

Viabilidade técnica da utilização de tubos de concreto extrudado para revestimento de poços de petróleo.

Resumo

O constante desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação permite que utilizações inovadoras surjam diariamente. No caso da tecnologia de extrusão de concreto, a adição de plastificantes permitiu a redução de vazios presente no material. Como tais vazios funcionam como pontos de concentração de tensão e estimulam o surgimento de trincas, a redução resultou em melhores propriedades mecânicas. Este artigo apresenta um estudo de viabilidade técnica para a substituição de tubos de aço de alta liga por tubos de concreto extrudado para revestimento de poços de petróleo. Através de uma análise qualitativa, ele avalia quatro situações críticas: solicitações radiais de tração associadas a uma bolha de gás, solicitações radiais compressivas associadas à poropressão e fraturamento da formação, solicitações axiais de tração associadas à movimentação da coluna e solicitações axiais de tração associados ao destravamento da coluna de revestimento. Para a análise, utilizou-se modelos numéricos com a ferramenta Ansys, considerando propriedades mecânicas e solicitações típicas. Os resultados mostraram que os tubos de concreto extrudado podem suportar tensões radiais bastante significativas contudo mostrou-se inadequado para tensões axiais associados ao içamento da coluna de revestimento. As análises demonstram que os tubos de concreto extrudado necessitam desenvolvimentos adicionais para ser uma opção viável para revestimento de poços de petróleo, eles, contudo, indicam as potencialidades do processo.

Palavras-chave: tubos de concreto, concreto extrudado, coluna de revestimento, óleo e gás.

1. Introdução

O constante desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação permite que utilizações inovadoras surjam todos os dias. Esse é o caso dos avanços registrados na tecnologia de extrusão de concreto. Devido à adição de plastificantes e ao método inovador de processamento, a tecnologia de extrusão de concreto permite a redução dos vazios presentes no material. Como tais vazios funcionam como pontos de concentração de tensão e estimulam o surgimento de trincas, a redução tem como resultado melhores propriedades mecânicas.

Tal melhora permite investigar a possibilidade de utilização da extrusão de concreto para revestimento de poços de petróleo. Tal fase da construção de poços é uma das mais caras e o custo dos tubos representa mais de 15% do valor total do poço. A possibilidade de substituir tubos de aço de alta liga por tubos de concreto extrudado reduziria consideravelmente o custo do empreendimento. Contudo uma avaliação técnica cuidadosa deve ser realizado com foco nos requisitos e normas vigentes.

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, com natureza aplicada, e emprega procedimentos experimentais para investigar a viabilidade técnica da utilização de tubos de concreto fabricados por meio da técnica de extrusão - conforme descrita em Rossetto (2007) - para revestimento de poços de petróleo. O estudo avalia tensões e deformações geradas quatro situações críticas para uma coluna de revestimento. Os resultados foram gerados com a técnica de elementos finitos e considerou propriedades mecânicas típicas de peças extrudadas.

2. Coluna de revestimento e dimensionamento crítico

Desde a antiguidade o homem tem perfurado poços na crosta terrestre. Esses poços eram geralmente instáveis e a importância de revesti-los foi rapidamente reconhecida. Esse revestimento evoluiu das rudimentares alvenarias, adotadas na antiguidade, passando pelas proteções de madeira e tubos de ferro fundido até chegar ao atual revestimento constituído de tubos de aço especial (Thomas, 2001).

Ao se iniciar a perfuração de um poço, já existe uma posição especificada para revestimento em função da variação prevista das pressões de poros de fratura das formações, que indicam o risco de prisão da coluna por pressão diferencial, de ocorrência de kicks ou de desmoronamento das paredes do poço.

Segundo Iramina (2016), cada coluna de revestimento é composta de tubos com cerca de 10 metros, conectados individualmente no ato da descida, por enroscamento, com utilização de equipamentos próprios para o manuseio. Cada um destes tubos apresenta características (resistência à tração, resistência à pressão interna, resistência ao colapso) que dependem do diâmetro, da composição do aço e da espessura de sua parede. O revestimento constitui uma das parcelas mais expressivas do custo de perfuração de um poço de petróleo (15% a 20%).

Ela deve apresentar como principais características ser estanque, ter resistência e dimensões compatíveis com as solicitações e atividades futuras, ser de fácil conexão além de ter a menor espessura possível. Atualmente a American Petroleum Institute (API) juntamente com a International Organization for Standardization (ISO) possuem diversas publicações que dissertam sobre os métodos de cálculo que determinam as principais características e parâmetros para tubos de revestimento de poços. Os trabalhos de Roque (1992) e Costa (2015):

- API 5CT: Esta norma padroniza as especificações para tubos de revestimento e conexões, incluindo diâmetros externos, espessura da parede e propriedades mecânicas.
- API 5B: Foca nas roscas das conexões, definindo os padrões para garantir a integridade e a segurança das juntas entre os tubos.
- API 5C2: Trata da performance dos tubos de revestimento, abordando aspectos como resistência ao colapso e pressão interna (burst), fundamentais para garantir a segurança estrutural durante a operação
- API ISO 10400: Esta norma é utilizada para calcular a resistência mecânica das colunas de revestimento, considerando esforços axiais e pressões internas. É crucial para assegurar que as colunas suportem as condições operacionais esperadas.

