

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

NATHAN ABDON DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE REVESTIMENTO DE POÇO VERTICAL
TÍPICO USANDO PLANILHAS ELETRÔNICAS E SOFTWARE
ESPECIALISTA**

MACEIÓ/AL
2021

NATHAN ABDON DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE REVESTIMENTO DE POÇO
VERTICAL TÍPICO USANDO PLANILHAS
ELETRÔNICAS E SOFTWARE ESPECIALISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado aos professores do curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Engenheira de Petróleo.

Orientador: Prof. Me. Lucas Pereira de Gouveia

Coorientador: João Paulo Nogueira de Araújo

MACEIÓ/AL
2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Livia Silva dos Santos – CRB-4 – 1670

S237d Santos, Nathan Abdon dos.

Dimensionamento de revestimento de poço vertical típico usando planilhas eletrônicas e software especialista / Nathan Abdon dos Santos. – 2021.
96 f.:il.

Orientador: Lucas Pereira de Gouveia.

Coorientador: João Paulo Nogueira de Araújo.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021

Bibliografia: f. 95-96

1. Web Score – Planilha eletrônica. 2. Poço de petróleo. 3. Resistência de tubos.
I. Título.

CDU: 665.6

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele não seria possível superar todos os obstáculos que perpassaram o caminho.

Aos meus pais que nunca mediram esforços para que eu tivesse uma educação de qualidade. Obrigado pelo amor, carinho, paciência, conselhos e incentivos. Devo minha vida a vocês e tudo que faço é para orgulha-los.

À minha irmã pelo companheirismo.

Ao meu sobrinho Arthur, por me ensinar que não existe tamanho pro amor.

À minha vó, que não tenho palavras pra descrever como foi importante pra toda a minha vida e educação.

À Jennifer por me ensinar o que é companheirismo, paciência, amor e dedicação.

À todos os meus amigos(as) que me acompanham desde a infância e vibraram com cada etapa conquistada.

À todos os meus amigos, que tornaram esta caminhada mais fácil. Morgana França, Igor Mala-faia, Guilherme Costa, Joyce Tenório, Raíza Alchaar, Raniel Albuquerque e Adelaide Silmara, obrigado pela amizade e companheirismo durante todos esses anos de graduação.

Ao Professor Lucas Gouveia e ao pesquisador João Paulo de Araújo, pela paciência, ensinamentos e orientações.

Ao LCCV por ceder o acesso ao SCORE para realização deste trabalho.

Por fim, obrigado a todos que acreditaram em mim.

“Para tudo há uma ocasião certa; há um tempo certo para cada propósito debaixo do céu.”

ECLESIASTES 3.1

RESUMO

Um projeto de revestimento é composto pelo dimensionamento dos tubos e conexões que integram a coluna. Este projeto passa por diversas fases e requer dados referentes às formações onde o poço será construído. Alguns desses dados são os gradientes de pressão de fratura e poros que são essenciais para construção da janela operacional, no qual é possível determinar características do fluido de perfuração e o número de fases ao qual o poço estará sujeito. Dispondo de um catálogo de tubos disponíveis, o projetista deve calcular as resistências a pressão interna e externa e o esforço axial assim como investigar os possíveis cenários que levem aquele revestimento à falha. A finalização do projeto para atestar a infalibilidade do revestimento se dá através da verificação dos fatores de segurança. Executar estes cálculos sem uma ferramenta computacional demanda tempo e atenção, tempo este que se torna escasso na indústria. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de dimensionar os revestimentos de um poço exemplo encontrado na literatura, calculando suas resistências, esforços e carregamentos através de planilhas eletrônicas, que é um tipo de ferramenta computacional ainda muito utilizada por engenheiros, e utilizando um *software* especialista que auxilia no processo de dimensionamento. A aplicação *web* SCORE, desenvolvida pela parceria UFAL/LCCV e CENPES/Petrobras, vêm para otimizar este tempo, fazendo de forma confiável e precisa os cálculos necessários para o dimensionamento, facilitando a experiência de elaboração do projeto pelo engenheiro. Neste trabalho foi realizado o dimensionamento dos revestimentos por meio de planilhas eletrônicas e do SCORE, de modo a comparar e verificar o erro associado. O erro relativo percentual foi considerado ínfimo, não chegando em nenhum dos casos estudados a 0,5%, desse modo, gerando resultados confiáveis e de forma eficiente.

Palavras-chaves: PROJETO DE POÇO; PETRÓLEO; SCORE; RESISTÊNCIA DE TUBOS.

ABSTRACT

A casing design consists in the sizing of the pipes and connections that compose the tubular string. This design goes through several phases and requires data regarding the formations where the well will be built. Some of this data is the fracture and pore pressure gradient that are essential for the construction of the operational window, in which it is possible to determine the characteristics of the drilling fluid and the number of phases to which the well will be subjected. With a catalog of available pipes, the designer must calculate the internal and external pressure and axial load resistance, as well as investigate the possible scenarios that may lead the casing to failure. The design for the infallibility of the casing is completed by checking the safety factors. Executing these calculations without a computational tool takes time and attention, time that becomes scarce in the industry. This work was performed in order to design the casing string of an example well found in the literature, calculating its resistances, internal forces and loads with electronic spreadsheets, which is a type of computational tool which is still widely used by engineers, and using an expert software that assists in the design process. The application *web* Score, developed by the partnership UFAL/LCCV and CENPES/Petrobras, has come to optimize this time, doing in a reliable and precise way the necessary calculations for the dimensioning, facilitating the experience of the project elaboration by the engineer. In this work, the dimensioning of the casings was performed using electronic spreadsheets and the SCORE application, in order to compare and verify the associated error. The relative percentage error was considered minimal, not reaching 0.5% in any of the cases studied, thus generating reliable and efficient results.

Keywords: WELL PROJECT; OIL; SCORE; TUBE STRENGHT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Revestimento.	19
Figura 2 – Assentamento das sapatas baseado na janela operacional.	21
Figura 3 – Pressão interna em um tubo	22
Figura 4 – Fronteiras entre os limites de resistência ao colapso	23
Figura 5 – Força Axial - Tração e Compressão	30
Figura 6 – Perfil de pressão externa para cenário onde o topo do cimento está abaixo do revestimento anterior.	34
Figura 7 – Perfil de pressão externa para cenário onde o topo do cimento está acima do revestimento anterior.	35
Figura 8 – Metodologia de projeto de poço	46
Figura 9 – Fluxo usual de projeto de revestimento	47
Figura 10 – Curva de Pressões - Janela Operacional	49
Figura 11 – Perfil de pressão para o cenário de teste de pressão	51
Figura 12 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de furo na coluna de produção	52
Figura 13 – Perfil de pressão externa para o cenário de poço cheio de fluido.	53
Figura 14 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de cimentação	54
Figura 15 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de perda de circulação	55
Figura 16 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de esvaziamento parcial	56
Figura 17 – Força Axial Para Cenários de Burst - Revestimento de Produção	60
Figura 18 – Força Axial Para Cenários de Colapso - Revestimento de Produção	61
Figura 19 – Fatores de segurança para cenários de <i>burst</i> do revestimento de produção	63
Figura 20 – Fatores de segurança para cenários de colapso do revestimento de produção	63
Figura 21 – Fatores de segurança axial para o revestimento de produção	64
Figura 22 – Fatores de segurança para critério triaxial do revestimento de produção	64
Figura 23 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Poço Com Fluido e Teste de Pressão	66
Figura 24 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Perda de Circulação	68
Figura 25 – Força Axial para Cenários de Burst - Revestimento de Superfície	69
Figura 26 – Força Axial para Cenários de Colapso - Revestimento de Superfície	70
Figura 27 – Fatores de Segurança de <i>Burst</i> para revestimento de superfície	71
Figura 28 – Fatores de Segurança de Colapso para revestimento de superfície	72
Figura 29 – Fatores de Segurança Axial para revestimento de superfície	72
Figura 30 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises	73

Figura 31 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Poço Com Fluido da Formação e Teste de Pressão	75
Figura 32 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Perda de Circulação	77
Figura 33 – Força Axial para Cenários de Burst - Revestimento Intermediário	78
Figura 34 – Força Axial para Cenários de Colapso - Revestimento Intermediário	79
Figura 35 – Fatores de Segurança de <i>burst</i> para revestimento intermediário	80
Figura 36 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento intermediário	81
Figura 37 – Fatores de Segurança Axial para revestimento intermediário	81
Figura 38 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises	82
Figura 39 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Furo na Coluna e Teste de Pressão	84
Figura 40 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Esvaziamento Parcial	86
Figura 41 – Força Axial para Cenários de Burst - <i>Liner</i> de Produção	87
Figura 42 – Força Axial para Cenários de Colapso - <i>Liner</i> de Produção	88
Figura 43 – Fatores de Segurança de <i>burst</i> para revestimento Liner	89
Figura 44 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento Liner	90
Figura 45 – Fatores de Segurança Axial para revestimento Liner	90
Figura 46 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Profundidades e diâmetros usuais para poços onshore e offshore	20
Tabela 2 – Intervalo para pressão de colapso por escoamento	24
Tabela 3 – Intervalo para pressão de colapso plástico	26
Tabela 4 – Intervalo para pressão de colapso de transição	27
Tabela 5 – Intervalo para pressão de colapso elástico	28
Tabela 6 – Constantes Empíricas de acordo com as unidades USC	29
Tabela 7 – Cenários de carregamentos de Serviço e Sobrevivência	33
Tabela 8 – Intervalos tipicamente usados	45
Tabela 9 – Dados de entrada	48
Tabela 10 – Dados de Cimentação	49
Tabela 11 – Dados complementares	50
Tabela 12 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de teste de pressão	51
Tabela 13 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de furo na coluna de produção	52
Tabela 14 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de poço com fluido	53
Tabela 15 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de cimentação	54
Tabela 16 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de perda de circulação	55
Tabela 17 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de esvaziamento parcial	56
Tabela 18 – Forças axiais para o perfil de cimentação	57
Tabela 19 – Forças axiais para o perfil de perda de circulação	58
Tabela 20 – Forças axiais para o perfil de esvaziamento parcial	58
Tabela 21 – Forças axiais para o perfil de teste de pressão	58
Tabela 22 – Forças axiais para o perfil de furo na coluna de produção	59
Tabela 23 – Forças axiais para o perfil de poço com fluido da formação	59
Tabela 24 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento produtor	62
Tabela 25 – Fatores de Segurança de <i>burst</i> para revestimento produtor	62
Tabela 26 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para revestimento de superfície	65
Tabela 27 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para cenários de colapso de revestimento de superfície	67
Tabela 28 – Fatores de segurança para o revestimento de superfície	71

Tabela 29 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para revestimento intermediário	74
Tabela 30 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para cenários de colapso do revestimento intermediário	76
Tabela 31 – Fatores de Segurança para o revestimento intermediário	80
Tabela 32 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para <i>liner</i> de produção .	83
Tabela 33 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para <i>liner</i> de produção .	85
Tabela 34 – Fatores de Segurança para o revestimento <i>liner</i> de produção	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BF	Fator de flutuação
BOP	<i>Blowout Preventer</i> - Preventor de erupção
CSB	Conjunto Solidário de Barreiras
DF	Fator de Projeto
FS	Fator de Segurança
ID	Diâmetro Interno
LDA	Lâmina d'água
LOT	<i>Leakoff Test</i> - Teste de Absorção
OCTG	<i>Oil Country Tubular Goods</i>
OD	Diâmetro Externo
SCORE	Sistema de Confiabilidade de Revestimentos
SF	Fator de Segurança
TOC	Topo do cimento
TVD	<i>True Vertical Depth</i> - Profundidade vertical
WAG	<i>Water Alternated Gas</i> - Injeção alternada de água e gás
WOC	<i>Wait On Cement</i> - Tempo de pega do cimento

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Constante empírica para colapso API
A_i	Área interna do tubo
A_o	Área externa do tubo
A_p	Área da seção transversal do tubo
B_c	Constante empírica para colapso API
C_c	Constante empírica para colapso API
D	Diâmetro externo do tubo
E	Módulo de Young
F_a	Força axial
F_{bal}	Força axial devido ao efeito balão
F_c	Constante empírica para colapso API
F_j	Peso próprio no ponto de análise
F_p	Força peso
F_{psap}	Peso próprio na sapata
F_{ptopo}	Peso próprio no topo
f_{yax}	Força de tensão equivalente na presença de força axial
f_{ymn}	Tensão mínima do escoamento do aço
G_c	Constante empírica para colapso API
G_f	Gradiente do fluido de menor peso ao longo da vida produtiva do poço
G_{finfl}	Gradiente de pressão fluido da formação
G_{gas}	Gradiente da pressão hidrostática do gás
G_{HC}	Gradiente do hidrocarboneto produzido
G_{pi}	Gradiente de pressão do fluido dentro do revestimento
G_{po}	Gradiente de pressão do fluido no anular

K_{wall}	Fator de tolerância admissível para imprecisões durante a fabricação do tubo
L	Profundidade total do trecho livre
P	Pressão prevista na profundidade do influxo
P_c	Pressão de colapso (calculada nas equações)
P_{cabot}	Pressão na cabeça, em um evento de <i>tubing leak</i>
p_{ci}	Pressão de colapso na presença de pressão interna
P_a	Pressão externa
P_E	Pressão para colapso elástico
P_i	Pressão interna
P_{int}	Pressão interna na interface entre o fluido invasor e o da fase
P_j	Profundidade no ponto de análise
P_P	Pressão para colapso plástico
P_{pos}	Pressão no ponto posterior ao analisado.
P_{sap}	Pressão na sapata
$P_{sapin,fl}$	Pressão na sapata devido ao influxo
P_T	Pressão para colapso de transição
P_{teste}	Pressão de teste para garantir um LOT
P_{topo}	Profundidade no topo
P_{YP}	Pressão de colapso por escoamento
R	Resistência que o tubo estará sujeito
R_b	Resistência a pressão interna
R_t	Resistência a tração
S	Solicitação que o tubo estará sujeito
t	Espessura da parede do tubo
T	Temperatura do reservatório
t_{min}	Espessura mínima da parede do tubo

TVD	Profundidade vertical
TVD_{can}	Profundidade vertical dos canhoneados
TVD_{esv}	Profundidade vertical do esvaziamento
TVD_i	Profundidade vertical no ponto analisado.
TVD_{inf}	Profundidade vertical da interface entre o fluido invasor e o da fase
TVD_{infl}	Profundidade vertical do influxo
TVD_i	Profundidade vertical no ponto posterior ao analisado
TVD_p	Profundidade vertical do fluido devido a perda
TVD_{pck}	Profundidade vertical do <i>packer</i>
TVD_{sapata}	Profundidade vertical da sapata
TVD_{susp}	Profundidade vertical do suspensor
TVD_{TOC}	Profundidade vertical do topo do cimento
TVD_{zp}	Profundidade vertical da zona de ocorrência do evento
W	Peso linear do tubo
Y_p	Tensão mínima de escoamento do aço
z	Profundidade da cota
γ_m	Peso específico do fluido de perfuração
γ_s	Peso específico do aço
σ_a	Tensão axial
σ_e	Tensão equivalente
σ_r	Tensão radial
σ_t	Tensão tangencial
$\rho_{cimento}$	Massa específica da pasta de cimento
ρ_{des}	Massa específica do fluido de deslocamento
ρ_{fluido}	Gradiente do fluido presente no revestimento
ρ_{fm}	Massa específica do fluido de perfuração mais pesado da fase

$\rho_{fratura}$	Gradiente de fratura na sapata do revestimento
ρ_{fs}	Massa específica do fluido de perfuração da fase seguinte
ρ_{infl}	Gradiente de pressão na área do influxo
ρ_{margem}	Gradiente adicional ao gradiente de fratura
ρ_p	Gradiente de pressão de poros mínima da fase.
ρ_{pf}	Massa específica do <i>packer fluid</i>
ρ_{zp}	Gradiente de pressão de poros da zona de perda
ρ_{zpr}	Gradiente de pressão de poros da zona produtora
ν	Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Comentários Iniciais	17
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.2.3	Delimitação do Trabalho	18
1.3	Justificativa	18
2	RESISTÊNCIAS DE TUBOS	19
2.1	Pressão Interna (<i>Burst</i>)	22
2.2	Pressão Externa (Colapso)	23
2.2.1	Pressão de Colapso por Escoamento	23
2.2.2	Pressão de Colapso Plástico	24
2.2.3	Pressão de Colapso de Transição	26
2.2.4	Pressão de Colapso Elástico	27
2.3	Pressão de Colapso Corrigida (Força Axial e Pressão Interna)	29
2.4	Resistência à Força Axial	30
2.5	Triaxial - Critério de von Mises	30
3	CENÁRIOS DE CARREGAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO RE-VESTIMENTO	32
3.1	Cenários de Carregamento	34
3.1.1	Cenários de <i>Burst</i>	34
3.1.1.1	Teste de Pressão	35
3.1.1.2	Poço cheio de fluido da formação	36
3.1.1.3	Poço revestido preenchido com 70% de fluido da formação e 30% de fluido de perfuração	37
3.1.1.4	Furo na coluna de produção - <i>Tubing Leak</i>	38
3.1.2	Cenários de Colapso	38
3.1.2.1	Cimentação	39
3.1.2.2	Perda de Circulação	39
3.1.2.3	Esvaziamento Total - <i>Full Evacuation</i>	40
3.1.2.4	Esvaziamento Parcial	41
3.1.2.5	Esvaziamento Total Abaixo do <i>Packer</i>	42
3.2	Força Axial	42
3.2.1	Peso Próprio	43

3.2.2	Efeito Pistão	43
3.2.3	Efeito Balão	43
3.3	Fatores de Segurança	44
3.4	Metodologia de projeto de poço	45
3.5	Fluxo Usual de Projeto	46
4	APLICAÇÃO	48
4.1	DETALHAMENTO DO CASO	48
4.2	Dimensionamento do revestimento de produção	50
4.2.1	Cenários de <i>burst</i>	50
4.2.1.1	Teste de Pressão	50
4.2.1.2	Furo na Coluna de Produção	51
4.2.1.3	Poço Cheio de Fluido da Formação	52
4.2.2	Cenários de colapso	53
4.2.2.1	Cimentação	53
4.2.2.2	Perda de Circulação	54
4.2.2.3	Esvaziamento Parcial	55
4.2.3	Força Axial	56
4.2.4	Cálculo dos Fatores de Segurança	61
4.3	Dimensionamento das demais fases	65
4.3.1	Revestimento de Superfície	65
4.3.1.1	Cenários de <i>Burst</i>	65
4.3.1.2	Cenários de Colapso	66
4.3.1.3	Força Axial	68
4.3.1.4	Fatores de Segurança	70
4.3.2	Revestimento Intermediário	73
4.3.2.1	Cenários de <i>Burst</i>	73
4.3.2.2	Cenários de Colapso	75
4.3.2.3	Força Axial	77
4.3.2.4	Fatores de Segurança	79
4.3.3	<i>Liner</i> de Produção	82
4.3.3.1	Cenários de <i>Burst</i>	82
4.3.3.2	Cenários de Colapso	84
4.3.3.3	Força Axial	86
4.3.3.4	Fatores de Segurança	88
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

A grande demanda de energia no mundo tem contribuído para a expansão da produção de petróleo em terra e no mar, ou seja *onshore* e *offshore*, respectivamente. Esse cenário tornou o investimento no setor petrolífero mais amplo, ocasionando assim uma expansão no mercado que recebe fortes investimentos. Para que ocorra produção de petróleo deve-se perfurar um poço e anteriormente a este fato, deve existir um projeto que englobe todas as etapas que estão desde o estudo geológico do campo e reservatório passando pela fase de produção até o abandono do poço.

Um projeto de revestimento de poço compõe-se do dimensionamento dos tubos e conexões que integram a coluna, onde são classificados de acordo com suas propriedades geométricas e pelo grau do aço (GOUVEIA, 2014). Em um projeto o custo do revestimento varia em torno de 15% a 20% para ambientes *offshore* e pode custar até 50% do custo total do projeto para poços *onshore* (ROCHA; AZEVEDO, 2009), dessa forma é indispensável o correto dimensionamento para evitar a inviabilidade do projeto.

Para dimensionar os revestimentos são necessários cálculos de resistências e solicitações às quais o revestimento estará sujeito. A aplicação *web SCORE*, Sistema de Confiabilidade de Revestimento, desenvolvida em parceria entre a UFAL/LCCV e CENPES/Petrobras, apresenta a possibilidade de otimizar o tempo no cálculo gerando resultados confiáveis e de maneira interativa com o usuário, sendo possível dimensionar tubos e conexões, em conformidade com as normas técnicas da operadora.

Vale ressaltar que a Agência Nacional do Petróleo (ANP), traz por meio da Resolução Nº 43/2007, o regime de segurança operacional, onde fica determinado que o operador deve possuir um sistema de gestão de segurança operacional, de tal modo que seja possível verificar os elementos críticos de segurança operacional. Enquanto, na Resolução Nº 46/2016, é aprovado o Regime de Segurança Operacional de Poços de Petróleo e Gás Natural, que dispõe e guia sobre a segurança operacional que deve ser seguida para salvaguardar a vida humana e o meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo detalhar e elaborar o dimensionamento de tubos de revestimento para um poço de petróleo vertical, em ambiente *onshore* utilizando planilhas eletrônicas e a aplicação *web SCORE*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica sobre cálculo de resistências e carregamentos de tubos de revestimento.
- Estudar e avaliar os tipos de carregamentos atuantes em cada cenário estudado.
- Estudar metodologia para seleção dos revestimentos do poço.
- Realizar o estudo comparativo entre os resultados obtidos da aplicação *web SCORE* e a planilha implementada.

1.2.3 Delimitação do Trabalho

O projeto de revestimento proposto no presente trabalho possui as seguintes simplificações:

- Não são consideradas variações de temperatura.
- Os tubos utilizados são somente tubos de acordo com a *American Petroleum Institute* (API).
- Possíveis *drilling hazards* são desprezados, ou seja, zonas com perdas de circulação, H_2S ou CO_2 .
- O poço considerado é vertical.

1.3 JUSTIFICATIVA

O atual trabalho visa o desenvolvimento de um projeto de revestimento de poço através do estudo e da avaliação dos tipos de carregamento que atuam em um poço vertical típico.

Esse estudo perpassa pela obtenção das pressões internas e externas, assim como, das forças axiais que um tubo estará sujeito durante sua vida produtiva. Salientando que os tubos devem passar pelo controle de segurança previamente estabelecido conhecido como fatores de segurança.

Portanto, o estudo das etapas para obtenção dos carregamentos é de fundamental importância em um projeto de poço, pois, não é possível haver produção ou injeção de fluidos sem o estudo dos revestimentos que serão empregados para obter o fim ao qual se destina o poço.

2 RESISTÊNCIAS DE TUBOS

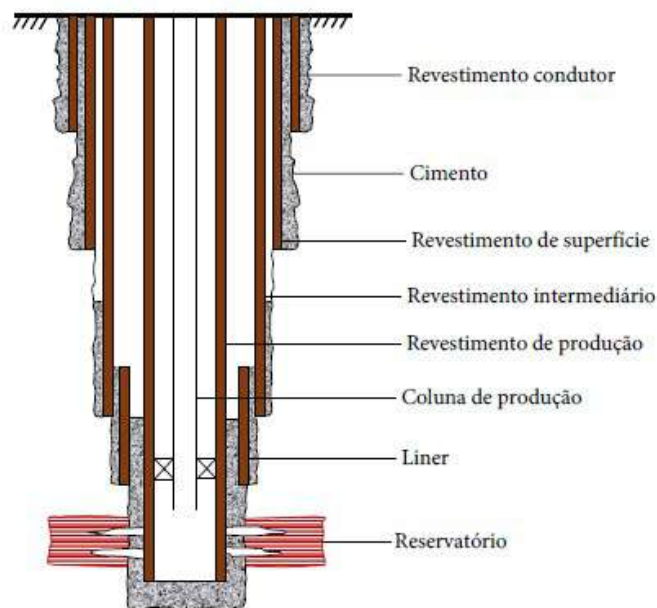
Antes da perfuração de um poço é necessário a realização de estudos geofísicos, geológicos e de engenharia. Após estes serem concluídos é então iniciada a fase de perfuração do poço. Ao atingir a fase de perfuração, são necessários equipamentos específicos para atingir o objetivo, de acordo com Thomas (2004) são eles: sonda, colunas de perfuração, brocas e fluidos de perfuração.

As classificações e funções dos revestimentos de um poço variam conforme a profundidade. De acordo com Rocha e Azevedo (2009) o revestimento condutor tem como objetivo isolar o poço das zonas superficiais pouco consolidadas, enquanto o revestimento de superfície além de isolar o poço deve suportar o peso do BOP e das outras colunas de revestimento subsequentes. O revestimento intermediário tem como propósito proteger zonas de alta e baixa pressão, zonas de perda de circulação e zonas desmoronáveis. O revestimento de produção tem o intuito de conter a coluna de produção e isolar os intervalos produtores.

