez, 2011).**

Ao analisar as curvas de ensaio é possível notar que na condição confinante, entre 0 e 4,137 MPa, ocorre o espelhamento dos deslocamentos, devido ao fato dos carregamentos serem iguais nas duas direções do bloco e dos pontos coletados se encontrarem em posições simétricas de condições de contorno. Já entre 4,137 e 11,032 MPa quando o carregamento passa a ser aplicado apenas na direção vertical e impõe-se a restrição de deslocamento na face horizontal, os deslocamentos aumentam de forma acentuada no ponto vertical em relação ao horizontal.

#### **4.1.4. Modelagem Numérica**

Referente à modelagem numérica é válido ressaltar que Vargas et al. (2012) já propuseram dois modelos para este ensaio, o primeiro com o programa de elementos finitos ABAQUS® e o segundo com os programas de elementos discretos PFC3D® e FLAC3D®, segundo os autores o modelo com elementos finitos foi o que obteve melhor resultado. Neste trabalho, optou-se por utilizar o método dos elementos finitos,



visando melhorar o modelo proposto por Vargas et al. (2012), visto que este não conseguiu capturar completamente o comportamento da tela.

Com esse intuito, será feito um estudo das propriedades do pacote granular, uma vez que, dentre os materiais adotados, ele foi o único com as propriedades arbitradas, sendo as demais obtidas pelos ensaios de Villarroel (2009) e Vargas et al. (2012). O programa escolhido para realizar a simulação foi o *software* comercial ABAQUS®, por ser uma ferramenta amplamente utilizada e referenciada, adotada em trabalhos de produção de sólidos com estruturas de controle, como os de Santos et al. (2008), Hilbert et al. (2011) e Xu et al. (2014).

#### 4.1.4.1. Condições de Contorno

As condições de contorno definidas para os modelos podem ser visualizadas na Figura 4.6, a qual apresenta as fases de carregamento no ensaio e no sistema modelado computacionalmente o qual, em função da simetria, corresponde à  $\frac{1}{4}$  do bloco cúbico ensaiado.

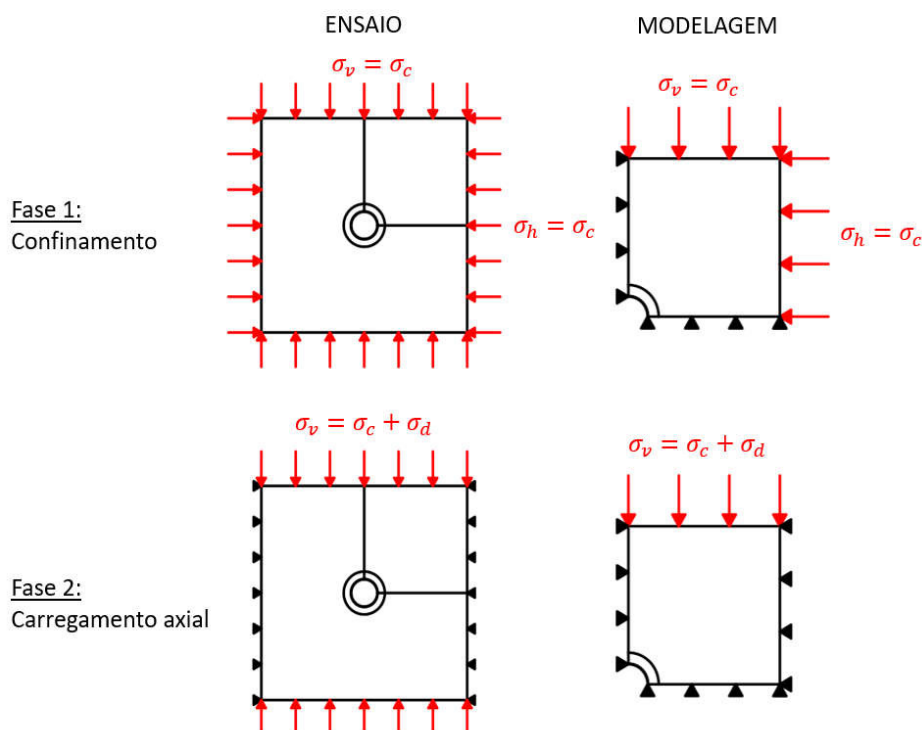
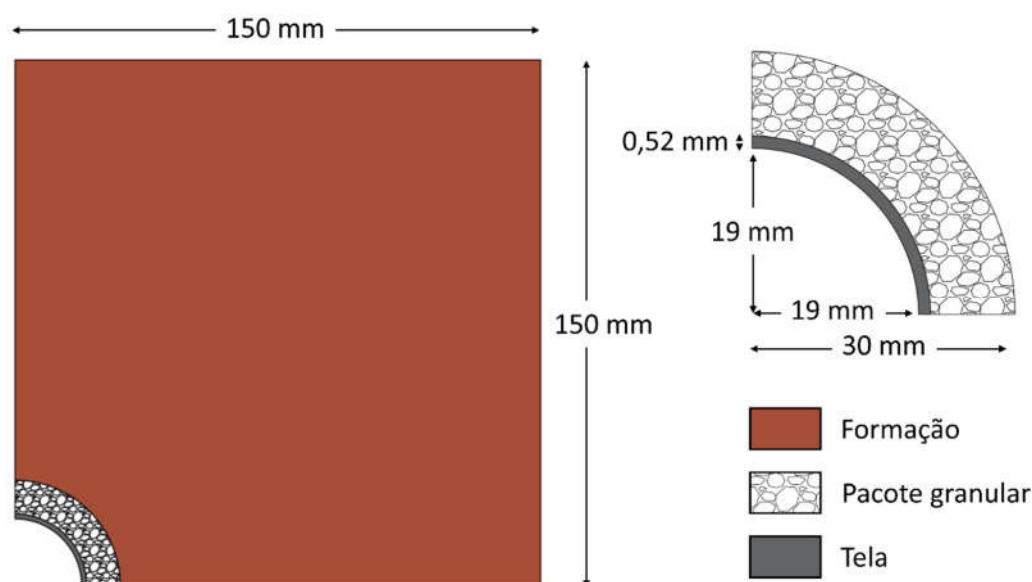


Figura 4. 6 – Condições de contorno em cada fase de carregamento.

Estas condições corroboram a sequência de carregamento apresentada na Figura 4.3, com o confinamento na primeira fase e a aplicação de tensão desviadora na vertical e restrição de deslocamento horizontal na segunda.

#### 4.1.4.2. Geometria e malha

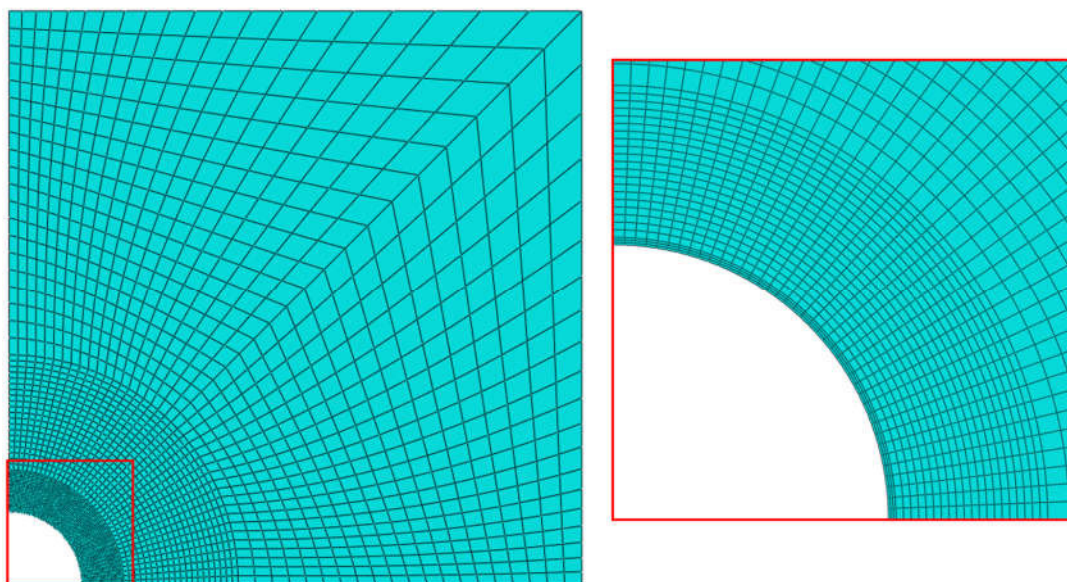
Os detalhes da geometria modelada podem ser vistos na Figura 4.7, a partir da qual foi definida a estratégia de refinamento da malha, que teve como base o critério de maior refino nas regiões com maior concentração de tensão. Assim, os elementos da parede do poço foram os que obtiveram maior discretização.



**Figura 4.7 – Geometria do modelo.**

Por se tratar de um problema em Estado Plano de Deformação o tipo de elemento escolhido no ABAQUS® foi o CPE4, que corresponde a um elemento bidimensional linear com quatro nós e integração completa. Em relação aos aspectos de discretização tem-se que: a tela foi dividida em 120 elementos, com 3 divisões ao longo do seu comprimento e 40 divisões ao longo do seu arco; o pacote granular foi separado em 800 elementos, com 40 divisões no seu arco e 20 separações ao longo do seu comprimento; por fim, na formação foi feito um semicírculo a uma distância de 30 mm do pacote granular que foi dividido em 40 elementos, assim como as faces inferior e

lateral esquerda, as demais linhas e as faces superior e lateral direita foram divididas em 20 partes cada, com isso, a formação foi discretizada em 1600 elementos e o modelo completo em 2520 elementos e 2624 nós. Conforme apresentado na Figura 4.8.



**Figura 4.8 – Malha de elementos finitos do modelo.**

#### **4.1.4.3. Propriedades dos Materiais**

As propriedades da tela e da formação foram obtidas por ensaios de Villarroel (2009) e Vargas et al. (2012), sendo descritas na Tabela 4.1 que conta também com os parâmetros plásticos de Mohr-Coulomb para a formação e de Von Mises para a tela.

**Tabela 4.1 – Propriedades da formação e da tela.**

	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>c (MPa)</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\sigma_y</math> (MPa)</b>
<b>Formação</b>	2,70	0,27	5,51	28°	-
<b>Tela</b>	90,64	0,32	-	-	484

Uma vez que não foram feitos ensaios para obter as propriedades do pacote granular foi necessário determiná-las com base em referências bibliográficas, dentre elas estão as listadas na Tabela 4.2. A partir da qual é possível observar que não há um

valor unificado para as propriedades do pacote granular, com diferentes considerações e valores a depender do autor referenciado.

**Tabela 4.2 – Propriedades do pacote granular de acordo com referências bibliográficas.**

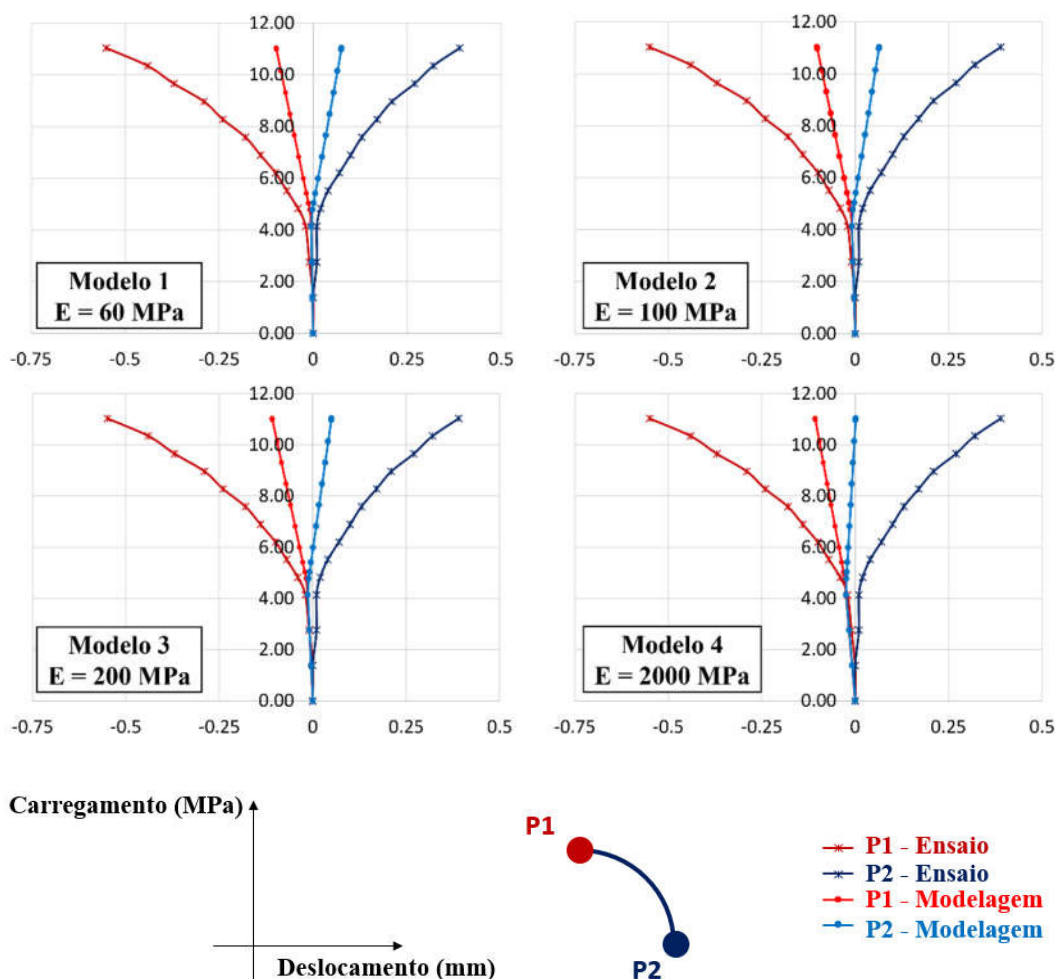
	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>c (MPa)</b>	<b><math>\varphi</math></b>
<b>Karlinasari &amp; Rachmadan (2017)</b>	60 a 172,5	0,15 a 0,35	-	-
<b>Xu et al. (2014)</b>	100	0,35	20	30°
<b>Chavez (2011); Vargas et al. (2012)</b>	0,9 a 200	0,34 a 0,35	0	32°
<b>Hicher &amp; Chang (2006)</b>	2000	0,21	-	-

Por conta da divergência entre os valores tabelados optou-se por fazer a modelagem numérica com quatro conjuntos de propriedades, onde cada um deles considera o módulo de elasticidade constante e tem o valor condizente com as referências apresentadas na Tabela 4.2. Os detalhes dos modelos desenvolvidos a partir dessas ponderações estão listadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Propriedades do pacote granular para os Modelos 1, 2, 3 e 4.**

	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>c (MPa)</b>	<b><math>\varphi</math></b>
<b>Modelo 1</b>	60	0,30	-	-
<b>Modelo 2</b>	100	0,35	20	30°
<b>Modelo 3</b>	200	0,35	0	32°
<b>Modelo 4</b>	2000	0,21	-	-

Com as respostas desses modelos foram construídos os gráficos da Figura 4.9, que comparam os resultados dos deslocamentos dos pontos P1 e P2 de cada modelagem com os dados coletados no ensaio de Chavez (2011). Para manter a compatibilidade de unidades, os deslocamentos estão descritos em milímetros e os carregamentos em MPa, em conformidade com o adotado na modelagem numérica.