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gas (IBP) (2022), os revestimentos devem ser projetados com base em cenários representativos, que estão relacionados às condições de serviço e aos carregamentos esperados do poço. Esses cenários resultam em carregamentos hidrostáticos, axiais e térmicos, sendo necessário avaliar as resistências do tubo e das conexões quanto ao colapso, pressão interna, forças axiais e tensões triaxiais. Esses métodos de cálculo geralmente visam garantir a integridade estrutural do revestimento e, por consequência, da estabilidade do poço durante o funcionamento. Iramina (2016) vai além, o trabalho cita que as principais situações críticas são relacionadas com:

- Solicitações radiais de trações associadas a uma bolha de gás de um possível kick;
- solicitações radiais compressivas associadas à poro-pressão e fraturamento da formação;
- solicitações axiais de tração associadas à movimentação da coluna de revestimento; e
- solicitações axiais de tração associados ao destravamento da coluna de revestimento.

Ou seja, segundo Iramina (2016), é suficiente dimensionar os tubos para situações nas quais a pressão interna é superior a externa (situação na qual ocorre um influxo descontrolado de gás pela coluna de revestimento), pressão externa maior que a interna (situação na qual a poro-pressão e a da formação exercem força radial sobre o tubo) e esforços axiais (que ocorrem durante a movimentação, posicionamento e em situações de destravamento).

Apesar de já existirem diversas equações que analisam cada uma dessas situações nas diversas sessões da coluna de revestimento, elas levam em consideração um comportamento elasto-plástico que caracteriza os aços. Como esse trabalho analisa o comportamento de uma coluna de revestimento em concreto extrudado (de comportamento frágil), a abordagem utiliza o método de elementos finitos e dados do material para a determinação do coeficiente de segurança.

3. Concreto extrudado

Apesar de ser um dos materiais mais utilizados no mundo e seu consumo ser um indicador do grau de desenvolvimento de um país, a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações não cessa. Parte significativa desse trabalho foca na melhora as propriedades mecânicas do material, ou seja, na melhora da microestrutura e do processamento do material.

Dois trabalhos destacam-se nesse sentido. O primeiro foi o de Roy e Gouda (1973) que demonstra que as pastas de cimento Portland com relações (a/c) inferiores a 0,10 podem apresentar uma resistência à compressão de até 330MPa, desde que prensadas à 345 MPa durante 1 hora.

O segundo foi o trabalho Birchall, Howard e Kendall (1981) que conclui que a manutenção de baixas relações (a/c) associada à adição de polímero solúvel em água permitia a conformação por técnicas apropriadas às massas plásticas, tais como a prensagem (ou a calandragem) e a extrusão. Por fim, o trabalho de Rossetto (2007) desenvolve processos industriais que permitem a execução de peças industriais com baixas relações (a/c) e alto desempenho mecânico. A figura 1 mostra um dos perfis descritos no trabalho de Rossetto (2007).

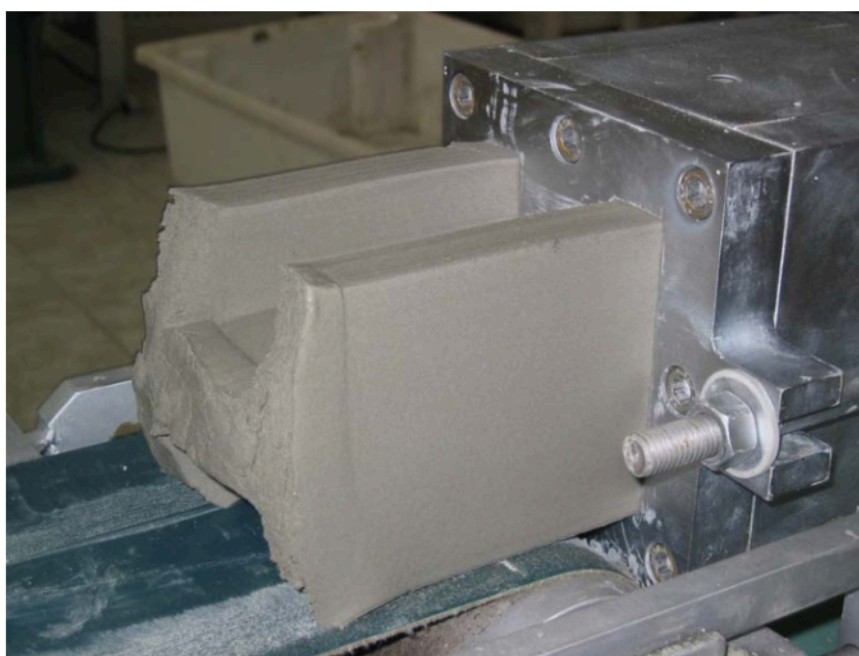


Figura 1 - Corpo de prova extrudado (Fonte: Rossetto (2007))

O bom desempenho mecânico dos materiais cimentícios assim obtidos, com resistência à flexão de 40 a 150 MPa, foi atribuído aos defeitos menores do que aqueles que resultam das convencionais técnicas de conformação, derivando daí o termo MDF ou “Macro-Defect Free Cements”.