Thomas (2004) diz que o *liner* é uma coluna pequena de revestimento que protege apenas a parte inferior do poço, sendo ancorada um pouco acima do final do revestimento anterior, dessa maneira o *liner* cobre apenas o poço aberto. O *tie-back* é um complemento do *liner* até a superfície de forma a proteger o revestimento anterior.

Logo, o dimensionamento do revestimento de um poço é primordial para que ocorra uma produção segura. Um esquema típico de revestimento está exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de Revestimento.



Fonte: (SILVA, 2018)

Além disso, os revestimentos podem atuar como uma via para permitir o acesso de ferramentas ao poço, bem como os equipamentos de completação, e também pode trabalhar isolando zonas onde a pressão de poros esteja anormalmente altas.

Os poços de petróleo, sejam eles *onshore* ou *offshore*, são perfurados por fases. Alguns fatores que determinam o número de fases de um poço de petróleo são: finalidade do poço, comprimento máximo do poço aberto, pressões de poros e de fraturas. Através dessas informações é possível estabelecer tanto o número de fases quanto o intervalo de profundidade em que ela estará (THOMAS, 2004).

Bourgoyne et al. (1986) explica que as estruturas que compõem o revestimento apresentam várias seções de diferentes tipos de aços, espessura e tipos de acoplamentos. A consideração dos gradientes de pressão, que engloba poros, fratura e sobrecarga é essencial na seleção da quantidade de colunas de revestimento a serem implementadas e nas suas respectivas profundidades.

Os diâmetros externos dos revestimentos podem ser definidos na ordem inversa ao posicionamento em relação a superfície, ou seja, é preciso saber no projeto qual o diâmetro do revestimento produtor ou do *liner* de produção para definir os demais. A Tabela 1 apresenta profundidades e diâmetros externos (OD) típicos de poços *onshore* e *offshore*. As células sem dados presentes na mesma representa que não foram encontrados dados de referência na literatura, pois cada projeto pode demandar soluções únicas.

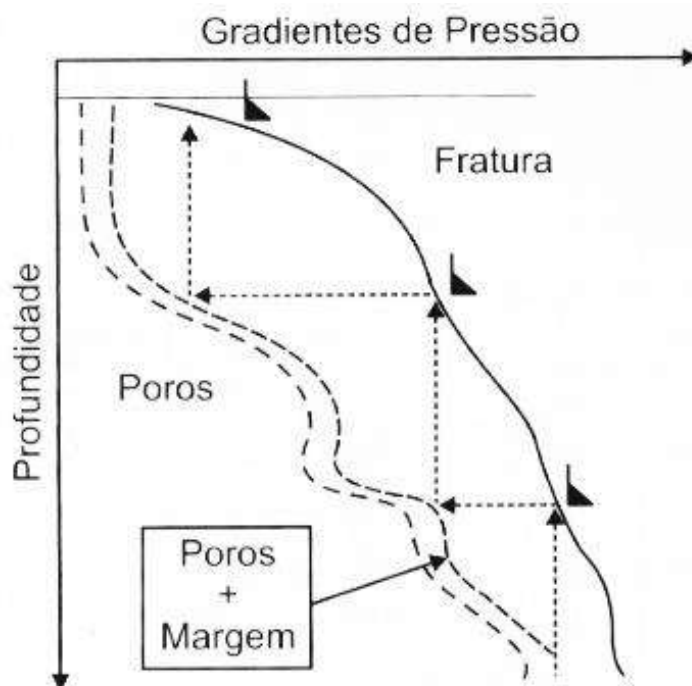
Tabela 1 – Profundidades e diâmetros usuais para poços onshore e offshore

	Poços <i>onshore</i>		Poços <i>offshore</i>	
	Comprimento (m)	Diâmetro (pol)	Comprimento (m)	Diâmetro (pol)
Revestimento Condutor	10 a 50	$13 \frac{3}{8}$ a 30	Até 305	30 a 36
Revestimento de Superfície	100 a 600	$9 \frac{5}{8}$ a 20	-	$13 \frac{3}{8}$ a 22
Revestimento Intermediário	1000 a 4000	7 a $13 \frac{3}{8}$	-	7 a $13 \frac{3}{8}$
Revestimento de Produção	-	$5 \frac{1}{2}$ a $9 \frac{5}{8}$	-	-
<i>Liner</i>	-	$5 \frac{12}{2}$ a $13 \frac{3}{8}$	-	-
<i>Tie-Back</i>	-	$5 \frac{1}{2}$ a $9 \frac{5}{8}$	-	-

Fonte: Adaptado de ((RAHMAN; CHILINGARIAN, 1995); (ROCHA; AZEVEDO, 2009); (THOMAS, 2004)

O projeto de revestimento deve conter como entrada os gradientes de pressão de fratura, colapso e poros, que agrupados formam a janela operacional de um poço. A Figura 2 mostra um gráfico típico de janela operacional.

Figura 2 – Assentamento das sapatas baseado na janela operacional.



Fonte: (ROCHA; AZEVEDO, 2009)

A janela operacional é utilizada para definir a profundidade na qual as sapatas do revestimento devem ser assentadas, além de assistir na escolha de peso ótimo do fluido de perfuração para assegurar a estabilidade do poço, retratando o intervalo permitido para a variação da pressão exercida pelo fluido de perfuração (ROCHA; AZEVEDO, 2009). Ao escolher o fluido que será utilizado, deve-se levar em consideração as pressões de poros e fratura da formação, pois caso a pressão seja maior que a pressão de fratura, a formação sofrerá fratura e causará perda de circulação. Tem-se que o limite da pressão de poros é importante pois o fluido de perfuração é responsável pela pressão exercida dentro do poço o que impede o fluido da formação de invadir o interior do poço assegurando a estabilidade do mesmo.

As sapatas de revestimento são equipamentos que servem como um mecanismo de vedação e de acordo com Rocha e Azevedo (2009) existem alguns fatores que afetam a posição do assentamento, sendo eles, o objetivo do poço, poços direcionais, zonas de perda de circulação, longas extensões de poço aberto, diferencial de pressão entre o poço e a formação e margem de riser. É importante salientar que cada companhia possui critérios próprios para o assentamento de sapatas, esses critérios são resultados da experiência da empresa ao longo dos anos.

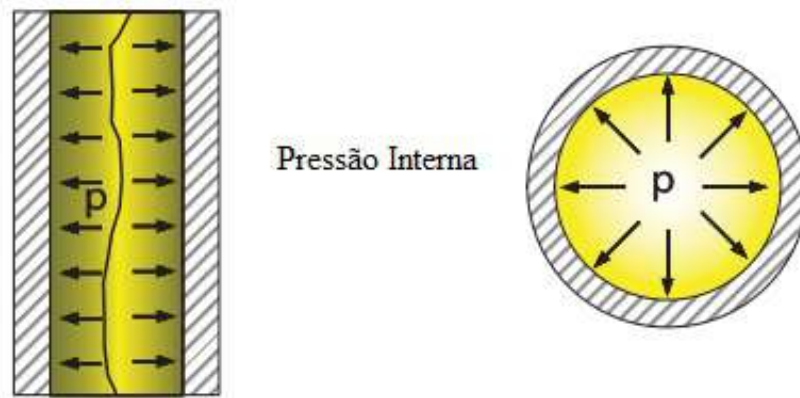
Um revestimento de poço é composto por uma série de equipamentos, tais como, tubos e conexões. O presente trabalho visa retratar somente as resistências encontradas em projetos para tubos de revestimento, apresentado através do relatório técnico da API (2008).

2.1 PRESSÃO INTERNA (*BURST*)

A resistência a pressão interna ou resistência ao *burst* é definida como a pressão interna mínima que ocasiona a ruptura do tubo. Com isso tem-se que $P_a < P_i$, ou seja, a pressão hidrostática do fluido dentro do revestimento, P_i , é maior que a pressão presente exteriormente no revestimento, P_a . De acordo com a norma REPSOL YPF (2000), a ruptura pode ocorrer por testes de pressão, situações de controle de poço, assim como estimulações ou operações de cimentação por compressão.

A Figura 3 representa a pressão interna que faz o tubo romper.

Figura 3 – Pressão interna em um tubo



Fonte: (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015)

Segundo o relatório técnico da API (2008), a Equação 2.1 é baseada na formulação proposta por Barlow.

$$R_b = 2 \cdot Y_p \cdot \frac{t}{D} \quad (2.1)$$

De acordo com o relatório técnico da API (2008), é permitida uma redução pontual de até 12,5% na espessura da parede do tubo, logo a Equação 2.1 deve ser corrigida pela 2.2.

$$R_b = 2 \cdot Y_p \cdot 0,875 \cdot \frac{t}{D} \quad (2.2)$$

Onde:

R_b - Resistência a pressão interna.

Y_p - tensão mínima de escoamento do aço.

D - Diâmetro externo do tubo.

t - Espessura da parede do tubo

2.2 PRESSÃO EXTERNA (COLAPSO)

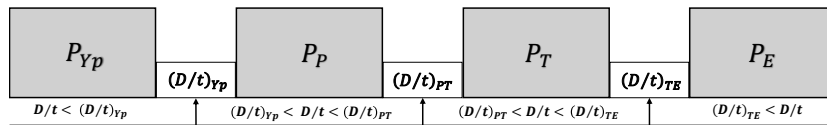
Tem-se uma falha por colapso quando a pressão externa é maior que a interna, ou seja, $P_i < P_a$. Isso pode ocorrer em situações de cimentação do poço e em evacuação de fluidos, por exemplo. Aadnøy (2007) cita exemplos que podem levar o revestimento ao colapso, são alguns: perda de circulação e perfuração em seções de sal. Logo, ao colapsar, o tubo tem seu formato circular alterado para elíptico ocasionando uma barreira para passagem de equipamentos em seu interior.

De acordo com Rahman e Chilingarian (1995) a maior pressão externa que o tubo suporta é função de muitos fatores, sendo alguns deles: diâmetro, espessura do tubo e propriedades provenientes do material.

Koehler (2018) atenta que a estabilidade geométrica do tubo está ligada diretamente ao índice de esbeltez (D/t), dessa forma, quanto maior este índice, mais instável.

A Figura 4 apresenta os limites de rompimentos a que um tubo pode ser submetido, dispondo, com isso, fronteiras de (D/t) entre um tipo de falha e outro.

Figura 4 – Fronteiras entre os limites de resistência ao colapso



Fonte: Autor

As equações para cálculo das resistências ao colapso, assim como as tabelas de referência para seus respectivos índices de esbeltez, são apresentadas a seguir.

2.2.1 Pressão de Colapso por Escoamento

A pressão externa de colapso por escoamento é encontrada através da Equação 2.3.

$$P_{Yp} = 2 \cdot f_{ymn} \cdot \frac{\left(\frac{D}{t}\right) - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \quad (2.3)$$

Onde:

P_{Yp} - Pressão externa

f_{ymn} - Tensão mínima de escoamento do aço

A Equação 2.3 é usada quando o tubo apresenta $D/t < (D/t)_{yp}$, onde $(D/t)_{yp}$ é calculado de acordo com a Equação 2.4.

$$(D/t)_{yp} = \frac{[(A_c - 2)^2 + 8 \cdot (B_c + C_c/f_{ymn})]^{1/2} + (A_c - 2)}{2 \cdot (B_c + C_c/f_{ymn})} \quad (2.4)$$

Onde:

A_c - Constante empírica para colapso API.

B_c - Constante empírica para colapso API.

C_c - Constante empírica para colapso API.

A Tabela 2 apresenta os valores da razão D/t para os quais a Equação 2.1 se aplica.

Tabela 2 – Intervalo para pressão de colapso por escoamento

Grau	D/t máximo
H40	16,40
50	15,24
J e K55	14,81
60	14,44
70	13,85
C e E75	13,60
L-N-80	13,38
C90	13,01
C,T e X95	12,85
100	12,70
P e G105	12,57
P110	12,44
120	12,21
Q125	12,11
130	12,02
S135	11,92
140	11,84
150	11,67
155	11,59
160	11,52
170	11,37
180	11,23

FONTE: (API, 2008)

2.2.2 Pressão de Colapso Plástico

Este tipo de colapso é baseado em teste empíricos realizados com tubos K-55, N-80 e P-110. Os tubos fabricados de acordo com a especificação API tem um nível de confiança de 95% de que 99,5% falharão se a pressão de colapso for maior que a pressão de colapso plástico.

A pressão mínima de colapso plástico é calculada por meio da Equação 2.5

$$P_P = f_{ymn} \cdot \left[\frac{A_c}{(D/t)} - B_c \right] - C_c \quad (2.5)$$

Onde:

P_P - Pressão para colapso plástico.

A Equação (2.5) é usada entre $(D/t)_{Yp} < D/t < (D/t)_{pt}$. Onde $(D/t)_{pt}$ é calculado usando a Equação 2.6.

$$(D/t)_{pt} = \frac{f_{ymn} \cdot (A_c - F_c)}{C_c + f_{ymn} \cdot (B_c - G_c)} \quad (2.6)$$

Onde:

F_c - Constante empírica para colapso API.

G_c - Constante empírica para colapso API.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes empíricos assim como os intervalos D/t para pressão de colapso plástico.

Tabela 3 – Intervalo para pressão de colapso plástico

Grau	Fatores			D/t
	A_c	B_c	C_c (psi)	
H40	2,950	0,0465	754	16,40 - 27,01
50	2,976	0,0515	1056	15,24 - 25,63
J e K55	2,991	0,0541	1206	14,81 - 25,01
60	3,005	0,0566	1356	14,44 - 24,42
70	3,037	0,0617	1656	13,85 - 23,38
C e E75	3,054	0,0642	1806	13,60 - 22,91
L-N-80	3,071	0,0667	1955	13,38 - 22,47
C90	3,106	0,0718	2254	13,01 - 21,69
C,T e X95	3,124	0,0743	2404	12,85 - 21,33
100	3,143	0,0768	2553	12,70 - 21,00
P e G105	3,162	0,0794	2702	12,57 - 20,70
P110	3,181	0,0819	2852	12,44 - 20,41
120	3,219	0,0870	3151	12,21 - 19,88
Q125	3,239	0,0895	3301	12,11 - 19,63
130	3,258	0,0920	3451	12,02 - 19,40
S135	3,278	0,0946	3601	11,92 - 19,18
140	3,297	0,0971	3751	11,84 - 18,97
150	3,336	0,1021	4053	11,67 - 18,57
155	3,356	0,1047	4204	11,59 - 18,37
160	3,375	0,1072	4356	11,52 - 18,19
170	3,412	0,1123	4660	11,37 - 17,82
180	3,449	0,1173	4966	11,21 - 17,47

FONTE: (API, 2008)

2.2.3 Pressão de Colapso de Transição

De acordo com Rahman e Chilingarian (1995) os tubos que falham na faixa de transição representam um problema de instabilidade. Dessa forma, a pressão crítica prevista não deve basear-se no módulo de Young, mas sim no declive local da curva tensão-deformação da região elastoplástica.

A equação de pressão de colapso mínima para o intervalo entre o regime plástico e o regime elástico é encontrada através da Equação 2.7.

$$P_T = f_{ymn} \cdot \left[\frac{F_c}{(D/t)} - G_c \right] \quad (2.7)$$

Onde:

P_T - Pressão para colapso de transição.

A equação da pressão de colapso de transição (P_T) é utilizada para valores entre $(D/t)_{PT} < (D/t) < (D/t)_{TE}$. Onde a Equação 2.8 mostra como é calculado $(D/t)_{TE}$.

$$(D/t)_{TE} = \frac{2 + \frac{B_c}{A_c}}{3 \cdot \frac{B_c}{A_c}} \quad (2.8)$$

A Tabela 4 apresenta os coeficientes empíricos assim como os intervalos D/t para pressão de colapso de transição.

Tabela 4 – Intervalo para pressão de colapso de transição

Grau	Fatores		D/t
	F_c	G_c	
H40	2,063	0,0325	27,01 - 42,64
50	2,003	0,0347	25,63 - 38,83
J e K55	1,989	0,0360	25,01 - 37,21
60	1,983	0,0373	24,42 - 35,73
70	1,984	0,0403	23,38 - 33,17
C e E75	1,990	0,0418	22,91 - 32,05
L-N-80	1,998	0,0434	22,47 - 31,02
C90	2,017	0,0466	21,69 - 29,18
C,T e X95	2,029	0,0482	21,33 - 28,36
100	2,040	0,0499	21,00 - 27,60
P e G105	2,053	0,0515	20,70 - 26,89
P110	2,066	0,0532	20,41 - 26,22
120	2,092	0,0565	19,88 - 25,01
Q125	2,106	0,0582	19,63 - 24,46
130	2,119	0,0599	19,40 - 23,94
S135	2,133	0,0615	19,18 - 23,44
140	2,146	0,0632	18,97 - 22,98
150	2,174	0,0666	18,57 - 22,11
155	2,188	0,0683	18,37 - 21,70
160	2,202	0,0700	18,19 - 21,32
170	2,231	0,0734	17,82 - 20,60
180	2,261	0,0769	17,47 - 19,93

FONTE: (API, 2008)

2.2.4 Pressão de Colapso Elástico

Rahman e Chilingarian (1995) afirma que a equação para colapso elástico em corpos de prova de paredes finas e longas é uma função do quociente entre a diâmetro do tubo (D) e de sua espessura (t). Isso é baseado na falha da instabilidade elástica teórica e independe da tensão de escoamento. E utiliza módulo de Young ($E = 30 \cdot 10^6$) e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$),

valores típicos do aço utilizado nos *Oil Country Tubular Goods* (OCTG) API (2008), resultando assim na Equação 2.9.

$$P_E = \frac{46,95 \cdot 10^6}{(D/t)(D/t - 1)^2} \quad (2.9)$$

Onde:

P_E - Pressão para colapso elástico.

E tem-se o regime elástico quando $(D/t)_{TE} < D/t$. A Tabela 5 apresenta os intervalos D/t para qual os tubos apresentam comportamento elástico.

Tabela 5 – Intervalo para pressão de colapso elástico

Grau	D/t
H40	$\geq 42,64$
50	$\geq 38,83$
J e K55	$\geq 37,21$
60	$\geq 35,73$
70	$\geq 33,17$
C e E75	$\geq 32,05$
L-N-80	$\geq 31,02$
C90	$\geq 29,18$
C,T e X95	$\geq 28,36$
100	$\geq 27,60$
P e G105	$\geq 26,89$
P110	$\geq 26,22$
120	$\geq 25,01$
Q125	$\geq 24,46$
130	$\geq 23,94$
S135	$\geq 23,44$
140	$\geq 22,98$
150	$\geq 22,11$
155	$\geq 21,70$
160	$\geq 21,32$
170	$\geq 20,60$
180	$\geq 19,93$

FONTE: (API, 2008)

As constantes empíricas são calculadas de acordo com o relatório técnico da (API, 2008) nas unidades americanas (USC). A Tabela 6 explana como os cálculos dos coeficientes são encontrados.

Tabela 6 – Constantes Empíricas de acordo com as unidades USC

$A_c = 2,8762 + 0,10679 \cdot 10^{-5} f_{ymn} + 0,21301 \cdot 10^{-10} \cdot f_{ymn}^2 - 0,53132 \cdot 10^{-16} f_{ymn}^3$
$B_c = 0,026233 + 0,50609 \cdot 10^{-6} f_{ymn}$
$C_c = -465,93 + 0,030867 \cdot f_{ymn} - 0,10483 \cdot 10^{-7} \cdot f_{ymn}^2 + 0,36989 \cdot 10^{-13} \cdot f_{ymn}^3$
$F_c = 46,95 \cdot 10^6 [(3B_c/A_c)/(2 + B_c/A_c)]^3 / f_{ymn} [(3B_c/A_c)/(2 + B_c/A_c) - B_c/A_c] [1 - (3B_c/A_c)/(2 + B_c/A_c)]^2$
$G_c = F_c \cdot B_c/A_c$

Fonte: (API, 2008)

2.3 PRESSÃO DE COLAPSO CORRIGIDA (FORÇA AXIAL E PRESSÃO INTERNA)

Quando há a presença de uma força axial de tração, o relatório técnico (API, 2008) recomenda a utilização da tensão de escoamento equivalente (Y_{pa}). Dessa forma, há uma redução na tensão de escoamento acarretado pela força axial imposta ao revestimento, como mostra a Equação 2.10.

$$f_{yax} = \{[1 - 0,75 \cdot (\sigma_a/f_{ymn})^2]^{1/2} - 0,5 \cdot \sigma_a/f_{ymn}\} \cdot f_{ymn} \quad (2.10)$$

Onde:

f_{yax} - Força de tensão equivalente na presença de força axial.

σ_a - Componente da tensão axial

Dessa forma, a metodologia de cálculo deve ser realizada com f_{yax} e não mais com f_{ymn} . Porém, limita-se o uso de f_{yax} sendo maior que 24000 *psi*, se menor, essa metodologia não deve ser aplicada (GOUVEIA, 2014).

Ao obter a f_{yax} é possível recalculer as Equações 2.3, 2.5, 2.7, 2.9. Com isso pode-se calcular também a influência da pressão interna na pressão externa. De acordo com a Equação 2.11.

$$P_{ci} = P_c + \left(1 - 2 \cdot \frac{t}{D}\right) \cdot P_i \quad (2.11)$$

Onde:

P_{ci} - Pressão de colapso na presença de pressão interna.

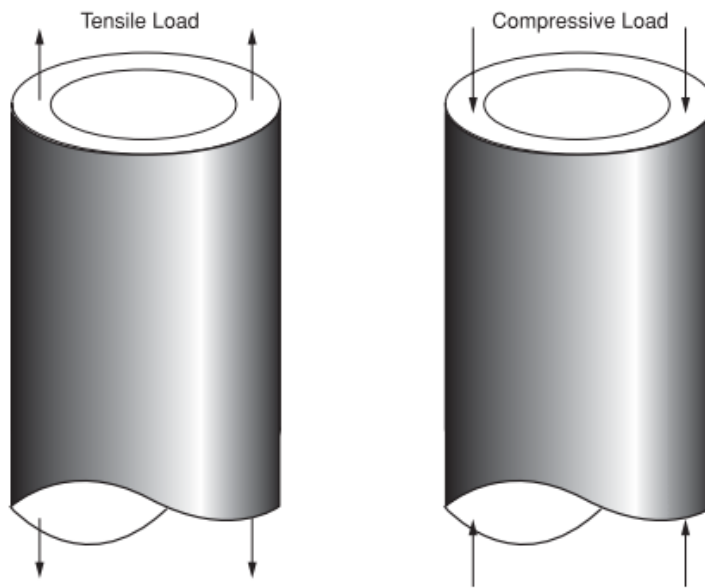
P_c - Pressão de colapso (calculada nas equações).

2.4 RESISTÊNCIA À FORÇA AXIAL

A força axial aplicada no revestimento pode ser de tração ou compressão e varia ao longo do comprimento do mesmo. Durante a perfuração e produção o revestimento é submetido a várias cargas axiais. Desse modo, a carga axial máxima (em módulo) que um tubo pode receber antes de sofrer escoamento é denominada resistência à força axial.

A Figura 5 representa as forças axiais que um revestimento pode estar sujeito e a Equação 2.12 mostra como é calculado a resistência à força axial.

Figura 5 – Força Axial - Tração e Compressão



Fonte: (FORD, 2005).

$$R_t = f_{ymn} \cdot A_p = f_{ymn} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \quad (2.12)$$

Onde:

R_t - Resistência à força axial, em termos de força

A_p - Área da seção transversal do tubo

2.5 TRIAXIAL - CRITÉRIO DE VON MISES

Um tubo pode resistir às cargas de pressão interna, externa e axial, mas o material pode chegar à falha. Isto pode ocorrer devido a ação combinada das forças, que pode chegar ao seu nível máximo e levar o tubo à falha.

O critério de von Mises analisa esse cenário, de tal modo, que a análise tridimensional leva em consideração a tensão axial (σ_a), tangencial (σ_t), radial (σ_r) e a tensão de escoamento do material (f_y).

A Equação 2.13 apresenta uma formulação para um material que se encontra no regime elástico.

$$f_y^2 > \sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_a^2 - \sigma_r \cdot \sigma_t - \sigma_r \cdot \sigma_a - \sigma_t \cdot \sigma_a \quad (2.13)$$

Segundo Aadnøy (2007) a tensão radial e a tangencial são encontradas através das Equações 2.14 e 2.15 respectivamente.

$$\sigma_r = -P_i \quad (2.14)$$

$$\sigma_t = -P_i + \Delta P \cdot \frac{D^2}{2 \cdot t \cdot (D - t)} \quad (2.15)$$

A tensão axial é o quociente entre a força axial pela seção transversal do tubo, conforme a Equação (2.16).

$$\sigma_a = \frac{F_a}{\pi \cdot t \cdot (D - t)} \quad (2.16)$$

A Equação 2.17 apresenta de forma simplificada como obter a tensão equivalente.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_a \cdot \sigma_r - \sigma_a \cdot \sigma_t - \sigma_r \cdot \sigma_t} \quad (2.17)$$

3 CENÁRIOS DE CARREGAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO REVESTIMENTO

Para o estudo dos cenários operacionais ao qual um revestimento poderá estar sujeito é necessário conhecer as cargas internas e externas. Que podem ser divididas em estágios, sendo eles, instalação, perfuração e produção

A Resolução N° 46/2016 da Agência Nacional do Petróleo mostra o conceito de Conjunto Solidário de Barreiras (CSB), sendo, um conjunto de um ou mais elementos que tem como objetivo impedir o fluxo não intencional (*kicks*) de fluidos da formação para o meio externo. Também trata das etapas do Ciclo de Vida do Poço, que perpassa desde a etapa de projeto até o abandono.