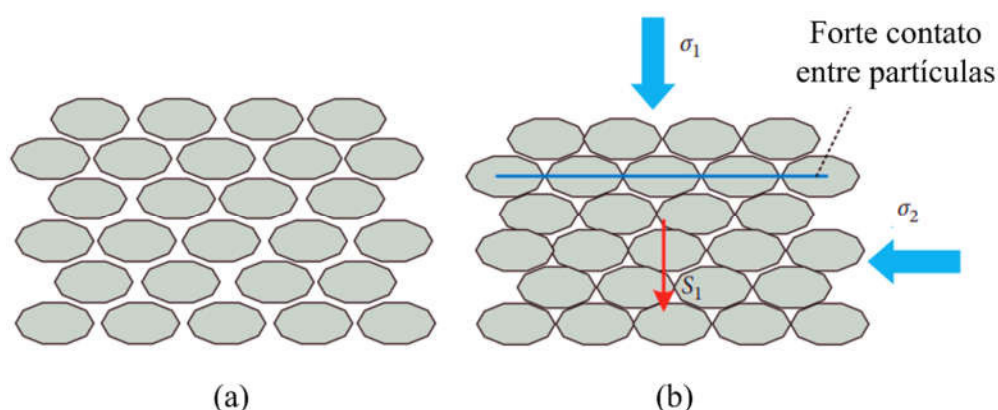


**Figura 4.9 – Curvas de ensaio versus curvas dos Modelos 1, 2, 3 e 4.**

A partir dos gráficos da Figura 4.9 constata-se que nenhum dos quatro modelos se mostrou satisfatório e que a mudança do módulo de elasticidade só interferiu na inclinação das curvas de deslocamento, que se movem para a esquerda à medida que o módulo assume um valor mais alto.

Diante disso, foi necessário rever as hipóteses anteriores. O módulo de elasticidade deixou de ser tratado como constante e passou a ser considerado variável e dependente do estado de tensões. O que é defendido por Cudny & Staszewska (2021) e reforçado por Hoque & Tatsuoka (1998) os quais afirmam que em materiais granulares o aumento da tensão confinante e a diminuição do índice de vazios resulta em uma maior rigidez do pacote granular.

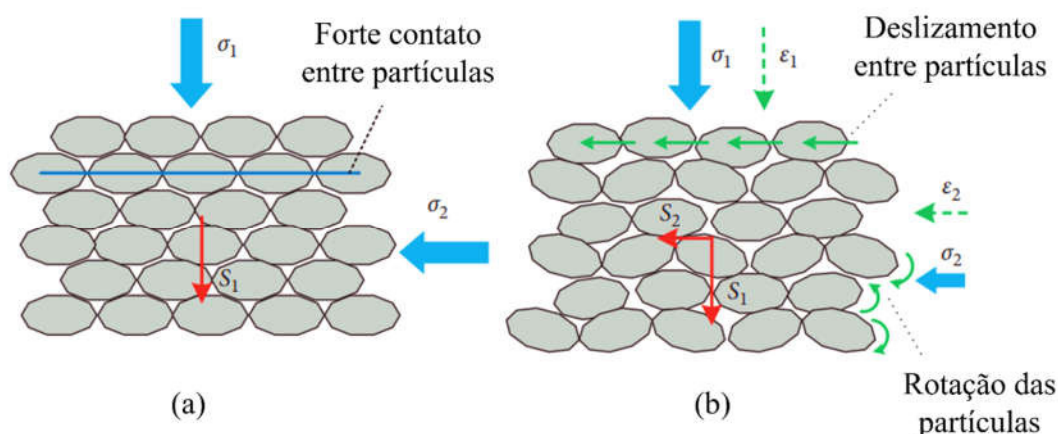
A representação dessa teoria pode ser vista na Figura 4.10, que mostra um conjunto de partículas em dois estados: (a) quando não há carregamento aplicado e (b) quando o conjunto é submetido a tensões confinantes. Na Figura 4.10b é possível ver que o conjunto sofre compactação, o que resulta no aumento das forças de contato entre as partículas e, por consequência, no aumento da rigidez do pacote.



**Figura 4.10 – Aumento das forças de contato entre partículas em um pacote granular confinado: (a) estado inicial; (b) estado confinante (Chen et al., 2020).**

Além da consideração de módulo de elasticidade variável, foi assumido que, após o confinamento, o material apresenta um comportamento anisotrópico. O qual é defendido por Oda (1993) e Chen et al. (2020), que citam dois tipos de anisotropia presentes em materiais granulares: anisotropia inerente, que se dá pela forma como as partículas são depositadas e agrupadas, onde os grãos podem estar em diferentes orientações; e anisotropia induzida, que se apresenta quando um estado de tensões anisotrópico provoca uma resposta não uniforme do pacote granular (e.g. quando uma tensão desviadora é aplicada).

A Figura 4.11 mostra de que forma esse comportamento anisotrópico é gerado, com a tendência de compressão das partículas na direção de maior carregamento, e de deslizamento com rotação na direção de menor carregamento, de maneira que a rigidez será mais elevada na direção de maior tensão.



**Figura 4.11 – Comportamento anisotrópico do pacote granular provocado por tensão desviadora: (a) estado confinante; (b) estado anisotrópico de tensões (Chen et al., 2020).**

Segundo Hoque & Tatsuoka (1998) e Hicher & Chang (2006) a anisotropia característica nesse caso é a do tipo transversal, em que há uma simetria em torno do eixo vertical, com a matriz de flexibilidade sendo descrita pela Equação 4.1.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1 + \nu_{hh})}{E_h} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde  $E_h$  é o módulo de elasticidade nas direções horizontal,  $E_v$  é o módulo de elasticidade na direção vertical,  $G_{vh}$  é o módulo de cisalhamento das direções vertical e horizontal,  $\nu_{hh}$  é o coeficiente de poisson entre as direções horizontais,  $\nu_{vh}$  e  $\nu_{hv}$  são os coeficientes de Poisson entre as direções vertical e horizontal.



Através da matriz de flexibilidade é possível observar que há seis variáveis independentes, contudo, esse número se reduz a três quando as relações das Equações 4.2, 4.3 e 4.4 são assumidas.

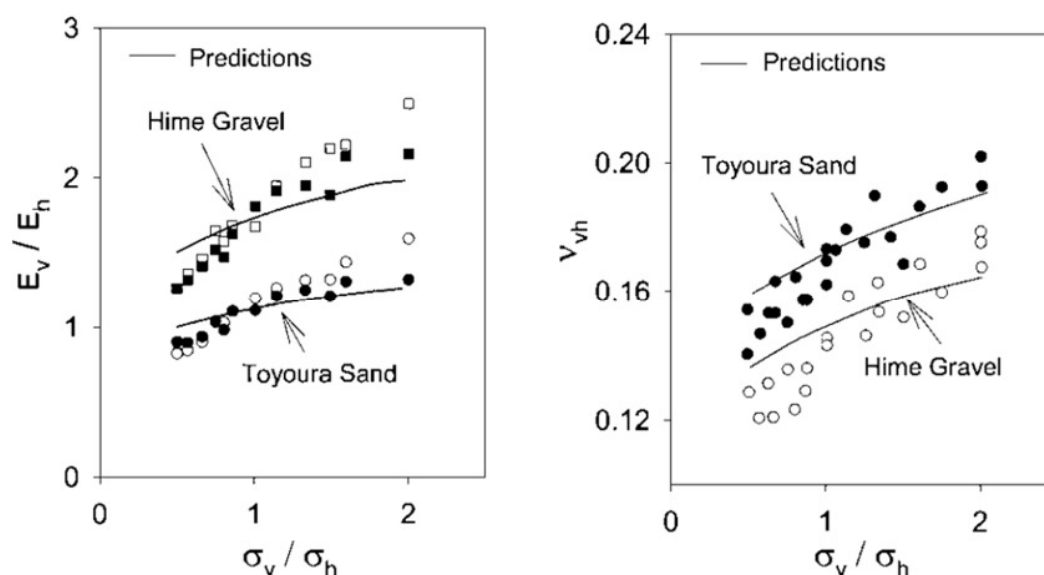
$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \quad (4.2)$$

$$\nu_{vh} = \nu_{hh} \quad (4.3)$$

$$G_{vh} = \frac{E_v}{2(1+\nu_{vh})} \quad (4.4)$$

A adoção dessas relações se deve aos seguintes fatos: a primeira garante a simetria da matriz; a segunda é presenciada em condições de carregamento isotrópico, que aqui será estendida para o carregamento anisotrópico; e a terceira apresenta a relação clássica entre o módulo de cisalhamento e o módulo de elasticidade que será utilizada como forma de simplificação, para que não seja necessário arbitrar  $G_{vh}$ . Com isso, as únicas variáveis independentes do modelo passam a ser:  $E_h$ ,  $E_v$  e  $\nu_{vh}$ .

Para definir essas variáveis recorreu-se ao estudo feito por Hicher & Chang (2006), o qual ilustra na Figura 4.12 o comportamento anisotrópico de dois materiais granulares: uma areia (*Toyoura Sand*) e um cascalho (*Hime Gravel*).



**Figura 4.12 – Variação da anisotropia em materiais granulares (Hicher & Chang, 2006).**

Através da figura é possível notar que os dois materiais possuem anisotropia inerente e induzida, sendo a primeira acentuada no *Hime Gravel*, que apresenta relações



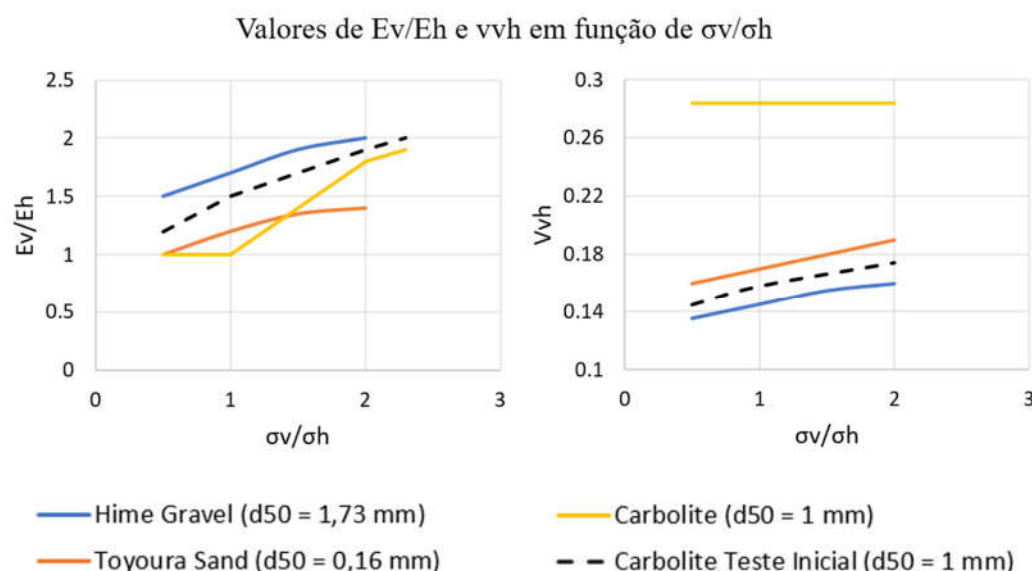
entre as rigidezes vertical e horizontal ( $E_v/E_h$ ) diferentes de um mesmo quando a condição de carregamento é isotrópica, ou seja, quando a relação entre as tensões ( $\sigma_v/\sigma_h$ ) é igual a um. Outro ponto a ser observado é que as linhas contínuas da imagem representam predições desenvolvidas pelos autores a partir de um modelo anisotrópico não-linear elástico e que estas têm boas adequações com dados de ensaio (pontos quadrados e circulares).

Diante disso, considerou-se coerente utilizar as curvas de predições da Figura 4.12 como base para obter o comportamento anisotrópico do *Carbolite* (material utilizado no ensaio modelado). Visto que os materiais analisados por Hicher & Chang (2006) são diferentes do material adotado no pacote granular, foi necessário definir uma maneira de relacioná-los. Para isso, foram utilizados como critérios de comparação o diâmetro médio, a morfologia das partículas e o peso específico aparente de cada material, parâmetros estes que podem ser conferidos na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Considerações assumidas em cada fase de carregamento.**

	TOYOURA SAND	HIME GRAVEL	CARBOLITE
<b>Diâmetro Médio</b> <b>d<sub>50</sub> (mm)</b>	0,16	1,73	1,00
<b>Arredondamento</b>	Sub-angular	Angular	Muito arredondado
<b>Peso específico aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,62	2,65	2,71

Com os dados expostos na tabela infere-se que o *Carbolite* se assemelha mais ao *Hime Gravel* em diâmetro e peso específico, enquanto que morfologicamente é mais próximo da *Toyoura Sand*. De forma que, ao tentar prever o comportamento do *Carbolite* buscou-se traçar curvas que fossem próximas das curvas de predição do *Hime Gravel* ou que ficassem em um intervalo entre os dois materiais de referência, o que resultou no gráfico da Figura 4.13.



**Figura 4.13 – Variação da anisotropia induzida por carregamento (Hicher & Chang, 2006).**

A princípio o critério de semelhança com as curvas de Hicher & Chang (2006) foi seguido e as curvas tracejadas em preto foram consideradas. Entretanto, ao construir modelos com propriedades que seguiram essas curvas percebeu-se que os resultados não eram próximos dos de ensaio, com discrepâncias principalmente no trecho confinante. Diante disso, outras simulações foram executadas até que se chegou às curvas representadas pelas linhas contínuas em amarelo, que consideram um comportamento isotrópico na fase confinante e anisotrópico na fase desviadora.

A isotropia no início do ensaio se dá pelo fato do *Carbolite* possuir alta esfericidade e arredondamento. Isso permite a deposição e o agrupamento uniforme das partículas, de maneira que o material não possui uma orientação preferencial e a compactação segue a direção do carregamento. Como a tensão inicial é confinante, espera-se que o conjunto se comporte de maneira simétrica nas diferentes direções, com os módulos de elasticidade  $E_v$  e  $E_h$  iguais enquanto a razão entre as tensões for menor ou igual a um ( $\sigma_v/\sigma_h \leq 1$ ).

Já na segunda etapa do ensaio, quando uma tensão desviadora é introduzida ( $\sigma_v/\sigma_h > 1$ ), espera-se que o pacote apresente anisotropia induzida, com maior compactação em uma direção do que na outra. O que resulta no aumento de  $E_v$  em relação a  $E_h$  à medida que a razão  $\sigma_v/\sigma_h$  é elevada. Através de modelos numéricos

observou-se que o coeficiente de poisson  $\nu_{vh}$  do *Carbolite* é maior que os da *Toyoura Sand* e do *Hime Gravel* e que a sua variação ao longo do ensaio tem pouca influência no resultado. Assim, optou-se por mantê-lo constante e igual a 0,284 (valor dentro do descrito nas referências bibliográficas citadas da Tabela 4.2).

