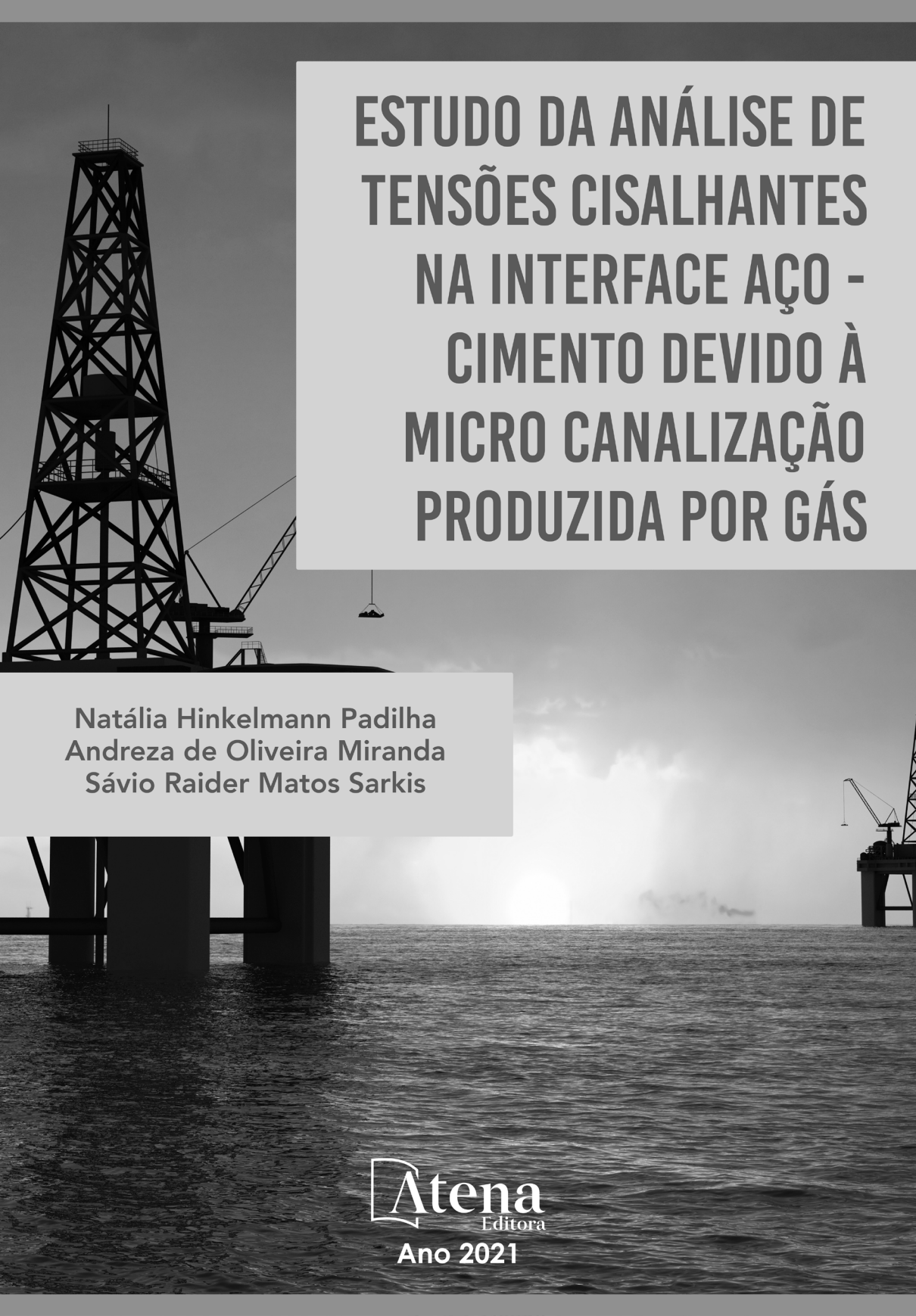


ESTUDO DA ANÁLISE DE TENSÕES CISALHANTES NA INTERFACE AÇO - CIMENTO DEVIDO À MICRO CANALIZAÇÃO PRODUZIDA POR GÁS

Natália Hinkelmann Padilha
Andreza de Oliveira Miranda
Sávio Raider Matos Sarkis

Atena
Editora

Ano 2021



ESTUDO DA ANÁLISE DE TENSÕES CISALHANTES NA INTERFACE AÇO - CIMENTO DEVIDO À MICRO CANALIZAÇÃO PRODUZIDA POR GÁS

Natália Hinkelmann Padilha
Andreza de Oliveira Miranda
Sávio Raider Matos Sarkis

Atena
Editora

Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miraniide Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa

Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Estudo da análise de tensões cisalhantes na interface açoimento devido à micro canalização produzida por gás