Com esse estudo é possível observar que nem todas as fases do revestimento sofrem as mesmas cargas, desse modo, o revestimento condutor não é estudado neste trabalho, pois existem carregamentos específicos que são avaliados para ele. A Tabela 7 apresenta as cargas estudadas e onde pode ocorrer esses cenários.

Tabela 7 – Cenários de carregamentos de Serviço e Sobrevivência

Serviço		
	Cenário	Revestimento
Colapso	Perda de Circulação	Revestimento de Superfície Revestimento Intermediário Revestimento de Produção (Apenas se houver perfuração avante)
	Esvaziamento Parcial	- Revestimento de Produção
	Cimentação	- Revestimento de Superfície - Revestimento Intermediário - Revestimento de Produção
Burst	Teste de Pressão	- Revestimento de Superfície - Revestimento Intermediário - Revestimento de Produção
Sobrevivência		
Colapso	Esvaziamento Total "full evacuation"	- Revestimento de Produção (Poços produtores/injetores de gás)
	Esvaziamento total abaixo do "packer" ("above/below packer")	- Revestimento de Produção
Burst	Poço cheio de fluido da formação	- Revestimento de Superfície - Revestimento Intermediário - Revestimento de Produção (Apenas se houver perfuração avante)
	Poço revestido preenchido com 70% de fluido da formação e 30% de fluido de perfuração	- Revestimento de Superfície - Revestimento Intermediário - Revestimento de Produção (Apenas se houver perfuração avante)
	Furo na Coluna de Produção/Injeção ("tubing leaking")	- Revestimento de Produção (Poços produtores/injetores)

Fonte: Adaptado (COSTA, 2016)

Os cenários para pressão de colapso comumente considerados são: cimentação e perda de circulação, enquanto os cenários para *burst* são, vazamento na tubulação, compressão de cimento, *kick* e teste de pressão.

Sendo assim, a definição dos cenários operacionais a serem considerados, é uma das etapas mais importantes no processo de projeto de revestimento e, portanto, eles geralmente serão estabelecidos como uma política de cada operadora (FORD, 2005).

Alguns cenários presentes na Tabela 7 não serão considerados devido às delimitações impostas no presente trabalho.

3.1 CENÁRIOS DE CARREGAMENTO

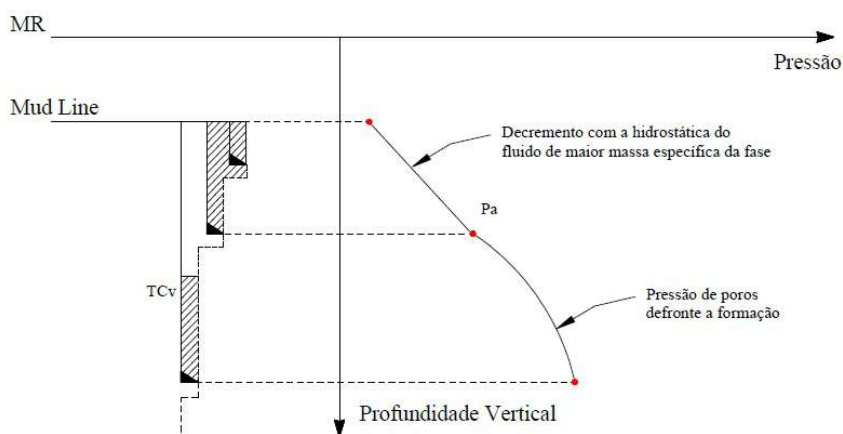
3.1.1 Cenários de *Burst*

Ao se tratar da pressão externa ou pressão de *backup* é necessário entender o que seria topo do cimento (TOC). Ao se instalar o revestimento é deslocado uma pasta de cimento, onde, nas fases mais superficiais a cimentação ocorre em todo o trecho, enquanto nas fases mais profundas a cimentação é feita até uma parte da profundidade, o que gera um intervalo onde pode haver o contato direto do revestimento com a formação ou com o revestimento anterior, onde o topo da parte cimentada denomina-se topo do cimento.

Todos os cenários de *burst* têm a mesma formulação para o cálculo da pressão externa ou pressão de *backup* onde é usada a menor pressão de poros da fase para este cálculo. Utiliza-se a menor pressão de poros pois o peso do fluido de perfuração deve ser sempre maior, para evitar a invasão de fluidos indesejados *kick*. Nestas situações, deve-se considerar o cenário crítico, ou seja, minimizar a pressão de *backup* para aumentar o diferencial de pressão, portanto, é usada a menor pressão de poros da fase.

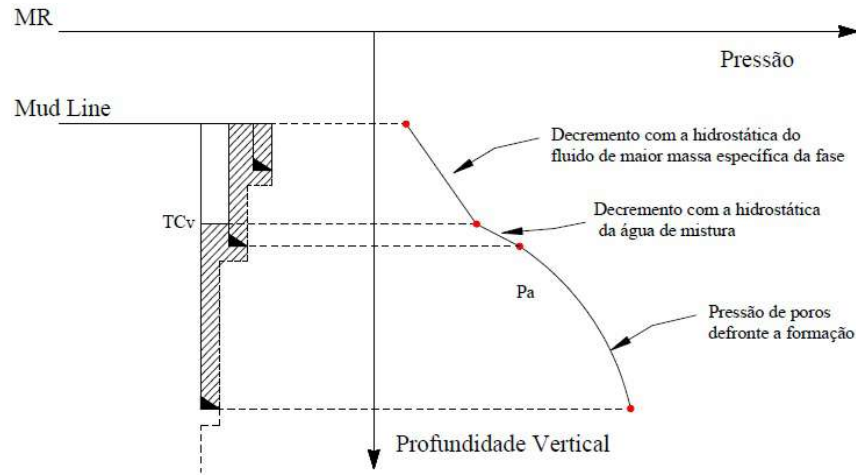
Nos pontos que se encontram acima da sapata do revestimento anterior, deve-se realizar um decréscimo de pressão hidrostática do fluido de maior peso previsto para a fase, pois, a pressão que a formação exerce já não opera de forma direta no revestimento. Há ainda outro cenário possível, onde a pressão de *backup* é dividida em três partes. Esse cenário acontece quando o topo do revestimento da fase corrente está acima da sapata do revestimento anterior. Nesse intervalo, deve-se abater a pressão hidrostática da água de mistura, que é uma base para a fabricação das pastas de cimento, da pressão externa. Como pode ser observado através das Figuras 6 e 7 que mostram os dois possíveis cenários para a pressão de *backup* ao longo da profundidade vertical.

Figura 6 – Perfil de pressão externa para cenário onde o topo do cimento está abaixo do revestimento anterior.



Fonte: (SOUZA, 2015)

Figura 7 – Perfil de pressão externa para cenário onde o topo do cimento está acima do revestimento anterior.



Fonte: (SOUZA, 2015)

Como a pressão externa depende da profundidade que se deseja analisar, foi utilizada a Equação 3.1 para verificar as pressões na sapata e no topo do cimento e a Equação 3.2 para encontrar a pressão acima da sapata do revestimento anterior. Ou seja, a pressão de *backup* foi separada em duas partes, sendo, trecho abaixo da sapata do revestimento anterior, usando o gradiente de pressão de poros, e trecho acima da sapata do revestimento anterior fazendo o decréscimo da pressão hidrostática do fluido.

$$P_a = 0,1704 \cdot \rho_p \cdot TVD \quad (3.1)$$

$$P_a = P_{pos} - 0,1704 \cdot \rho_{fluido} \cdot (TVD_j - TVD_i) \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_p - Gradiente de pressão de poros mínima da fase.

P_j - Pressão no ponto posterior ao analisado.

P_{pos} - Pressão no ponto posterior ao analisado.

TVD_j - Profundidade vertical no ponto posterior ao analisado.

TVD_i - Profundidade vertical no ponto analisado.

3.1.1.1 Teste de Pressão

O teste de pressão é normalmente realizado após a instalação do revestimento e a cimentação de uma fase. Durante o teste é inserida uma pressão extra, que pode ser sobre a formação ou não, e consequentemente sobre a fase corrente do revestimento, pois o objetivo é testar o

revestimento contra vazamentos. Então, segundo Lake (2006) a pressão de teste se baseia na pressão superficial máxima prevista.

Para a realização do teste de pressão o revestimento é sujeito a uma pressão complementar, chamada de pressão de teste, que visa testar a integridade dos tubos de revestimento, vedação das conexões e da cimentação. A Equação 3.3 apresenta a pressão interna, a Equação 3.4 apresenta a pressão de teste para garantir um *leakoff test* (LOT), que é um teste para definir a pressão de fratura da formação aberta, geralmente conduzido imediatamente após a perfuração abaixo de uma nova sapata de revestimento.

$$P_i = P_{teste} + 0,1704 \cdot \rho_{fluido} \cdot TVD \quad (3.3)$$

$$P_{teste} = 0,1704 \cdot (\rho_{fratura} - \rho_{fluido} + \rho_{margem}) \cdot TVD_{sapata} \quad (3.4)$$

Onde:

TVD - *True Vertical Depth* - Profundidade vertical

P_{teste} - Pressão de teste para garantir um LOT.

ρ_{fluido} - Gradiente do fluido presente no revestimento.

$\rho_{fratura}$ - Gradiente de fratura na sapata do revestimento.

ρ_{margem} - Gradiente adicional ao gradiente de fratura.

TVD_{sapata} - profundidade vertical da sapata.

3.1.1.2 Poço cheio de fluido da formação

De acordo com Souza (2015) neste cenário o poço será invadido totalmente por fluidos provenientes da formação, sendo então, um cenário de elevada pressão.

Então, o perfil de pressão é encontrado de acordo com a Equação 3.5. Onde o gradiente do fluido da formação é considerado como gás por se tratar de um cenário mais crítico.

$$P_i = P_{sap} - G_{infl} \cdot (TVD_{sap} - TVD) \quad (3.5)$$

A pressão na sapata é o valor mínimo encontrado entre as Equações 3.6 e 3.7, pois se a pressão na sapata for maior que a pressão de fratura ela irá fraturar a formação.

$$P_{sap} = 0,1704 \cdot \rho_{infl} \cdot TVD_{infl} - G_{infl} \cdot (TVD_{infl} - TVD_{sap}) \quad (3.6)$$

$$P_{sap} = 0,1704 \cdot \rho_{fratura} \cdot TVD_{sap} \quad (3.7)$$

Onde:

P_{sap} - Pressão na sapata.

G_{infl} - Gradiente do fluido da formação.

TVD - Profundidade onde se deseja investigar a pressão.

$P_{sapinfl}$ - Pressão na sapata devido ao influxo.

ρ_{infl} - Gradiente de pressão de poros na área de influxo.

TVD_{infl} - Profundidade do influxo.

3.1.1.3 Poço revestido preenchido com 70% de fluido da formação e 30% de fluido de perfuração

Considera-se que o poço não está totalmente preenchido com fluido invasor se a pressão na cabeça do poço for inferior a 10.000 psi. Dessa maneira, considera-se que o poço encontra-se preenchido com 70% do fluido presente na formação e 30% com o fluido utilizado na perfuração da fase corrente.

O perfil de pressão interna é encontrado através da Equação 3.8.

$$P_i = P_{int} - 0,1704 \cdot \rho_f \cdot (TVD_{int} - TVD) \quad (3.8)$$

se

$$TVD \leq TVD_{int}$$

$$P_i = P_{sap} - G_{infl} \cdot (TVD_{sap} - TVD)$$

se

$$TVD > TVD_{int}$$

A profundidade vertical da interface e a pressão interna da interface fluido invasor/fluido da fase é encontrada através das Equações 3.9 e 3.10. O suspensor é o suporte da coluna de revestimentos.

$$TVD_{int} = TVD_{sap} - (TVD_{sap} - TVD_{susp}) \cdot 70\% \quad (3.9)$$

$$P_{int} = P_{sap} - G_{infl} \cdot (TVD_{sap} - TVD_{int}) \quad (3.10)$$

Onde:

P_{int} - Pressão interna da interface entre o fluido invasor e o da fase.

ρ_f - Massa específica do fluido de perfuração da fase seguinte.

$TV D_{int}$ - Profundidade vertical da interface entre o fluido invasor e o da fase.

$TV D_{susp}$ - Profundidade vertical do suspensor.

3.1.1.4 Furo na coluna de produção - *Tubing Leak*

Este cenário é específico para os revestimentos de produção de poços que sejam produtores ou que seja realizado um teste de formação. Este vazamento ocorre no topo da coluna, em sua situação mais crítica. A Equação 3.11 apresenta a pressão na cabeça do poço em um evento de *tubing leak*.

$$P_{cabpt} = 0,1704 \cdot \rho_{zpr} \cdot TV D_{can} - G_{HC} \cdot (TV D_{can} - LDA) \quad (3.11)$$

Desse modo, o perfil de pressão interna é encontrada através da Equação 3.12.

$$P_i = P_{cabpt} + 0,1704 \cdot \rho_{pf} \cdot (TV D - LDA) \quad (3.12)$$

P_{cabpt} - Pressão na cabeça, em um evento de *tubing leak*.

ρ_{zpr} - Gradiente de pressão de poros da zona produtora.

G_{HC} - Gradiente do hidrocarboneto produzido.

$TV D_{can}$ - Profundidade vertical dos canhoneados.

LDA - Lâmina d'água.

ρ_{pf} - Massa específica do fluido do *packer fluid*.

3.1.2 Cenários de Colapso

Os cenários de colapso tem a mesma pressão de *backup*, exceto para o caso do cenário de cimentação, pois neste momento a pasta de cimento se encontra fluida, o que acaba por transmitir pressão. Os demais cenários utilizam a massa específica do fluido de perfuração mais pesado da fase para considerar um perfil de pressão externa de maior valor, portanto, mais crítico. Dessa forma, o perfil de pressão externa dos demais casos é encontrado de acordo com a Equação 3.13.

$$P_a = 0,1704 \cdot \rho_f \cdot TV D \quad (3.13)$$

Onde:

ρ_f - Massa específica do fluido de perfuração mais pesado da fase.

3.1.2.1 Cimentação

Esse cenário de cimentação, para esforços de colapso, está intrinsecamente ligado com o deslocamento da pasta de cimento. Onde a pressão externa é influenciada pela densidade da pasta de cimento e a pressão interna se baseia no fluido de perfuração. Conforme Lake (2006) o uso de um fluido de perfuração leve pode acarretar em uma carga de colapso expressiva. A pressão interna pode ser encontrada de acordo com a Equação 3.14.

$$P_i = 0,1704 \cdot \rho_{fdes} \cdot TVD \quad (3.14)$$

O perfil de pressão externo é encontrado através da Equação 3.15.

$$P_a = 0,1704 \cdot \rho_f \cdot TVD \quad (3.15)$$

se

$$TVD \leq TVD_{TOC}$$

$$P_a = P_{TOC} + 0,1704 \cdot (\rho_{cimento} \cdot (TVD - TVD_{TOC}))$$

se

$$TVD > TVD_{TOC}$$

A pressão externa no topo do cimento é definida como mostra a Equação 3.16.

$$P_{TOC} = 0,1704 \cdot \rho_f \cdot TVD_{TOC} \quad (3.16)$$

Onde:

ρ_{fdes} - Massa específica do fluido de deslocamento.

$\rho_{cimento}$ - Massa específica da pasta de cimento.

TVD_{TOC} - Profundidade vertical do topo do cimento.

3.1.2.2 Perda de Circulação

Esta carga acontece por uma perda descontrolada de fluido ao longo da fase seguinte o que acarreta em uma redução no nível estático.

De acordo com Rahman e Chilingarian (1995) a perda de circulação é comum em baixas profundidades. Entretanto, em maiores profundidades a perda completa da circulação não é alcançada, devido a pressão hidrostática do fluido de perfuração presente no interior do revestimento está equilibrado com a pressão de poros na zona de perda de circulação.

Este cenário pode ocorrer em revestimentos de superfície, intermediário e de produção, caso exista alguma fase posterior a esse último.

A Equação 3.17 apresenta o cálculo da altura onde há a queda de fluido no interior do revestimento.

$$TVD_p = TVD_{zp} \cdot \left(\frac{\rho_{fs} - \rho_{zp}}{\rho_{fs}} \right) \quad (3.17)$$

De posse de TVD_p é possível encontrar o perfil de pressão interno, através da Equação 3.18

$$Pi = 0 \quad (3.18)$$

se

$$TVD \leq TVD_p$$

$$Pi = 0,1704 \cdot \rho_{fs} \cdot (TVD - TVD_p)$$

se

$$TVD > TVD_p$$

Onde:

TVD_p - Profundidade vertical do fluido devido a perda

TVD_{zp} - Profundidade da zona de ocorrência do evento

ρ_{fs} - Maior massa específica do fluido da fase seguinte

ρ_{zp} - Gradiente de pressão poros da zona de perda

3.1.2.3 Esvaziamento Total - *Full Evacuation*

Pode ser considerado o pior cenário possível para os carregamentos de colapso. Esta carga é condicionada a revestimentos de produção, sendo produtores ou injetores de gás ou WAG (*Water Alternated Gas*).

Silva (2018) cita a sequência de eventos observados para que esse cenário ocorra: Perda da vedação do packer; Substituição gradual total do *packer fluid* pelo gás produzido ou injetado; Completo Entupimento do reservatório; Descompressão do gás.

O cálculo do perfil é feito através da Equação 3.19

$$Pi = 0 \quad (3.19)$$

se

$$TVD \leq TVD_{can}$$

$$P_i = 0,1704 \cdot \rho_{pf} \cdot (TVD - TVD_{can})$$

se

$$TVD > TVD_{can}$$

3.1.2.4 Esvaziamento Parcial

Segundo Byrom (2015) comumente nos casos de perda de circulação não há o completo evacuamento da coluna, sendo possível calcular o nível em que há o equilíbrio entre a formação fraturada e o fluido de perfuração, porém seria necessário dispor de dados rigorosos sobre a fratura e pressão da formação.

A pressão interna se baseia na queda do nível de fluido, usando o peso máximo do fluido encontrado na próxima seção do furo.

A pressão interna na base dos canhoneados é encontrada de acordo com a Equação 3.20.

$$P_{can} = G_f \cdot (TVD_{can} - TVD_{esv}) \quad (3.20)$$

Ao definir a pressão nos canhoneados (P_{can}) é possível encontrar o perfil de acordo com a Equação 3.21:

$$P_i = 0 \quad (3.21)$$

se

$$TVD \leq TVD_{esv}$$

$$P_i = G_f \cdot (TVD - TVD_{esv})$$

se

$$TVD_{esv} < TVD \leq TVD_{can}$$

$$P_i = P_{can} + 0,1704 \cdot \rho_{pf} \cdot (TVD - TVD_{can})$$

se

$$TVD > TVD_{can}$$

Onde:

G_f - Gradiente do fluido de menor peso ao longo da vida produtiva do poço.

TVD_{ev} - Profundidade vertical do esvaziamento.

3.1.2.5 Esvaziamento Total Abaixo do *Packer*

Este cenário pode ocorrer em poços onde são realizadas avaliações de formação. Neste caso, o anular acima do *packer* tem monitoramento constante, o que torna os cenários de esvaziamento parcial ou total uma possibilidade improvável. Em contrapartida, a zona embaixo do *packer* está exposta a possíveis variações de pressões, visto que está em contato direto com o reservatório. (Score, 2018)

Dessa forma, acima do *packer* a pressão é encontrada através da Equação 3.22 e abaixo é considerada nula, onde o peso da água do mar é considerado como 8,55 lb/gal

$$P_i = 0,1704 \cdot 8,55 \cdot TVD \quad (3.22)$$

se

$$TVD < TVD_{pck}$$

$$P_i = 0$$

se

$$TVD \geq TVD_{pck}$$

Onde:

TVD_{pck} - Profundidade vertical do *packer*.

3.2 FORÇA AXIAL

Conforme Rahman e Chilingarian (1995) as principais cargas que geram forças axiais são o peso do tubo, flexão e teste de pressão.

Para o presente trabalho não serão consideradas as cargas de flexão e temperatura, pois, o esforço de flexão está presente em poços inclinados e os esforços térmicos levam em conta a variação de temperatura ao longo da profundidade. Estando, dessa forma, conforme as delimitações impostas ao mesmo.

De forma complementar também se consideram os efeitos pistão e balão que devem gerar variações na força axial na qual a coluna de revestimento está submetida.

3.2.1 Peso Próprio

O peso próprio do tubo é encontrado através de:

$$F_p = 3,28084 \cdot W \cdot TVD \quad (3.23)$$

Onde:

F_p - Força peso.

W - Peso linear do tubo.

O peso próprio do revestimento é alterado conforme a profundidade ao qual o mesmo está submetido. tendo assim, seu maior peso próprio no topo do revestimento e seu menor na sapata, na forma:

$$F_j = \frac{F_{psap} - F_{ptopo}}{P_{sap} - P_j} \cdot (P_j - P_{topo}) + F_{ptopo} \quad (3.24)$$

Onde:

F_j - Peso próprio no ponto de análise.

F_{psap} - Peso próprio na sapata.

F_{ptopo} - Peso próprio no topo.

P_{sap} - Profundidade da sapata.

P_{topo} - Profundidade no topo.

3.2.2 Efeito Pistão

O efeito pistão é decorrente de uma força que atua em uma área exposta do revestimento, denominada ombro, que é causada devido a uma variação de pressão neste. O efeito pistão está presente em todos os cenários sejam eles de *burst* ou colapso.

$$F_{pistao} = \Delta P_a \cdot A_{pa} - \Delta P_i \cdot A_{pi} \quad (3.25)$$

Onde:

ΔP_a - Variação de pressão no anular.

ΔP_i - Variação de pressão no interior.

3.2.3 Efeito Balão

Quando o revestimento é submetido a uma variação de pressão o mesmo poderá sofrer um efeito denominado efeito balão, gerando uma carga axial. Isto ocorre devido ao revestimento

estar contido no topo e na base, pela cabeça do poço e pelo cimento endurecido, respectivamente (FORD, 2005).

O efeito balão é aplicado em todos os cenários, exceto no cenário de cimentação, pois este é o estado inicial.

Para o efeito balão têm-se dois tipos de configurações: trecho livre e trecho cimentado. A equações 3.26 e 3.27 apresentam ambas configurações respectivamente.

$$F_{bal} = -2 \cdot \nu \cdot (A_a \cdot \Delta P_{amedio} - A_i \cdot \Delta P_{imedio}) \cdot \frac{z}{L} \quad (3.26)$$

$$F_{bal} = -2 \cdot \nu \cdot (A_a \cdot \Delta P_{amedio} - A_i \cdot \Delta P_{imedio}) \quad (3.27)$$

Onde:

F_{bal} - Força axial devido ao efeito balão.

ν - Coeficiente de Poisson (= 0,3 para aço)

ΔP_{amedio} - Variação média de pressão externa - $(\Delta P_{atopo} + \Delta P_{abase})/2$

ΔP_{imedio} - Variação média de pressão interna - $(\Delta P_{itopo} + \Delta P_{ibase})/2$

z - Profundidade da cota

L - Profundidade total do trecho livre

3.3 FATORES DE SEGURANÇA

Ao se projetar um poço deve-se considerar margens de segurança que tornem o projeto aceitável. Devido às incertezas inerentes ao processo de perfuração e das cargas na qual o revestimento estará sujeito são aplicados os chamados fatores de segurança (FS). Usualmente os fatores de segurança mínimos ou toleráveis são selecionados de acordo com o histórico da região onde será perfurado, condições específicas do poço e requisitos regulatórios legais (API, 2008).

De acordo com Rahman e Chilingarian (1995) devido ao desgaste e a corrosão o revestimento deteriora-se com o tempo, logo, os fatores de segurança permitem garantir a incerteza da ocorrência destes eventos, assim como, garantir que desempenho seja sempre maior do que o esperado.

É importante salientar que os fatores de segurança são essenciais para verificar a viabilidade do projeto, pois, o mesmo pode se tornar inviável devido ao superdimensionamento das cargas que o involucro estará sujeito. Wojtanowicz e Maidla (1987) mostra que um acréscimo de 0,1 no fator de segurança de *burst* do projeto pode ocasionar um aumento em seu custo.

A Tabela 8 apresenta os intervalos comumente utilizados.

Tabela 8 – Intervalos tipicamente usados

Modo de falha	Faixas de FS
Colapso	1,0 - 1,125
Axial	1,0 - 2,0
Burst	1,0 - 1,33
Triaxial	1,25

Fonte: (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015)

O cálculo do fator de segurança é realizado através da Equação 3.28:

$$FS = \frac{R}{S} \quad (3.28)$$

Onde:

S - Solicitação que o tubo estará sujeito.

R - Resistência do tubo a solicitação.