Em resumo, para a definição das propriedades do **Modelo 5**, foram assumidas as considerações da Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Considerações assumidas em cada fase de carregamento.**

	CONSIDERAÇÕES
<b>Fase confinante (0 a 4,137 MPa)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comportamento isotrópico, <math>E_v = E_h</math>;</li> <li>• Comportamento não-linear, com aumento do módulo de elasticidade à medida que a tensão confinante aumenta.</li> <li>• Coeficiente de poisson <math>\nu_{vh}</math> constante e igual a 0,284.</li> </ul>
<b>Fase desviadora (4,137 a 11,032 MPa)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comportamento anisotrópico, <math>E_v &gt; E_h</math>;</li> <li>• Comportamento não-linear, com aumento dos módulos de elasticidade à medida que as tensões aumentam;</li> <li>• Variação da razão entre <math>E_v</math> e <math>E_h</math> em função da razão entre <math>\sigma_v</math> e <math>\sigma_h</math>;</li> <li>• Coeficiente de poisson <math>\nu_{vh}</math> constante e igual a 0,284.</li> </ul>

Tendo em vista que o modelo deve ter a rigidez elevada à medida que o confinamento aumenta e que deve ser incorporada uma relação de anisotropia entre os módulos de elasticidade vertical e horizontal fez-se necessário a utilização de uma sub-rotina no ABAQUS®, capaz de reproduzir a mudança das propriedades no decorrer da simulação. Tal sub-rotina foi escrita em FORTRAN e é responsável por definir as propriedades do pacote granular em função da razão entre as tensões vertical e horizontal. Para cada passo de carregamento, o programa calcula o valor de  $\sigma_v/\sigma_h$  e assume um conjunto de valores para  $E_v$ ,  $E_h$ ,  $G_{vh}$ ,  $\nu_{hv}$ ,  $\nu_{hh}$  e  $\nu_{vh}$ .

Como os únicos termos independentes desse conjunto são  $E_v$ ,  $E_h$  e  $\nu_{vh}$ , estes serão expostos na Tabela 4.6, que leva em consideração a razão de  $E_v/E_h$  em função de  $\sigma_v/\sigma_h$  conforme determinado na Figura 4.13. Ressalta-se que os demais termos são dependentes e podem ser obtidos pelas Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.6 – Propriedades do pacote granular adotadas no Modelo 5.

$\sigma_v/\sigma_h$	$E_v/E_h$	$E_v$ (MPa)	$E_h$ (MPa)	$\nu_{vh}$
0	1,00	13	13	0,284
1	1,00	15	15	0,284
2	1,80	23	12,77	0,284
2,3	1,90	50	26,32	0,284
2,5	1,95	60	30,77	0,284
3	2,44	150	61,47	0,284
3,2	2,63	200	76,05	0,284
3,5	2,86	250	87,41	0,284
4	3,33	300	90,09	0,284
4,5	3,85	600	155,84	0,284
5	4,20	1000	238,09	0,284
6	4,54	2000	440	0,284

Baseado na tabela anterior, tem-se que a sub-rotina funciona como uma calibradora, a qual determinará a rigidez de cada região do pacote granular de acordo com a relação de  $\sigma_v/\sigma_h$  em cada elemento. Um exemplo disso está na Figura 4.14 que mostra diferentes valores de  $E_v$  e  $E_h$  para três regiões distintas ao final na fase de confinamento.

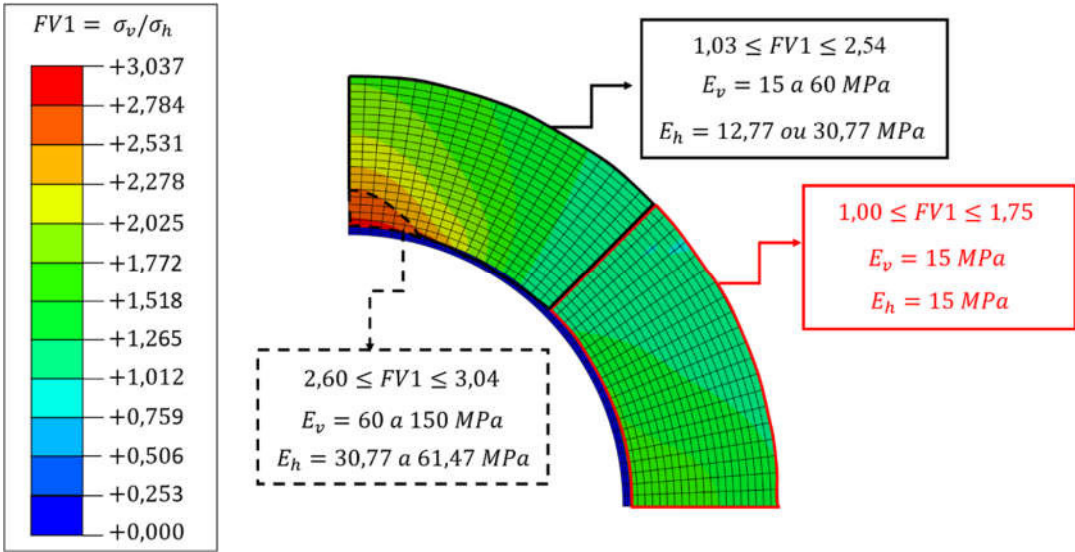
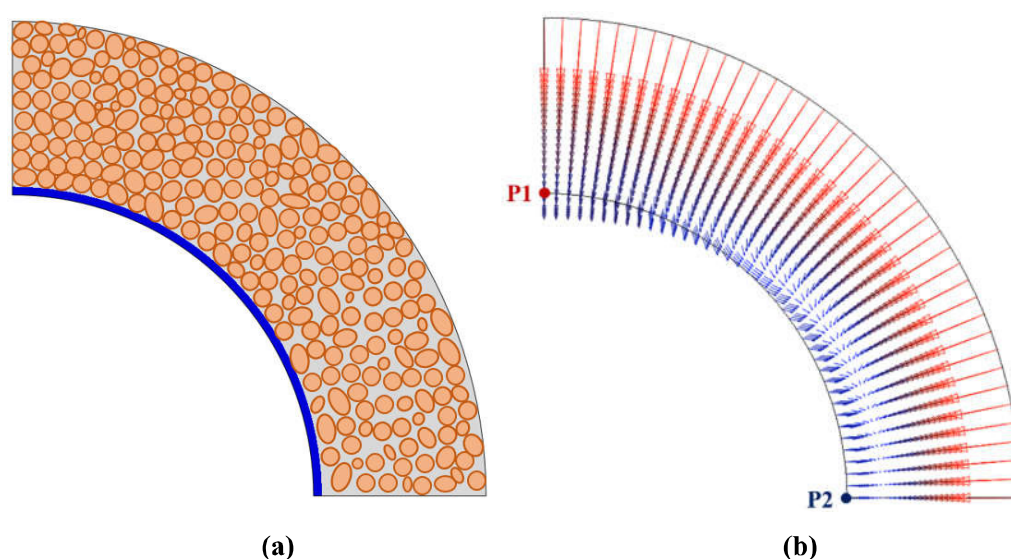


Figura 4. 14 – Valores de  $E_v$  e  $E_h$  em três regiões distintas do pacote granular.

Através da Figura 4.14 infere-se que os grãos do pacote granular sofrem maior compactação no topo da tela (em azul escuro) e, por esse motivo, apresentam maior rigidez que nas outras regiões. Tal fato é ilustrado na Figura 4.15a que também mostra o *Carbolite* afastado e com espaços vazios nas regiões de menor rigidez. Aliado a isso, a Figura 4.15b mostra os deslocamentos resultantes no conjunto tela-pacote granular e demonstra como a variação da rigidez interfere na resposta de deslocamentos dos pontos P1 e P2 da tela.



**Figura 4.15 – Concentração e deslocamento resultante dos grãos no pacote granular após o confinamento.**

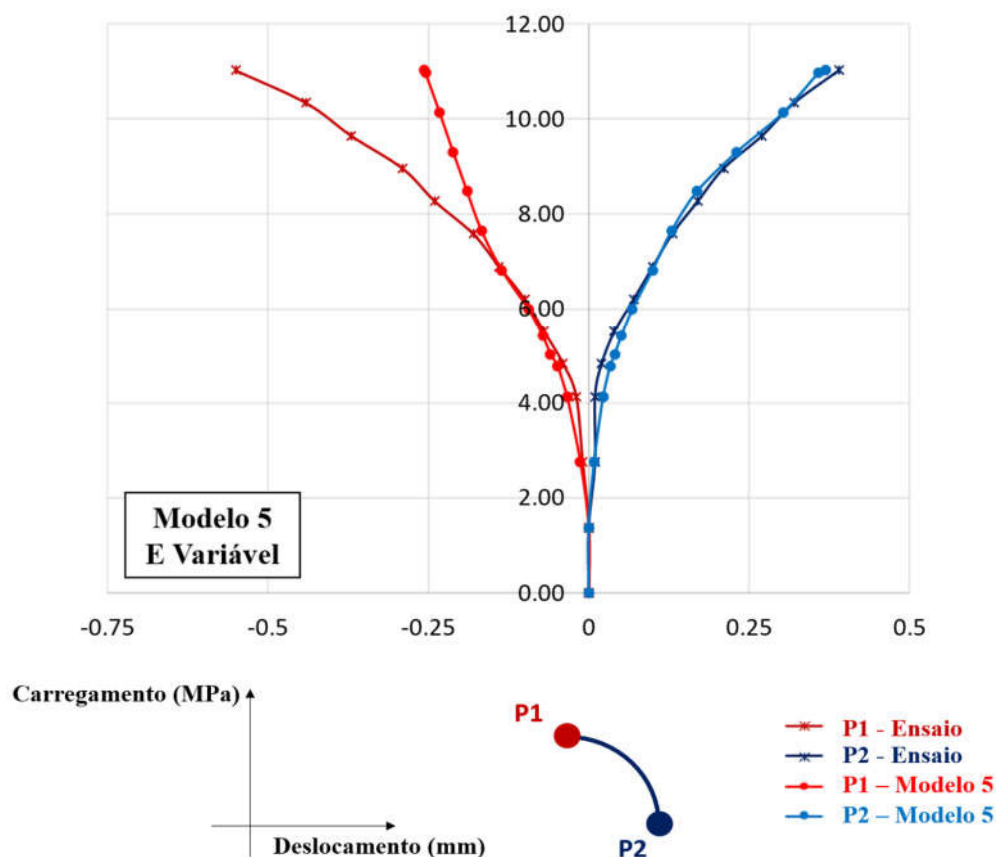
Para compreender os vetores de deslocamentos mostrados na Figura 4.5b é preciso levar em conta a condição de confinamento do modelo, com a aplicação de carga nas faces superior e lateral direita do bloco, que fazem o pacote granular se deslocar para baixo e para a esquerda. Por considerar um material rígido na região alinhada verticalmente ao ponto P1, tem-se que as tensões serão transmitidas do material granular para a tela. De maneira que ela se desloca para baixo e força o deslocamento do ponto P2 para a direita.

Caso o material granular da área alinhada horizontalmente ao ponto P2 tivesse rigidez elevada a tensão aplicada na lateral mudaria o deslocamento da tela para a esquerda, porém, como a tela é mais rígida os deslocamentos dos grãos são minimizados e P2 permanece se deslocando para a direita. Esta observação pode ser

constatada no gráfico do modelo 4 que tinha módulo de elasticidade constante e alto para todo o pacote o que resultou em uma curva de P2 na direção contrária à de ensaio.

#### 4.1.5. Resultados

Formulado a partir das teorias descritas no tópico anterior, o Modelo 5 teve como resposta o gráfico da Figura 4.16, que apresenta as curvas de deslocamentos dos pontos P1 e P2 ao longo da aplicação de carregamento, referentes aos resultados do modelo desenvolvido e do ensaio realizado por Chavez (2011).

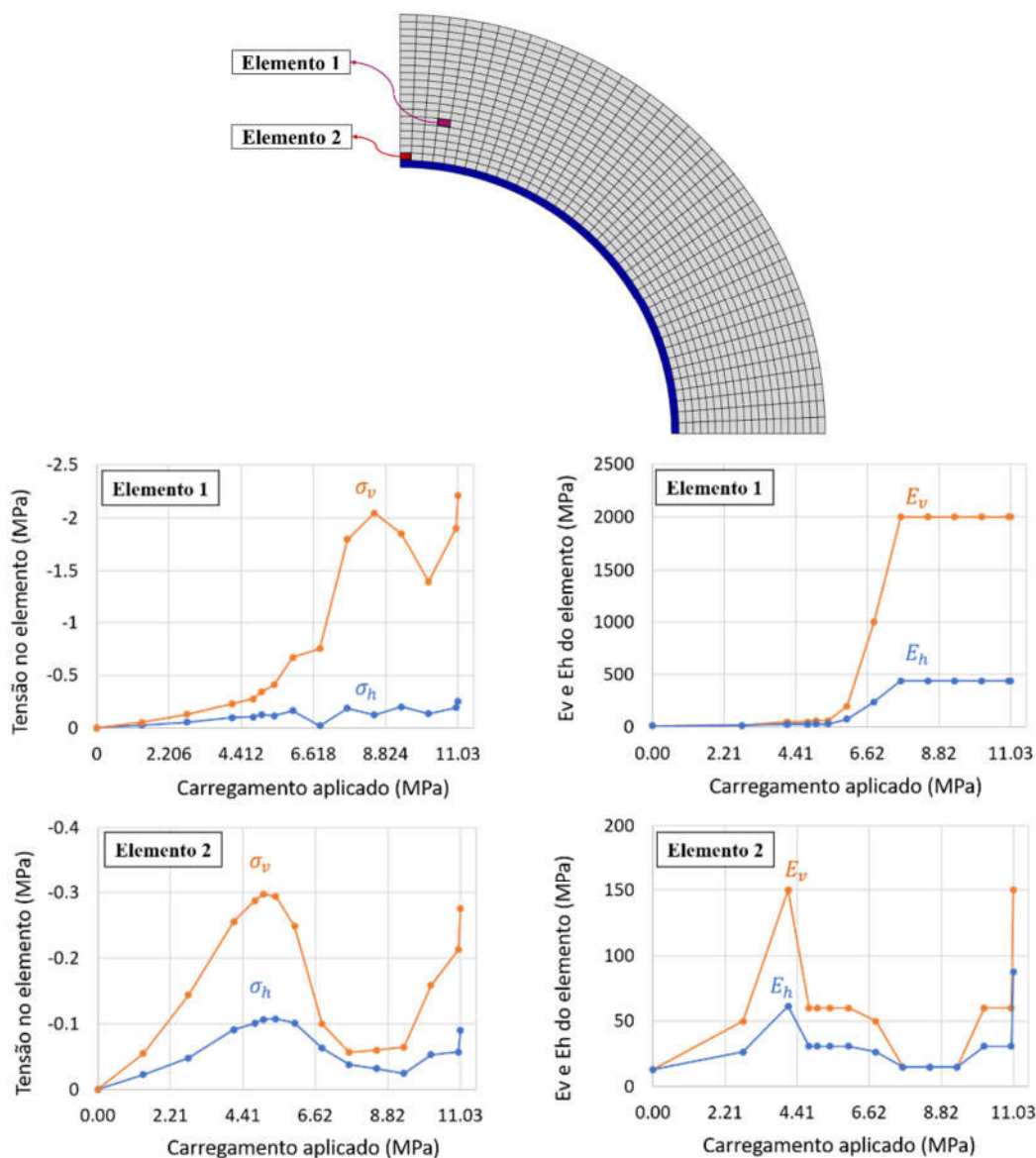


**Figura 4.16 – Gráfico de deslocamentos dos pontos P1 e P2: resultado de ensaio x resultado do Modelo 5.**

De forma comparativa, é possível afirmar que a curva referente ao ponto P2 do Modelo 5 teve boa adequação à curva de ensaio. Enquanto, para o ponto P1, a resposta foi razoável, com divergências entre a simulação e o ensaio evidenciadas a partir da

aplicação do carregamento igual a 6,82 MPa. O principal motivo dessas divergências é a limitação da sub-rotina, que condiciona o aumento dos módulos de elasticidade à razão de  $\sigma_v/\sigma_h$ .