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Giovanna Sandrini de Azevedo
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Autores: Andreza de Oliveira Miranda
Natália Hinkelmann Padilha
Sávio Raider Matos Sarki

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M672 Miranda, Andreza de Oliveira
Estudo da análise de tensões cisalhantes na interface açoimento devido à micro canalização produzida por gás / Andreza de Oliveira Miranda, Natália Hinkelmann Padilha, Sávio Raider Matos Sarki. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-124-1

DOI 10.22533/at.ed.241210106

1. Cimentação. 2. Migração de gás. 3. Resistência ao cisalhamento. 4. Teor de água livre. I. Miranda, Andreza de Oliveira. II. Padilha, Natália Hinkelmann. III. Sarki, Sávio Raider Matos. IV. Título.

CDD 533

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder saúde e condições para poder estudar e concluir a minha formação acadêmica.

A UFAM por ceder os Laboratórios de Processos da Engenharia de Petróleo e Gás e Laboratório de Usinagem e Soldagem da Engenharia Mecânica.

Aos professores desta honrosa instituição que lecionam e incentivam os alunos a persistirem nos seus sonhos.

Agradecimento especial ao meu orientador Prof. MSc. Sávio Raider Matos Sarkis por toda a dedicação no meu projeto, desde a publicação do artigo em revista nacional até a minha conclusão, TCC.

Agradeço a minha amiga de UFAM, Andreza Miranda, pelo apoio durante a faculdade, realização do PIBIC, apresentação de congressos, enfim, pela parceria que tivemos durante os 5 anos de estudo nesta Universidade.

Agradeço à minha mãe Monica Hinkelmann pela educação e apoio para persistir nessa jornada de engenharia, pesquisas e vida profissional e, pelo companheirismo nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

Ao Pedro Ribeiro, por ter me apoiado neste trabalho e pelo companheirismo constante.

Obrigada a todos!

Andreza de Oliveira Miranda

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	1
RESUMO	2
ABSTRACT	3
INDRODUÇÃO	4
OBJETIVOS.....	6
Objetivos gerais	6
Objetivos específicos	6
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
Cimento Portland	7
Cimento Portland para poços petrolíferos	8
Aditivos químicos	9
Pasta de cimento para poços de petróleo	10
Operação de cimentação.....	11
Cimentação primária	11
Cimentação secundária	12
Problemas operacionais de cimentação.....	13
Corrosão por sulfatos.....	13
Poços de fácil absorção.....	13
Poço produtor térmico.....	14
MIGRAÇÃO DE GÁS	15
Mecanismo de migração de gás.....	16
Densidade incorreta	17
Má remoção do fluido de perfuração	17
Geleificação prematura	17
Perda de filtrado	17
Pasta de cimento com alta permeabilidade.....	18

Retração da pasta de cimento.....	18
Fraturas devidas às cargas de subsuperfície.....	18
Má aderência entre as interfaces	18
TESTES LABORATORIAIS – AVALIAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO.....	19
Equipamento de mistura - Misturador de Palhetas	19
Determinação do Peso Específico	20
Teor de Água Livre.....	20
Teste de consistometria	21
Determinação das propriedades reológicas.....	22
Equipamento de teste de Resistência à compressão	23
METODOLOGIA.....	25
Fluxograma	26
Montagem do corpo de prova para o sem migração de gás.	27
Montagem para o ensaio de cimentação com migração de gás	29
Aditivos químicos	29
Materiais cimentantes	29
Preparo das pastas de cimento e moldagem.....	30
Ensaio de resistência ao cisalhamento	31
Equipamentos utilizados na parte laboratorial.....	32
Teor de Água livre	33
RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
Corpos de prova e moldagem	34
Ensaio de resistência ao cisalhamento	36
Teor de água livre.....	39
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
Conclusões	41
Recomendações para trabalhos futuros.....	41
REFERÊNCIAS	43

APÊNDICE	45
SOBRE OS AUTORES	47

LISTA DE ABREVIATURAS

A - Área de contato

API - American Petroleum Institute

CP - Corpo de Prova

D - Diâmetro

F - Força calculada

$H_{\text{Cimentado}}$ - Altura cimentada

H_{tubo} - Altura do tubo de aço

$H_{\text{Média poliestireno}}$ - Altura média do poliestireno

$H_{\text{Espaço vazio}}$ - Altura do espaço vazio – não cimentado

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S/A

PROCELAB - Procedimentos e Métodos de Laboratório destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos.