Alguns autores como Lake (2006) e Pattillo (2018) diferenciam fator de segurança de fator de projeto. Considerando a relação apresentada pela Equação 3.28 fator de projeto é o valor mínimo aceitável dessa razão e fator de segurança é o valor real da resistência calculado à carga submetida.

Logo, têm-se que:

$$DF = FS_{min} \leq FS = \frac{R}{S} \quad (3.29)$$

Onde:

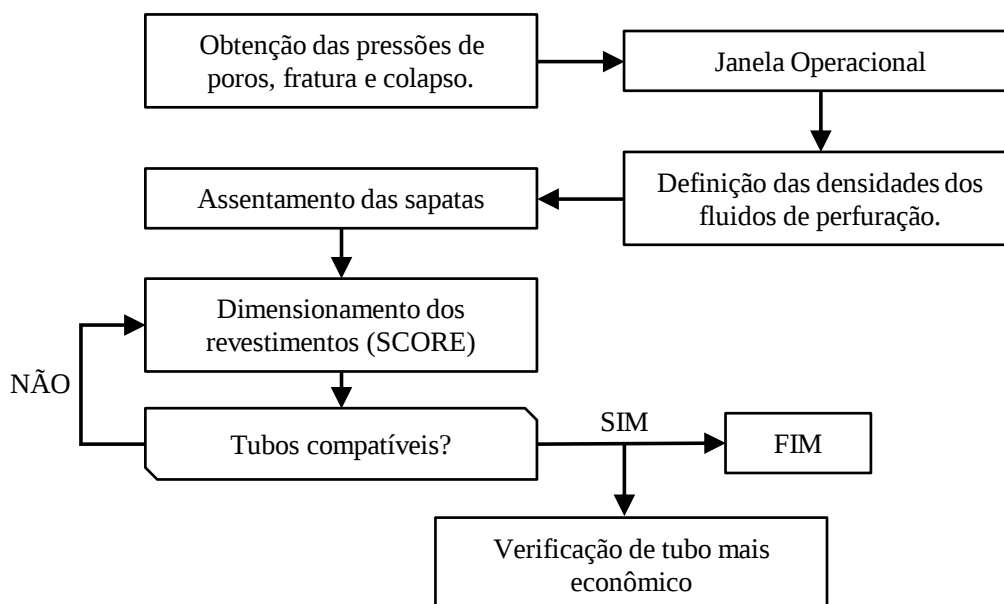
DF - Fator de projeto.

SF - Fator de Segurança.

3.4 METODOLOGIA DE PROJETO DE POÇO

A realização de um projeto de poço passa por diversas fases. A Figura 8 representa o fluxograma para a realização das etapas de um projeto de poço, onde é possível observar que para chegar ao correto dimensionamento dos tubos é preciso saber as pressões que o revestimento estará sujeito, bem como definir o peso dos fluidos de perfuração que serão utilizados, para que não ocasione fraturas que venham prejudicar o poço. Dessa forma trabalhar dentro da janela operacional resulta em um projeto seguro. Em seguida realiza-se a definição da profundidade vertical na qual as sapatas do revestimentos irão ser assentadas. É importante observar que para certificar-se que um tubo é compatível deve-se escolher previamente o mesmo, pois as características do tubo são imprescindíveis para o cálculo das resistências.

Figura 8 – Metodologia de projeto de poço



Fonte: Autor

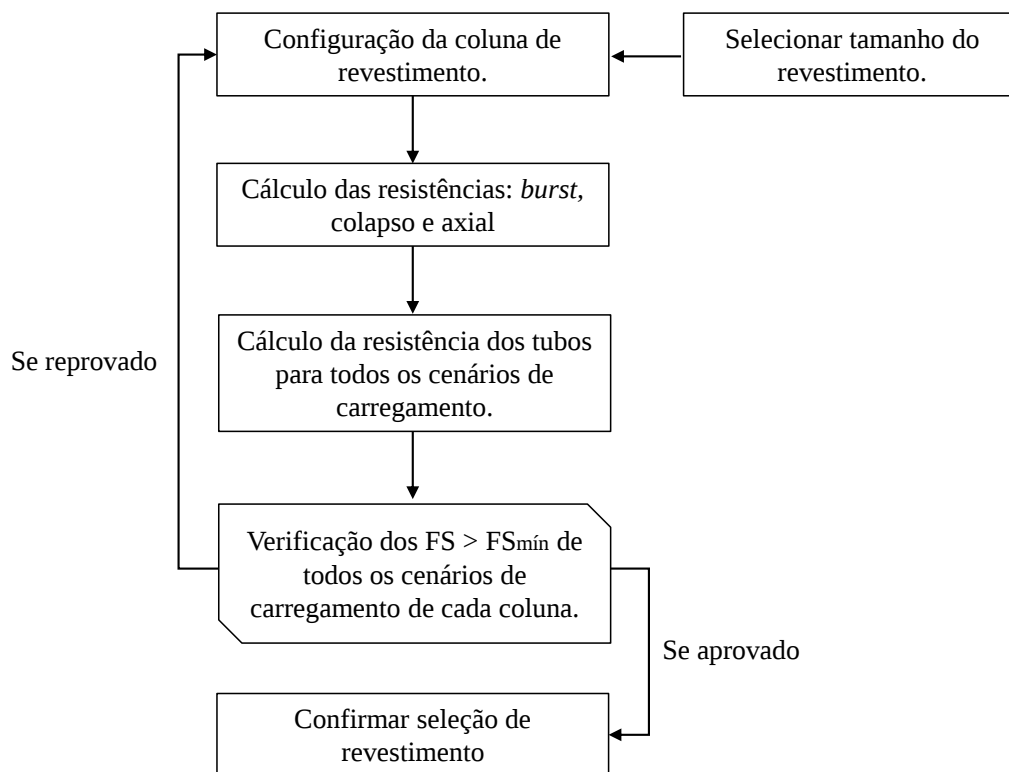
Ao verificar os fatores de segurança é possível confirmar ou alterar a seleção do revestimento, devido tanto a reprovação, como também a altos fatores encontrados. Fatores de segurança acima da margem estabelecida pode ocasionar um oneroso custo ao projeto.

3.5 FLUXO USUAL DE PROJETO

O processo de realização do projeto de revestimento é dividido em três etapas que passam da seleção dos tamanhos do revestimento e das profundidades que estarão submetidos, a definição dos cenários de carregamentos ao qual estarão expostos e o cálculo da magnitude dessas cargas, seleção de um peso e grau do revestimento (FORD, 2005).

A Figura 9 apresenta o fluxo usual de um projeto de revestimento. Onde deve-se configurar a coluna de revestimento e escolher o tubo que será utilizado para posteriormente calcular as resistências e os cenários de carregamento aos quais o revestimento estará sujeito e então após essa verificação observar se os fatores de segurança estão de acordo com os limites aceitáveis. Depois dessa análise é possível confirmar se o tubo resiste ou escolher uma nova configuração. É importante salientar que não é possível selecionar os revestimentos após o cálculos dos carregamentos pois o cálculo do perfil de força axial depende do revestimento selecionado a priori.

Figura 9 – Fluxo usual de projeto de revestimento



Fonte: Autor

4 APLICAÇÃO

Os capítulos anteriores tratam das formulações necessárias para calcular as resistências e solicitações para revestimentos de poços de petróleo. Este capítulo retrata com um exemplo prático o dimensionamento através da aplicação *web SCORE*, assim como, com a utilização de planilhas eletrônicas para a obtenção e comparação dos resultados.

4.1 DETALHAMENTO DO CASO

As Tabelas 9 e 10 apresentam os dados de entrada para o dimensionamento do revestimento e dados de cimentação e a Tabela 11 mostra os dados de suposição assim como os dados de teste de produção. O caso estudado é uma adaptação do caso exposto por Ford (2005).

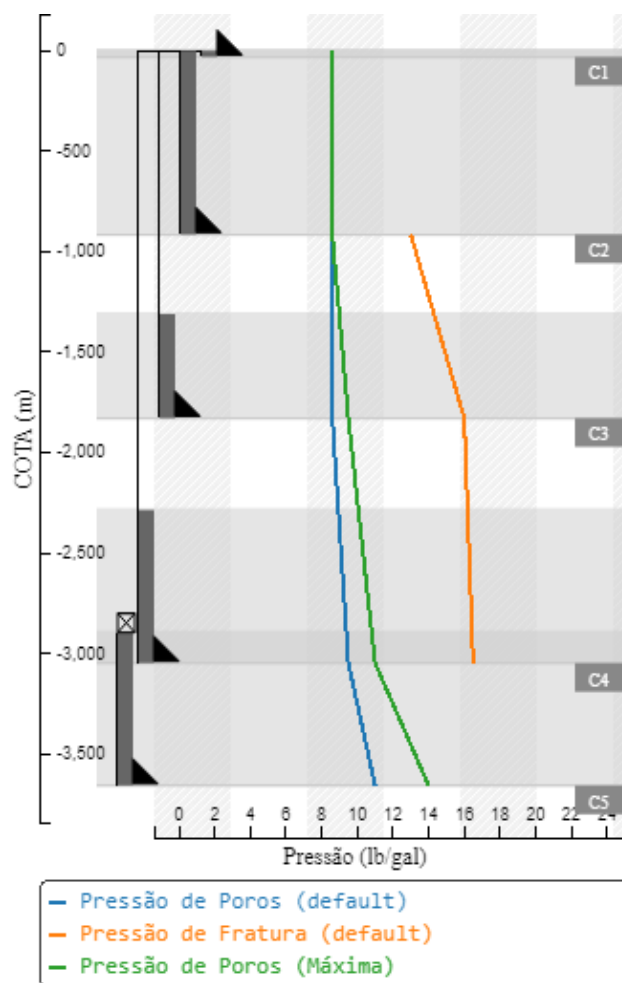
Tabela 9 – Dados de entrada

Tipo	Diâmetro da Broca (in) Profundidade (m)	Diâmetro externo do revestimento (in)	Gradiente de Pressão de poros mínima / máxima esperada (ppg)	Gradiente de pressão esperado LOT (ppg)	Peso do fluido (ppg)
Condutor	36 30,48	30	-	-	-
Superfície	26 914,4	20	8,6	13,0 @ 914,4	9,0
Intermediário	17 1/2 1828,8	13 5/8	8,6 / 9,5	16 @ 1828,8	11,0
Produção	12 1/4 3048	9 5/8	9,5 / 11,0	16,5 @ 3048	14,0
Liner	8 1/2 2895,6 - 3657,6	7"L	11,0 / 14,0	-	15,0

Fonte: Adaptado de Ford (2005)

Com os dados de entrada é possível observar a janela operacional. A Figura 10 apresenta a curva de pressões associadas a este poço.

Figura 10 – Curva de Pressões - Janela Operacional



Fonte: SCORE

Tabela 10 – Dados de Cimentação

Dados de cimentação			
TOC (m)	Lead Slurry (ppg)	Tail Slurry (ppg)	Mixwater (ppg)
-	-	-	-
Superfície	13,5	15,88 152,4 m	8,5
1310,64	13,5	15,88 152,4 m	8,5
2286	13,5	15,88 152,4 m	8,5
2895,6	15,88	15,88 152,4 m	8,5

Fonte: Ford (2005)

Tabela 11 – Dados complementares

Definições de FS mínimos aceitáveis	
FS (Triaxial)	1,125
FS (Burst)	1,1
FS (Colapso)	1,0
FS (Axial)	1,3
Dados de teste de produção	
Densidade do fluido de teste de poço	8,55 ppg
Profundidade do packer de teste	3352,8 m TVD
Profundidade dos canhoneados	3429 m TVD
Pressão no topo dos canhoneados	14,0 ppg

Fonte: Adaptado de Ford (2005)

4.2 DIMENSIONAMENTO DO REVESTIMENTO DE PRODUÇÃO

Para o estudo das resistências deve-se primeiramente escolher um tubo. O tubo selecionado para essa fase um tubo de grau CR13/95KSI, com diâmetro externo de 9 5/8 polegadas, peso linear de 53,5 lb/pé e espessura 0,545 polegadas.

4.2.1 Cenários de *burst*

Os cenários de *burst* contam com uma mesma formulação na pressão externa para todos os perfis, enquanto a pressão interna apresenta uma formulação própria para cada cenário estudado.

4.2.1.1 Teste de Pressão

Para este cenário do revestimento de produção foi considerado uma P_{teste} de 5200 psi, com isso, calculou-se a pressão interna, externa e o diferencial de pressão. Foi possível também observar o erro pertinente ao uso de apenas duas casas decimais na planilha eletrônica em relação a Aplicação *Web SCORE*. Os pontos utilizados na análise representam o topo do revestimento, os pontos anterior e posterior a altura do cimento da fase e a base. Esses valores estão de acordo com a Tabela 12.

O erro relativo percentual é encontrado através da Equação 4.1.

$$\%Erro = \frac{|x - \bar{x}|}{|\bar{x}|} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Onde x representa o resultado de referência do Score e $\bar{x}$ o resultado calculado na planilha eletrônica.

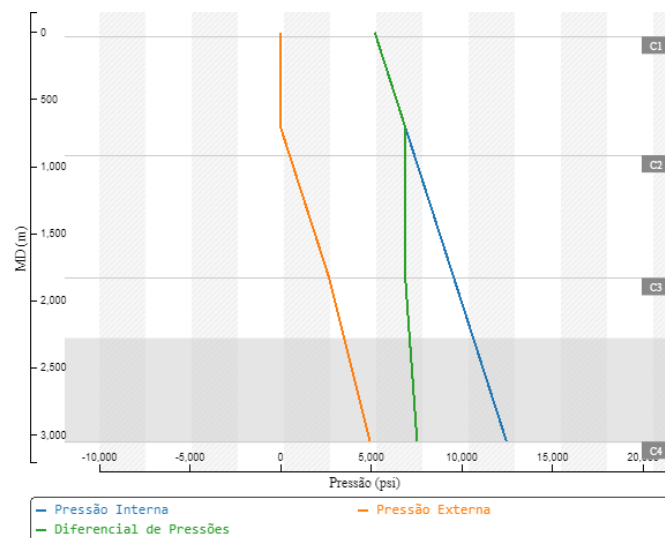
Tabela 12 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de teste de pressão

Calculado			SCORE		Erro (%)		ΔP	
Prof.	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0	5200	0,00	5200	0,00	0,0000	-	5200	5200
2285,99	10653,46	3525,96	10654,52	3525,95	0,0100	0,0000	7127,50	7128,57
2286,01	10653,48	3525,99	10654,57	3525,99	0,0100	0,0000	7127,51	7128,58
3048	12471,31	4934,10	12472,73	4935,06	0,0114	0,0195	7537,21	7537,66

Fonte: Autor

É possível observar que o erro associado às diferenças de pressão encontrados entre as duas formas de cálculo para este cenário é baixo, isto ocorre devido ao truncamento do fator de conversão e devido a profundidade vertical do suspensor, que foi considerada como 0,01 no SCORE e na planilha foi considerada 0,0. Então, com os dados de pressão obtidos foi possível gerar a Figura 11 que apresenta a variação de pressão ao longo da profundidade estudada para este cenário.

Figura 11 – Perfil de pressão para o cenário de teste de pressão



Fonte: Autor

4.2.1.2 Furo na Coluna de Produção

Para este cenário foi considerado uma P_{cab} de 3359,36 psi, um G_{HC} de 1,24 psi/m e ρ_{pf} de 14 psi. Gerando assim os valores apresentados na Tabela 13.

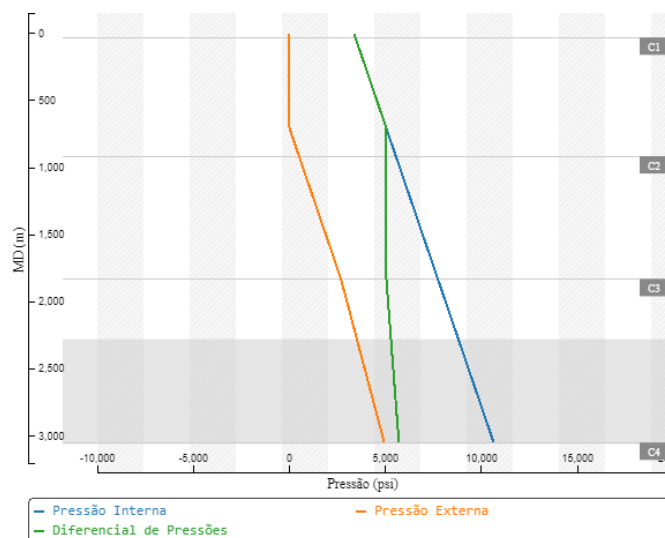
Tabela 13 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de furo na coluna de produção

Prof.	Calculado		SCORE		Erro (%)		ΔP	
	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0	3359,36	0,00	3359,36	0,00	0,0000	-	3359,36	3359,36
2285,99	8812,82	3525,96	8813,88	3525,95	0,01202	0,0000	5286,86	3359,36
2286,01	8812,87	3525,99	8813,92	3525,99	0,01202	0,0000	5286,87	5287,93
3048	10630,67	4934,10	10632,08	4935,06	0,01330	0,01950	5696,57	5697,02

Fonte: Autor

Neste cenário também é possível ver que os erros relacionados às pressões foram mínimos. A Figura 12 apresenta o perfil de pressão ao longo de toda a profundidade vertical do revestimento.

Figura 12 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de furo na coluna de produção



Fonte: Autor

4.2.1.3 Poço Cheio de Fluido da Formação

Para este cenário foi considerado uma profundidade de influxo na sapata do revestimento subsequente (3657,6 metros), gradiente de influxo de 0,45 psi/metro e uma pressão na cabeça de 7081,35. Dessa forma, o poço não está totalmente preenchido com fluido, visto que a $P_{cab} < 10000$ psi, logo é considerado como 70% do fluido invasor e 30% do fluido de perfuração.

A tabela 14 apresenta as pressões internas, externas o erro associado a comparação entre os métodos de cálculo e seu diferencial de pressão.

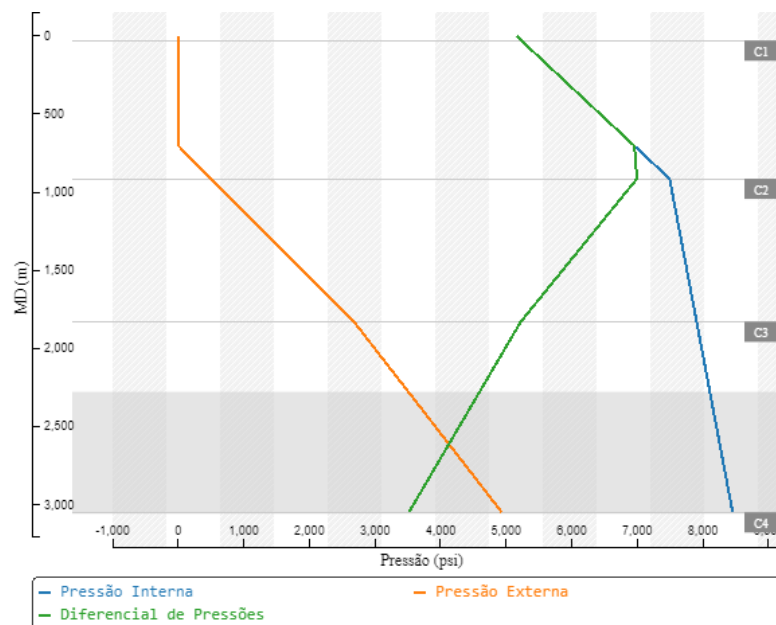
Tabela 14 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de poço com fluido

Prof.	Calculado		SCORE		Erro (%)		ΔP	
	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0	5153,92	0,00	5155,17	0,00	0,0243	-	5153,92	5155,17
914,4	7491,13	498,59	7492,83	498,70	0,0227	0,0218	6992,53	6994,13
1828,81	7902,62	2680,01	7904,32	2680,54	0,0216	0,0197	5222,60	5223,78
2285,99	8108,35	3525,96	8110,05	3525,96	0,0210	0,0000	4582,39	4584,09
2286,01	8108,36	3525,99	8110,06	3525,99	0,0210	0,0000	4582,36	4584,07
3048	8451,25	4934,10	8452,95	4935,06	0,0201	0,0195	3517,15	3517,89

Fonte: Autor

A Figura 13 apresenta a variação da pressão em função da profundidade.

Figura 13 – Perfil de pressão externa para o cenário de poço cheio de fluido.



Fonte: Autor

4.2.2 Cenários de colapso

O cálculo da pressão de *backup* para os cenários de colapso são equivalentes para todos os cenários, exceto para o de cimentação. Este apresenta um perfil de pressão externa próprio. Dessa forma, de maneira análoga aos cenários de *burst* foram encontradas as pressões externas, internas e seu diferencial para os cenários de colapso.

4.2.2.1 Cimentação

As pressões internas e externas, assim como o diferencial de pressão e o erro associado a diferença entre os métodos calculados estão presentes na Tabela 15.

Os pontos selecionados para estudo, foram, assim como os cenários de *burst*, o topo, a base e os pontos subjacentes ao topo do cimento do revestimento. Os cálculos foram feitos utilizando as equações 3.14, 3.15 e 3.16.

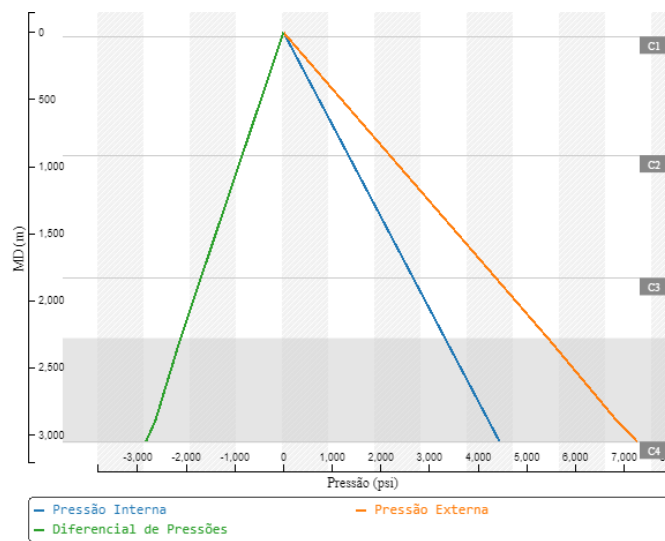
Tabela 15 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de cimentação

Calculado			SCORE		Erro (%)		ΔP	
Prof.	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
2285,99	3330,50	5453,46	3331,15	5454,52	0,0195	0,0195	-2122,95	-2123,37
2286,01	3330,53	5453,51	3331,18	5454,57	0,0195	0,0195	-2122,97	-2123,39
3048,00	4440,69	7271,31	4441,56	7269,61	0,0195	0,0234	-2830,62	-2828,05

Fonte: Autor

Com as pressões foi possível gerar o gráfico Profundidade $\times$ Pressão. A Figura 14 apresenta o gráficos gerado através do Score.

Figura 14 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de cimentação



Fonte: Autor

4.2.2.2 Perda de Circulação

Para este cenário foram considerados o ρ_{zp} como 9,5 lb/gal, a profundidade vertical da zona de perda foi considerada a profundidade da sapata desta fase, e $TV D_p$ foi calculado de acordo com a expressão 3.17 e encontrado um valor de 1117,6 metros. Dessa forma os pontos estudados foram o topo, a profundidade da zona de perda, os pontos subjacentes ao topo do cimento e a profundidade da sapata do revestimento.

A Tabela 16 expõe as pressões encontradas para perda de circulação e seus respectivos erros.

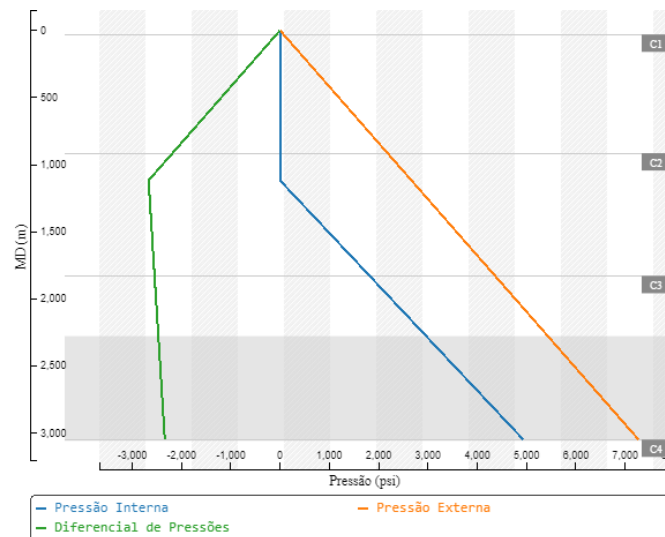
Tabela 16 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de perda de circulação

Prof.	Calculado		SCORE		Erro (%)		ΔP	
	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
1117,6	0,00	2666,15	0,00	2666,67	-	0,0195	-2666,15	-2666,67
2285,99	3330,50	5453,46	2986,99	5454,52	0,0195	0,0195	-2467,05	-2467,53
2286,01	3330,53	5453,51	2987,04	5454,57	0,0195	0,0195	-2467,05	-2467,53
3048,00	4440,69	7271,31	4935,06	7272,73	0,0195	0,0195	-2337,21	-2337,66

Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta o perfil de pressão para este cenário. A pressão interna permanece zero até 1117,6 metros onde há a queda vertical do fluido devido a perda.