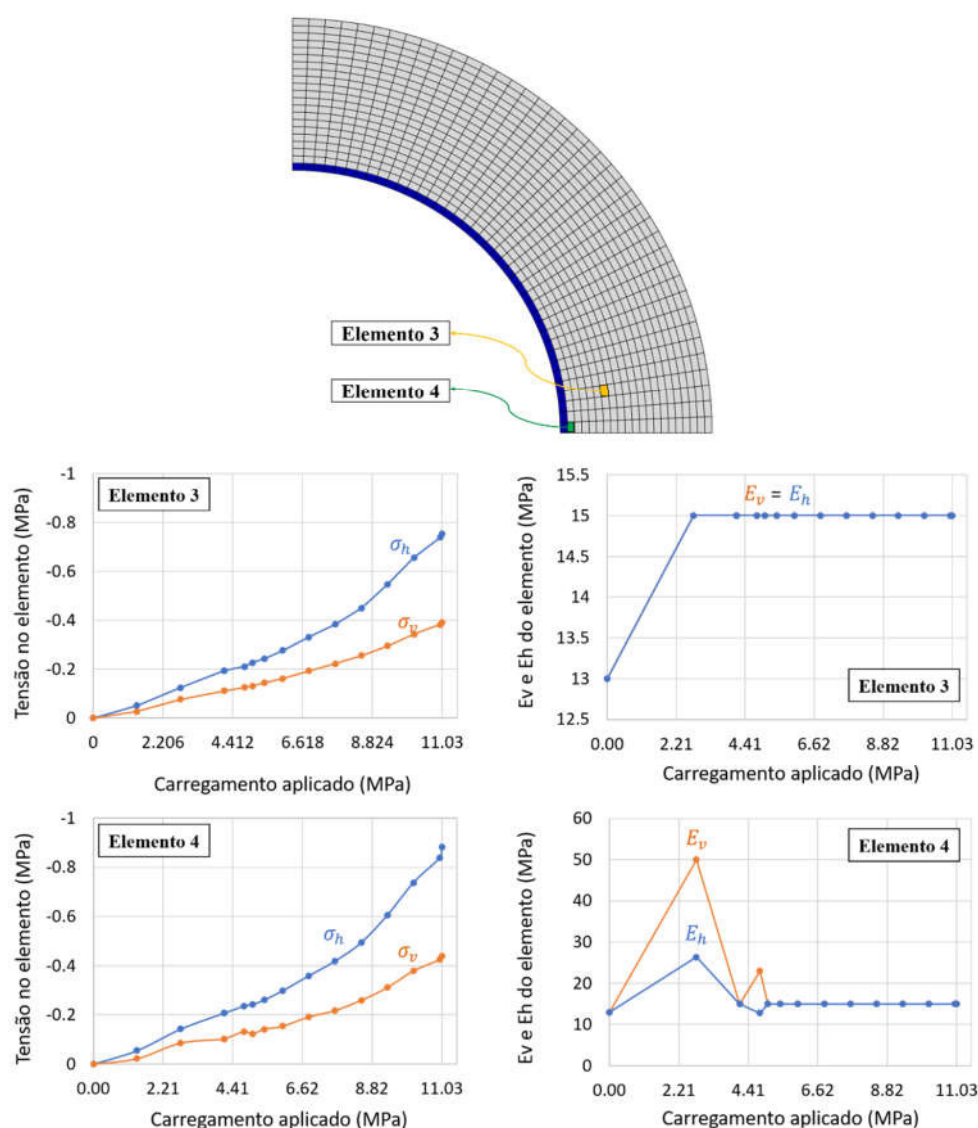
Para compreender essa limitação pode-se observar a Figura 4.17, que mostra a evolução das tensões  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  em dois elementos do pacote granular, assim como a variação dos módulos de elasticidade  $E_v$  e  $E_h$  do início ao fim da análise.



**Figura 4.17 – Evolução das tensões  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  em função do carregamento aplicado em dois elementos (1 e 2) do pacote granular e a sua influência na variação dos módulos de elasticidade  $E_v$  e  $E_h$ .**



No elemento 1, a sub-rotina funciona conforme o esperado e faz com que os módulos de elasticidade aumentem à medida que o carregamento aumenta, até que atinjam o valor máximo e se tornem constantes. Entretanto, no elemento 2, a razão  $\sigma_v/\sigma_h$  retrocede quando o carregamento chega à 6 MPa, o que faz com que os valores de  $E_v$  e  $E_h$  diminuam e o elemento não possua rigidez suficiente para transmitir tensões em uma intensidade que faça a tela atingir o deslocamento vertical observado no ensaio. Como essa tendência se repete em outros elementos próximos ao ponto P1, o resultado final é a diferença de deslocamentos observada na Figura 4.16.



**Figura 4.18 – Evolução das tensões  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  em função do carregamento aplicado em dois elementos (3 e 4) do pacote granular e a sua influência na variação dos módulos de elasticidade  $E_v$  e  $E_h$ .**



Já em relação aos elementos próximos ao ponto P2, observa-se, através da Figura 4.18, uma concordância nas curvas tanto das tensões ( $\sigma_v$  e  $\sigma_h$ ) quanto dos módulos de elasticidade ( $E_v$  e  $E_h$ ), onde estes se elevam durante o confinamento (até 4,137 MPa) e depois se mantêm constante até o final do carregamento com  $E_v = E_h = 15 \text{ MPa}$ . É importante ressaltar que para os elementos da região próxima ao ponto P2 a sub-rotina cumpriu com o esperado, pois os módulos se mantiveram baixos e permitiram que a tela se deslocasse horizontalmente sem muitas restrições.

Por fim, mesmo com a limitação da sub-rotina para o ponto P1, o Modelo 5 conseguiu alcançar o objetivo de melhorar o modelo numérico de Vargas et al. (2012), onde a principal diferença entre eles foi a consideração da anisotropia no presente trabalho. A comparação entre os resultados dos modelos numéricos citados pode ser visualizada na Figura 4.19.

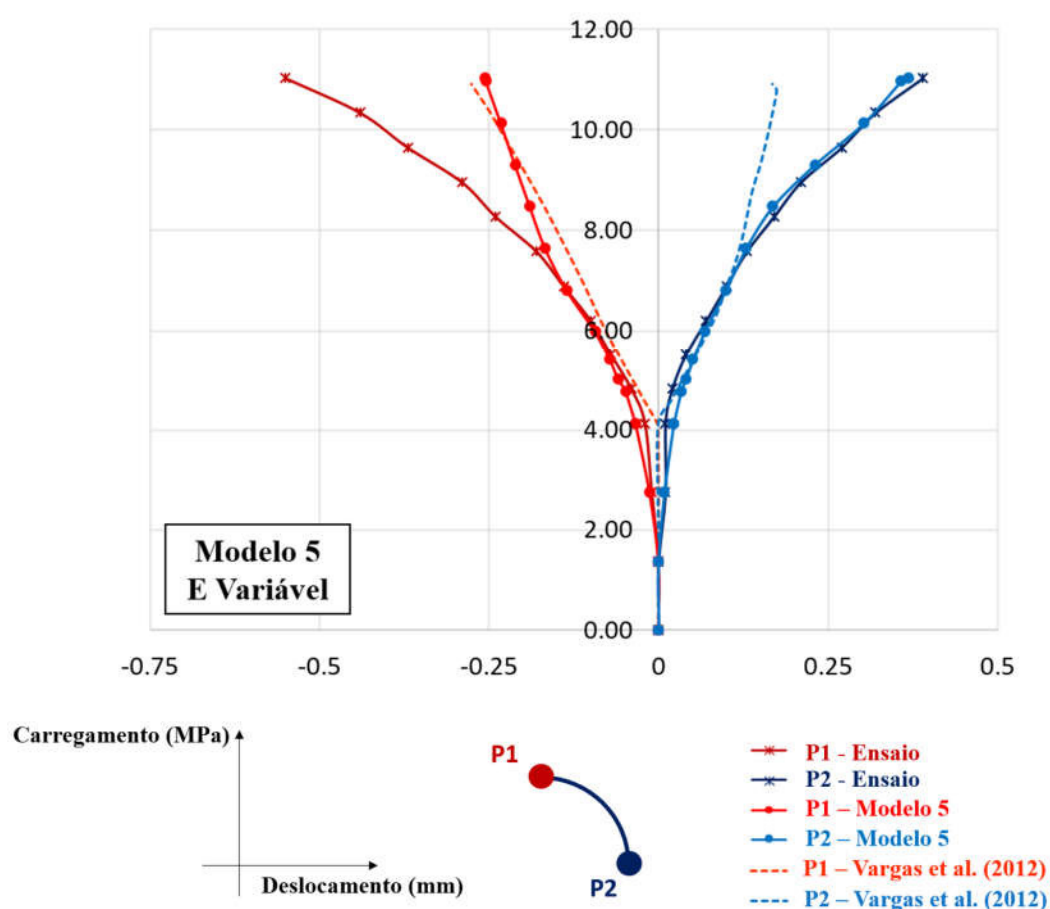


Figura 4.19 – Resultados: numéricos x ensaio.

A tabela 4.7 descreve as considerações adotadas nos modelos numéricos apresentados na figura anterior, a fim de destacar os pontos concordantes e discordantes entre eles.

**Tabela 4.7 – Características do modelo numérico de Vargas et al. (2012) e do Modelo 5.**

	MODELO CONSTITUTIVO	SUB-ROTINA	MÓDULO DE ELASTICIDADE	MATERIAL
Vargas et al. (2012)	Não linear elástico	Condicionada à $\sigma_v$	0,9 a 200 MPa	Isotrópico
Modelo 5		Condicionada à $\sigma_v/\sigma_h$	13 a 2000 MPa	Anisotrópico

#### 4.1.6. Sugestão para correção do modelo numérico

A Figura 4.17 elucidou não só a limitação da sub-rotina como também o comportamento contraditório das tensões verticais no Elemento 2 que não seguiram a tendência de aumento do carregamento, de forma que o modelo numérico não representa o comportamento esperado pelo ensaio, pois a tensão vertical no elemento deveria aumentar a medida que o carregamento é elevado.

Após analisar as considerações assumidas percebeu-se um equívoco em relação à matriz de flexibilidade mostrada na Equação 4.1, a qual pressupõe que o bloco tem comportamento igual nas direções horizontais com anisotropia apenas transversal. Ao recorrer à literatura percebe-se que o ensaio só teria esse comportamento se as tensões horizontais fossem iguais, o que não ocorre, tendo em vista que uma das faces horizontais do bloco tem restrição de deslocamento, sem aplicação de carga, durante todo o ensaio, enquanto a outra tem aplicação de carregamento até certo período de tempo.

Assim a anisotropia que deveria ser reproduzida é a ortotrópica, pois o bloco tem diferentes propriedades nas três direções, e a matriz de flexibilidade que precisaria ser utilizada é a exposta na Equação 4.5, em que os índices 1, 2 e 3 indicam a direção da propriedade correspondente (Silva, 2018).

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{v_{12}}{E_2} & -\frac{v_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{v_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{31}}{E_1} & -\frac{v_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para manter a simetria da matriz, as relações da Equação 4.6 também deveriam ser respeitadas.

$$\frac{v_{21}}{E_1} = \frac{v_{12}}{E_2} ; \frac{v_{31}}{E_1} = \frac{v_{13}}{E_3} \text{ e } \frac{v_{32}}{E_2} = \frac{v_{23}}{E_3} \quad (4.6)$$

Diante disso, sugere-se que em modelos futuros a matriz da Equação 4.5 seja adotada como base para a calibração, a fim de evitar os problemas expostos e para que o modelo numérico siga de forma mais fiel o ensaio.

## 5

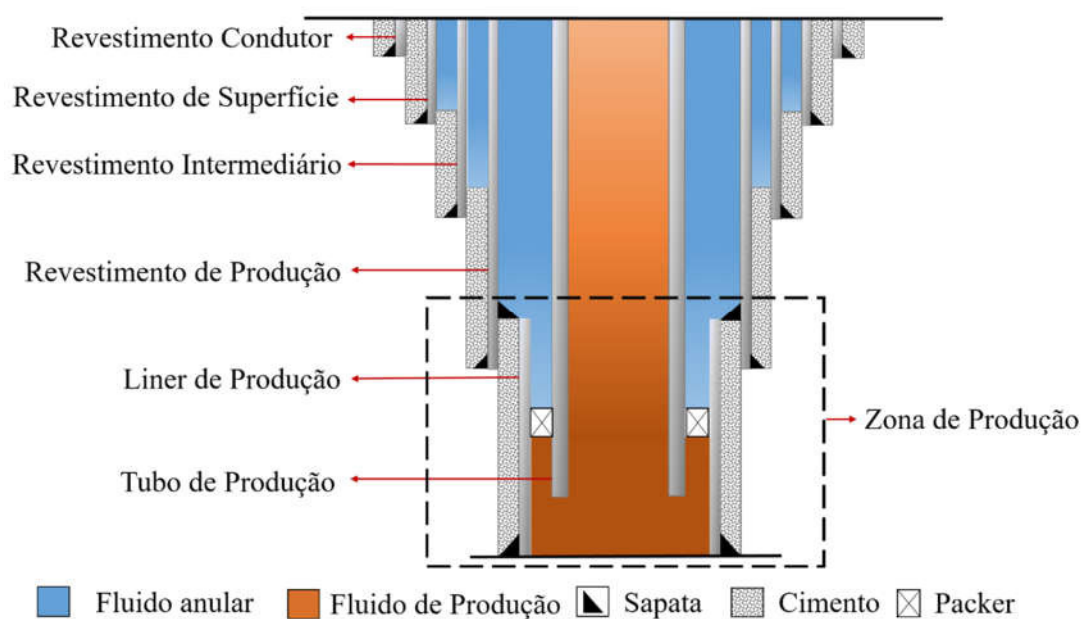
### Modelo de integridade mecânica do filtro de areia

O modelo apresentado neste capítulo é o de um poço fechado com estruturas filtrantes, ou seja, um poço que além do pacote granular e da tela de controle tem uma camada de cimento e outra de revestimento no espaço entre a parede do poço e o pacote granular. Neste contexto, os modelos desenvolvidos têm como função retratar uma situação de campo onde o intervalo de produção de sólidos sofre, após a produção de hidrocarbonetos, uma depleção de 25 MPa.