4. Materiais e métodos

As diretrizes estabelecidas para o desenvolvimento deste trabalho levaram à adoção de uma pesquisa de natureza aplicada, de natureza explicativa e utilizando procedimentos experimentais. As variáveis de controle, tensão máxima e fator de segurança, foram analisados para vários cenários. Segundo Prodanov (2013), A pesquisa experimental é predominantemente utilizada nas ciências tecnológicas, visando demonstrar a produção de certos fenômenos e as razões subjacentes a eles. Esse tipo de pesquisa se caracteriza pela manipulação direta das variáveis associadas ao objeto de estudo. Através dessa manipulação, é possível investigar a relação entre causas e efeitos de fenômenos específicos.

As quatro situações críticas foram analisadas através da utilização de modelos numéricos. A ferramenta utilizada foi o software de análise Ansys®, amplamente utilizado pra fins comerciais e acadêmicos. Enquanto os elementos de malha foram triangulares, as condições de contorno variaram conforme a situação crítica analisada. A elaboração da malha foi realizada em sucessivas etapas. Uma menor discretização sem afetar o desempenho computacional foi o objetivo.

As propriedades mecânicas consideradas no trabalho foram determinadas a partir dos resultados descritos em Rossetto (2007) e são compiladas na tabela 1. Já o comportamento mecânico foi considerado “Plástico Perfeito”.

#	Propriedades	Valor	Unidade
1.	Densidade	2.500	kg/m ³
2.	Coeficiente de expansão térmica	1,4.10 ⁻⁵	C ⁻¹
3.	Temperatura de referência	22	C
4.	Módulo de Young	30.000	Mpa
5.	Coeficiente de poisson	0,18	□
6.	Módulo de Bulk	1,56.10 ¹⁰	Pa
7.	Módulo de cisalhamento	1,27.10 ¹⁰	Pa
8.	Tensão de escoamento a tração	30	MPa
9.	Tensão de escoamento a compressão	100	MPa
10	Tensão de ruptura a compressão	100	MPa
11	Tensão de ruptura a tração	30	MPa

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do material considerado (Fonte: Rossetto (2007))

Outro detalhe importante é que, como a coluna de revestimento é geometricamente axissimétrica e bastante longa, o modelos elaborados são uma seção de 90° com comprimento reduzido, conforme mostra a imagem.

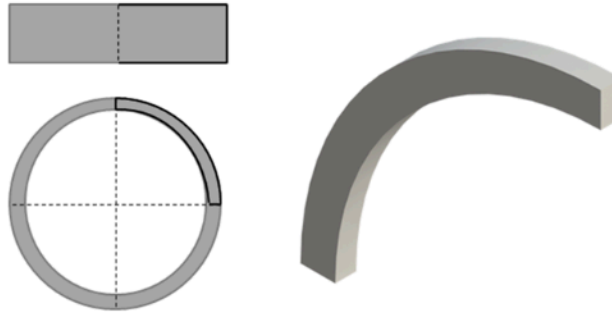


Figura 1 - Seção do tubo de revestimento analisado (Fonte: elaborado pelo autor)

Essa abordagem metodológica proporciona uma redução substancial no esforço computacional necessário para a simulação. Ao otimizar o uso dos recursos disponíveis, permite que o sistema processe informações de maneira mais eficiente, diminuindo o tempo de execução e a demanda por memória e processamento

5. Modelos e resultados

5.1 Análise de tensões, deformações e fator de segurança associadas a pressão interna superior a pressão externa

Uma das situações críticas para a coluna de revestimento é aquela na qual a pressão interna do poço torna-se maior que a pressão externa. Devido as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, esta situação é ainda mais delicada. Ela pode ocorrer quando, por algum motivo, o poço torna-se instável e uma bolha de gás emerge e incrementa a pressão interna. Estimativas mostram que tal valor da pressão interna pode ser de até 1.000 psi superior a pressão externa.

O modelo elaborado considera um tubo de 663 mm de diâmetro interno e diferenças de pressão de 1.000 psi. Os valores de pressão interna e externa foram 1.500 e 500 psi, respectivamente. A tabela 02 sumariza esses dados.