Figura 15 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de perda de circulação



Fonte: Autor

4.2.2.3 Esvaziamento Parcial

Para este cenário foi considerado um G_f de 2,386 psi/m, uma P_{can} de 6136,19 psi e um $TVDe$ de 857,25 metros. A Tabela 17 retrata os valores de pressão e o erro associado a este cenário.

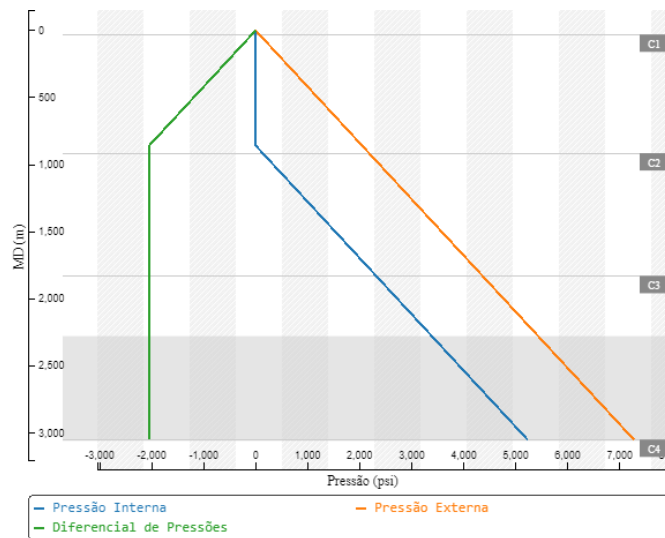
Tabela 17 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para o cenário de esvaziamento parcial

Prof.	Calculado		SCORE		Erro (%)		ΔP	
	Pi	Pa	Pi	Pa	Pi	Pa	Calculado	Score
0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
857,25	0,00	2045,06	0,00	2045,46	-	0,01962	-2045,06	-2045,45
2285,99	3408,97	5453,46	3409,06	5454,52	0,00267	0,01950	-2044,48	-2045,46
2286,01	3409,02	5453,51	3409,11	5454,57	0,00267	0,01950	-2044,48	-2045,46
3048,00	5227,13	7271,31	5227,27	7272,73	0,00269	0,01950	-2044,18	-2045,46

Fonte: Autor

Com os dados obtidos foi possível gerar o perfil gráfico para este cenário, como mostra a Figura 16. Neste cenário a pressão interna é zero até a altura vertical onde há o esvaziamento parcial da coluna, chegando a 5227,13 psi na sapata do revestimento. Já a pressão externa não é nula até o ponto de esvaziamento e chega a 7272,31 psi na sapata.

Figura 16 – Perfil de pressão do revestimento de produção para o cenário de esvaziamento parcial



Fonte: Autor

4.2.3 Força Axial

O cálculo da força axial é a junção de alguns fatores, sendo eles: peso próprio, efeito pistão e efeito balão. Como o efeito pistão é uma força concentrada nos ombros do revestimento e o problema proposto não contém ombros, o único cenário a que foi considerado o efeito dessa força foi o cenário de cimentação, pois, no momento anterior a cimentação do revestimento não há influência do efeito balão, somente a influência do peso próprio e do efeito pistão localizado na sapata do revestimento.

Os cálculos aqui encontrados foram feitos utilizando as Equações 3.23 à 3.27.

O perfil de cimentação é considerado o perfil inicial para os demais perfis estudados, dessa forma, as variações médias de pressão externa e interna obtidas e apresentadas nas tabelas seguintes são entre o estudo do perfil que se deseja analisar e o perfil de cimentação.

A Tabela 18 apresenta os dados encontrados para a força axial no cenário de cimentação, onde a força axial foi considerada como a junção entre o peso próprio e a força pistão de compressão que ocorre na sapata do revestimento de produção.

Tabela 18 – Forças axiais para o perfil de cimentação

Prof.	Calculado			SCORE	Erro Relativo
	Peso próprio	Força Pistão	Força axial	Força axial	
0,00	535000,02	-274992,19	260007,83	260180,60	0,0007
700,00	412132,83	-274992,19	137140,64	137313,14	0,0013
750,00	403356,58	-274992,19	128364,39	128536,90	0,0013
800,00	394580,32	-274992,19	119588,13	119760,65	0,0014
857,25	384531,51	-274992,19	109539,32	-	-
900,00	377027,82	-274992,19	102035,63	102208,16	0,0017
914,40	374500,26	-274992,19	99508,07	-	-
1100,00	341922,46	-274992,19	66930,27	67103,17	0,0026
1117,60	338833,22	-274992,19	63841,02	-	-
1200,00	324369,95	-274992,19	49377,76	49550,68	0,0035
1828,81	213998,39	-274992,19	-60993,80	-60820,81	0,0028
2285,99	133751,85	-274992,19	-141240,34	-141067,30	0,0012
2286,01	133748,34	-274992,19	-141243,85	-141070,81	0,0012
3048,00	0,00	-274992,19	-274992,19	-274819,05	0,0006

Fonte: Autor

Ao analisar as variações de pressões no decorrer da profundidade do revestimento deve-se decompor esse perfil em intervalos e dessa forma examinar os trechos livre e cimentado. Dessa forma, a força balão encontrada nos pontos onde há o trecho livre é somada, tornando-se uma única força no intervalo. Enquanto nos pontos onde há o trecho cimentado deve-se analisar o ponto em questão e não mais o intervalo, pois o trecho cimentado está fixo e o efeito balão é local.

Diferente do cenário de cimentação a força axial dos demais cenários leva em consideração a soma entre peso próprio e as forças devido ao efeito balão.

As Tabelas de 19 a 23 apresentam o perfil de forças axiais para os cenários de perda de circulação, esvaziamento parcial, teste de pressão, furo na coluna e poço com fluido, respectivamente. A força axial foi validada de acordo com os dados obtidos através do SCORE, sendo assim, a diferença entre o calculado e a aplicação advém de um erro propagado dos perfis de pressões internas e externas anteriormente calculados.

Tabela 19 – Forças axiais para o perfil de perda de circulação

Calculado				SCORE		
Prof.	Pi	Pa	Força Balão	Força Axial	Força axial	Erro Relativo
0,00	0,00	0,00	-30966,10	229041,72	229208,66	0,0007
1100,00	0,00	2624,16		35964,16	36131,24	0,0046
1117,60	0,00	2666,15		32874,92	33042,35	0,0051
1200,00	210,61	2862,72		18411,66	18578,74	0,0090
2285,99	2986,40	5453,46		-172206,45	-172039,23	0,0010
2286,01	2986,46	5453,51	-11811,87	-153055,72	-152884,64	0,0011
3048,00	4934,10	7271,31	16937,77	-258054,42	-258014,04	0,0002

Fonte: Autor

Tabela 20 – Forças axiais para o perfil de esvaziamento parcial

Calculado				SCORE		
Prof.	Pi	Pa	Força Balão	Força Axial	Força axial	Erro Relativo
0,00	0,00	0,00	-20595,07	239412,75	239575,38	0,0007
800,00	0,00	1908,48		98993,06	99155,42	0,0016
857,25	0,00	2045,06		88944,25	89106,80	0,0018
900,00	102,00	2147,04		81440,56	81602,93	0,0020
2285,99	3408,97	5453,46		-161835,42	-161672,51	0,0010
2286,01	3409,02	5453,51	2694,32	-138549,53	-138395,70	0,0011
3048,00	5227,13	7271,31	26996,80	-247995,39	-247983,22	0,0000

Fonte: Autor

Tabela 21 – Forças axiais para o perfil de teste de pressão

Calculado				SCORE		
Prof.	Pi	Pa	Força Balão	Força Axial	Força axial	Erro Relativo
0,00	5200,00	0,00	278213,00	538220,82	538337,70	0,0002
700,00	6869,92	0,00		415353,63	415470,25	0,0003
750,00	6989,20	106,40		406577,38	406694,00	0,0003
1828,81	9562,81	2680,01		217219,20	217336,30	0,0005
2285,99	10653,46	3479,83		136972,65	137089,81	0,0009
2286,01	10653,51	3479,88	337543,09	196299,24	194519,87	0,0091
3048,00	12471,31	4934,10	377707,58	102715,38	102791,32	0,0007

Fonte: Autor

Tabela 22 – Forças axiais para o perfil de furo na coluna de produção

Calculado				SCORE		
Prof.	Pi	Pa	Força Balão	Força Axial	Força axial	Erro Relativo
0,00	3359,36	0,00	214825,64	474833,47	475152,37	0,0007
700,00	5029,28	0,00		351966,28	352284,9167	0,0009
750,00	5148,56	106,40		343190,03	343508,67	0,0009
1828,81	7722,17	2680,01		153831,84	154150,9666	0,0021
2285,99	8812,82	3525,96		73585,30	73904,48	0,0043
2286,01	8812,87	3525,99	272344,61	131100,75	131334,26	0,0018
3048,00	10630,67	4934,10	314522,13	39529,94	39605,72	0,0019

Fonte: Autor

Tabela 23 – Forças axiais para o perfil de poço com fluido da formação

Calculado				SCORE		
Prof.	Pi	Pa	Força Balão	Força Axial	Força axial	Erro Relativo
0,00	5153,923	0,00	253582,62	513590,44	513731,52	0,0003
700,00	6943,123	0,00		390723,25	390864,07	0,0004
750,00	7070,923	106,40		381947,00	382087,82	0,0004
914,40	7491,129	498,59		353090,68	353231,70	0,0004
1828,81	7902,615	2680,01		192588,82	192730,12	0,0007
2285,99	8108,346	3479,817		112342,27	112483,63	0,0013
2286,01	8108,355	3479,864	250173,94	108930,08	107171,92	0,0164
3048,00	8451,251	4934,102	239707,12	-35285,07	-35199,40	0,0024

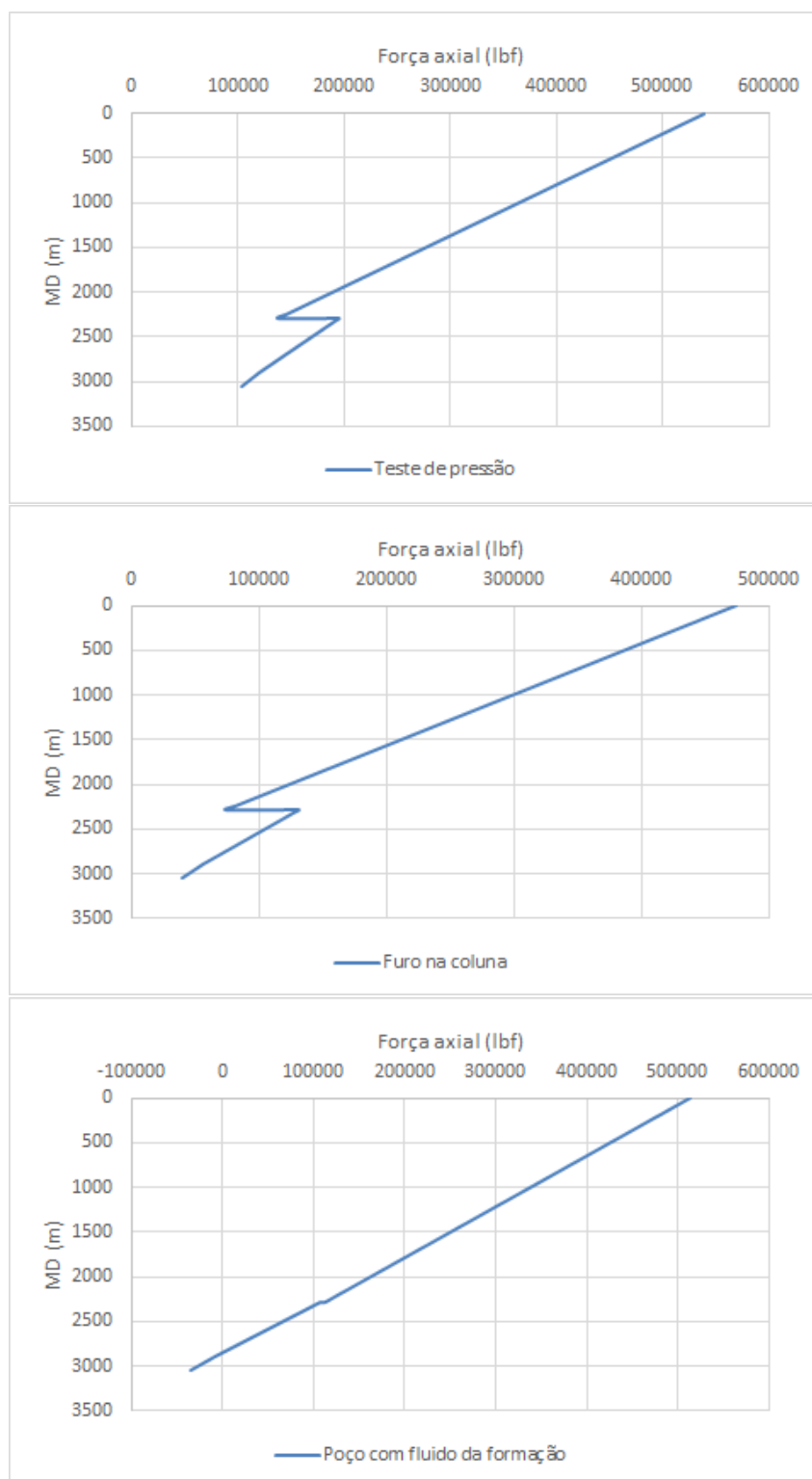
Fonte: Autor

Para todos os cenários estudados foram consideradas suas particularidades, encontrando dessa forma as pressões interna e externa, força balão e força axial para cada ponto estudado.

A Figura 17 apresenta os perfis de força axial dos cenários de teste de pressão, furo na coluna de produção e poço com fluido produtor, respectivamente.

Nas Figuras 17 e 18 os pontos de alteração dos gráficos acontecem no topo do cimento.

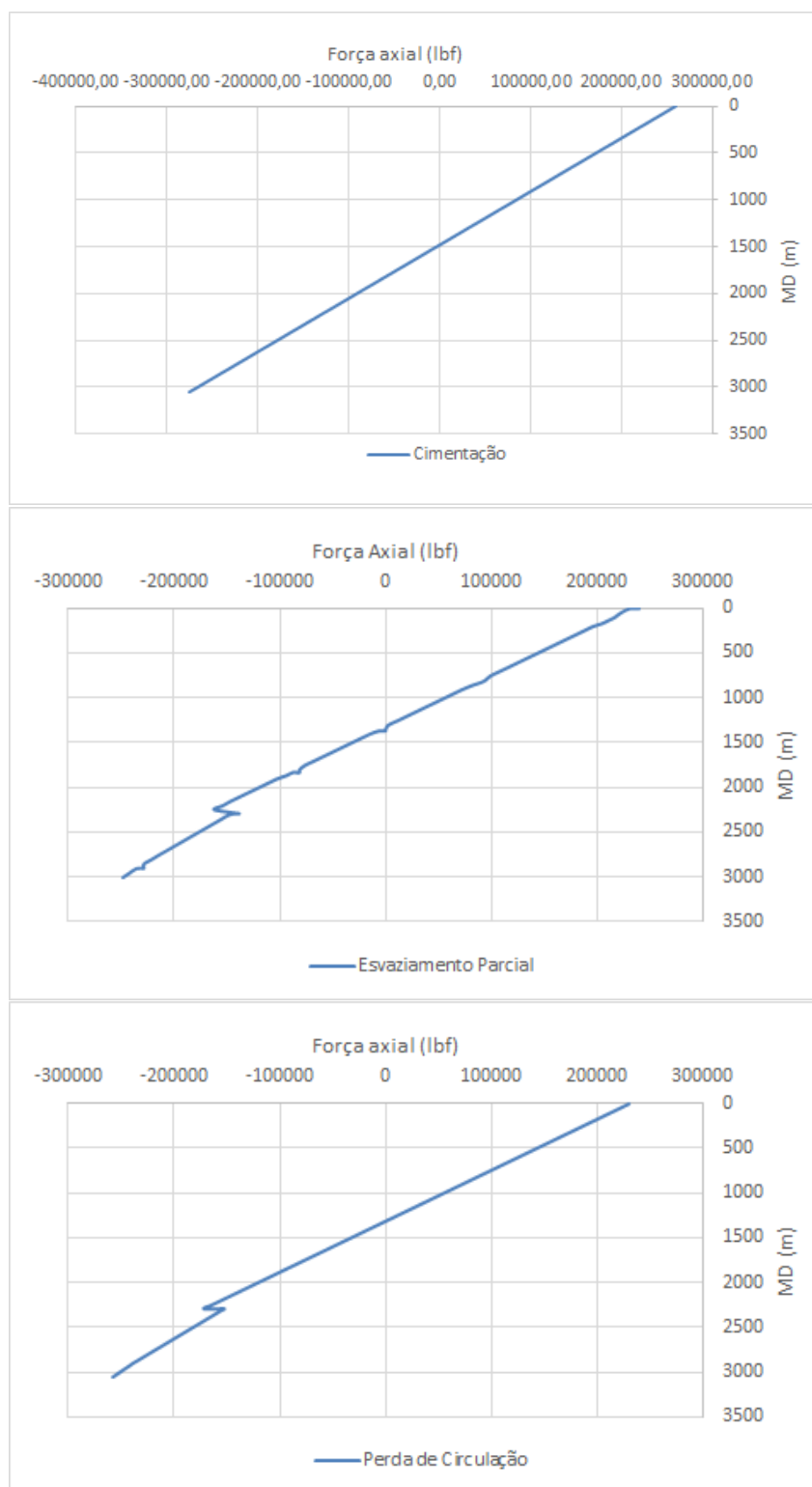
Figura 17 – Força Axial Para Cenários de Burst - Revestimento de Produção



Fonte: Autor

A Figura 18 apresenta os perfis de força axial para os cenários de cimentação, esvaziamento parcial e perda de circulação, respectivamente.

Figura 18 – Força Axial Para Cenários de Colapso - Revestimento de Produção



Fonte: Autor

4.2.4 Cálculo dos Fatores de Segurança

As Tabelas 24 e 25 apresentam os fatores de segurança encontrados para os cenários de colapso, burst, triaxial e axial.

É importante salientar que o cálculo das resistências ao colapso reduzido levam em consideração a componente axial e que para o presente trabalho, a força axial foi simplificada, levando em consideração apenas a ação do peso próprio e do efeito balão.

Os fatores de segurança foram limitados a 20, ou seja, qualquer valor igual ou superior foi exposto como o limite estabelecido.

Tabela 24 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento produtor

Cenários	Profundidade	FS - Calculado			FS - SCORE		
		Colapso	Triaxial	Axial	Colapso	Triaxial	Axial
Cimentação	0	20	5,68	5,68	20	5,68	5,68
	3048	2,20	4,14	5,37	2,20	4,14	5,37
Perda de Circulação	0	20	6,45	6,45	20	6,44	6,44
	3048	2,54	5,01	5,72	2,53	5,01	5,72
Esvaziamento Parcial	0	20	6,17	6,17	20	6,16	6,16
	3048	2,79	5,72	5,95	2,78	5,72	5,96

Fonte: Autor

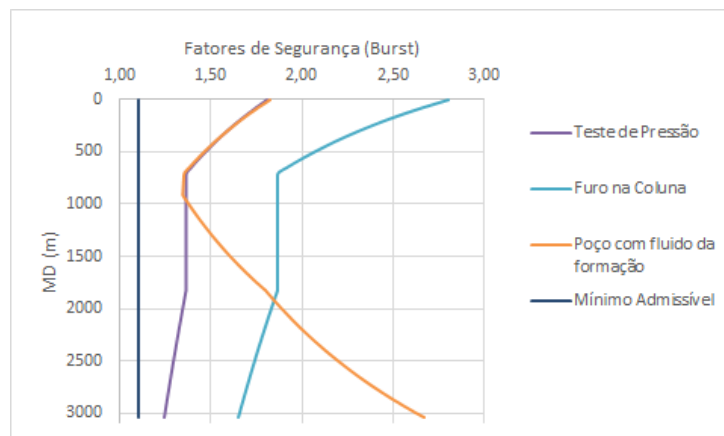
Tabela 25 – Fatores de Segurança de *burst* para revestimento produtor

Cenários	Profundidade	FS - Calculado			FS - SCORE		
		Burst	Triaxial	Axial	Burst	Triaxial	Axial
Teste de Pressão	0	1,81	2,14	2,74	1,81	2,12	2,74
	3048	1,25	1,50	14,38	1,25	1,50	14,37
Poço Cheio de Fluido	0	1,83	2,19	2,87	1,83	2,15	2,87
	3048	2,68	3,13	20	2,67	3,13	20
Furo na Coluna	0	2,80	2,96	3,11	2,80	2,90	3,11
	3048	1,65	1,97	20	1,65	1,97	20

Fonte: Autor

As Figuras 19 e 20, representam os perfis de variação dos fatores de segurança de toda a coluna do revestimento, onde é possível ver a profundidade vertical onde houve o fator de segurança máximo e mínimo. Enquanto a Figura 22 apresenta a envoltória API de acordo com o critério triaxial de von Mises. De acordo com a análise dos gráficos é possível constatar que o tubo resiste para os cenários estudados.

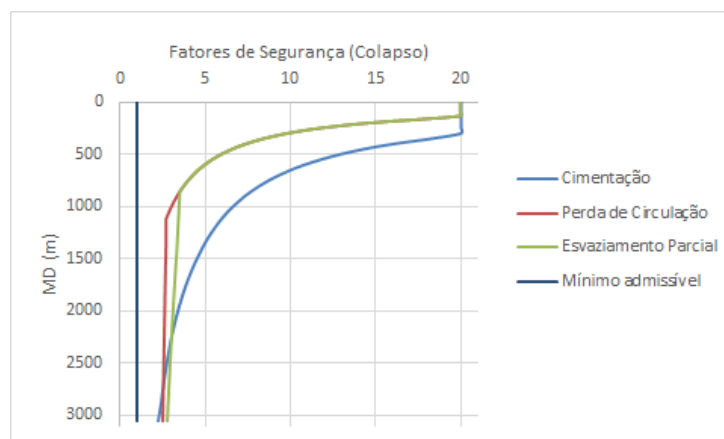
A Figura 19 apresenta os cenários de *burst* e mostram uma variação em toda a profundidade vertical. O cenário que mais aproximou-se do limite mínimo aceitável (1,1) foi o de teste de pressão (1,25), isso ocorreu devido aos altos valores de pressão interna calculados, que consequentemente geram uma maior variação de pressão, os demais casos tiveram limite mínimo de 1,65 para o cenário de furo na coluna e 1,35 para o de poço com fluido.

Figura 19 – Fatores de segurança para cenários de *burst* do revestimento de produção

Fonte: Autor

Os cenários de colapso tiveram fatores de segurança acima do mínimo permitido (1,0). A Figura 20 apresenta os cenários de cimentação, perda de circulação e esvaziamento parcial mostrando que seus fatores de segurança variaram ao longo da profundidade. Sendo encontrado os FS mínimos de 2,20 para cimentação, 2,53 para perda de circulação e 2,78 para esvaziamento parcial. Observou-se também que os menores valores dos fatores encontrados são na sapata do revestimento, isso ocorre devido ao maior diferencial de pressão na sapata.

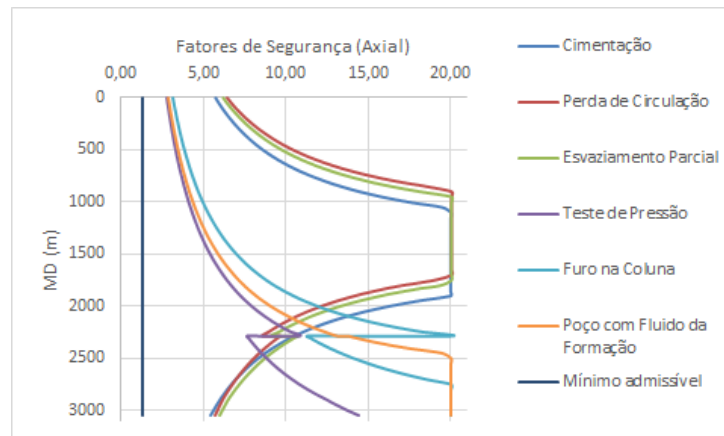
Figura 20 – Fatores de segurança para cenários de colapso do revestimento de produção



Fonte: Autor

A Figura 21 apresenta a variação dos fatores de segurança axiais para todos os cenários. Observou-se que todos os cenários estudados estavam acima do limite de segurança axial de 1,3.