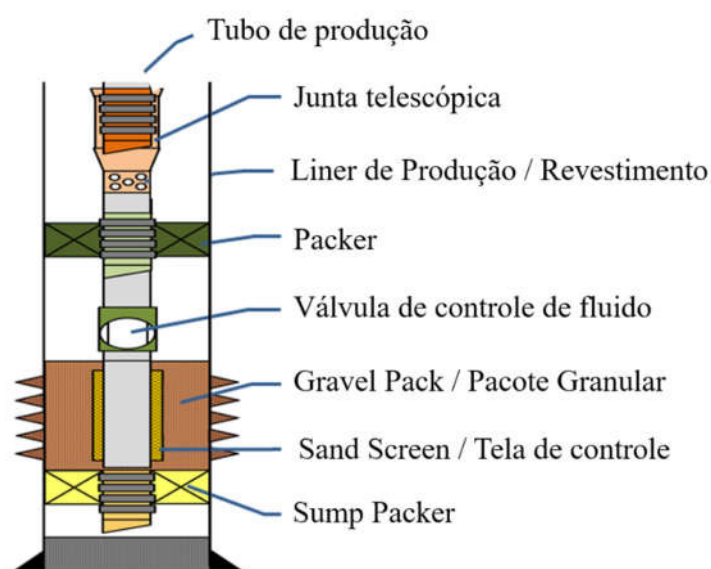
Enquanto no capítulo anterior foram discutidas as características mecânicas do pacote granular e como elas interferem na resposta da tela de controle. Neste será abordada a interação entre os componentes de completação e o filtro de areia, através do uso de elementos de interface. Será analisada também a integridade estrutural do conjunto que compõe o poço, por meio do estudo do comportamento plástico de cada material nos cenários propostos.

#### 5.1. Contexto

As estruturas de um poço são divididas em etapas que vão desde o fundo do mar até as zonas de produção de hidrocarbonetos, para o modelo proposto simula-se um poço simples com apenas uma zona produtora, na qual a rocha reservatório é um arenito suscetível à produção de sólidos. Assim, as estruturas de completação seguem o exposto na Figura 5.1a, com a sequência usual de um poço fechado. E como complemento tem-se os elementos da Figura 5.1b que mostra um arranjo típico de estruturas filtrantes posicionadas no fundo do poço.



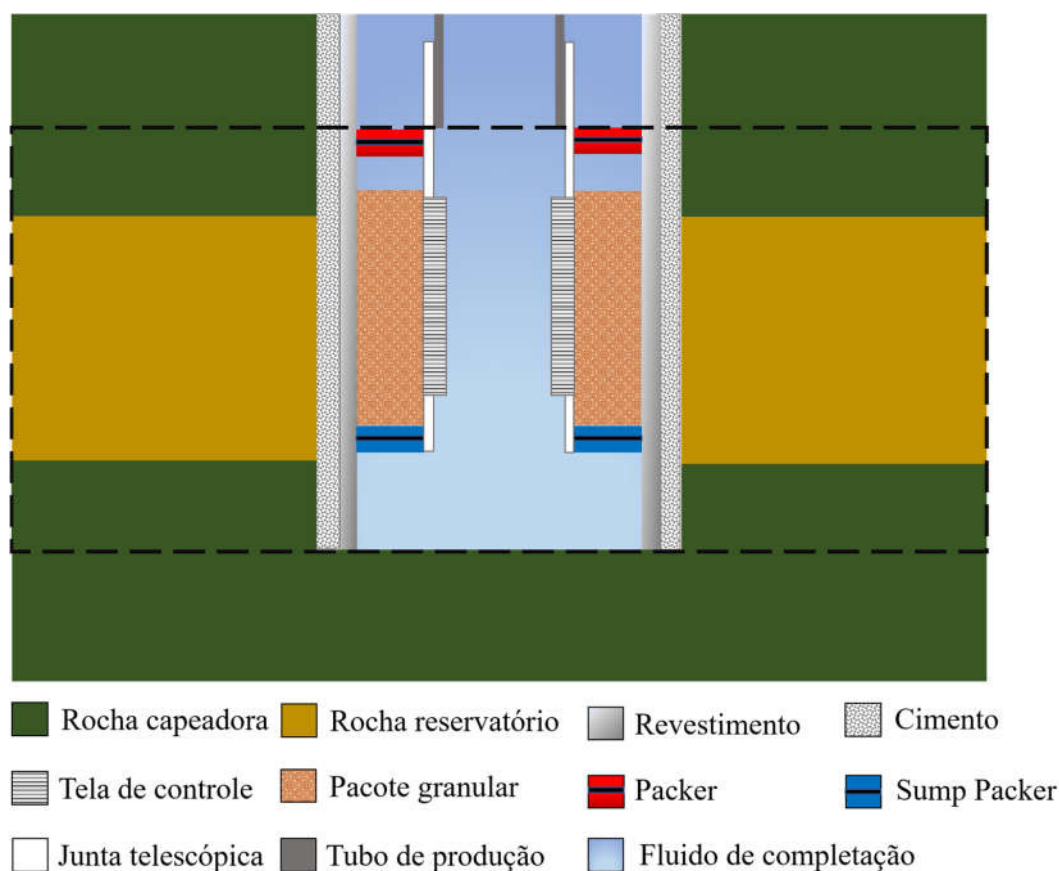
(a)



(b)

**Figura 5.1 – Contexto do poço (Zhang et al., 2019; Pocza & Ramnath, 2018).**

A área de interesse corresponde apenas à que contém as estruturas filtrantes, de maneira que não é necessário modelar todo o poço. Posto isto, a Figura 5.2 representa a zona de produção e a região delimitada pela linha tracejada corresponde à geometria usada como base para a modelagem.



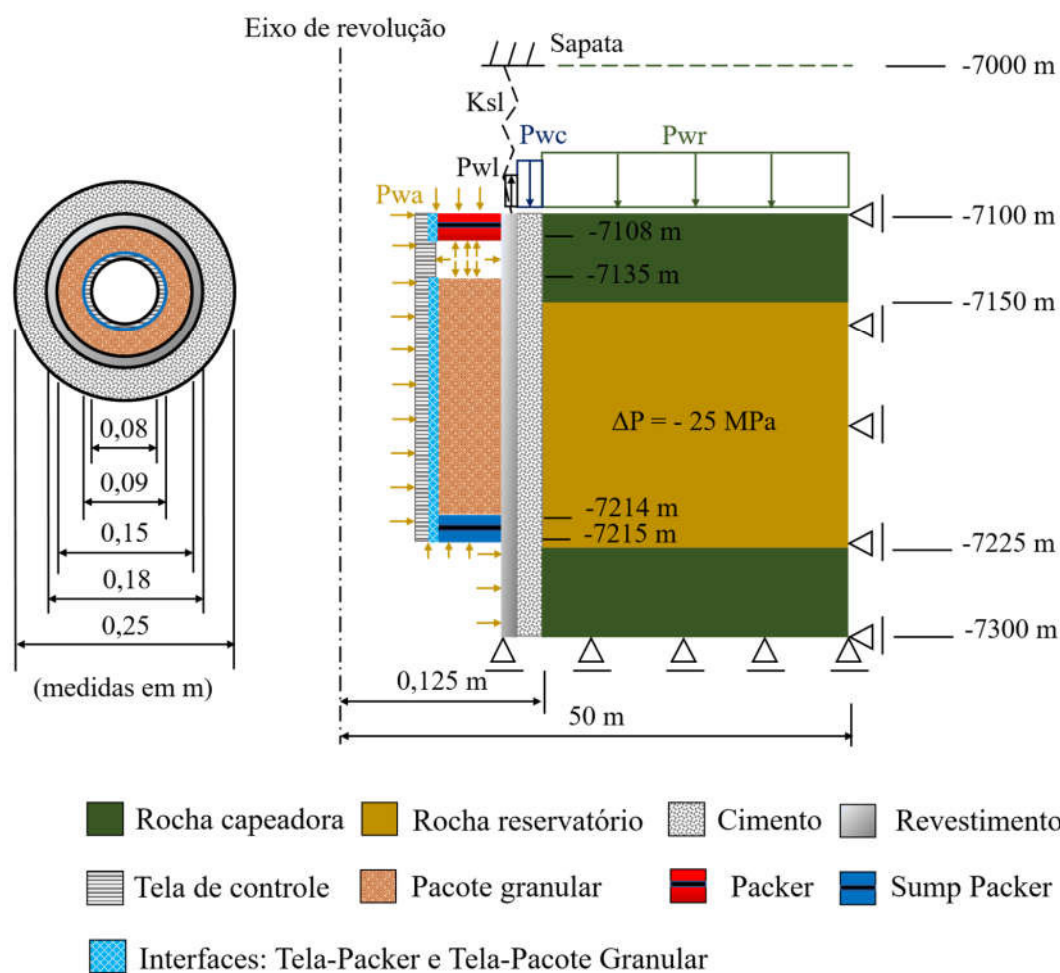
**Figura 5.2 – Geometria utilizada como base para a modelagem.**

## 5.2. Metodologia de modelagem

Neste subtópico será definida uma metodologia que pode ser adotada em poços sob condições semelhantes ao apresentado, com estruturas de controle de sólidos. A primeira medida proposta foi a de modelar apenas metade da geometria do poço, uma vez que este tem simetria ao longo da sua circunferência e um modelo axissimétrico é o suficiente para a análise.

Outra consideração assumida foi referente ao contato entre os componentes, onde as interfaces rocha-cimento, cimento-revestimento e revestimento-pacote granular foram tratadas como tendo adesão perfeita, enquanto para as interações tela-packer e tela-pacote granular admitiu-se um deslizamento entre as estruturas, o que foi reproduzido e estudado através da inserção de elementos de interface. Com o intuito de

Em relação às condições de contorno foi definido que as bordas inferior e lateral direita têm restrição de deslocamento, devido ao ambiente confinante em que a rocha se encontra. Já as bordas superior e lateral esquerda são submetidas, respectivamente, às pressões das camadas predecessoras e do fluido de completção. Conforme visto na Figura 5.3 que traz o modelo proposto a partir das hipóteses adotadas, a imagem apresentada é meramente informativa, ou seja, o desenho está fora de escala.



**Figura 5.3 – Geometria e condições de contorno do modelo proposto.**

Além disso, duas simplificações foram feitas e também podem ser conferidas na Figura 5.3, a primeira delas é referente à tela de controle e à junta telescópica que foram

modeladas como um só elemento e a segunda está relacionada ao *liner* de produção ou revestimento, que no trecho entre -7000 m e -7100 m foi modelado como uma mola engastada, ancorada por uma sapata às estruturas de completação das zonas anteriores.

Finalmente, o último aspecto definido foi relacionado a maneira como a depleção seria implementada no modelo. Para isto, foi determinado que ela seria aplicada incrementalmente e que seria dividida em no máximo 50 passos, com incrementos variáveis entre 0,5 e 1 MPa, até que a depleção de 25 MPa fosse atingida. De forma que os resultados do modelo podem ser analisados em cada etapa de aplicação de depleção.

### 5.3. Estudo de Caso

Diante do exposto, o poço estudado será particularizado a partir das características dos materiais, a começar pelos valores dos seus pesos específicos, que podem ser vistos na Tabela 5.1. Com os quais é possível realizar o cálculo das pressões exercidas nas estruturas, através da multiplicação do peso específico pela espessura da camada predecessora.

**Tabela 5.1 – Peso específico dos materiais.**

REFERÊNCIA	MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (KN/M3)
Xu et al. (2014)	Aço	78,50
Fink (2021)	Água e Fluido de completação (a base de água do mar)	10,00
Obrzud & Truty (2018)	Arenito	24,00
Ichim et al. (2018)	Cimento (classe G ou H)	15,22
Campos et al. (2018)	Pacote granular	20,00

A seguir será detalhado o cálculo da pressão exercida na rocha capeadora ( $P_{wr}$ ), a qual recebe a carga da camada de arenito (da cota -7100 m até a cota do fundo do mar -1000 m) e da lâmina d'água de 1000 m.

$$P_{wr} = 1000 \cdot 10 + 6100 \cdot 24 = 156400 \text{ kN/m}^2$$



As pressões  $P_{wc}$  e  $P_{wa}$  seguem esta mesma metodologia e podem ser resumidas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Pressão exercida nas estruturas.**

PRESSAO	LOCAL	COTA (M)	VALOR (KN/M2)
$P_{wc}$	No cimento	-7100	71522
$P_{wa}$	Na face superior da tela de controle e do <i>packer</i>	-7100	71000
	Na face inferior do <i>packer</i>	-7108	71080
	Na face inferior da tela de controle e do <i>sump packer</i>	-7215	72150
	Nas faces laterais esquerda	-7100 a -7300	71000 a 73000

Enquanto a pressão do *liner*  $P_{wl}$  foi obtida por meio da análise do equilíbrio de forças na cota -7100 m, de acordo com o descrito na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Representação das forças e cálculo das pressões no *liner*.**

CÁLCULO DAS PRESSÕES	SISTEMA DE FORÇAS NO LINER
$P_{lt}$ = Pressão total do <i>liner</i> $P_{lt} = 300 \cdot 78,5 = 23550 \text{ kN/m}^2$	
$R$ = Reações de apoio $R = P_{lt}/2$ $R = 23550/2 = 11775 \text{ kN/m}^2$	
$P_{ls}$ = Pressão do <i>liner</i> no trecho superior $P_{ls} = 100 \cdot 78,5 = 7850 \text{ kN/m}^2$	
$P_{la}$ = Pressão do <i>liner</i> na seção A $P_{la} = R - P_{ls}$ $P_{la} = 11775 - 7850$ $P_{la} = 3925 \text{ kN/m}^2$ $P_{wa} = P_{wl} = 3925 \text{ kN/m}^2$	

Por fim, tem-se que a rigidez da mola ( $K_{sl}$ ), no trecho de -7000 m a -7100 m, é a mesma do *liner*, sendo descrita a seguir.

$$K_{sl} = \frac{A_s \cdot E}{L} = \frac{\pi(r_e^2 - r_i^2) \cdot E}{L}$$

$$K_{sl} = \frac{\pi(0,09^2 - 0,075^2) \cdot (2,10 \cdot 10^8)}{100} = 16328,43 \text{ kN/m}$$

### 5.3.1. Propriedades dos materiais

Para a definição das propriedades materiais, apresentadas na Tabela 5.4, recorreu-se às seguintes referências bibliográficas: Chavez (2011) para o arenito, sendo os mesmos do Capítulo 4; Heidarian et al. (2015) para o cimento; Hicher & Chang (2006) e Chavez (2011) para o pacote granular e para o aço foram escolhidos dois tipos de tubos especificados pela API SPEC 5CT (2018), o P110 de liga de aço ( $\sigma_y = 758 \text{ MPa}$ ) recomendado para revestimento de poços profundos e o H40 de aço carbono ( $\sigma_y = 393 \text{ MPa}$ ), perfil aplicado como tubo base para tela de controle (Fuh et al., 2009).

**Tabela 5.4 – Propriedades dos materiais do poço fechado.**

	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>c (MPa)</b>	<b><math>\varphi</math></b>	<b><math>\psi</math></b>	<b><math>\sigma_y</math> (MPa)</b>
<b>Arenito</b>	2,70	0,32	5,51	28°	8°	-
<b>Cimento</b>	8,30	0,10	1,5	20°	0°	-
<b>Revestimento</b>	210	0,30	-	-	-	758
<b>Tela de Controle</b>	210	0,30	-	-	-	393
<b>Pacote Granular</b>	2	0,35	0	32°	12°	-

Destaca-se que o poço está localizado em um conjunto rochoso de arenito onde foi considerado que a camada capeadora compartilha as mesmas propriedades da camada reservatório, com diferença apenas no que se refere à permeabilidade e porosidade.