#	Parâmetros	Valor
1	Modelo do comportamento do material, []	Plástico perfeito
2	Forma dos elementos de malha, []	Triangular
3	Pressão interna, [psi]	1.500
4	Pressão externa, [psi]	500

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos numéricos criados (Fonte: elaborado pelo autor)

As análises focaram na tensão, deformação e coeficiente de segurança para tubos de espessura entre 10 e 150 mm (incremento de 10 mm). A figura 3 mostra as seções analisadas juntamente com as condições de contorno utilizadas. O modelo foi considerado com união flexível nas faces que os conectam ao restante da tubulação.

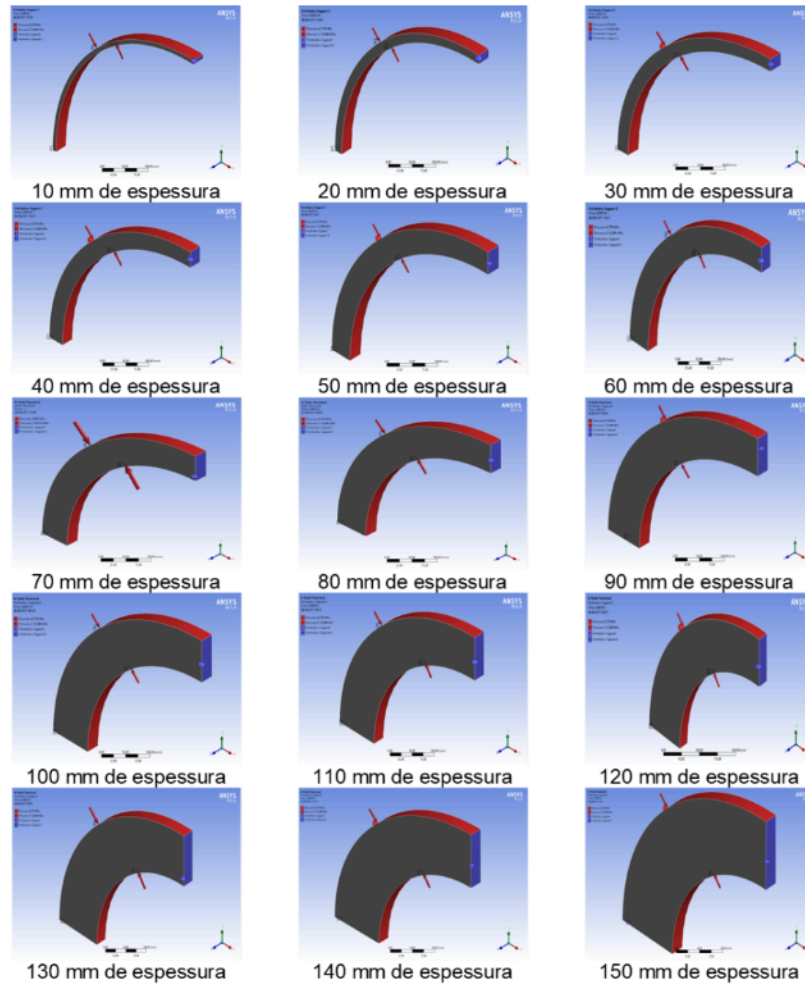


Figura 3 - Seção da tubulação com condições de contorno (Fonte: elaborado pelo autor)

As figuras 4 e 5, por sua vez, resumiram os valores máximos de tensão e coeficientes de segurança calculados para cada modelo.

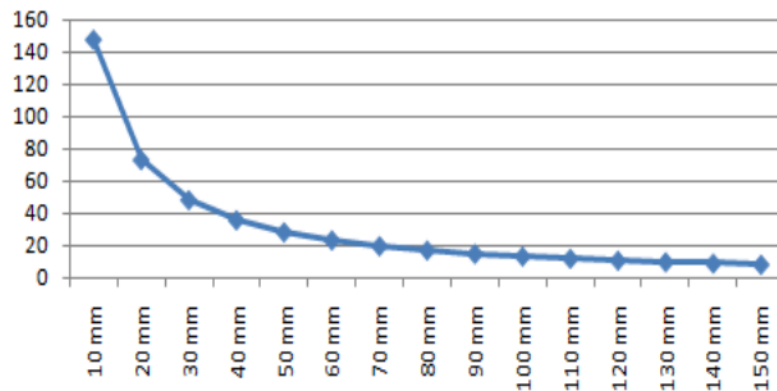


Figura 4 - Tensão máxima em cada modelo analisado para pressão interna superior a externa (Fonte: elaborado pelo autor)