RPM - Rotações por Minuto

T - Tensão de cisalhamento da interface aço-cimento

RESUMO

A cimentação de poços de petróleo é definida como o preenchimento do espaço anular entre a tubulação do revestimento e a parede do poço. Esta operação é essencial para evitar influxo de fluidos da formação para o poço, conferir aderência mecânica ao revestimento e à formação e proteção do revestimento contra corrosão. A migração de gás do reservatório pelo anular cimentado é um dos problemas que podem ocorrer, podendo levar à formação de micro canais que enfraquecem a estrutura. Diversos estudos vêm sendo realizados para solucionar o problema desde a década de 60, no entanto, o problema envolve diversas causas e é específico para cada caso. O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência da ação de migração de gás em uma pasta de cimento. Para tanto, foram criados moldes que simulam o anular de um poço de petróleo. Após isto, foram cimentados os corpos de prova (CP's) chamados de referência 0, ou seja, sem a migração de gás. Posteriormente, foram cimentados outros CP's que estavam sob a influência da migração de gás. O ensaio de resistência ao cisalhamento foi realizado com os CP's nas idades de 7 e 14 dias de cura à temperatura ambiente. A redução percentual da resistência ao cisalhamento devido à migração de gás para os corpos de prova com 14 dias foi de 20,0%. Para os corpos de prova com 7 dias, a redução percentual foi de 26,7%. O teste de Teor de Água livre também foi realizado para obter mais dados acerca da pasta cimentícia produzida. O teor de água livre encontrado foi de 0,15%. A pasta de cimento produzida foi adequada no quesito teor de água livre.

PALAVRAS - CHAVE: Cimentação. Migração de gás. Resistência ao cisalhamento. Teor de água livre.

ABSTRACT

Cementing of oil wells is defined as the filling of the annular space between the casing pipe and the well wall. This operation is essential to prevent inflow of fluids from the formation to the well, to provide mechanical adhesion to the coating and to the formation and protection of the coating against corrosion. Gas migration from the reservoir through the cemented annulus is one of the problems that can occur, which may lead to the formation of micro channels that weaken the structure. Several studies have been conducted to solve the problem since the 60's, however, the problem involves several causes and is specific to each case. The present work aimed to analyze the influence of gas migration action on a cement paste. To this end, molds were created that simulate the annulment of an oil well. After that, the specimens (CP's) called reference were cemented, ie without gas migration. Subsequently, other CP's that were under the influence of gas migration were cemented. The shear strength test was performed with the CP's at the ages of 7 and 14 days of cure at room temperature. The percentage reduction in shear strength due to gas migration to 14-day specimens was 20.0%. For specimens with 7 days, the percentage reduction was 26.7%. The free water content test was also performed to obtain more data about the cement paste produced. The free water content found was 0.15%. The cement paste produced was adequate in terms of free water content.

KEYWORDS: Cementing. Gas migration. Shear strength. Free water content.

INTRODUÇÃO

A cimentação de poços de petróleo é uma operação realizada após a perfuração de cada fase do poço. O espaço entre o revestimento de aço e a formação rochosa é preenchido com cimento a fim de conferir aderência mecânica, isolamento de áreas permeáveis atravessadas e sustentação da coluna. Este espaço cimentado é chamado de anular. A Figura 1 ilustra o espaço anular cimentado. (THOMAS, 2001)

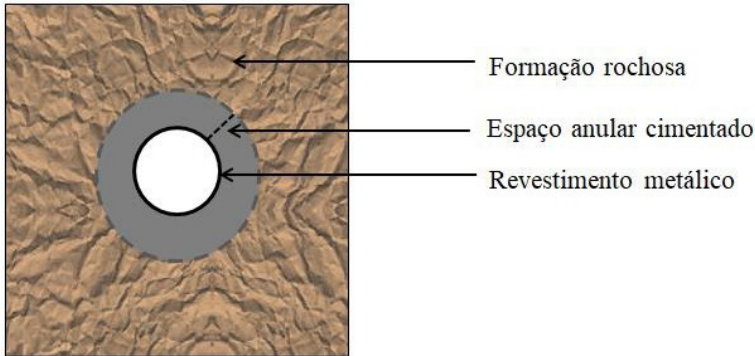


Figura 1: Vista superior do espaço anular cimentado

Fonte: O autor (2019).

A cimentação de poços divide-se em duas classes: primária e secundária

A cimentação primária consiste no preenchimento do espaço anular com pasta de cimento apropriada, como descrito anteriormente. A cimentação secundária é a correção de trechos que foram cimentados de forma deficiente. Esta última demanda tempo e dinheiro para ser realizada, portanto, a cimentação primária deve ser bem dimensionada e executada.

Com a necessidade crescente de exploração de reservatórios, a indústria do petróleo tem explorado reservatórios com poços cada vez mais complexos e operações que exigem maior grau de tecnologia.