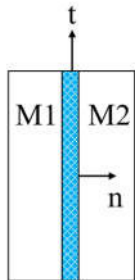
### 5.3.2. Propriedades dos elementos de interface

Zhang et al. (2021) ressaltam que o estudo da interação entre um material granular e uma estrutura de aço é primordial, devido ao comportamento descontínuo na superfície de contato entre os dois componentes, que pode presenciar deslizamento cisalhante, deslocamento e separação dos materiais. Desse modo, é justificada a aplicação de elementos de interface entre o pacote granular e a tela de controle.

Outra região que necessita desse tipo de elemento é a de contato entre a tela de controle e o *packer/sump packer*, visto que a ligação entre eles é feita através da junta telescópica, a qual tem como característica a absorção de movimentos de expansão ou contração da coluna de produção. Logo, a rigidez da interface deve ser controlada a fim de representar a liberdade de movimento e a transmissão de tensões entre os elementos de completação e os componentes filtrantes.

No que diz respeito às propriedades dos elementos de interface a literatura traz algumas relações diretas entre os módulos E e G, dos materiais circundantes, com os coeficientes de rigidez normal ( $K_n$ ) e tangencial ( $K_t$ ) da interface, conforme apresentado na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 – Valores dos coeficientes de rigidez dos elementos de interface de acordo com referências bibliográficas.**

	COEFICIENTES DE RIGIDEZ		INTERFACE
<b>Cordero (2013)</b>	$K_n = \frac{E}{t}$	$K_t = \frac{G}{t}$	 <p>M1 = Material 1 M2 = Material 2</p>
<b>Vilthalkar (2019)</b>	$K_n = \frac{E}{t}$	$K_t = \frac{G}{t}$	
<b>Midas (2019)</b>	$10 \cdot \frac{E_{sf}}{t} \leq K_n \leq 100 \cdot \frac{E_{sf}}{t}$	$10 \cdot \frac{G_{sf}}{t} \leq K_t \leq 100 \cdot \frac{G_{sf}}{t}$	
<b>Diana (2022)</b>	$100 \cdot \frac{E}{t} \leq K_n \leq 1000 \cdot \frac{E}{t}$	$\frac{K_n}{10} \leq K_t \leq \frac{K_n}{100}$	

Onde  $E_{sf}$  e  $G_{sf}$  se referem aos menores módulos de elasticidade e cisalhamento dentre os materiais M1 e M2.

A partir desses dados decidiu-se fazer o estudo de três modelos: com alta rigidez (AR), com rigidez intermediária (RI) e com baixa rigidez (BR), que seguem as seguintes relações para o cálculo dos coeficientes de rigidez.

**Modelo AR (Alta Rigidez):**

$$K_n = 1000 \cdot \frac{E_{\text{soft}}}{t} ; K_t = 1000 \cdot \frac{G_{\text{soft}}}{t}$$

**Modelo RI (Rigidez Intermediária):**

$$K_n = 1000 \cdot \frac{E_{\text{soft}}}{t} ; K_t = K_t \text{ do Modelo AR} \cdot 10^{-5}$$

**Modelo BR (Baixa Rigidez):**

$$K_n = 1000 \cdot \frac{E_{\text{soft}}}{t} ; K_t = \text{Fator} \cdot \frac{G_{\text{soft}}}{t}$$

Em que o Fator =  $10^{-3}$  para a interface tela-pacote granular e Fator =  $10^{-5}$  para a interface tela-packer.

A diferença entre os modelos está relacionada ao valor de  $K_t$ , o propósito da modificação deste parâmetro é avaliar o deslizamento dos materiais e verificar em qual dos cenários a tela se mantém íntegra. É importante notar que o valor de  $K_n$  é o mesmo para as três propostas, visto que a sua redução resultaria na separação lateral dos materiais, o que não acontece na prática. Com base nessas considerações, as propriedades das interfaces foram definidas na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6 – Propriedade dos elementos de interface.**

	INTERFACE	t (m)	$K_n$ (KPa/m)	$K_t$ (KPa/m)	c (MPa)	$\varphi$	$\psi$
<b>Modelo AR</b>	Tela-Packer	1	2,10E+11	8,08E+10	0	0°	0°
	Tela-Pacote granular	1	2,00E+09	7,41E+08	0	20°	0°
<b>Modelo RI</b>	Tela-Packer	1	2,10E+11	8,08E+05	0	0°	0°
	Tela-Pacote granular	1	2,00E+09	7,41E+03	0	20°	0°
<b>Modelo BR</b>	Tela-Packer	1	2,10E+11	8,08E+02	0	0°	0°
	Tela-Pacote granular	1	2,00E+09	7,41E+02	0	20°	0°

### 5.3.3. Considerações de modelagem

Os modelos desenvolvidos nessa aplicação foram feitos no *framework* GeMA (*Geo Modelling Analysis*) que permite a simulação precisa de modelos multifísicos e multiescala (Mendes et al., 2016). Para representar a geometria optou-se por utilizar elementos quadriláteros de quatro nós nomeados dentro do GeMA de quad4, para a mola escolheu-se o elemento de barra com dois nós (bar2) e para as interfaces foram adotados elementos do tipo int2dl4, quadriláteros de 4 nós, com coeficientes de rigidez (normal e tangencial).

Referente à malha, o modelo foi dividido horizontalmente em 60 elementos: 4 na tela de controle, 6 no *packer/sump packer*/pacote granular, 4 no revestimento, 6 no cimento e 40 na rocha capeadora/reservatório. E verticalmente em 100 elementos: 3 no *packer*, 8 no espaço vazio entre a base do *packer* e o topo do pacote granular, 68 no pacote granular, 1 no *sump packer* e 20 na distância entre a base do *sump packer* e o fundo do poço. A Figura 5.4 mostra de maneira mais detalhada esses valores e apresenta um trecho da malha com os componentes filtrantes e de completação.

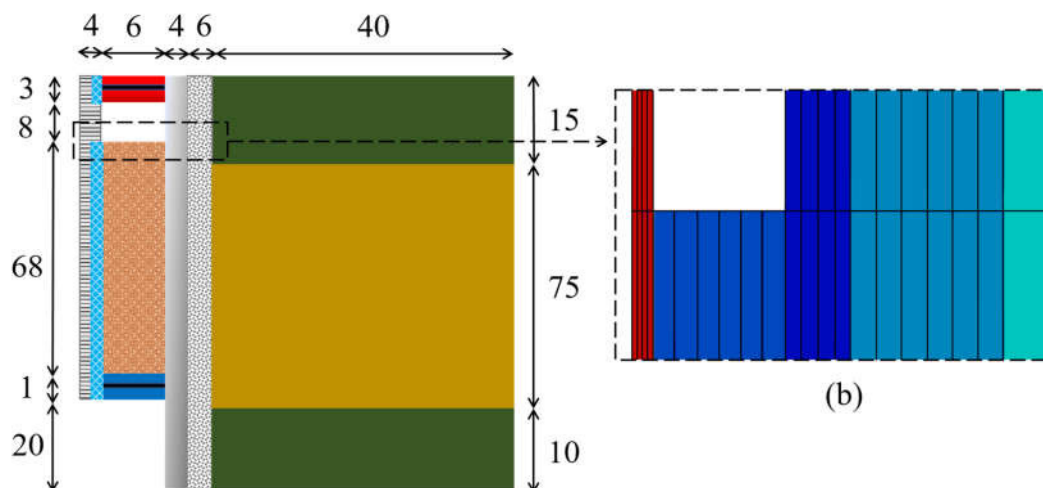


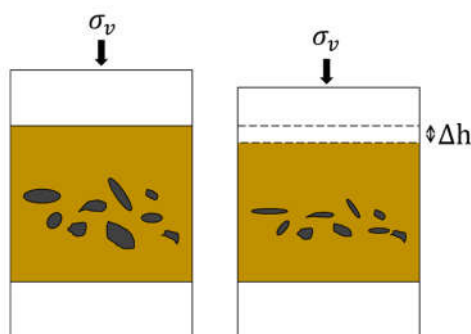
Figura 5.4 – Definições da malha de elementos finitos: (a) número de divisões; (b) detalhe dos componentes filtrantes e de completação.

### 5.3.4. Resultados

No exemplo estudado ocorre o fenômeno da depleção, que é presenciado após a produção de hidrocarbonetos, em função da migração dos fluidos da rocha para dentro do poço. Como a camada reservatório está sujeita à carga das camadas predecessoras a rocha sofre compactação ao fechar os espaços vazios antes ocupados por fluidos/gases. A Figura 5.5 ilustra esse processo e a Equação 5.1 traz a formulação de Settari (2002) para o cálculo da compactação da camada depletada.

$$\Delta h = [\beta \cdot (1 - \nu - 2 \cdot \nu^2) / (1 - \nu)] \cdot \frac{\Delta P}{E} \cdot h \quad (5.1)$$

onde  $\Delta h$  é a compactação,  $\beta$  é o coeficiente de Biot,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\Delta P$  é a depleção,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $h$  é a espessura da camada reservatório.

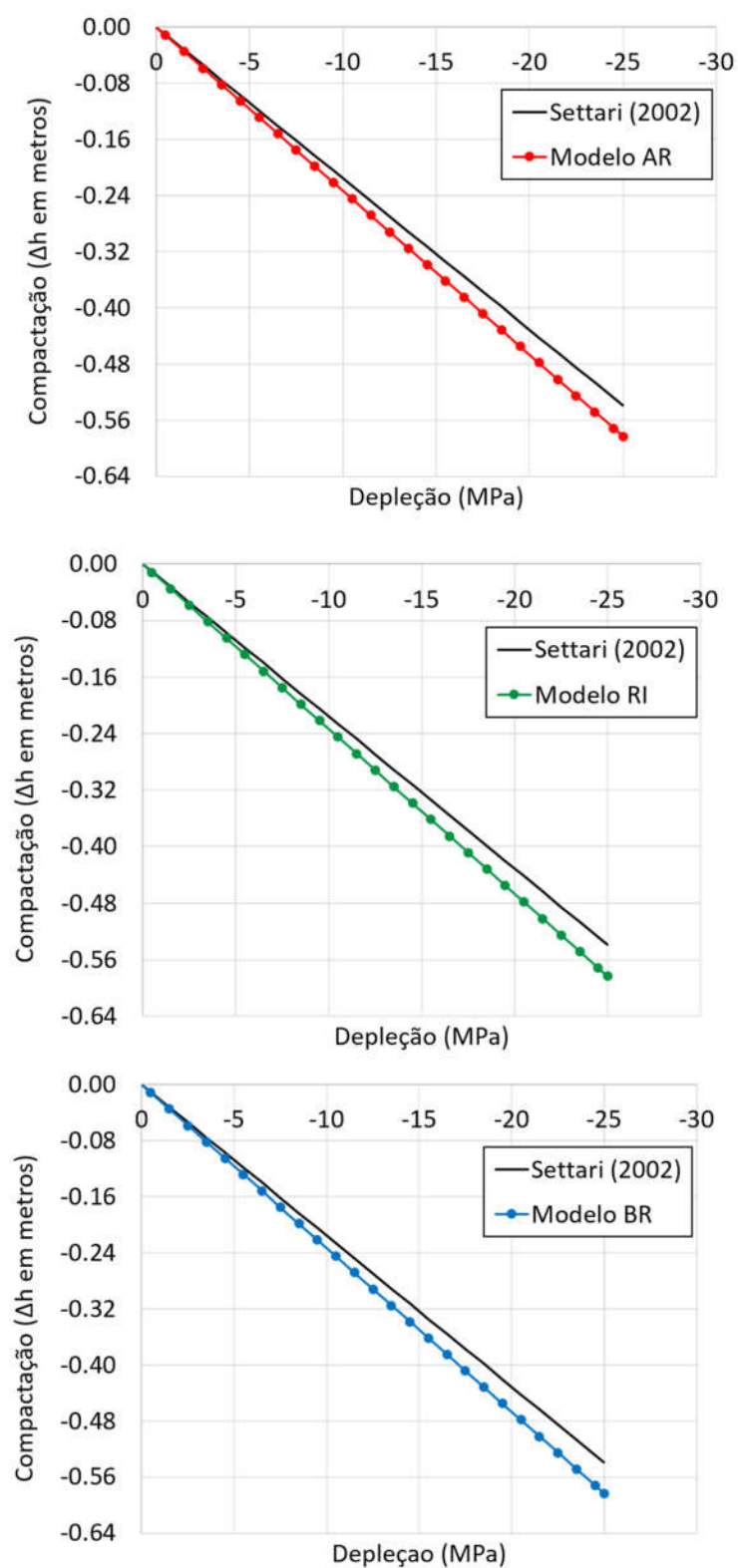


**Figura 5.5 – Compactação de rocha reservatório após depleção.**

Dentre os parâmetros apresentados na Equação 5.1, o único que ainda não teve o valor citado foi o coeficiente de Biot. Para obtê-lo, recorreu-se ao trabalho de Junior (2018) que estabelece um intervalo de  $0,80 \leq \beta \leq 0,97$  onde o coeficiente assume valores maiores para um arenito friável e menores para um arenito rígido, como o arenito do modelo tem rigidez semelhante ao arenito friável da referência definiu-se que  $\beta = 0,97$ . Assim, o valor da compactação teórica a cada passo da depleção ( $\Delta P$ ) será determinado pela Equação 5.2:

$$\Delta h = [0,97 \cdot (1 - 0,27 - 2 \cdot (0,27)^2) / (1 - 0,27)] \cdot \frac{\Delta P}{2700} \cdot 75 \quad (5.2)$$

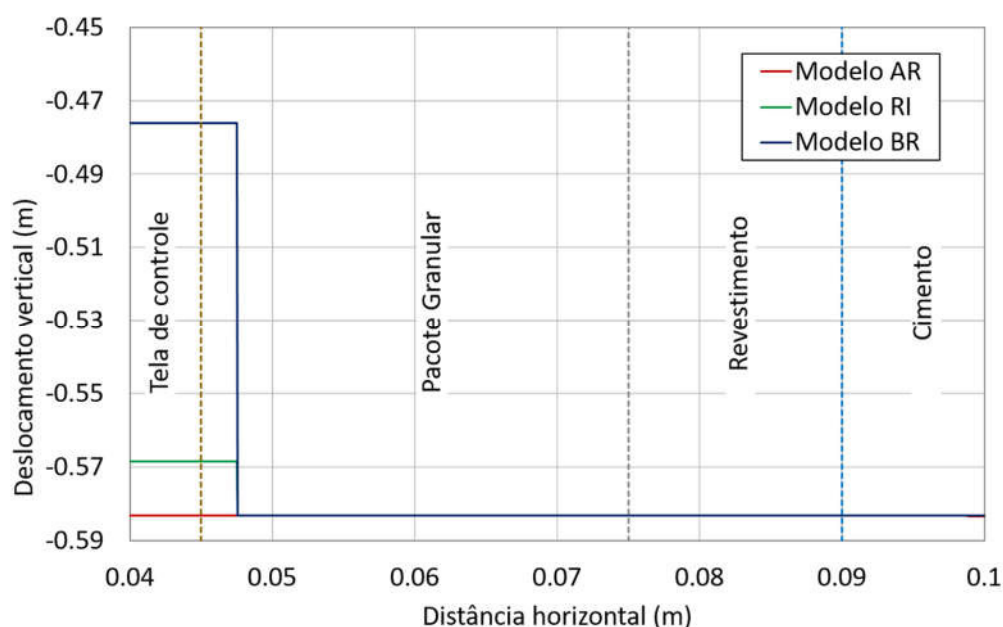
Para validar a modelagem, a Figura 5.6 traz a comparação entre a compactação obtida pela formulação teórica e pelos resultados dos modelos numéricos, sendo estes traçados através da média dos deslocamentos verticais de todos os pontos pertencentes ao topo da camada reservatório (na cota -7150 m), em cada incremento de depleção.