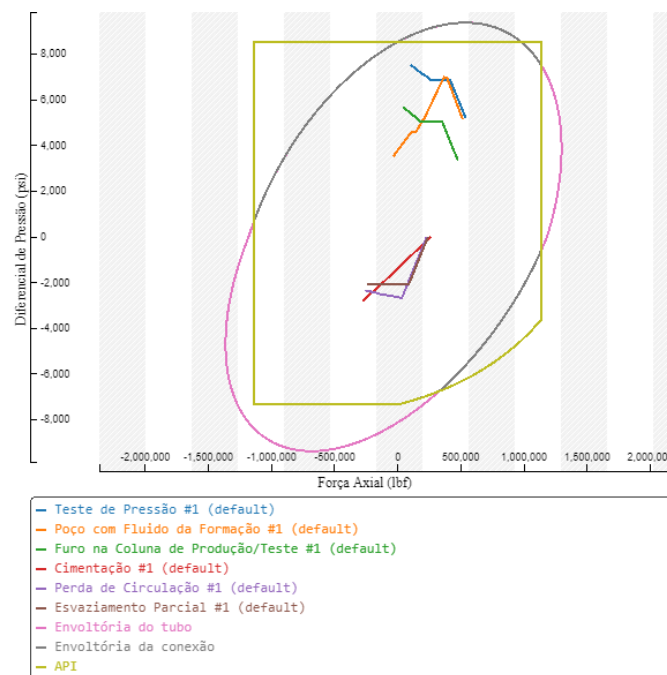
Figura 21 – Fatores de segurança axial para o revestimento de produção



Fonte: Autor

Para uma melhor visualização de todos os cenários estudados é possível plotar um gráfico contendo a envoltória API e de von Mises sobrepostas. Onde os valores positivos encontrados no eixo vertical representam os cenários de *burst*, enquanto os valores negativos os de colapso. O eixo horizontal apresenta a força axial que o revestimento está submetido, assim sendo, os valores da direita informam que o tubo está sujeito a tração e o da esquerda compressão. Como mostra a Figura 22 o tubo escolhido está dentro dos limites de segurança imposto pelo projeto.

Figura 22 – Fatores de segurança para critério triaxial do revestimento de produção



Fonte: Autor

4.3 DIMENSIONAMENTO DAS DEMAIS FASES

Para o dimensionamento dos demais revestimentos o método de análise foi análogo ao utilizado no revestimento de produção.

4.3.1 Revestimento de Superfície

Para este revestimento foram considerados os cenários de teste de pressão e poço cheio de fluido para *burst* e perda de circulação e cimentação para colapso. Foi selecionado para o estudo dessa fase um tubo de grau X-56, com diâmetro externo de 20 polegadas, peso linear de 132,5 lb/pé e espessura 0,625 polegadas. Com o objetivo de observar se o tubo resiste foi calculada a resistência a pressão interna e externa, sendo a última condicionada ao regime ao qual o tubo se encontra. Para o tubo de grau X-56 foi encontrada uma R_b de 3.062,5 psi e uma P_t de 1.449,14 psi, sendo então encontrado no regime de transição.

4.3.1.1 Cenários de *Burst*

Para este revestimento os cenários estudados foram teste de pressão e poço com fluido da formação. Foram encontradas as pressões internas, externas e o diferencial de pressão, como apresentado na Tabela 26.

Para o cenário de poço com fluido da formação foi considerado a profundidade do influxo a sapata do revestimento intermediário, 1.828,8 metros, um gradiente de influxo de 0,24 psi/metro e uma pressão na cabeça de referência de 1.962,36 psi. Como a pressão na cabeça é menor que 10.000 psi, o cenário de poço com fluido da formação é considerado como não preenchido totalmente com o fluido invasor. Para o teste de pressão foi considerado uma pressão de teste de 1.100 psi.

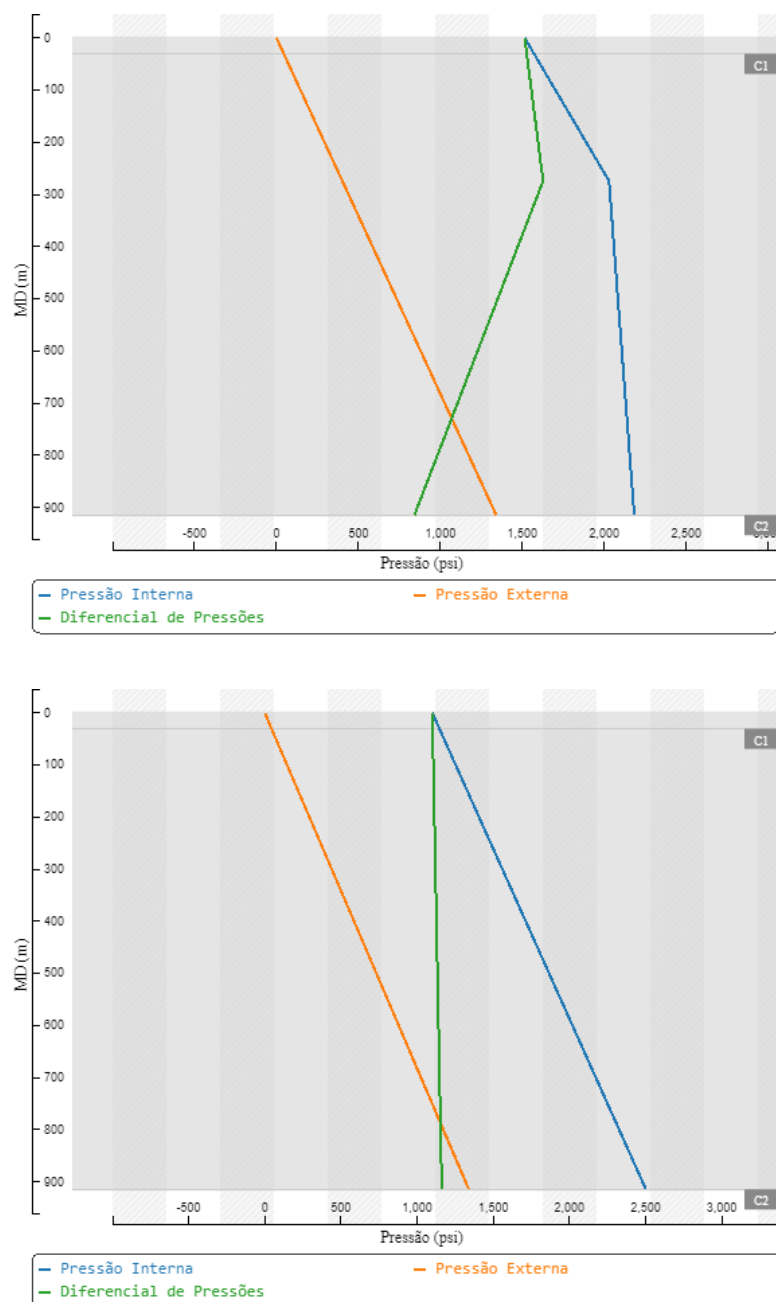
Tabela 26 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para revestimento de superfície

		Calculado		SCORE				
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)	
<i>Burst</i>	Teste de Pressão	0	1100,00	0,00	1100,00	0,00	0,0003	-
		914,4	2502,32	1340,00	2502,60	1340,26	0,0109	0,0195
	Poço Com Fluido da Formação	0	1513,59	0,00	1513,91	0,00	0,0216	-
		914,4	2181,39	1340,00	2181,82	1340,26	0,0195	0,0195

Fonte: Autor

Foram gerados os gráficos para os cenários de poço com fluido e teste de pressão, respectivamente, como mostrado na Figura 23. Ao analisar o primeiro gráfico é possível verificar que o comportamento da pressão interna muda em determinado ponto, este local é a profundidade vertical do fluido invasor que para este caso é de 274,32 metros.

Figura 23 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Poço Com Fluido e Teste de Pressão



Fonte: Autor

4.3.1.2 Cenários de Colapso

Foram encontradas as pressões internas, externas e o diferencial de pressão, como retratado na Tabela 27. Para o cenário de perda de circulação têm-se que a profundidade vertical da queda do fluido devido a perda foi em 399,01 metros e a profundidade da perda se deu na sapata do revestimento intermediário.

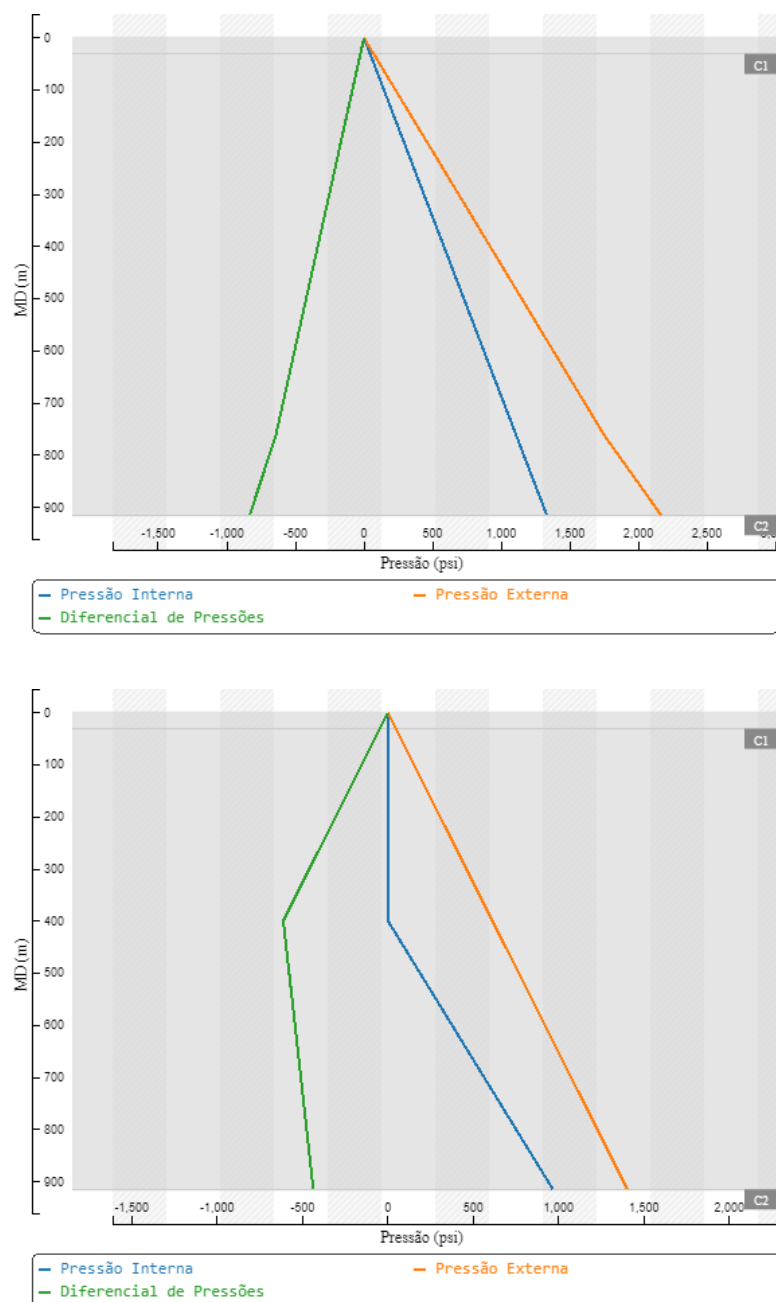
Tabela 27 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para cenários de colapso de revestimento de superfície

		Calculado		SCORE			
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)
Colapso	Cimentação	0	0	0	0	0	-
		914,4	1332,21	2165,71	1332,47	2165,71	0,0197
	Perda de Circulação	0	0	0	0	0	-
		399,01	0	611,92	0	612,04	-
		914,4	966,04	1402,32	966,24	1402,59	0,0197

Fonte: Autor

A Figura 24 mostra o perfil de pressão para os cenários de colapso. A primeira figura mostra o perfil de pressões sofrida no revestimento ao considerar a cimentação do poço, enquanto a segunda figura representa o cenário de perda de circulação.

Figura 24 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Perda de Circulação



Fonte: Autor

4.3.1.3 Força Axial

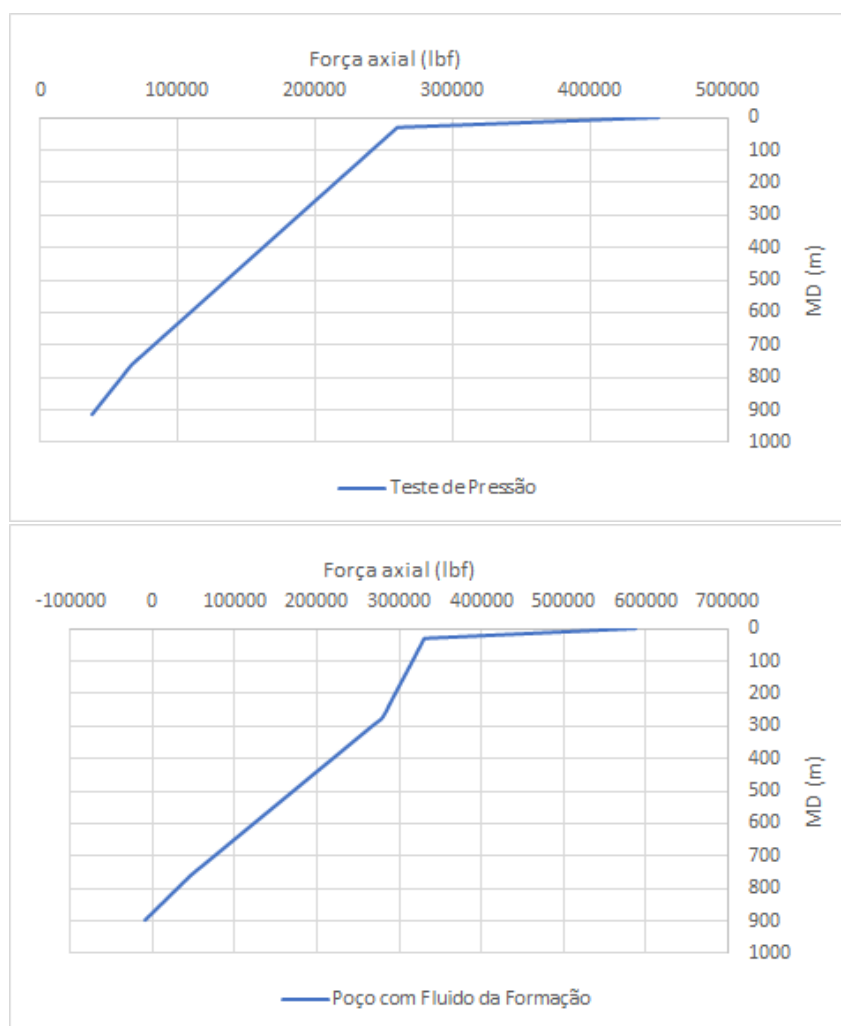
O cenário de teste de pressão gerou forças axiais de 449.314,3 lbf e 36.987,16 lbf no topo e na base do revestimento, enquanto o cenário de poço com fluido da formação gerou 586.459,6 lbf e -16.156,47 lbf, respectivamente.

No cenário de poço com fluido da formação há a interface entre o fluxo invasor e o fluido da fase, neste ponto há uma mudança na força axial, como é possível perceber no gráfico,

a diferença de densidades entre os fluidos geram pesos submersos diferentes o que acarreta essa mudança vista no gráfico.

A Figura 25 mostra os perfis de pressão dos cenários de teste de pressão e poço com fluido produtor, respectivamente.

Figura 25 – Força Axial para Cenários de Burst - Revestimento de Superfície

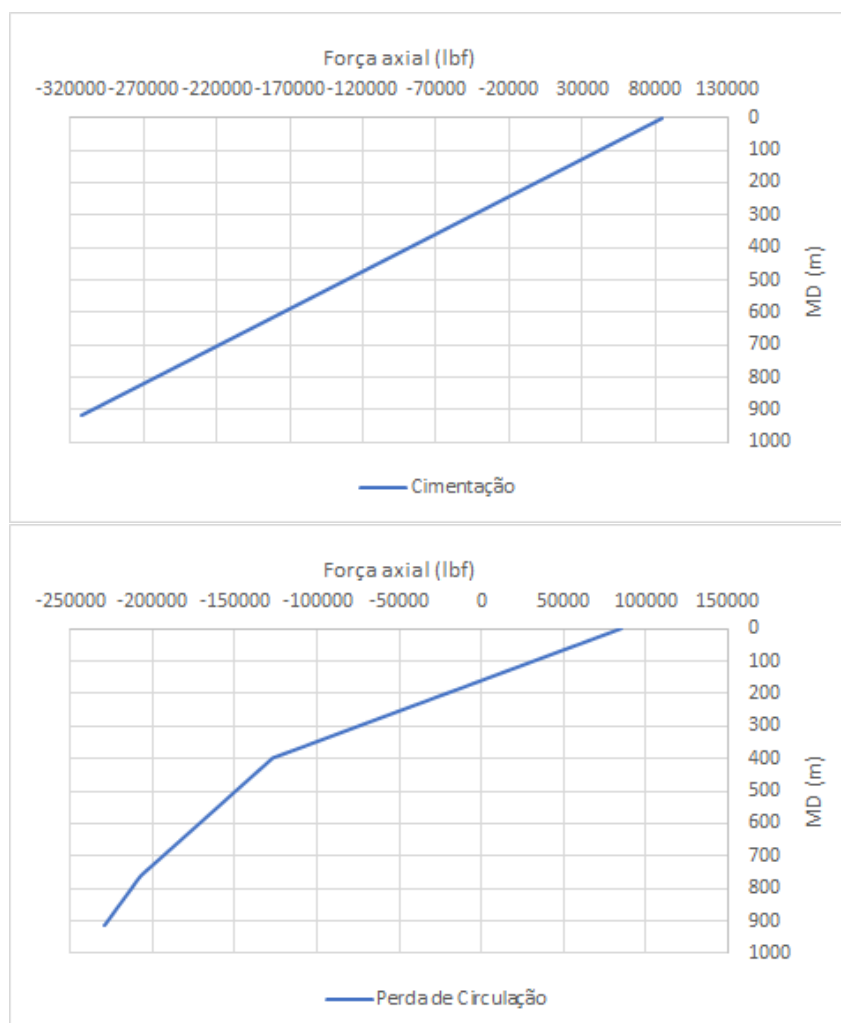


Fonte: Autor

O cenário de cimentação teve 85.036,75 lbf e -312.462,38 lbf em seus extremos, enquanto o cenário de perda de circulação gerou valores de 85.035,79 lbf e -229.291,87 lbf no topo e na base, respectivamente.

A Figura 26 apresenta os perfis de pressão para os cenários de cimentação e perda de circulação, respectivamente.

Figura 26 – Força Axial para Cenários de Colapso - Revestimento de Superfície



Fonte: Autor

4.3.1.4 Fatores de Segurança

Os fatores de segurança encontrados mostram que o tubo em estudo suporta os cenários de carregamento.

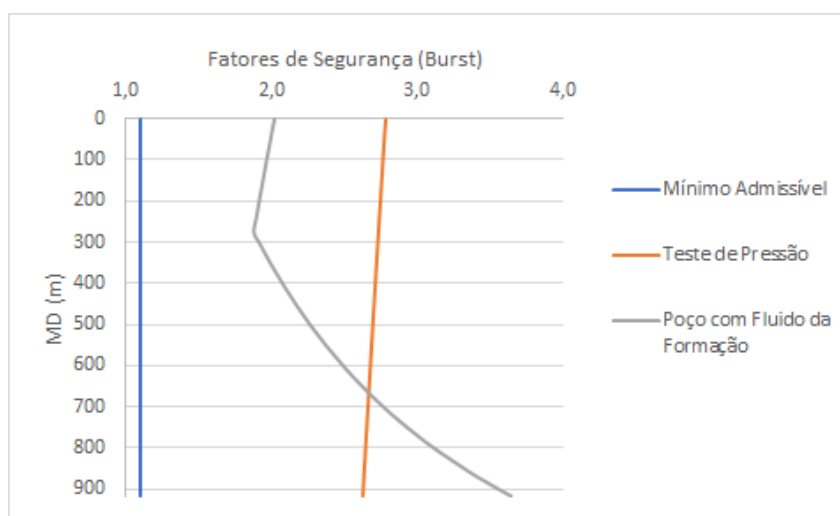
A Tabela 28 apresenta os fatores de segurança encontrados em alguns pontos estudados.

Tabela 28 – Fatores de segurança para o revestimento de superfície

FS - SCORE					
Cenários	Profundidade	Burst	Colapso	Triaxial	Axial
Cimentação	0	20	20	20	20
	914,4	20	1,57	4,69	6,82
Perda de circulação	0	20	20	20	20
	399,01	20	2,35	6,27	16,77
	914,4	20	2,89	8,73	9,29
Teste de pressão	0	2,78	20	3,46	4,74
	914,4	2,63	20	3,16	20
Poço com fluido	0	2,02	20	2,53	3,63
	274,32	1,88	20	2,37	7,64
	914,4	3,64	20	4,27	20

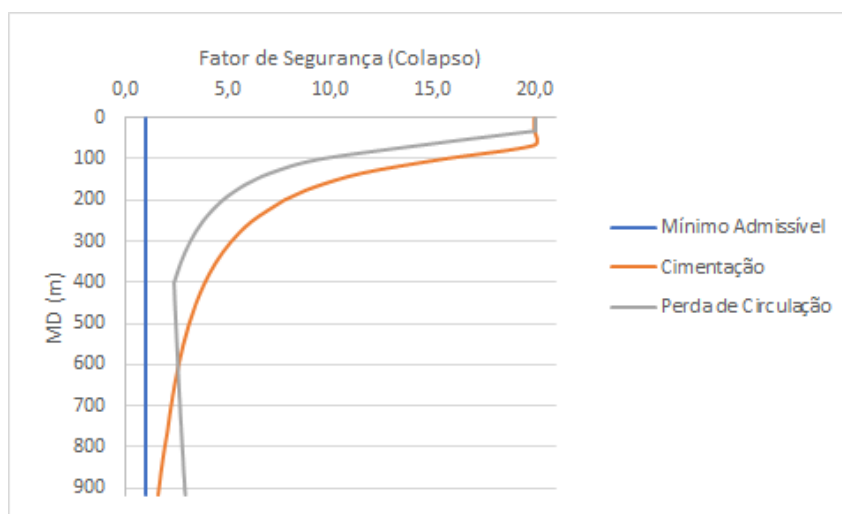
Fonte: Autor

As Figuras 27, 28 e 29 mostram os respectivos cenários de *burst*, colapso e axial e seus fatores de segurança em toda a profundidade do revestimento. É possível observar que todos os cenários encontram-se acima do limite mínimo admissível.

Figura 27 – Fatores de Segurança de *Burst* para revestimento de superfície

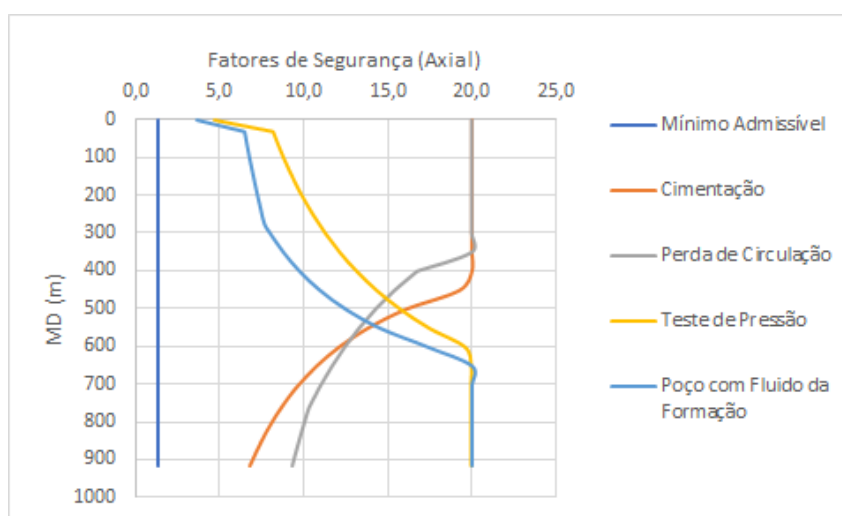
Fonte: Autor

Figura 28 – Fatores de Segurança de Colapso para revestimento de superfície



Fonte: Autor

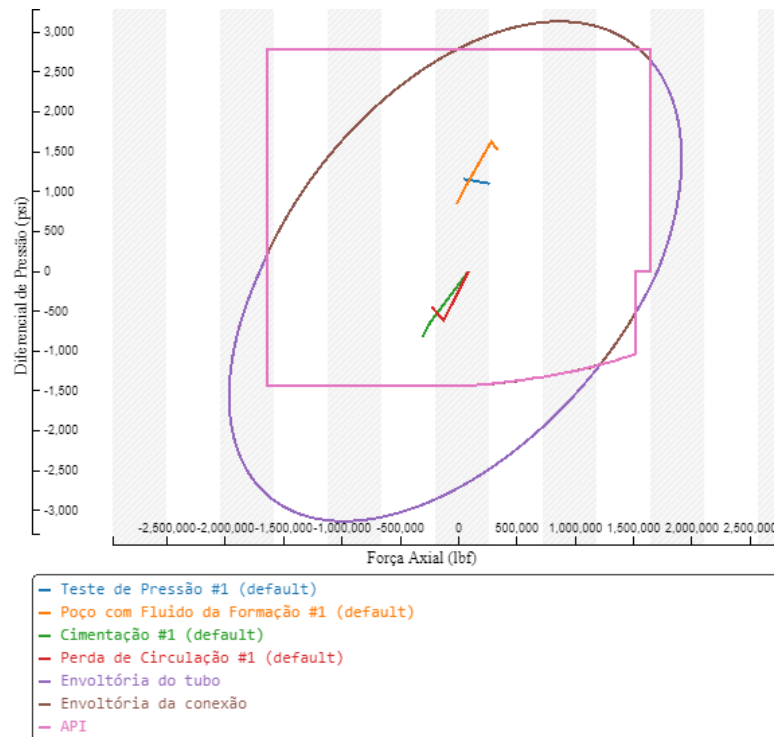
Figura 29 – Fatores de Segurança Axial para revestimento de superfície



Fonte: Autor

Como é possível observar na envoltória gerada através do critério triaxial de von Mises, retratado na Figura 30, o tubo escolhido suporta as cargas impostas.