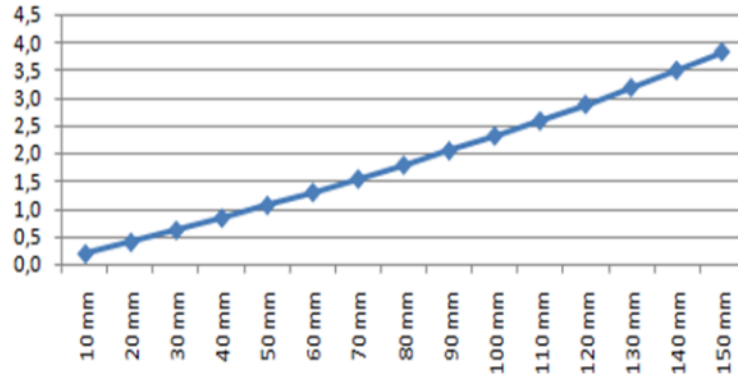


Figura 5 - Coeficiente de segurança em cada modelo analisado para pressão interna superior a externa (Fonte: elaborada pelo autor)

5.2. Análise de tensões e deformações associadas à pressão externa superior a pressão interna

Outro caso crítico ocorre quando a pressão externa ao revestimento assume valores demasiadamente altos. Isso pode ocorrer em situações que o poço é perfurado em formações altamente confinadas. Tais poços são chamados poços de alta pressão.

Da mesma forma que no caso crítico anterior, as análises focaram na tensão, deformação e coeficiente de segurança para tubos de espessura entre 10 e 150 mm. Essa semelhança permitiu a reutilização dos modelos já elaborados. Apenas os valores das condições de contorno foram modificados. A tabela 3 descreve os parâmetros utilizados para análise desse caso crítico.

#	Parâmetros	Valor
1	Modelo do comportamento do material, []	Plástico perfeito
2	Forma dos elementos de malha, []	Triangular
3	Pressão interna, [psi]	5.000
4	Pressão externa, [psi]	1.000

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos numéricos criados (Fonte: elaborada pelo autor)

Da mesma forma que na situação crítica anterior, os valores obtidos tensão máxima e coeficiente de segurança são mostrados nas figuras 6 e 7.

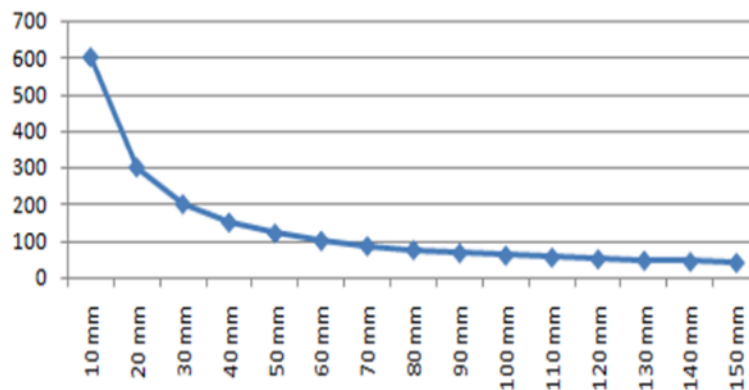


Figura 6 - Tensão máxima em cada modelo analisado para pressão externa superior a interna (Fonte: elaborada pelo autor)

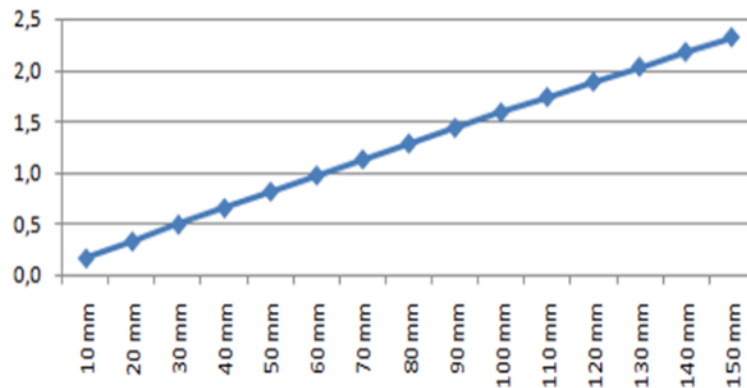


Figura 7 - Coeficiente de segurança em cada modelo analisado para pressão externa superior a interna (Fonte: elaborado pelo autor)

5.3 Análise de tensões e deformações associadas ao peso da coluna de revestimento

A terceira situação crítica refere-se às solicitações de trações axiais existentes durante o içamento da coluna de revestimento para o seu posicionamento no poço. Durante esse processo os tubos são conectados por rosca e descidos até a profundidade determinada.

No caso do revestimento com concreto extrudado a coluna de revestimento proposta seria composta por tubos 11 tubos de 9 metros de comprimento, 663,7 milímetros de diâmetro interno e 100 milímetros de espessura, correspondendo a 5.181 quilos por tubo.

Para reduzir o trabalho computacional, a região analisada ficou restrita a conexão entre o primeiro e o segundo tubo. Essa conexão utilizou rosca Buttress (conforme figura 8 a) e devido aos detalhes geométricos do modelo, atenção especial foi dedicada a elaboração da malha. Uma maior discretização foi adotada nas regiões próximas aos dentes da rosca como mostra a figura 8 b.