Uma das situações enfrentadas há bastante tempo é a presença de regiões portadoras de gás que estão próximas às zonas de exploração. A presença de gás nas formações rochosas atravessadas pelo poço de petróleo pode ocasionar um problema: influxo de gás da formação para dentro do anular cimentado.

Os primeiros trabalhos científicos que abordaram o fenômeno da migração de gás em anular cimentado foram do início dos anos 60. Desde lá, a necessidade de se controlar a migração do fluido desperta o interesse pelo fenômeno e, cada vez mais, soluções são propostas nas áreas de aditivos químicos para pastas de cimento, novas dosagens e procedimentos operacionais.

Em geral, a migração de gás em poços de petróleo é causada devido à má remoção do fluido de perfuração, má aderência entre as superfícies cimento-formação rochosa e

cimento-revestimento e o mau dimensionamento da pasta cimentícia para a região a ser cimentada. (JENNINGS *et al*, 2003)

Em muitos casos, a migração de gás causa falhas de isolamento no cimento entre zonas de subsuperfície, podendo levar a redução da produtividade do poço, ocorrência de pressão residual na cabeça do poço ou até mesmo a erupção do poço (blowout). (ROCHA, 2010)

Em 20 de abril de 2010, na plataforma Deep Water Horizon, localizada no golfo do México, ocorreu um blowout que ocasionou a morte de 11 pessoas e 17 pessoas ficaram feridas. Foram aproximadamente 4,9 milhões de barris perdidos e um prejuízo de 42 bilhões de dólares. O mau dimensionamento da pasta para cimentação para aquele reservatório de petróleo permitiu a migração de gás pelo anular cimentado, causando o acidente. (Deep Water Horizon. Accident Investigation Report. Executive Summary. BP. 8/09/2010)

Para a correta adequação da pasta de cimento ao ambiente em que ela será utilizada, deve ser feitas verificações prévias da qualidade e características da pasta de cimento elaborada através dos testes laboratoriais e simuladores. Os testes vão desde a análise de teor de água livre até a utilização de equipamentos que simulam a migração de gás com pressão e temperatura que se assemelham as de um poço de petróleo.

Este trabalho tem o objetivo de estudar e simular a migração de gás através da pasta de cimento no estado fresco e avaliar a influência deste fenômeno na resistência ao cisalhamento da interface cimento-aço.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho foi simular a migração de gás através da pasta de cimento e avaliar a influência deste fenômeno na resistência ao cisalhamento na interface aço-cimento dos corpos de prova.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver a dosagem da pasta cimentícia;
- Realizar o ensaio de Teor de Água livre;
- Criar moldes que simulem o anular cimentado acima de um reservatório de hidrocarbonetos e que esteja sob a ação de gás;
- Caracterizar as amostras com e sem a migração de gás quanto a resistência à tensão cisalhante;
- Fazer um estudo comparativo entre as amostras dos corpos de prova com e sem a influência da migração de gás;

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é a denominação mundialmente convencional para o material conhecido como cimento. O nome “Portland” deriva da origem da criação do cimento. Ele foi patenteado em 1824, pelo seu criador Joseph Aspdin, que criou um material de cor e dureza semelhante às pedras da ilha inglesa de Portland, utilizadas comumente na construção de casas na Inglaterra.

Este material é um pó fino com propriedades aglomerantes que endurece após a suareação química com a água. Depois de endurecido, mesmo que seja submetido à ação da água novamente, o cimento Portland não volta a se decompor. (Boletim técnico: guia básico de utilização do cimento Portland, 2002)

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e conferem a ele características que buscam atender às diferentes situações.

O clínquer é composto por argila e calcário. A jazida de rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada com argila moída (em proporções adequadas). Esta mistura é submetida a um forno de altas temperaturas, obtendo-se um produto incandescente em forma de pelotas, que deve ser bruscamente resfriado e moído. Assim, obtém-se o clínquer em pó.

O clínquer em pó desenvolve uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

O gesso tem a função básica de controlar o tempo de pega, ou seja, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado à água. Caso não se adicionasse gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa.

As escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Possuem a propriedade de ligante hidráulico muito resistente e apresentam melhoria da durabilidade e da resistência final. A composição química deste material é basicamente de silicato de cálcio e silicato de bicálcio.

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas

(550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Quando pulverizados em partículas muito finas, passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico. São materiais que contêm silício e alumínio.

Cimento Portland para poços petrolíferos

Renpu (2016) conceitua o cimento para poços de óleo como o cimento com silicatos (cimento Portland) e o cimento sem silicatos (incluindo o cimento modificado ou cimento especial com aditivos), que são aplicados na cimentação, nas operações de intervenção, na compressão e assim por diante.