Figura 30 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises



Fonte: Autor

4.3.2 Revestimento Intermediário

Foram considerados os cenários de teste de pressão e poço cheio de fluido da formação, para *burst*, e perda de circulação e cimentação, para colapso. Foi selecionado para o estudo dessa fase um tubo de grau C-110, com diâmetro externo de 13 5/8 polegadas, peso linear de 88,2 lb/pé e espessura 0,625 polegadas. Para esse tubo foi encontrada uma R_b de 8.830,27 psi e uma P_t de 4.572,40 psi, sendo dessa forma encontrado no regime de transição.

4.3.2.1 Cenários de *Burst*

Para o cenário de teste de pressão foi considerado uma pressão de teste de 3000 psi, no cenário de poço com fluido da formação foi utilizado um gradiente de influxo de 0,37 psi/metro, a profundidade do influxo foi de 3048 metros e a pressão na cabeça foi de 4.586,53 psi.

Foram encontradas as pressões internas, externas e o diferencial de pressão, como retratado na Tabela 29.

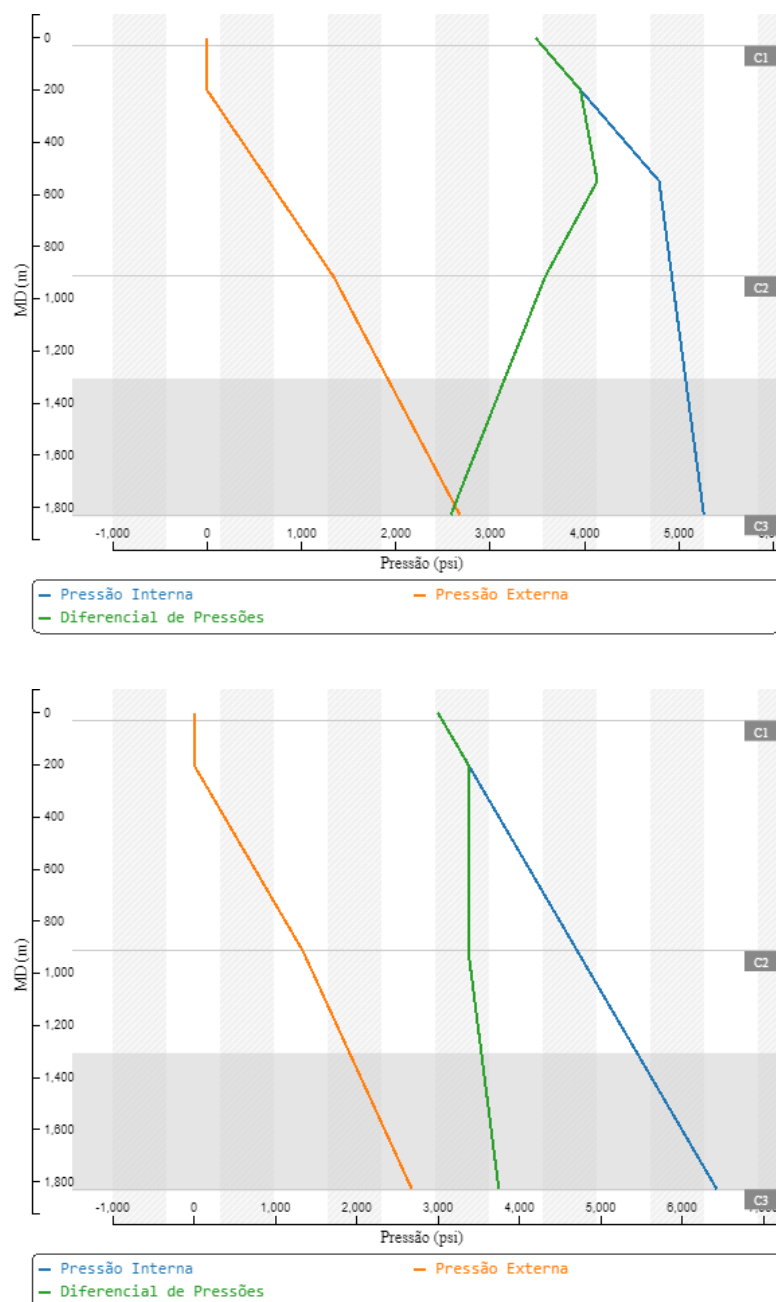
Tabela 29 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para revestimento intermediário

		Calculado		SCORE			
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)
<i>Burst</i>	Teste de Pressão	0	3000	0,00	3000	0,00	0,0000
							x
		1310,63	5456,64	1920,65	5457,12	1921,02	0,0088
		1310,65	5456,68	1920,68	5457,16	1921,05	0,0088
	Poço Com Fluido da Formação	1828,8	6427,90	2680,00	6428,57	2680,52	0,0104
		0	3479,57	0,00	3480,43	0,00	0,0247
		1310,63	5070,34	1920,65	5071,46	1921,02	0,0220
		1310,65	5070,35	1920,68	5071,47	1921,05	0,0220
		1828,8	5262,07	2680,00	5263,18	2680,52	0,0211

Fonte: Autor

A Figura 31 mostra os gráficos gerados para os cenários de *burst*.

Figura 31 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Poço Com Fluido da Formação e Teste de Pressão



Fonte: Autor

4.3.2.2 Cenários de Colapso

A profundidade vertical para queda de fluido, no cenário de perda de circulação foi de 979,71 metros.

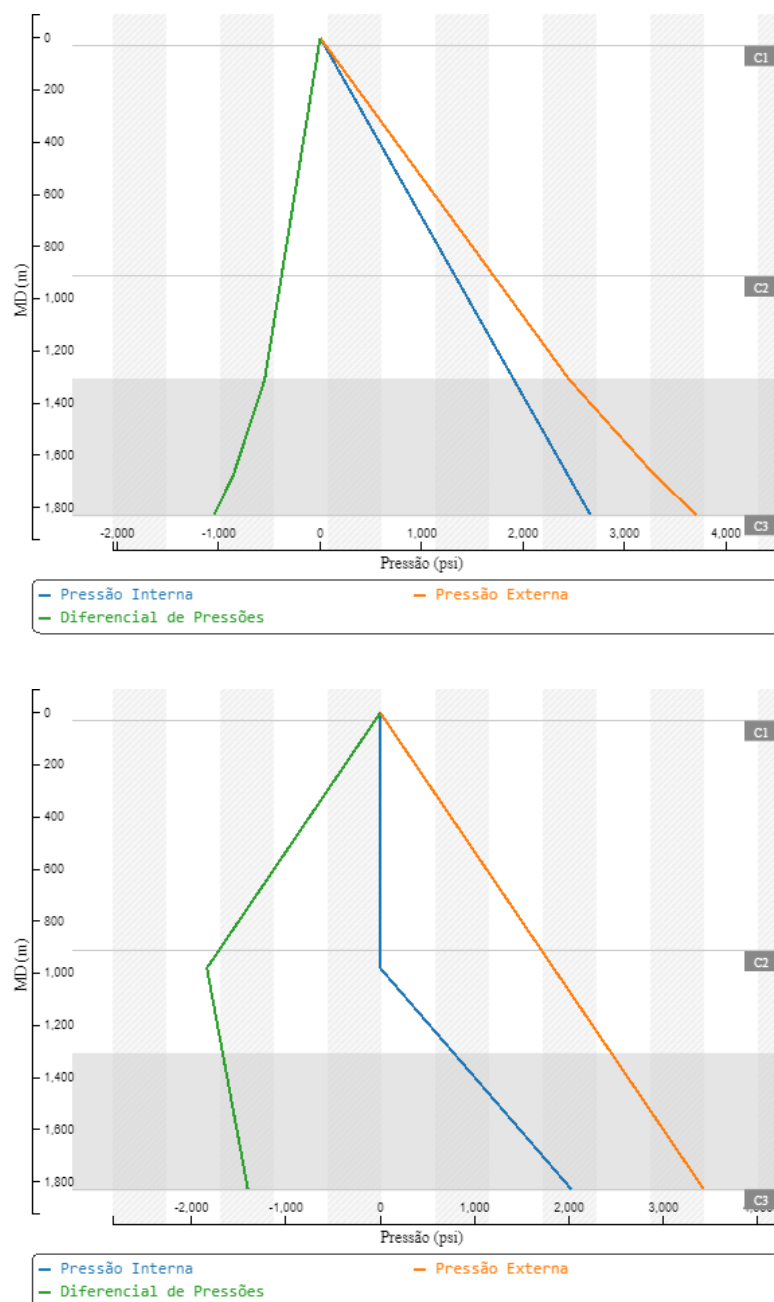
Tabela 30 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para cenários de colapso do revestimento intermediário

		Calculado		SCORE			
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)
Colapso	Cimentação	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-
		1310,63	1909,48	2456,64	1909,86	2457,12	0,0195
		1310,65	1909,51	2456,69	1909,88	2457,17	0,0195
		1828,8	2664,42	3711,17	2664,94	3711,17	0,0195
	Perda de Circulação	0	0,00	0,00	0	0	-
		979,71	0,00	1836,37	0,00	1836,73	-
		1310,63	789,43	2456,64	789,60	2457,12	0,0208
		1310,65	789,48	2456,68	789,64	2457,16	0,0208
		1828,8	2025,58	3427,90	2025,98	3428,57	0,0198
							0,0195

Fonte: Autor

A Figura 32 mostra os gráficos gerados para os cenários de colapso.

Figura 32 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Perda de Circulação



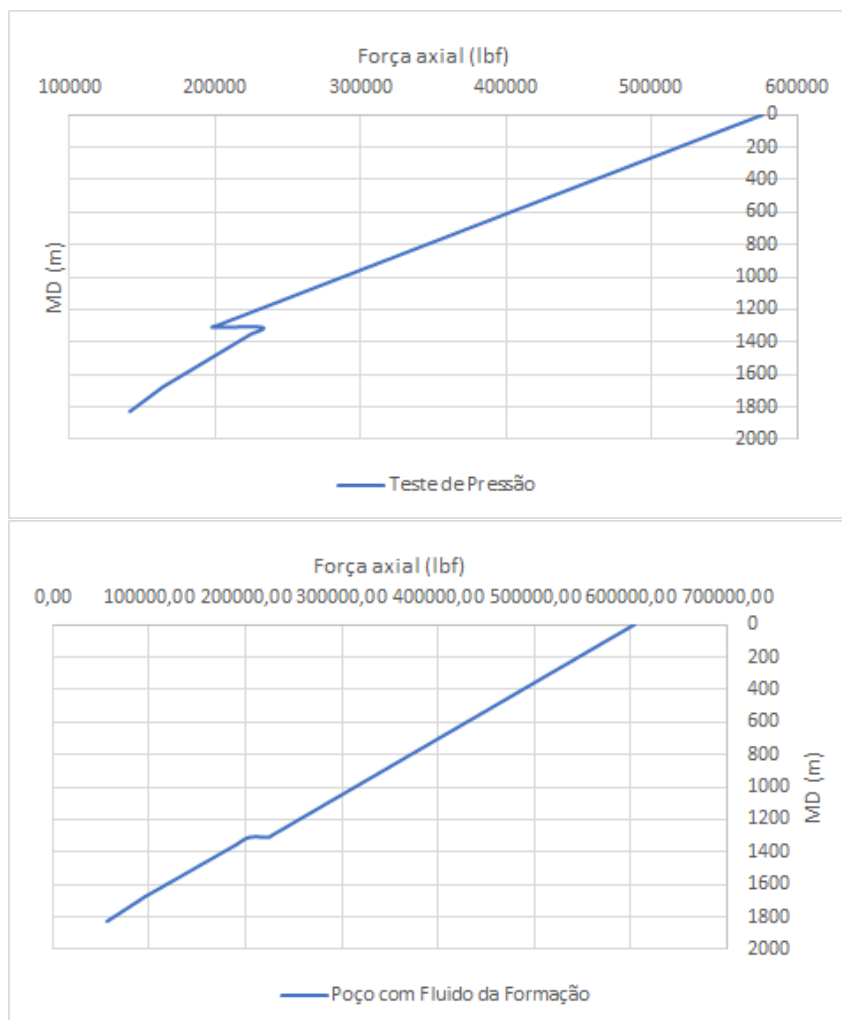
Fonte: Autor

4.3.2.3 Força Axial

A Figura 33 apresenta as forças axiais referentes aos cenários de *burst*, sendo eles teste de pressão e furo na coluna de produção. Os valores encontrados para a força axial do topo e da base do revestimento foram 577.247,57 lbf e 141.201,81 lbf para teste de pressão, enquanto para o cenário de poço com fluido da formação foram de 603.870,43 lbf e 57.100,51, respectivamente.

É possível observar que há uma mudança no comportamento das retas no decorrer da profundidade. Esta alteração representa a diferença entre o trecho livre e o trecho cimentado.

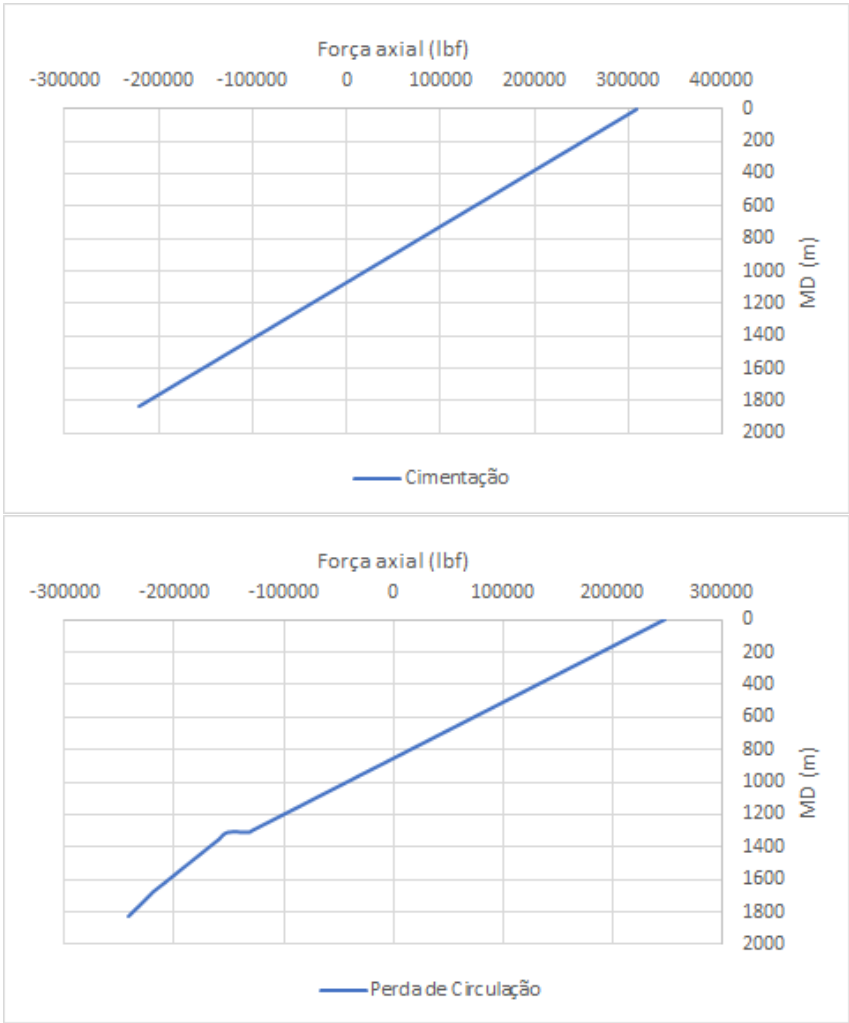
Figura 33 – Força Axial para Cenários de Burst - Revestimento Intermediário



Fonte: Autor

A Figura 34 mostra as forças axiais referentes aos cenários de colapso. O cenário de cimentação resultou uma força no topo de 308.633,01 lbf e na base de -220.566,41 lbf, enquanto o cenário de perda de circulação gerou uma força no topo de 246.913,90 lbf e de -241.954,90 lbf na base.

Figura 34 – Força Axial para Cenários de Colapso - Revestimento Intermediário



Fonte: Autor

4.3.2.4 Fatores de Segurança

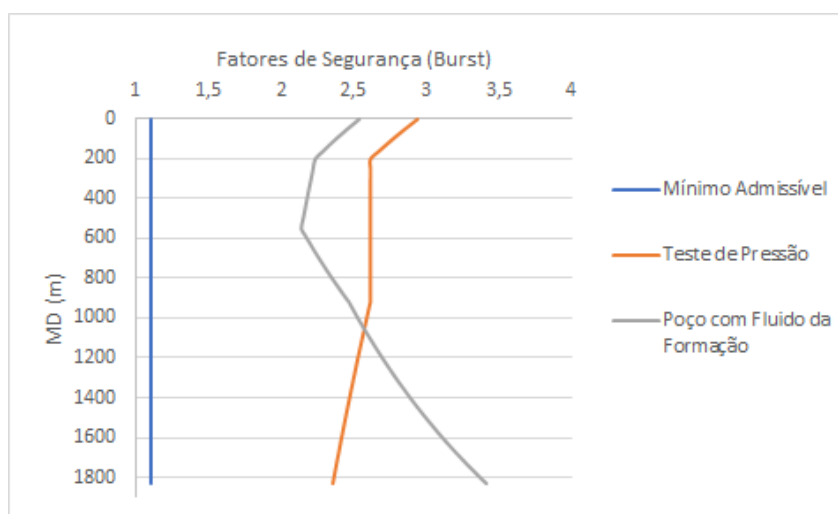
A Tabela 31 apresenta os valores dos fatores de segurança para alguns pontos, sendo eles, topo, TOC - 0,01, TOC +0,01 e base. No cenário de perda de circulação foi acrescentado a profundidade da queda do fluido.

Tabela 31 – Fatores de Segurança para o revestimento intermediário

Cenários	FS - SCORE				
	Profundidade	Burst	Colapso	Triaxial	Axial
Cimentação	0	20	20	7,28	7,28
	1310,63	20	8,82	18,74	20
	1310,65	20	8,82	18,74	20
	1828,8	20	4,94	10,63	12,73
Perda de circulação	0	20	20	9,10	9,10
	979,71	20	3,47	5,42	20
	1310,63	20	3,66	6,37	20
	1310,65	20	3,66	6,44	18,53
	1828,8	20	4,01	7,92	11,60
Teste de pressão	0	2,94	20	3,35	3,89
	1310,63	2,50	20	3,08	11,35
	1310,65	2,50	20	3,10	9,67
	1828,8	2,36	20	2,87	15,91
Poço com fluido da Formação	0	2,54	20	2,98	3,72
	1310,63	2,80	20	3,50	10
	1310,65	2,80	20	3,49	10,99
	1828,8	3,42	20	4,14	20

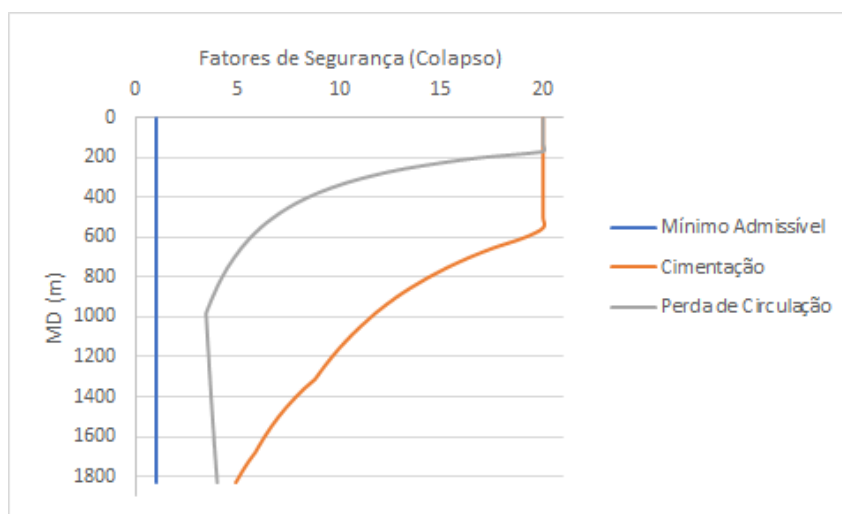
Fonte: Autor

As Figuras 35, 36 e 37 apresentam os fatores de segurança no decorrer da profundidade do revestimento intermediário. É possível perceber que os cenários de *burst*, colapso e axial estão de acordo com os fatores mínimos admissíveis, logo, o revestimento está dentro dos limites de segurança.

Figura 35 – Fatores de Segurança de *burst* para revestimento intermediário

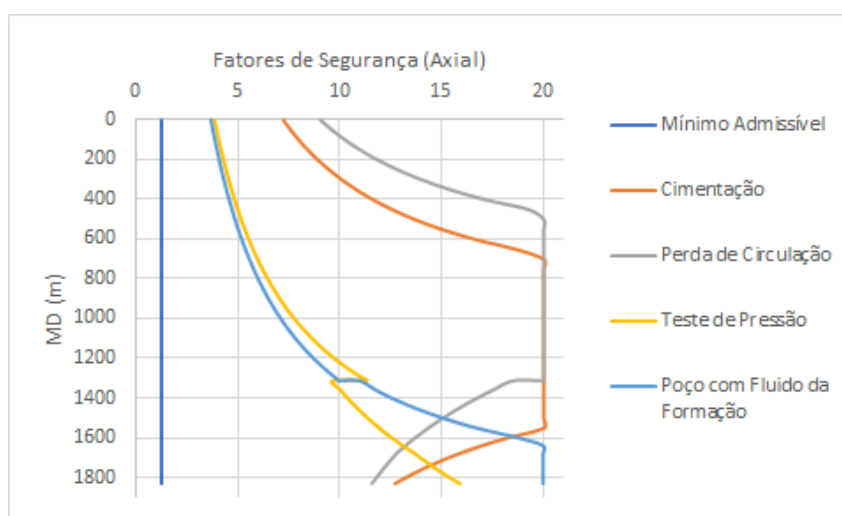
Fonte: Autor

Figura 36 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento intermediário



Fonte: Autor

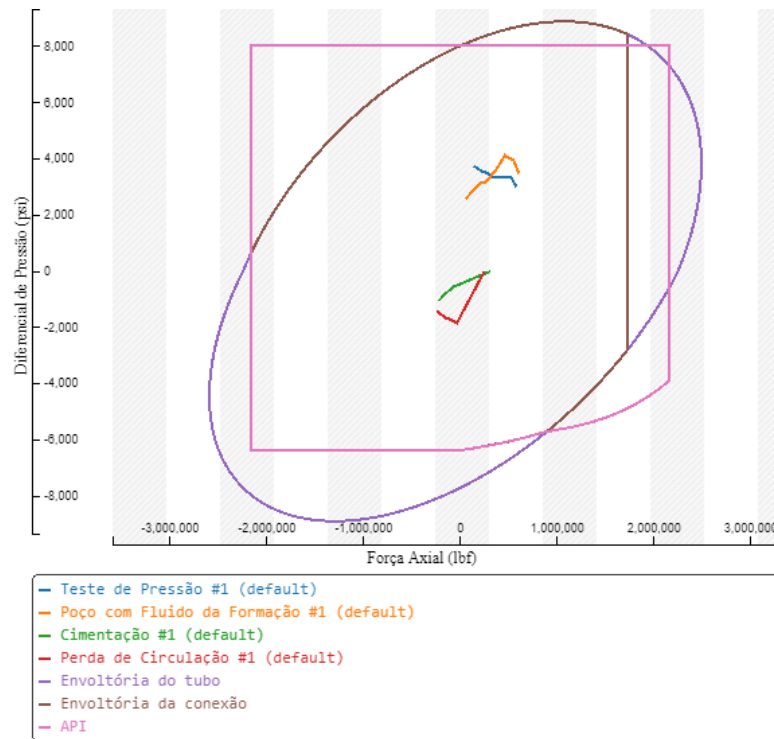
Figura 37 – Fatores de Segurança Axial para revestimento intermediário



Fonte: Autor

A Figura 38 evidencia que os cenários estão contidos dentro da envoltória de von Mises e portanto estão dentro dos limites de segurança aceitáveis.

Figura 38 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises



Fonte: Autor

Ao analisar os fatores de segurança ao longo da fase é possível observar que todos os cenários encontram-se dentro do limite de segurança admissível. Com isso, o tubo C-110 com diâmetro externo 13 5/8 de polegadas e peso linear de 88,2lb/pé resiste aos carregamentos impostos, estando acima da margem de projeto aplicável.