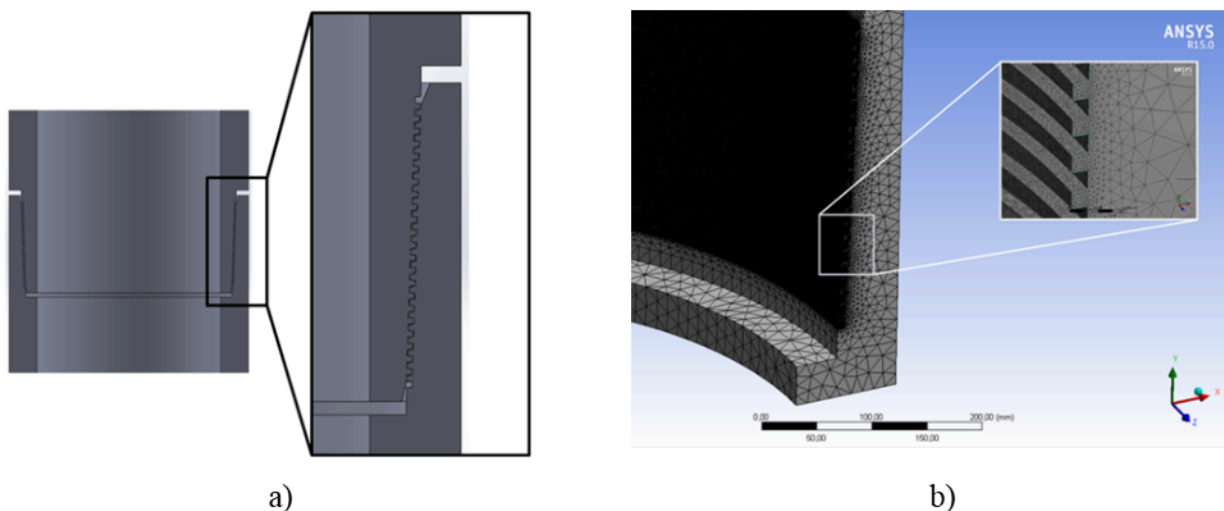


Figura 8 - Região de conexão rosqueada entre tubos (Fonte: elaborado pelo autor)

O modelo foi analisado pelo software Ansys® adotando um comportamento “plástico perfeito” do material. Como mostra a tabela 4, que sumariza os principais parâmetros analisados, o número de elementos e nós foram 3.916.187 e 6.122.571, respectivamente.

#	Parâmetros	Valor
1	Modelo do comportamento do material, []	Plástico perfeito
2	Forma dos elementos de malha, []	Triangular
3	Peso da coluna de revestimento, [kN]	5.100

Tabela 4 - Parâmetros do modelo elaborado (Fonte: elaborada pelo autor)

Como mostra a figura 9, enquanto as faces que conectam radialmente a região analisada ao restante do corpo foram consideradas como fixas sem atrito, a solicitação foi igualmente dividida sobre os dentes da rosca e a face que conecta a região analisada e o restante do tubo axialmente.

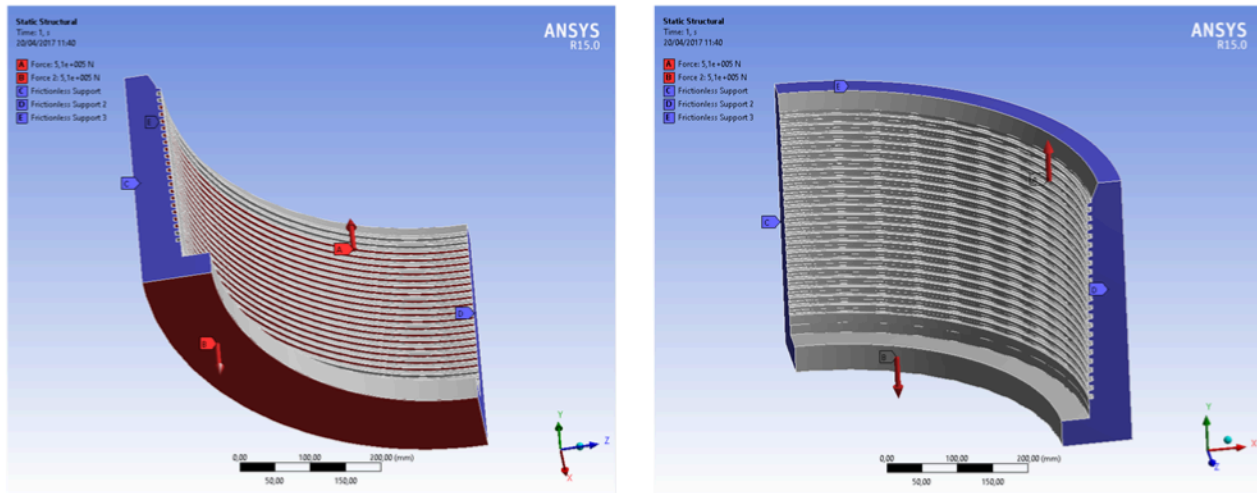


Figura 9 - Condições de contorno (Fonte: elaborada pelo autor)

O resultado foram diagramas de tensão e deformação que detalham o comportamento do modelo às solicitações elaboradas. Tais diagramas são mostrados nas figuras 10 e 11. O valor máximo de tensão foi de 96,57 MPa e o de deformação 0,42 mm.