Para o cimento se adequar aos requisitos de profundidade do poço e para a prevenção da corrosão da pega por sulfatos presentes nos fluidos da formação, existem variados graus e tipos de cimento para poço de óleo que podem ser selecionados. A *American Petroleum Institute (API)* define oito graus de cimento para poços de petróleo, conforme a tabela 1 abaixo.

Grau	Profundidade apropriada do poço (m)	Tipos			Comentários
		Comum	Resistência média a sulfatos	Alta resistência a sulfatos	
A	0~1830	X	-	-	Cimento comum
B	0~1830	-	X	X	Cimento resistente a sulfatos
C	0~1830	X	X	X	Cimento de alta resistência antecipada
D	1830~3050	-	X	X	Condições de média temperatura e média pressão
E	3050~4270	-	X	X	Condições de alta temperatura e alta pressão
F	3050~4270	-	X	X	Condições de temperatura superelevada e pressão superelevada
G	0~2440	-	X	X	Cimento básico de poço de petróleo
H	0~2440	-	X	X	Cimento básico de poço de petróleo

Nota: "X" significa possuir este tipo de cimento enquanto "-" significa não possuir este tipo de cimento.

Tabela 1: Faixa de utilização do cimento API para poços de óleo

Fonte: Renpu (2016).

A PETROBRAS faz uso nas operações de cimentação de poços petrolíferos quatro

tipos de cimento: Cimento Portland CPP-Classe G, Cimento Portland Composto CP-II-F32 e CP-II-E32, e o cimento Portland CPP-Classe Especial, ainda em fase de normalização (CAMPOS, et al., 2002).

Os tipos de cimento possuem propriedades diferenciadas para que possam ser utilizados em diferentes situações. A fim de conferir melhor desempenho e especificidade, são utilizados aditivos químicos, tema que será esclarecido no próximo tópico.

ADITIVOS QUÍMICOS

Para que a operação de cimentação seja realizada com sucesso, os fatores que influenciam a cimentação primária devem ser levados em consideração para a composição de uma pasta de cimento com composição adequada. As principais características da pasta de cimento a serem controladas são: tempo de pega, tempo de bombeabilidade, peso específico, teor de água livre, controle de perda de fluido e resistência compressiva.

A tabela 2 abaixo relaciona o tipo de aditivo, a função e o componente ativo do aditivo.

Aditivo	Função	Exemplo
Acelerador de pega de pasta de cimento	Visam diminuir o tempo de espessamento e aumentar a resistência compressiva inicial da pasta	Cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de cálcio (CaCl ₂)
Andensante	Visam aumentar o peso específico para controlar poços instáveis	Baritina e Hematita
Controlador de filtrado	Reduz a permeabilidade da pasta de cimento na formação rochosa e/ou aumentando a viscosidade do filtrado	Polímeros tais como a celulose, álcool polivinílico e poliaquiloaminas
Dispersante	Permitem a obtenção de pastas de cimento com reologia otimizada para o bombeamento a vazões mais baixas e com menores perdas de carga	Sal de polinaftaleno sulfonato de sódio
Estendedores	Reduzir a densidade ou aumentar o rendimento da pasta	Bentonita, silicatos, microesferas e pasta espumada
Retardador de pega de cimento	Tornam mais longo o tempo de pega da pasta permitindo, com segurança, posicioná-la na profundidade desejada com tempo hábil	Derivados do lignossulfonatos naturais e açúcares
Superplastificante	Aumentar trabalhabilidade sem gerar segregação à pasta	Policarboxilatos e lignossulfonatos

Tabela 2: Principais tipos de aditivos utilizados em pasta de cimento para poços de óleo.

Fonte: Campos *et al* (2002).

Como exemplo da dinamicidade das propriedades da pasta de cimento, considere que um poço perfurado atravessa uma zona rochosa que possui alta porosidade e permeabilidade. A pasta de cimento aplicada nesta região precisa ter maior controle de perda de filtrado para evitar a perda de cimento. Portanto, o aditivo a ser utilizado para esta situação é o Controlador de Filtrado. Atualmente, os aditivos utilizados com esta finalidade são:

- Material Particulado: Bentonita, resinas termoplásticas, microsilica e látex.
- Materiais de Alto peso molecular: Derivados da celulose (hidroxietilcelulose, carboximetilcelulose etc) e Copolímeros de acrilamida ácido acrílico.

Para operações de cimentação que exigem menor tempo de espera para a pega do cimento, geralmente para poços rasos ou para operações de cimentação secundária, utilizam-se os aceleradores de pega de cimento. Os acelerantes podem ser agrupados em:

- Inorgânicos: Cloretos, carbonatos, aluminatos, sulfatos e dentre outros. O acelerador mais eficaz e econômico é o cloreto de cálcio. Frequentemente, utiliza-se em operações offshore a água do mar como acelerante, já que o teor de cloreto de sódio é de cerca de 25g/l.
- Orgânicos: Formiato de Cálcio, formiato de amônio e trietanolamina.