4.3.3 Liner de Produção

Foi selecionado para o revestimento um tubo de grau L-80, com peso linear de 29 lb/pé, espessura 0,408 polegadas e diâmetro externo de 7 polegadas. Para esse tubo foi encontrada uma R_b de 8.160,00 psi e uma P_p de 7.025,59 psi, sendo então encontrado no regime plástico.

4.3.3.1 Cenários de *Burst*

Os cenários considerados foram teste de pressão e furo na coluna de produção, ao contrário dos demais, não foi considerado o cenário de poço cheio de fluido, pois este somente se aplica caso houvesse perfuração avante. A Tabela 32 apresenta os valores de pressão interna, externa e a variação de pressão para o *liner* de produção. O cenário de furo na coluna considerou uma pressão na cabeça de 3.359,36 psi, gradiente do fluido produzido de 1,24 psi/m e uma pressão nos canhoneados de 7.597,4 psi.

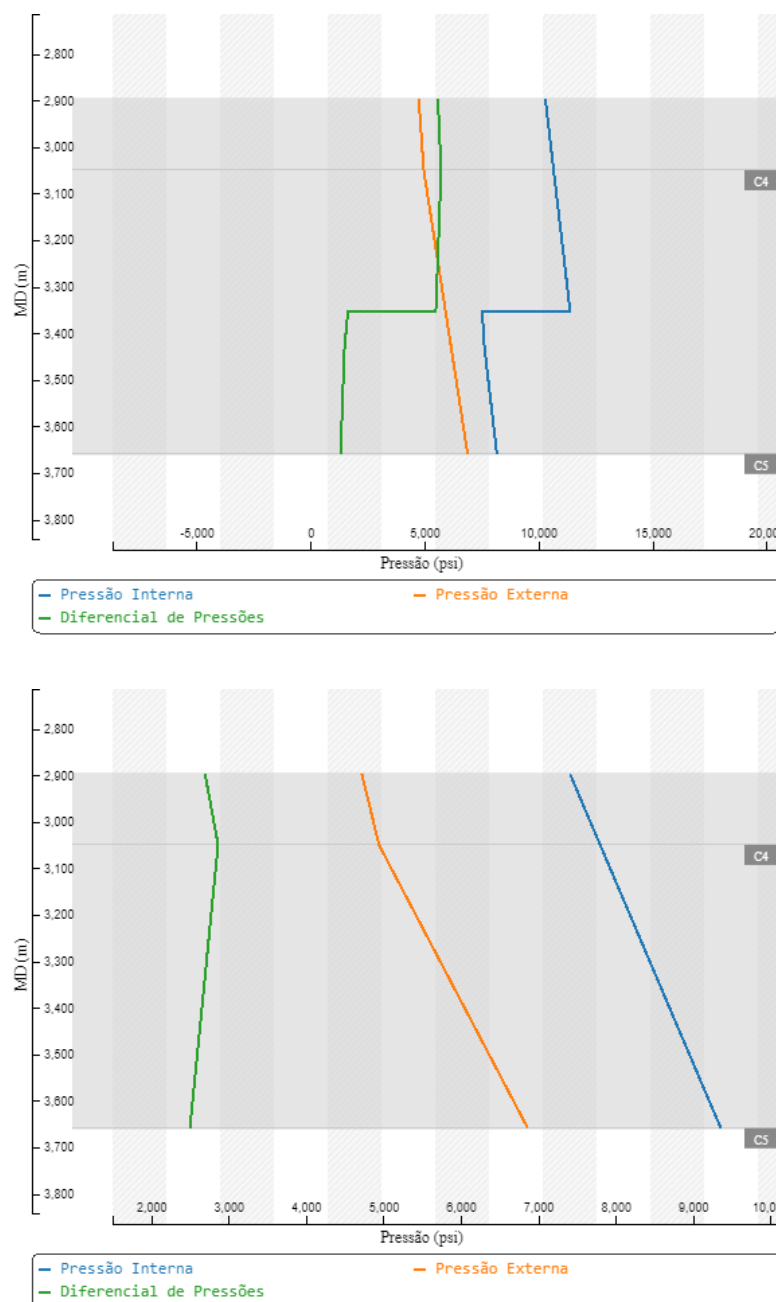
Tabela 32 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para *liner* de produção

		Calculado		SCORE				
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)	
<i>Burst</i>	Teste de Pressão	2895,6	7401,15	4712,07	7402,60	4714,29	0,0195	0,0470
		3657,6	9348,83	6855,81	9350,65	6857,14	0,0195	0,0195
	Furo na Coluna	2895,6	10267,10	4714,29	10268,45	4714,29	0,0131	0,0000
		3657,6	8142,85	6857,14	8142,85	6857,14	0,0000	0,0000

Fonte: Autor

A Figura 39 apresenta os perfis de pressão para furo na coluna e teste de pressão, respectivamente. Na primeira figura é possível observar que há um decréscimo da pressão 11.359,33 psi para 7.502,91 psi, essa redução acontece na profundidade do *packer* de 3.352,8 metros, devido a diminuição da hidrostática do *packer fluid*. Na segunda imagem, é retratado o cenário de teste de pressão, tendo sua menor e maior pressão interna e externa na topo e na base do revestimento, respectivamente.

Figura 39 – Perfis de Pressão Para Cenários de Burst - Furo na Coluna e Teste de Pressão



Fonte: Autor

4.3.3.2 Cenários de Colapso

No cenário de esvaziamento parcial a profundidade vertical de esvaziamento foi em 857,25 metros e a profundidade da base dos canhoneados de 3.429,00 metros.

A Tabela 33 apresenta os valores de pressão interna, externa e a variação de pressão para o revestimento *liner* de produção.

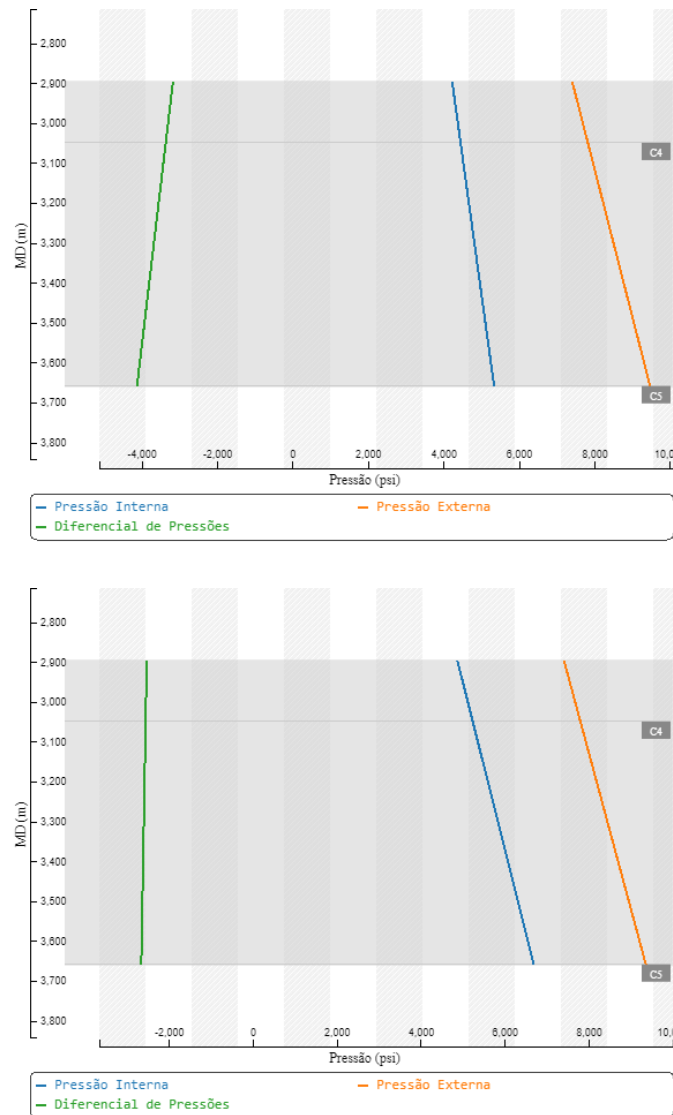
Tabela 33 – Pressões internas, externas e diferencial de pressão para *liner* de produção

		Calculado		SCORE				
		Profundidade	P_i	P_a	P_i	P_a	Erro (%)	
Colapso	Cimentação	2895,6	4218,66	7401,15	4219,48	7402,60	0,0195	0,0195
		3657,6	5328,83	9463,09	5329,87	9464,94	0,0195	0,0195
	Esvaziamento Parcial	2895,6	4863,50	7401,15	4863,63	7402,60	0,0027	0,0195
		3657,6	6681,63	9348,83	6681,82	9350,65	0,0027	0,0195

Fonte: Autor

A Figura 40 apresenta os perfis de pressão para cimentação e esvaziamento parcial, respectivamente. Ambos os cenários tiveram suas menores e maiores pressões internas e externas no topo e na base do revestimento em análise. Sendo a pressão externa maior que a interna como o esperado em cargas de colapso.

Figura 40 – Perfis de Pressão Para Cenários de Colapso - Cimentação e Esvaziamento Parcial



Fonte: Autor

4.3.3.3 Força Axial

A Figura 41 apresenta as forças axiais referentes aos cenários de *burst*, sendo eles teste de pressão e furo na coluna de produção. Os valores encontrados para a força axial do topo e da base do revestimento foram -12.232,17 lbf e -71.495,84 lbf para teste de pressão, enquanto para o cenário de furo na coluna de produção foram de 39.413,44 lbf e -93.261,57 lbf, respectivamente.

No cenário de teste de pressão é percebida uma mudança na inclinação da reta, esta alteração está ligada à profundidade do revestimento anterior, pois a cimentação do *liner* está acima da sapata do revestimento de produção, modificando o perfil de pressão externa e, consequentemente, o efeito balão. No cenário de furo na coluna, a segunda mudança na reta acontece na profundidade do *packer*.

Figura 41 – Força Axial para Cenários de Burst - *Liner* de Produção

Fonte: Autor

A Figura 42 mostra os cenários de cimentação e esvaziamento parcial, respectivamente. O cenário de cimentação tem uma força axial de -131.670,29 lbf no topo e -204.170,29 lbf na base, enquanto no cenário de esvaziamento parcial -120.061,97 lbf e -177.167,88 lbf.

Figura 42 – Força Axial para Cenários de Colapso - *Liner* de Produção



Fonte: Autor

4.3.3.4 Fatores de Segurança

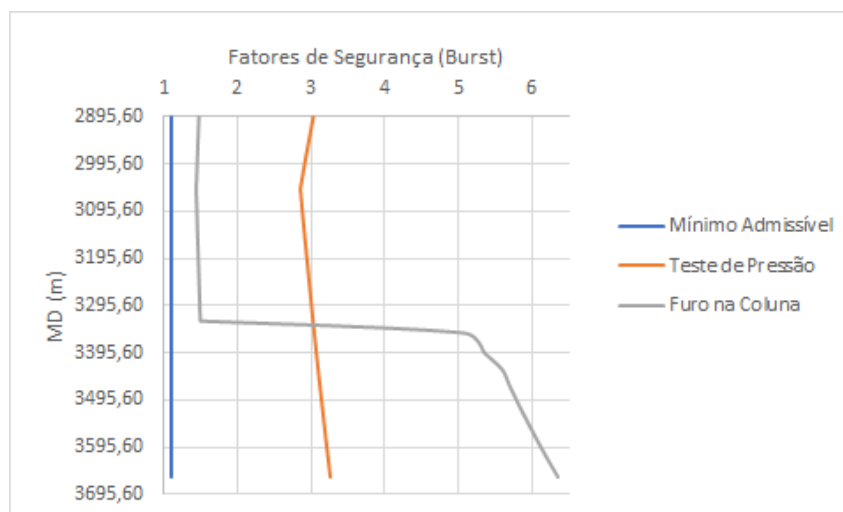
A Tabela 10 apresenta alguns fatores de segurança para o *liner* de produção, sendo eles o topo, os limites subjacentes à sapata do revestimento anterior e a base do revestimento.

Tabela 34 – Fatores de Segurança para o revestimento *liner* de produção

FS - SCORE					
Cenários	Profundidade	Burst	Colapso	Triaxial	Axial
Cimentação	2895,60	20,00	1,91	3,16	5,13
	3047,99	20,00	1,80	2,99	4,62
	3048,01	20,00	1,80	2,99	4,62
	3657,60	20,00	1,48	2,45	3,31
Esvaziamento Parcial	2895,60	20,00	2,26	3,97	5,63
	3047,99	20,00	2,21	3,94	5,14
	3048,01	20,00	2,21	3,94	5,14
	3657,60	20,00	2,04	3,78	3,82
Teste de pressão	2895,60	3,04	20,00	3,62	20
	3047,99	2,86	20,00	3,37	20
	3048,01	2,86	20,00	3,37	20
	3657,60	3,27	20,00	3,59	9,45
Furo na Coluna	2895,60	1,47	20,00	1,78	17,15
	3047,99	1,43	20,00	1,72	20
	3048,01	1,43	20,00	1,72	20
	3657,60	6,35	20,00	5,97	7,25

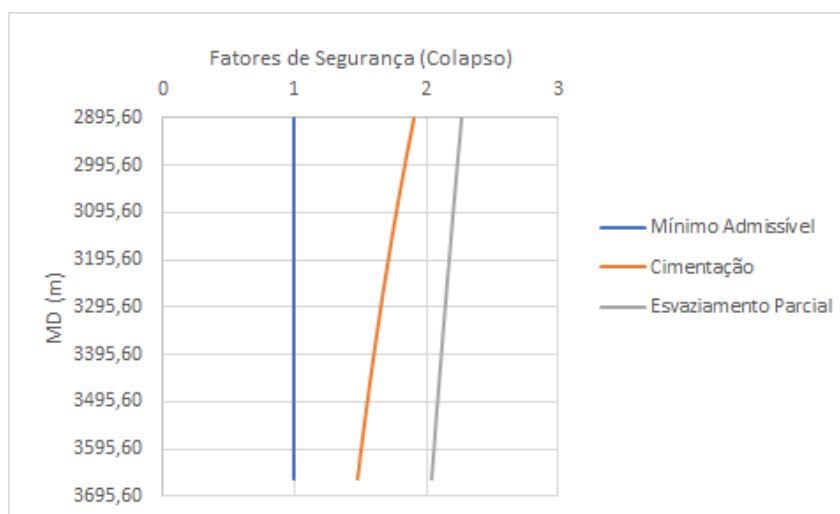
Fonte: Autor

As Figuras 43, 44 e 45, retratam os fatores de segurança pela profundidade dos cenários de *burst*, colapso e axial para o revestimento *Liner*. Com a análise dos resultados obtidos, é possível concluir que os fatores de segurança estão acima dos mínimos admitidos como critério de segurança o que acarreta na seleção do tubo.

Figura 43 – Fatores de Segurança de *burst* para revestimento *Liner*

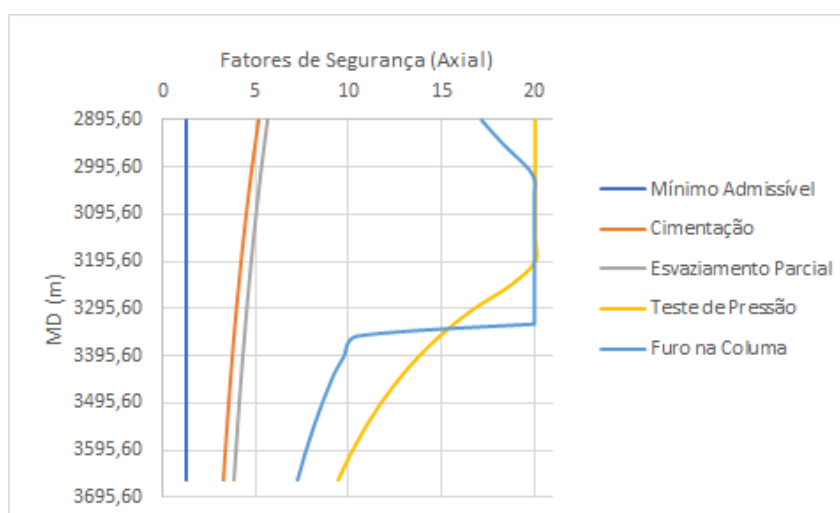
Fonte: Autor

Figura 44 – Fatores de Segurança de colapso para revestimento Liner



Fonte: Autor

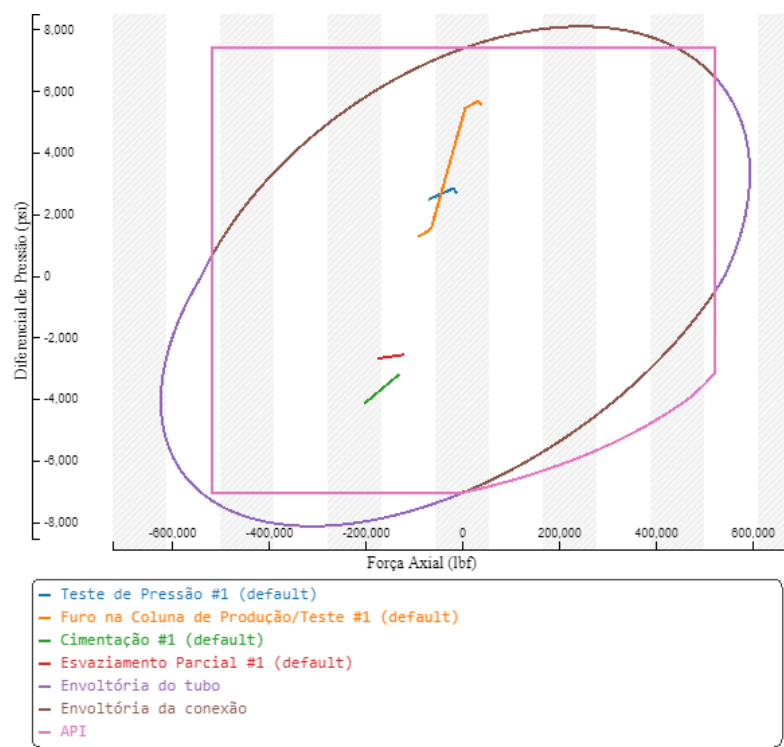
Figura 45 – Fatores de Segurança Axial para revestimento Liner



Fonte: Autor

A Figura 46 mostra que de acordo com o critério triaxial os carregamentos estão dentro dos limites da envoltória o que demonstra que o tubo resiste às solicitações impostas pelas carregamentos.

Figura 46 – Fatores de Segurança - Critério de Von Mises



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Ao se dimensionar revestimentos deve-se levar em consideração diversos parâmetros, sejam eles características da formação, do tubo ou dos fluidos utilizados para perfurar e completar um poço. Os perfis de pressão gerados ao longo da análise dos cenários de carregamento servem para determinar os pontos de maior e menor solicitação ao longo da profundidade em que se deseja revestir. Com isso, é de extrema importância que os tubos resistam a essas solicitações para evitar acidentes e prejuízos.

Analisar todos os cenários mecanicamente é uma tarefa árdua e que requer atenção e tempo, logo, trabalhar com *softwares* é uma maneira mais prática de obter resultados de forma mais precisa e em tempos expressivamente menores. A aplicação web SCORE trás esse viés, onde é possível dimensionar revestimentos com configurações personalizadas pelo usuário de maneira intuitiva e com confiança. A possibilidade e a destreza de obter respostas rápidas é de extrema relevância na indústria.

Há ferramentas computacionais que ajudam e são de grande valia no cálculo interativo com variáveis, como é o caso do *software* Excel. Porém, as respostas podem não ser obtidas de maneira prática e rápida. Logo, o estudo permitiu comparar os dois meios de análise e com isso determinar a eficiência do Sistema de Confiabilidade de Revestimentos. A comparação de eficiência foi feita através do cálculo do erro relativo percentual, que para os cenários estudados foram todos inferiores a 0,5%. Credita-se esse erro ao arredondamento, ao uso de apenas duas casas decimais no cálculo do erro e ao fator de conversão truncado na quarta casa decimal utilizadas na planilha eletrônica.

Através do SCORE, foi possível dimensionar os tubulares e observar de maneira precisa onde eles falham. O tubo de grau X-56, de peso linear 132,5 lb/ft e diâmetro externo de 20 polegadas, escolhido para o revestimento de superfície cumpre todos os requisitos necessários, estando assim dentro de todas as margens de segurança. O tubo selecionado para o revestimento intermediário foi o de grau C-110 com peso linear 88,2 lb/pé e diâmetro externo 13 5/8 polegadas suporta todos os cenários estudados e é aprovado. Utilizou-se o tubo de grau CR13/95KSI para o revestimento de produção, o mesmo apresenta peso linear de 53,5lb/pé e diâmetro externo de 9 5/8 polegadas, o tubo passa por todos os requisitos e também é aprovado. Por fim, foi escolhido um tubo com grau L-80 para *liner* de produção, com diâmetro externo de 7 polegadas e peso linear de 29 lb/pé, assim como os demais o tubo estava dentro de todos os limites de segurança impostos no projeto e portanto aprovado.

De acordo com os fatores de segurança de *burst*, colapso, axial e triaxial observados os tubos são aprovados. Ao analisar os fatores de segurança encontrados é possível observar que alguns pontos estão muito acima da faixa de segurança, uma escolha conservadora como esta pode acarretar num aumento expressivo do custo total do poço. Entretanto, foram escolhidos os

tubos de menor espessura e grau provenientes do catálogo.

Como sugestões para trabalhos futuros é possível trabalhar com a variação de temperatura, pois há a possibilidade de analisar a degradação térmica que um tubo está sujeito, devido a variação de temperatura ao longo da profundidade. Trabalhar com um poço inclinado, onde o revestimento estará sujeito a outras forças axiais presentes neste tipo de trajetória, bem como considerar todas as cargas axiais no revestimentos.

REFERÊNCIAS

AADNØY, B. *Modern Well Design*. [S.l.: s.n.], 2007.

ANP. RESOLUÇÃO ANP Nº 43, DE 6.12.2007, DOU 7.12.2007- RETIFICADA DOU 10.12.2007 E DOU 12 DE DEZEMBRO DE 2007. 2007. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-43-2007?origin=instituicao{%&}q=43/2>>.

ANP. RESOLUÇÃO ANP Nº 46, DE 1º 11.2016, DOU 3.11.2016- RETIFICADO DOU 7 DE NOVEMBRO DE 2016. 2016. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-46-2016?origin=instituicao{%&}q=46/2>>.

API. API TR 5C3. Technical Report on Equations and Calculations for Casing, Tubing, and Line Pipe Used as Casing or Tubing. *American Petroleum Institute*, v. 2007, n. December, 2008.

BOURGOYNE, A. T. et al. *Applied Drilling Engineering*. [S.l.: s.n.], 1986. 500 p. ISBN 1555630014.

BYROM, T. G. Pressure load determination. In: *Casing and Liners for Drilling and Completion*. Elsevier, 2015. p. 35–74. ISBN 9780128005705. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128005705000036>>.

COSTA, J. C. H. SISTEMA DE APLICAÇÕES DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO (SAEP): MÓDULO POÇO. p. 74, 2016.

Dagoberto Adriano Rizzoto Justo, Esequia Sauter, Fabio Souto de Azevedo, Leonardo Fernandes Guidi, P. H. d. A. K. *Cálculo Numérico - Um Livro Colaborativo Versão Python*. 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/reatmat/CalculoNumerico/livro-py/main.html>>.

FORD, J. *DRILLING ENGINEERING*. Edinburgh: Heriot-Watt University, 2005.

GOUVEIA, L. P. D. Avaliação da Confiabilidade em Tubos de Revestimento de Poços de Petróleo. p. 123, 2014.

HOSSAIN, M. E.; AL-MAJED, A. A. *Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering*. [S.l.: s.n.], 2015. 1–754 p. ISBN 9781119100300.

KOEHLER, L. P. Projeto de Revestimento de Poços e suas Especificidades. p. 79, 2018.

LAKE, L. W. *Drilling Engineering Handbook*. [S.l.: s.n.], 2006. II. ISBN 9781555631147.

PATTILLO, P. *Design Loads*. [S.l.: s.n.], 2018. 337–394 p. ISBN 9780128117699.

RAHMAN, S. S.; CHILINGARIAN, G. V. *Casing design theory and practice*. 1995.

REPSOL YPF. Drilling and Production Operations. 2000.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. de. *Projeto de Poços de Petróleo: Geopressões e Assentamentos de Colunas de Revestimentos*. [S.l.: s.n.], 2009. 562 p. ISBN 9788571932142.

SILVA, T. B. da. *CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE INTEGRIDADE EM SISTEMAS DE REVESTIMENTO VIA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL*. 2018. 87 p.

SOUZA, C. O. de. *Capítulo sobre levantamento de cargas em revestimentos*. 2015.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2ª edição. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004. 272 p.

WOJTANOWICZ, A. K.; MAIDLA, E. E. Minimum-Cost Casing Design for Vertical and Directional Wells. *Journal of Petroleum Technology*, n. October, 1987.