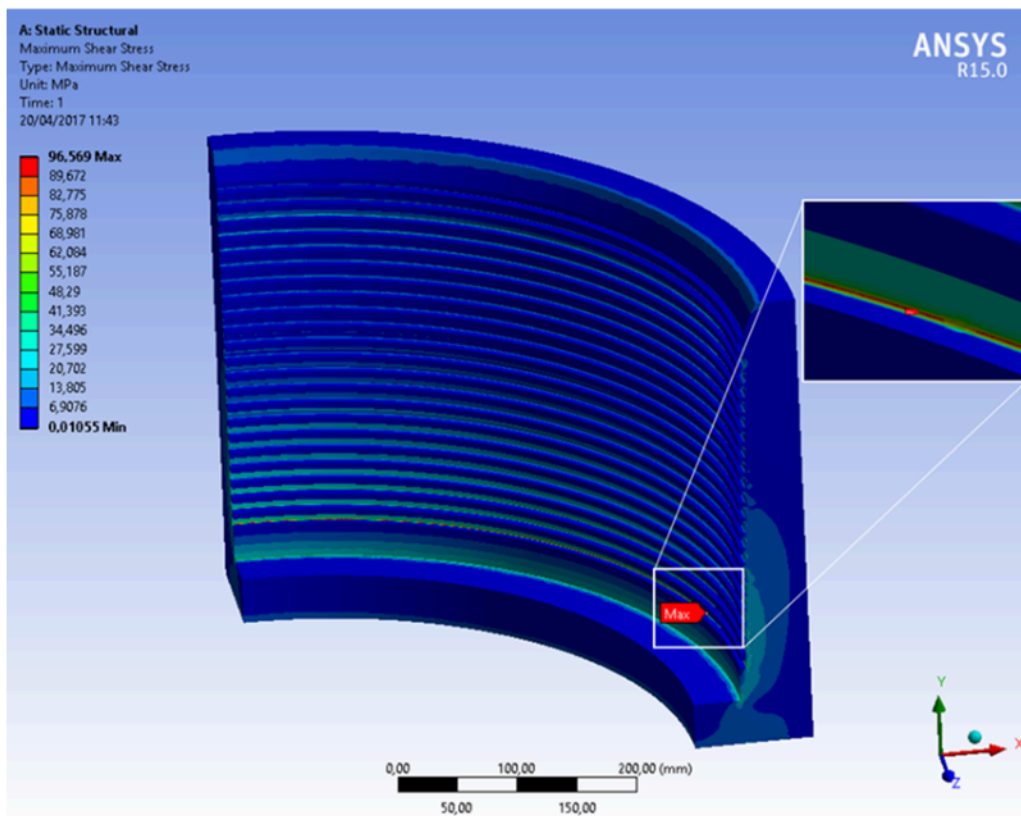


Figura 10 - Máximas tensões atuantes no corpo analisado (Fonte: elaborado pelo autor)