Segundo Anjos (2009), aditivos minerais são materiais em pó que são incorporados ao concreto ou argamassa com a finalidade de conferir algumas propriedades. Em muitos casos, eles são utilizados não só como aditivos, mas como substitutos parciais do cimento. Diversos materiais vêm sendo estudados para a utilização como pozolanas, dentre eles, estão a metacaulinita, a microsilica, cinzas e casca de arroz, cinzas volantes.

Um dos aditivos utilizados na elaboração da pasta de cimento deste trabalho foi a metacaulinita. A metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) é um material obtido através do processo industrial de ativação térmica entre 600°C e 850°C e através de moagem de argilas caulínicas e caulim.

Segundo Désir et al (2001) a metacaulinita, representa uma alternativa economicamente viável para substituição parcial do cimento na produção de argamassa, concreto de alto desempenho e pastas para cimentação. Por outro lado, estudos indicam que adições entre 30% e 40% de metacaulinita aumentam a resistência à compressão devido ao consumo total de hidróxido de cálcio. (LIMA, 2004; ORIOL; PERA, 2000; WILD; KHATIB, 1997).

PASTA DE CIMENTO PARA POÇOS DE PETRÓLEO

A pasta de cimento para poços de petróleo é constituída por Cimento Portland adequado, água e aditivos químicos. Ela deve ser dimensionada levando-se em consideração as características da operação, isso é, o tempo que a operação de cimentação irá ocorrer, a profundidade a ser atingida etc. As características geológicas também determinarão o dimensionamento da pasta, pois se deve considerar a permeabilidade das camadas em que

a pasta cimentícia entrará em contato, se há presença de sulfatos na formação rochosa, a temperatura em que o reservatório poderá atingir e pressões anormalmente elevadas.

OPERAÇÃO DE CIMENTAÇÃO

Cimentação primária

A cimentação primária ocorre logo após a descida da coluna de revestimento. Esta operação é realizada através do bombeio da pasta de cimentação pelo espaço interno do revestimento e, após a pasta chegar ao fundo do poço, ela retorna pelo espaço anular e sobe até a altura pré-estabelecida no projeto do poço. As cimentações primárias são realizadas após o término de cada uma das fases do poço. A figura 2 a seguir ilustra o deslocamento da pasta de cimento nesta operação (CAMPOS, et al., 2002).

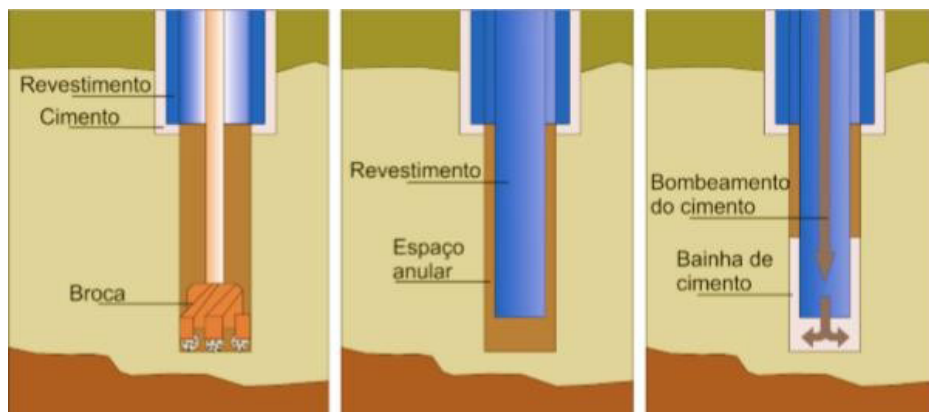


Figura 2 Cimentação Primária.

Fonte: Modificado pelo autor de Souza, W. R. M. (2017).

Os objetivos básicos da cimentação primária são:

- Conferir aderência mecânica entre a formação rochosa e o revestimento;
- Sustentação do peso da coluna;
- Impedir a migração de fluidos da formação rochosa para dentro do poço e isolar as zonas permeáveis atravessadas pelo poço;
- Proteção do revestimento contra corrosões e cargas dinâmicas em função das operações em seu interior.

Cimentação secundária

A cimentação secundária é realizada quando for necessária a correção de zonas mal cimentadas como, por exemplo, tampões de cimento, recimentação e compressão de cimento (squeeze).

Os tampões de cimento são realizados através do bombeamento de determinado volume de pasta que cobrirá um trecho do poço. São usados nos casos de perda de circulação¹, abandono total ou parcial do poço e como base para desvios (THOMAS, 2001).