**Figura 5.6 – Compactação no topo da rocha reservatório do início ao fim da aplicação da depleção, na cota -7150 m.**

Diante dos gráficos expostos, percebeu-se que os modelos tiveram resultados compatíveis com o esperado, com diferença de apenas 4 cm ao final da depleção entre as modelagens numéricas e a formulação teórica. Observou-se também que a mudança das rigidezes nas interfaces não exerce influência na compactação da camada reservatório.

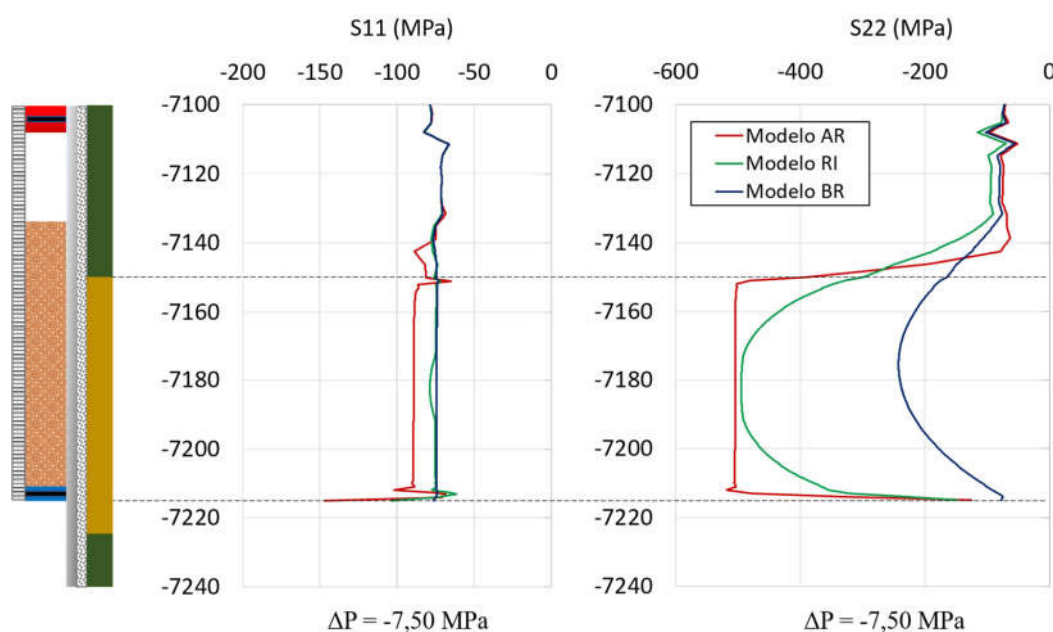
Contudo, espera-se que na região da tela de controle haja divergência entre os modelos, uma vez que a diminuição do coeficiente de rigidez tangencial propicia o deslizamento entre os elementos de contato. A fim de averiguar essa hipótese construiu-se o gráfico da Figura 5.7, o qual relaciona os deslocamentos verticais dos componentes filtrantes e das estruturas de completação na cota -7150 m (topo da rocha reservatório).



**Figura 5.7 – Deslocamento vertical das estruturas ao final da depleção nos Modelos AR, RI e BR, na cota -7150 m.**

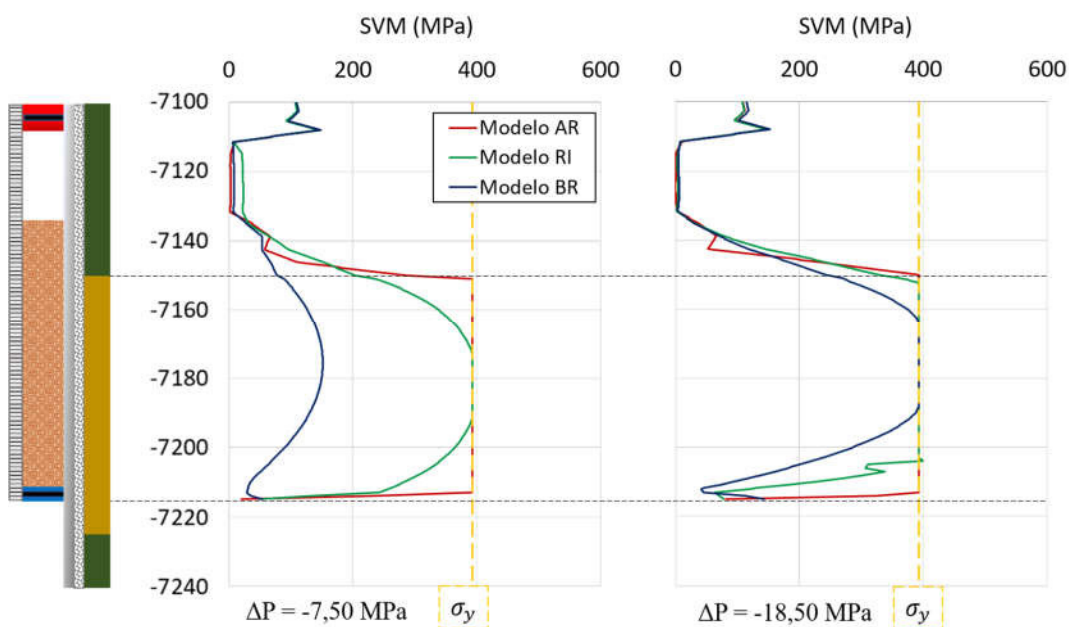
Ao observar a Figura 5.7 constata-se que no modelo de alta rigidez (AR) os elementos se deslocam em conjunto, com pouca diferença entre o deslocamento da tela e da camada depletada, o mesmo ocorre no Modelo RI onde a divergência entre os deslocamentos não passa de 2 centímetros, apenas o Modelo BR demonstra deslizamento significativo entre os materiais. Em decorrência desse comportamento, a transferência de tensões para a tela é maior nos dois primeiros modelos, fato que pode ser verificado na Figura 5.8.





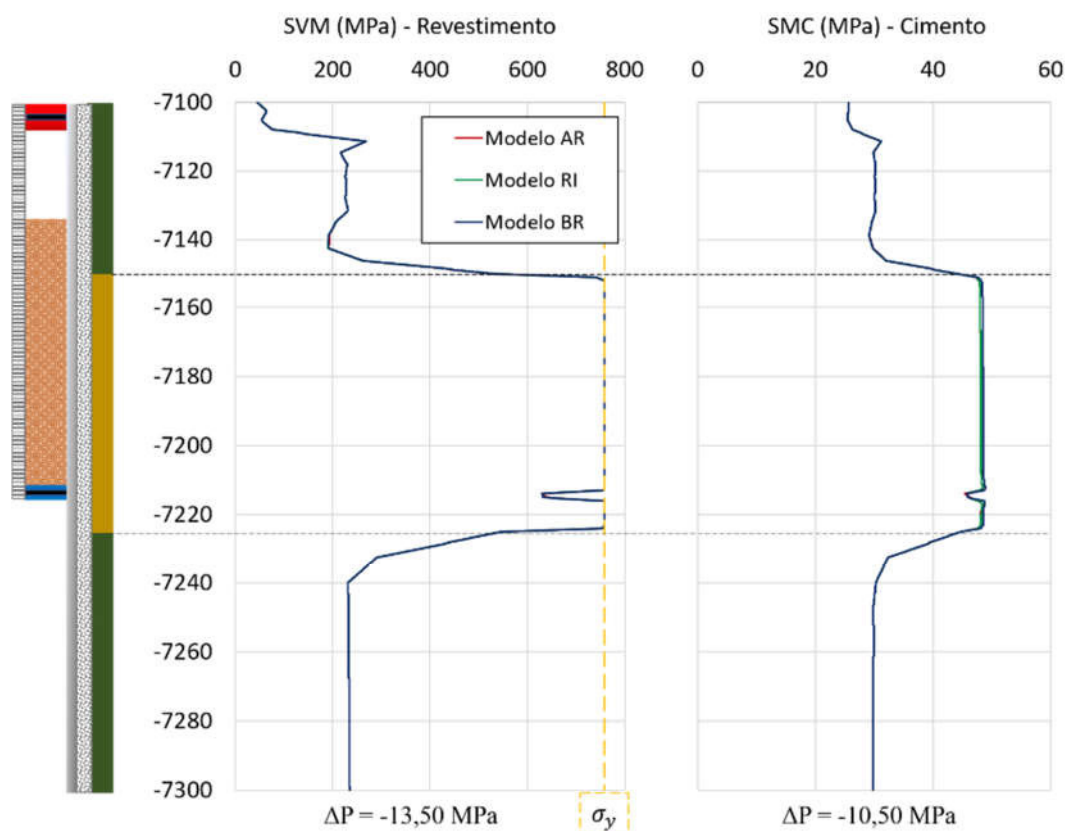
**Figura 5.8 – Tensões S11 e S22 na tela de controle ao longo da altura, na cota horizontal = 0,0425m.**

Por possuir maior rigidez no contato, a tela do Modelo AR absorve mais tensão, o que leva a plastificação em quase toda a sua extensão com um baixo valor de depleção ( $\Delta P = -7,50 \text{ MPa}$ ), o Modelo RI apresenta comportamento semelhante. Já o Modelo BR só inicia a plastificação em  $\Delta P = -18,50 \text{ MPa}$ . Conforme visto na Figura 5.9.



**Figura 5.9 – Plastificação da tela de controle, na cota horizontal = 0,0425m.**

Ainda que a tela seja aliviada no modelo menos rígido, o revestimento e o cimento não são afetados pela variação dos parâmetros da interface, com a plastificação ocorrendo sob valores iguais para os três modelos. Sempre na região compactada, de acordo com o representado na Figura 5.10, com o início da plastificação do revestimento em  $\Delta P = -13,50$  MPa e do cimento em  $\Delta P = -10,50$  MPa. Referente ao pacote granular foi observado que ele se manteve elástico durante toda a simulação.



**Figura 5.10 – Plastificação do revestimento e do cimento, nas cotas horizontais = 0,0825m e 0,1075 m, respectivamente.**

Ao assumir que a função principal da tela é a de servir como um meio filtrante e que a sua falha afetaria diretamente a funcionalidade do poço, é válido considerar que a ligação de campo seja feita com o intuito de aliviar as tensões que lhe são transmitidas, assim, dentre os modelos propostos o que mais corresponde à essa expectativa é o Modelo BR.

Nesta aplicação utilizou-se um módulo de elasticidade constante e o comportamento anisotrópico não-linear elástico estudado na modelagem do primeiro exemplo

foi desconsiderado. Para avaliar se a calibração desenvolvida no capítulo 4 consegue representar o pacote granular em qualquer situação decidiu-se testar, no Modelo BR, a troca das propriedades do pacote granular pelo descrito na Tabela 4.6. Entretanto, os resultados não foram satisfatórios, pois durante a simulação constatou-se que por iniciar em valores muito baixos de  $E_v$  e  $E_h$  o pacote granular não acompanhava os deslocamentos dos outros componentes do poço e não transmitia tensão suficiente para a tela, que permanecia na mesma posição independente do carregamento aplicado.

## 6

## Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 6.1.

#### Conclusões

Perante a abrangência do tema, o presente trabalho buscou elucidar os principais aspectos relacionados aos componentes constituintes de um poço em intervalo de produção de sólidos, através de minuciosa pesquisa bibliográfica, que contribuiu para compreensão das estruturas e dos métodos empregados pela indústria. Dentre as soluções apresentadas, optou-se por focar na aplicação de elementos filtrantes que tem como vantagem a contenção das partículas sem comprometer o fluxo de fluidos para dentro do poço.

Com o objetivo de investigar as propriedades de um desses elementos foi proposta uma análise comparativa entre as respostas de um ensaio e os resultados de modelagens numéricas. Durante a tentativa de reproduzir o modelo ensaiado percebeu-se uma divergência nos valores dos módulos de elasticidade apresentados na literatura para o pacote granular, o que motivou uma pesquisa mais profunda a respeito do comportamento desse material. Como resultado, foi formulada uma metodologia de calibração que considera um comportamento anisotrópico não-linear elástico em função das tensões aplicadas no modelo, a partir da qual os módulos de elasticidade aumentam à medida que o confinamento da rocha aumenta.

Apesar do modelo calibrado alcançar os deslocamentos obtidos em ensaio, algumas limitações foram observadas, uma delas é o retrocesso dos módulos de elasticidade a partir de dado ponto, o que impede que o material alcance a rigidez necessária para continuar transmitindo tensão às outras estruturas do poço, de maneira a provocar um alívio fictício que impede a tela de controle de chegar ao deslocamento registrado em ensaio.

Uma possível solução para esse problema é estabelecer uma nova regra para sub-rotina, com outra relação governante, sendo esta capaz de controlar a evolução dos módulos de elasticidade de acordo com o observado em ensaio, além de trocar a matriz de flexibilidade por uma matriz ortotrópica. A outra limitação relatada é em relação à generalidade dos parâmetros encontrados, visto que ao tentar utilizá-los na segunda aplicação o resultado não apresentou sentido físico, quanto a essa observação recomenda-se que o material granular tenha as suas propriedades avaliadas sob diferentes níveis de carga para verificar a influência do confinamento na sua rigidez.

Outra aplicação simulada foi a de um poço fechado (cimentado e revestido) com estruturas filtrantes em situação de campo, com as considerações de geometria e condições de contorno próximas ao presenciado em instalações reais, além de uma depleção de 25 MPa. Para esse caso, foi feita a análise da interação entre a tela de controle e as estruturas circundantes, através da introdução de elementos de interface. Ao comparar os resultados dos modelos, constatou-se que a hipótese de contato elevado resulta na absorção excessiva de tensão pela tela que passa a plastificar muito cedo, enquanto que quando foi assumido baixa rigidez na interface a tela plastificou em um valor próximo do revestimento. Sendo este um resultado mais aceitável, tendo em vista que o comportamento predominante da tela é o de filtro e não como um elemento propriamente estrutural. Diante disso, percebeu-se que a metodologia de modelagem proposta, com diferentes parâmetros de interface, permitiu uma análise de sensibilidade e auxiliou no estudo da transferência de tensões entre os elementos.

## **6.2.**

### **Sugestões para Trabalhos Futuros**

Durante a pesquisa foram observadas diversas possibilidades e caminhos para a modelagem dos problemas. Contudo, para manter uma sequência metodológica apenas alguns deles foram seguidos. Assim sendo, a seguir tem a lista de abordagens que podem ser utilizadas em trabalhos futuros:

- a) Realizar a calibração de outros ensaios, para verificar qual regra utilizar na sub-rotina, a fim de representar de maneira fidedigna o comportamento

anisotrópico de diferentes materiais granulares, em diferentes condições de carregamento;

- b) Propor outro modelo numérico para o ensaio de Chavez (2011) com a calibração feita a partir da matriz de flexibilidade ortotrópica;
- c) Avaliar o uso de elementos de interface na primeira aplicação, do modelo ensaiado por Chavez (2011);
- d) Reproduzir um poço que tenha resultados registrados, adotando os coeficientes de interface implementados na segunda aplicação;
- e) Adotar outros modelos constitutivos para o pacote granular e realizar um estudo comparativo;
- f) Comparar a modelagem axissimétrica com a modelagem 3D do segundo proposto.