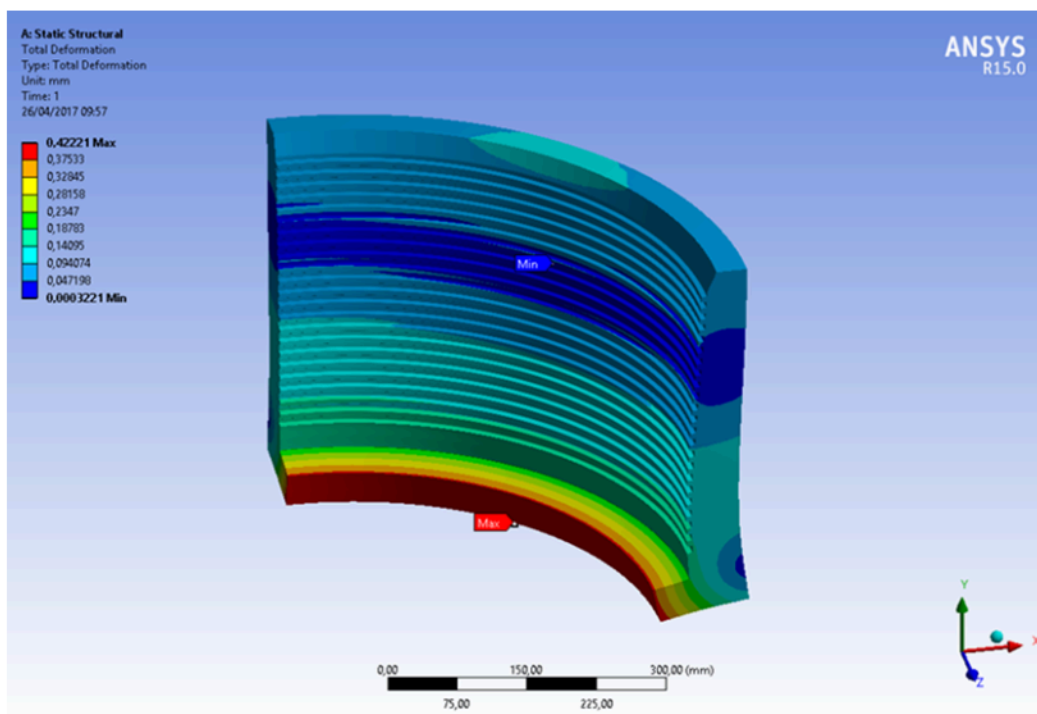


Figura 11 - Máximas deformações atuantes no corpo analisado (Fonte: elaborado pelo autor)

6. Considerações finais

A extrusão de concreto é um processo de fabricação altamente inovador que produz corpos com propriedades mecânicas significativamente superiores aos produzidos por processos tradicionais.

Entretanto a sua aplicação como processo de fabricação de tubos para revestimento de poços de petróleo mostra-se inadequada.

A identificação das principais situações críticas que uma coluna de revestimento é exposta ajudou nessa conclusão. Enquanto a análise do modelo computacional para as situações de pressão externa superior a interna e pressão interna superior a externa possibilitou a determinação da espessura do tubo (100 mm) com coeficiente de segurança adequado, a avaliação da coluna durante o içamento e o processo de destravamento mostrou tensões cujo o material é incapaz de suportar.

Enquanto a análise do processo de içamento mostrou tensões de 96,57 MPa, a análise do processo de destravamento sugeriu tensões máximas de 193,14 MPa. Ambas são muito superiores a tensão máxima de tração do material, apenas 30 MPa.

Vale citar também que a análise do peso da coluna levou em consideração apenas 11 tubos, perfazendo uma coluna de comprimento de 99 metros. Um valor apenas compatível com a execução do revestimento condutor, mas pífio comparado com o comprimento de centenas de metros necessários para executar o revestimento intermediário de poços de petróleo.

Além disso, a espessura de 100 mm aumenta significativamente o volume escavado e eleva a exigência sobre os demais sistemas de perfuração. Tal fato incrementa valor e eleva o risco de desmoronamento do poço.

A rugosidade e a permeabilidade do concreto são fatores que também devem ser mencionados. Apesar de apresentar valores bastante inferiores aos encontrados em outras peças fabricadas em concreto, tais características dificultam o fluxo ascendente dos fluidos do poço (exigindo maiores potências de bombeamento) e não garantem a perfeita estanquidade do revestimento.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro do Governo Brasileiro através do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e os Departamentos de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Referências

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; KENDALL, K.. Flexural strength and porosity of cements. *Nature*, [S. L.], v. 289, n. 5796, p. 388-390, jan. 1981. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/289388a0>. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/289388a0>. Acesso em: 10 out. 2024.

ROQUE, J. L. **Dimensionamento de revestimentos para poços profundos, poços direcionais e horizontais de longo afastamento horizontal pelo método do mínimo custo global**. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1992. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/69604>. Acesso em: 10 out. 2024.

COSTA, J. C. H.; SANTOS, J. P. L. Ferramenta computacional para auxílio ao dimensionamento de colunas de revestimento em poços de petróleo. *In*: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 8., 2015, Curitiba. *Anais [...]*. Curitiba: Universidade Federal de Alagoas, 2015. Disponível em: https://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais8/repositorio/trabalho/460910110820157877.

pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GAS (IBP). **Diretrizes para projeto e construção de poços marítimos**. Rio de Janeiro: IBP, 2022. 127 p. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2022/11/diretrizes-de-projetos-e-construcao-de-pocos.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

IRAMINA, W. S. **Aula 1-introdução à engenharia de perfuração: objetivos e escopo da disciplina**. São Paulo: PoliUSP, 2016. 68 slides, color. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1749511/mod_resource/content/5/Aula%201.pdf. Acesso em: 09 out. 2024.

ROY, D. M.; GOUDA, G. R.. High Strength Generation in Cement Paste. **Cement And Concrete Research**. Pennsylvania, p. 807-820. jun. 1973.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Emani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2024.

ROSSETTO, H. L. **Contribuições para a ciência e engenharia dos materiais cimentícios: processamento, durabilidade e resistência mecânica**. Tese (Doutorado em Ciência e engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-19062009-214423/publico/Tese_Hebert.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.