A recimentação é a correção da cimentação primária e é utilizada quando o cimento não alcançou a altura desejada. O processo ocorre por meio da circulação da pasta cimentícia por trás do revestimento, através dos canhoneiros². A figura 3 abaixo ilustra a operação.

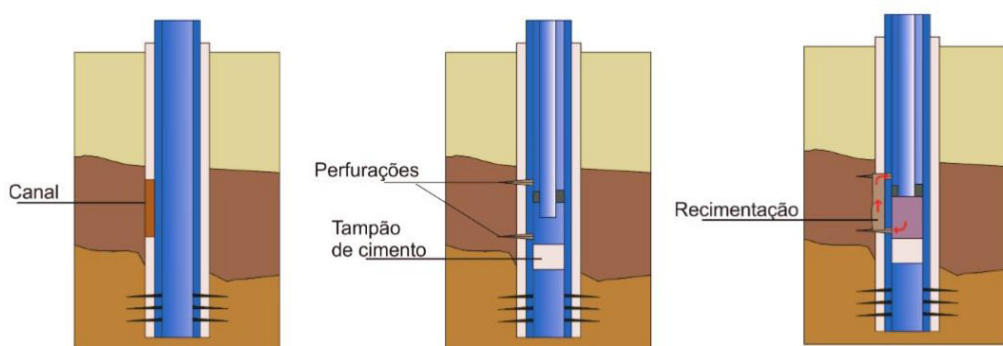


Figura 3: Exemplo de Tampão de cimento e Recimentação

Fonte: Modificado pelo autor de Souza, W. R. M. (2017).

A compressão de cimento (*squeeze*) consiste na injeção forçada de um pequeno volume de pasta cimentícia sob pressão. A área é isolada e a pressão é aplicada a partir da superfície para forçar a pasta a penetrar todos os vazios de forma eficaz. A pasta é projetada especificamente para cada tipo de problema, seja uma microfissura ou um grande vazio (NELSON, 1990).

1 Quando certa quantidade de fluido, seja o fluido de perfuração ou pasta de cimentação, é absorvida pela coluna rochosa, fazendo com que haja perda do líquido.

2 O procedimento consiste em utilizar cargas explosivas moldadas para abrir túneis no revestimento e na rocha, permitindo a vazão do fluido para o interior do poço.

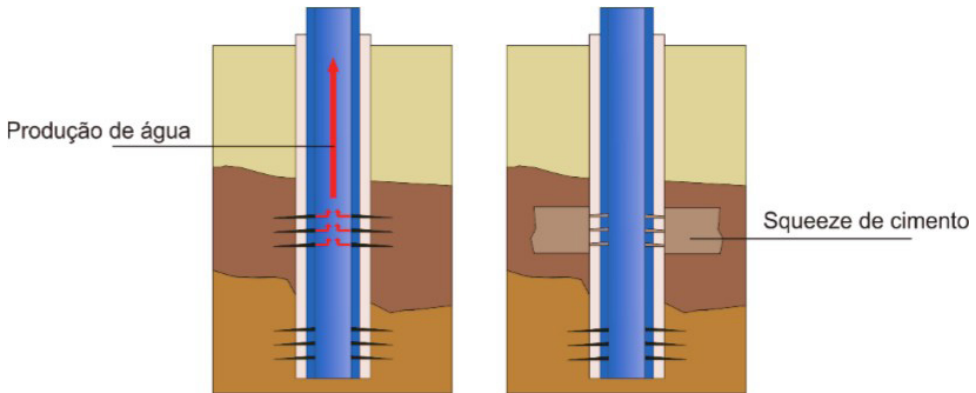


Figura 4 Squeeze de cimento

Fonte: Modificado pelo autor de Souza, W. R. M. (2017).

PROBLEMAS OPERACIONAIS DE CIMENTAÇÃO

Problemas impostos pela natureza podem ocorrer durante a cimentação e sua avaliação necessita de cautela. A presença de zonas com baixos gradientes de fratura, formações pressurizadas, presença de zonas de gás dentre outras, deve ser levadas em consideração desde o projeto da operação (NELSON, 1990).

Abaixo, são citados alguns exemplos de problemas que podem ocorrer durante a cimentação.

Corrosão por sulfatos

Quando há sulfatos presentes no meio e estes reagem com os componentes gerados durante a pega do cimento, Ca(OH)_2 , C_3A , C-S-H, pode haver a formação, expansão e crescimento gradativo dos cristais hidróxido de cálcio ou aluminato de cálcio. Esta formação de cristais ocorre nos poros do cimento, podendo levar a falha da estrutura da pega do cimento, enfraquecendo a estrutura de forma geral (RENPU, 2016).