ABORISADE, O. M. **Practical approach to effective sand prediction, control and management**. 94 p. Dissertação de Mestrado. African University of Science and Technology. Abuja, Nigeria, 2011.

ABSATDAROV, R. **Report: Sand Control in Wells of underground gas storage**. SPE International Oil and Gas Horizons. Moscow, 2014.

AHAD, N. A. et al. **A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs**. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, v.10, p. 1675-1688, 2020.

ALI, S. et al. **High-Productivity Horizontal Gravel Packs**. Oilfield Review, v. 13, n. 2, p. 52-73, 2001.

ALLEN, T. O.; ROBERTS, A. P. **Production Operations: Well Completions, Workover, and Stimulation**. 3ª Edição. Oklahoma: Editora Oil & Gas Consultants International, 1989.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API BULL 5C3: Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe Properties**. 6ª Edição, 1994.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 58: Recommended Practices for Testing Sand Used in Gravel Packing Operations**. 2ª Edição, 1995.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 5CT: Specification for Casing and Tubing**. 10ª Edição, 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STD 19C: Measurement of and Specifications for Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations**. 2ª Edição, 2018.

BELLARBY, J. **Well Completion Design**. 1ª Edição. Oxford: Editora Elsevier, 2009.

BRECHAN, B. et al. **Collapse prediction of pipe subject to combined loads**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.191, 2020.

BURTON, R. C. et al. **Multi-Zone Cased Hole Frac-Pack and Intelligent Well Systems Improve Recovery in Subsea Gas Fields**. Texas: SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio - SPE 187075, 2017.

BYRNE, M. et al. **Improved Selection Criteria for Sand Control – When Are “Fines” Fines?**. Louisiana: SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control held in Lafayette - SPE 128038, 2010.

CAMPOS, V. P. P. et al. **Hydraulic fracturing proppants (Propantes para fraturamento hidráulico)**. Cerâmica, v. 64, n. 370, p. 219-229, 2018.

CARDENAS, J. L.; TWYNAM, A. **Practical Approaches to Sand Management**. Oilfield Review, 2004.

CHAVEZ, R. R. L. **Ensaio em Célula Cúbica de Grandes Dimensões para Estudo de Medidas de Contenção de Sólidos em Poços de Petróleo**. 111 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

CHEN, X. et al. **Investigating the Combined Effects of Inherent and Stress-Induced Anisotropy on the Mechanical Behavior of Granular Materials Using Three-Dimensional Discrete Element Method**. Mathematical Problems in Engineering, 2020.

CIVAN, F. **Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation**. 3ª Edição. Oxford: Editora Elsevier, 2007.

COBERLY, C. J. **Selection of Screen Openings for Unconsolidated Sands**. American Petroleum Institute, v. January, p. 189-201, 1937.

COFFIN M.; ODDIE, K. **Compliant screen raises the bar for successful, cost-efficient sand control**. World Oil Magazine, v. July, p. 45-47, 2018.

CORDERO, J. A. R. **Reativação de falhas geológicas com modelos numéricos discretos e distribuído**. 137 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

CUDNY, M.; STASZEWSKA, K. **A hyperelastic model for soils with stress-induced and inherent anisotropy**. Acta Geotechnica, v.16, p. 1983-2001, 2021.

DIANA FEA. **What is a guideline for the normal and tangential stiffness of interface elements?**. Disponível em: <<https://dianafea.com/faq-tangent-normal-stiffness>>. DIANA Finite Element Analysis, Delft, Holanda, 2022.

DUSSEAUULT, M. B. et al. **Casing Shear: Causes, Cases, Cures**. Beijing: SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition - SPE 48864, 1998.



FARIAS, R. et al. **Lessons Learned in Open Hole Horizontal Gravel Packs Deepwater Brazil**. Deep Offshore Technology International Conference & Exhibition. Espírito Santo, Brasil, 2005.

FINK, J. **Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids**. 3ª Edição. Cambridge: Editora Elsevier, 2021.

FISHER, Q. et al. **Potential impact of faults on CO2 injection into saline aquifers & Geomechanical concerns of CO2 injection into depleted oil reservoirs**. School of Earth and Environment. Reino Unido, 2014.

FJAER, E. et al. **Petroleum Related Rock Mechanics**. 2ª Edição. Amsterdam: Editora Elsevier, 2008.

FUH, G. et al. **Modeling Analysis of Snad-Screen Collapse Resistance Under Geotectonic Load**. Lousiana: SPE Annual Technical Conference and Exhibition – SPE 124388, 2009.

GALLOWAY, W. E. **Gulf of Mexico**. Disponível em: <<https://www.geoexpro.com/articles/2009/03/gulf-of-mexico>>. GEO ExPro Magazine, v. 6, n. 3, 2009.

GEILIKMAN, M. B. et al. **Sand Production as a Viscoplastic Granular Flow**. Louisiana: SPE International Symposium on Formation Damage Control - SPE 27343, 1994.

GILLESPIE, G. et al. **Screen Selection for Sand Control Based on Laboratory Tests**. Australia: SPE International Symposium on Formation Damage Control - SPE 64398, 2000.

GUO, B. et al. **Petroleum Production Engineering**. 2ª Edição. Oxford: Editora Elsevier, 2017.

HAMID, S.; ALI, S. A. **Causes of Sand Control Screen Failures and Their Remedies**. Netherlands: SPE European Formation Damage Conference - SPE 38190, 1997.

HEBEI SHENGKAI METAL MESH CO. **Reliable Slotted Liner for Better SAGD Horizontal Completion Well**. Disponível em: <<https://www.wellscreen.org/well-screen/slotted-liner.html>>. Hebei Shengkai Metal Mesh Cooperation Ltda, China, 2021.

HEIDARIAN, M. et al. **Effect of Mechanical and Geometrical Properties of Cement on Wellbore Stability Using 3-D Analysis**. Walailak Journal of Science and Technology, v.12, n.8, 2015.

HICHER, P.; CHANG, C. S. **Anisotropic Nonlinear Elastic Model for Particulate Materials**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, v.132, p. 1052-1061, 2006.

HILBERT, L. B. et al. **Modeling Horizontal-Completion Deformations in a Deepwater Unconsolidated-Sand Reservoir**. Louisiana: SPE Annual Technical Conference and Exhibition – SPE 124350, 2011.

HOQUE, E.; TATSUOKA, F. **Anisotropy in elastic deformation of granular materials**. Soils and Foundations, v.38, n.1, p. 163-179, 1998.

HUANG, W. et al. **A study of tubular string buckling in vertical wells**. International Journal of Mechanical Sciences, v.118, p. 231-253, 2016.

ICHIM, A. et al. **Estimation of Cement Thermal Properties through the Three-Phase Model with Application to Geothermal Wells**. Energies, v.11, n.10, 2018.

IKPORO, B.; SYLVESTER, O. **Effect of Sand invasion on Oil Well Production: A Case study of Garon Field in the Niger Delta**. The International Journal of Engineering and Science, v. 4, n. 1, p. 64-72, 2015.

IRAMINA, W. S. **Aula 1 - Introdução à Engenharia de Perfuração: Objetivos e escopo da disciplina**. Notas de Aula, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2016.

JEREZ, N. A. **A New Production Casing Design to Withstand Installation Compression Loading and High Multi-Stage Hydraulic Fracturing Pressure in Montney Shale Horizontal Wells**. 141 p. Monografia. University of Calgary. Alberta, Canadá, 2015.

JIMÉNEZ, K. B. **Análise Estrutural de tubos furados para poços de petróleo sob ação de pressão externa**. 114 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

JUNIOR, L. C. S. **Análise geomecânica da injeção de fluidos em subsuperfície**. 111 p. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil, 2018.

KARLINASARI, R.; RACHMADAN, R. **Analysis of lateral deformation of mini pile around the vacuum consolidation area**. Bali: Proceeding of PILE, 2017.

LI, Y. et al. **Mechanism of casing failure during hydraulic fracturing Lessons: learned from a tight-oil reservoir in China**. Engineering Failure Analysis, v. 98, p. 58-71, 2019.

LIU, Z. et al. **Casing Integrity: Strain-Based Fatigue Life Estimulation Coupled with Numerical Thermal-Flow Simulation and Multistring Stress**

**Analysis.** Canada: SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium held in Banff - SPE 178448, 2015.

MAHMUD, H. B. et al. **Sand production: A smart control framework for risk mitigation.** Petroleum, 2019.

MATANOVIC, D. et al. **Sand Control in Well Construction and Operation.** 1ª Edição. Nova Iorque: Editora Springer, 2012.

MCLEROY, P. G.; CAUDLE, B. H. **Petroleum Production.** Encyclopaedia Britannica Inc, 2021.

MENDES, C. A. T et al. **The GeMa Framework – An Innovative Framework for the Development of Multiphysics and Multiscale Simulations.** Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016). Athens: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil Engineering National Technical University of Athens (NTUA) Greece, 2016.

MIDAS. **GTS NX User Manual.** MIDAS Family Program, 2019.

MICHELL, R. F. **Petroleum Engineering Handbook: Drilling Engineering.** Volume II. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006.

MOHAMMED, A. I. et al. **Casing Structural Integrity and Failure Modes in Range of Well Types – A Review.** Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019.

MORENO, B. et al. **Critical Data Needs for Design of Frac-Pack Completions in Today's Oilfield Environment.** Escócia: SPE Offshore Europe Oil & Exhibition - SPE 124389, 2009.

MORITA, N. et al. **Parametric Study of Sand-Production Prediction: Analytical Approach.** SPE Production Engineering, 1989.

MORITA, N.; BOYD, P. A. **Typical Sand Production Problems: Case Studies and Strategies for Sand Control.** Dallas: 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (SPE), 1991.

OBRZUD, R. F.; TRUTY, A. **The hardening soil model – a practical guidebook.** 1ª Edição. Switzerland: Editora Zace Services Ltd Software Engineering, 2018.

OCANDO, A. **Geomechanics, the Nemesis of the NPT.** Disponível em: <<https://oilmanmagazine.com/article/geomechanics-the-nemesis-of-the-npt/>>. Oil Magazine, Texas, 2020.

ODA, M. **Inherent and induced anisotropy in plasticity theory of granular soils.** Mechanics of Materials, v.16, p. 35-45, 1993.

POCZA, J.; RAMNATH, L. **An Uncommon Approach To Offshore Interventions**. Disponível em: <<https://www.hartenergy.com/ep/exclusives/uncommon-approach-offshore-interventions-177084>>. Hart Energy, 2018.

RACKLEY, S. A. **Carbon Capture and Storage**. 1ª Edição. Oxford: Editora Elsevier, 2010.

RAGHAVENDRA, H. N. et al. **Simulation of Erosion Wear in Choke Valves using CFD**. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 3, n. 7, 2014.

RAHMAN, S. S.; CHILINGARIAN, G. V. **Casing Design Theory and Practice**. 1ª Edição. Amsterdam: Editora Elsevier, 1995.

RECHARD, R. P., SCHULER, K. W. **Euler Buckling of Geothermal Well Casing**. Sandia National Laboratories – SAND 82-0863, 1983.

RENPU, W. **Advanced Well Completion Engineering**. 3ª Edição. Oxford: Editora Elsevier, 2011.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projeto de Poços de Petróleo: Geopressões e Assentamento de Colunas de Revestimentos**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2009.

SANTOS, A. P. et al. **Collapse Analysis of Screens Used in Horizontal Open Hole Gravel Pack Completion**. Louisiana: SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control – SPE 112506, 2008.

SCHUTJENS, P. M. T. M. et al. **Compaction- and Shear-Induced Well Deformation in Tyra: Geomechanics for Impact on Production**. Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 52, p. 5205-5224, 2019.

SETTARI, A. **Reservoir Compaction**. Society of Petroleum Engineers – SPE 76805, 2002.

SILVA, A. H. C.; CALMETO, J. C. N. **Noções de Perfuração e Completação**. Apostila de Curso Eletrônico Petrobras, 2013.

SILVA, P. C. G. **Modelo ortotrópico em elementos finitos para análise não linear física de problemas bidimensionais**. 89 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Brasil, 2008.

STEWART, M. **Surface Production Operations: Facility Piping and Pipeline Systems**. Volume III. Virginia: Editora Elsevier, 2016.

SUBBIAH, S. K. et al. **Root cause of sand production and methodologies for prediction**. Petroleum, 2020.

TAHERI, S. R.; PAK, A. **Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes**. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 2ª Edição. Nova Iorque: Editora McGraw-Hill Book Company, 1951.

TJIOE, M. et al. **Compaction-Induced Sand Control Failure in the Deepwater Gulf of Mexico**. New York: 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium of American Rock Mechanics Association, 2019.

TOTAL ENERGIES. **Tyra Gas Field Starts its Redevelopment**. Disponível em: <<https://ep.totalenergies.com/en/projects/projects-management/tyra-gas-field-starts-its-redevelopment>>. Total Energies, Paris, 2021.

VARGAS, E. A. et al. **Numerical Analysis of Experiments in Sand Control Measures Using Stand Alone and Open Hole Gravel Pack Completion**. Chicago: 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium of American Rock Mechanics Association, 2012.

VEEKEN, C. A. M. et al. **Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach**. Dallas: 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers (SPE), 1991.

VILLARROEL, F. M. G. **Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo**. 123 p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

VITHALKAR, A. **Investigation of interface modelling techniques using finite element analysis with ATENA**. 112 p. Dissertação de Mestrado. Delft University of Technology. Delft, Holanda, 2019.

WATSON, K.; JONES, C. **FEA Modelling of Expandable Sand Screens Interactions with Rock Formations**. Weatherford International, 2009.

WALTMAN, B. et al. **Technologies or Intangibles: What Drives Sand-Control Selection?**. Offshore Technology Conference, 2010.

XU, E. et al. **Numerical Analysis of Wellbore Behaviour during Methane Gas Recovery from Hydrate Bearing**. Texas: Offshore Technology Conference - OTC 25208 MS, 2014.

YAN, C. et al. **Critical Drawdown Pressure of Depleted Reservoir**. Indian Geotechnical Journal, 2013.

ZHANG, B. et al. **Trapped annular pressure caused by thermal expansion in oil and gas wells:** A review of prediction approaches, risk assessment and mitigation strategies. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.172, p. 70-82, 2019.

ZHANG, P. et al. **Research on Shear Behavior of Sand-Structure Interface Based on Monotonic and Cyclic Testes.** Applied Sciences, v.11, n. 24, 2021.

ZHAO, C. et al. **The Casing Deformation During Shale Gas Hydraulic Fracturing: Why it is so Serious in Weiyuan-Changning, China?.** Trinidad and Tobago: SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference held in Port of Spain - SPE 191273, 2018.

ZHONG R. B. **Sand Production Analysis for Depleted Reservoir.** Advances in Petroleum Exploration and Development, v. 7, n. 1, p. 57-61, 2014.

ZHU, D.; FURUI, K. **Modern Completion Technology for Oil and Gas Wells.** 1ª Edição. Nova Iorque: Editora McGraw-Hill Education, 2013.

ZOBACK, M. **Reservoir Geomechanics.** 1ª Edição. Cambridge: Editora Cambridge University Press, 2007.