Poços de fácil absorção

Os reservatórios fraturados de baixa pressão ou de arenitos podem apresentar zonas de baixa pressão para perda de circulação. Se a pressão hidrostática da coluna de fluido de perfuração for maior que a do reservatório, pode ocasionar demasiada perda do fluido de perfuração e de pasta cimentícia. A perda de circulação durante a cimentação pode não cimentar o reservatório ou cimentá-lo com muitas falhas, podendo gerar comunicação de zonas rochosas. Além disso, a infiltração de cimento pode tamponar fraturas, causando danos à formação (NELSON, 1990).

Poço produtor térmico

Os poços produtores térmicos são amplamente utilizados para a produção de óleo

pesado. Para tanto, o revestimento e bainha de cimento estão sob condições extremas e podem ser gravemente danificados devido às altas temperaturas.

Como a temperatura pode atingir os 300°C, o revestimento se dilata e exerce tensão compressiva na estrutura. Quando a tensão compressiva excede o limite de resistência compressiva do material, o revestimento se rompe ou danifica.

Quanto à bainha de cimento, segundo Renpu (2016), a pega do cimento pode ser bastante reduzida após os 110°C e se rompe quando ultrapassa os 200°C fazendo com que o cimento perca as suas funções de suportar e vedar o revestimento.

MIGRAÇÃO DE GÁS

Um dos problemas que podem ocorrer durante a operação de cimentação é migração de gás da formação rochosa para o anular cimentado. As causas desse complexo problema podem envolver fatores como a má remoção do fluido de perfuração, controle da massa específica da pasta, hidratação do cimento, aderência do cimento ao revestimento etc.

O estudo desse fenômeno na indústria petrolífera vem aumentando com o passar dos anos devido à complexidade dos novos campos de petróleo explorados. Os poços atingem profundidades cada vez maiores e podem vir a enfrentar problemas com a presença de gás.

Em 1970 os autores Carter e Slage publicaram um dos primeiros trabalhos científicos que consideraram a migração de gás, onde o fenômeno foi descrito como sendo causa da baixa de pressão hidrostática da coluna de cimento devido a perdas de filtrado para a formação rochosa. Dessa forma, a pressão da camada de gás quando se torna maior que a da coluna de cimento, permite a migração para dentro do anular. Recomendava-se que fosse feito um ajuste do peso específico da pasta de cimento.

Em 1976, Garcia e Clark realizaram uma série de experimentos e relataram que o influxo de gás no anular ocorria caso a perda de fluido de cimento (ou a configuração irregular da pasta de cimento) ocorresse no alto do poço, de modo que a comunicação do topo hidrostático não existisse mais entre o fundo do poço e a coluna de lama acima do ponto de cimento definido. Eles indicaram que, enquanto a pasta de cimento permanecia fluida, o fluxo de gás entre as zonas era controlado. No entanto, algum tempo após a cimentação, o fluxo de gás poderia iniciar.

Tinsley et al. (1979) introduziu um novo sistema de cimento destinado principalmente a controlar a migração de gás na interface cimento-formação. O trabalho revelou que diminuições de volume na matriz da pasta cimentícia, sejam por resultado de perda de filtrado ou hidratação química do cimento, causam uma rápida diminuição na pressão de poros na matriz de cimento. Eles relataram ainda que essa rápida redução na pressão é causada pela baixa compressibilidade da fase fluida (água) dentro da matriz de cimento. Eles recomendaram que a pressão pode ser mantida pela introdução de uma fase altamente compressível, como por exemplo, o arrastamento, adição ou geração in situ de uma fase gasosa altamente dispersa.

Posteriormente, Cheung, P. R., & Beirute, R. M. em 1985 relatam em “Gas Flow in Cements” que apenas o controle de densidade da pasta de cimentação não eram suficientes para contornar o problema. Eles apresentaram como solução a utilização de aditivos poliméricos que tornavam a pasta “impermeável”, impedindo assim a migração de gás.

Kutchak et al (2018, Halliburton) abordam os novos formatos de poços petrolíferos que a indústria de petróleo tem alcançado e, com estes novos formatos, vem novos desafios. A prática de rotacionar a coluna durante a cimentação para eliminar regiões portadoras de gás é drasticamente diminuída em poços horizontais. Para tanto, os autores relatam a utilização de pastas de cimento com baixo teor de cimento Portland associado à utilização de resina para formar uma barreira de isolamento nas áreas sujeitas a migração de gás.

MECANISMO DE MIGRAÇÃO DE GÁS

A migração de gás causa falhas de isolamento no cimento entre zonas de subsuperfície, podendo levar a redução da produtividade do poço, ocorrência de pressão residual na cabeça do poço ou até mesmo a erupção do poço (blowout) (ROCHA, 2010).

Segundo Nelson (1990), as operações de remediação para corrigir as falhas de cimentação decorrente de migração de gás são onerosas e por vezes as técnicas usuais não atendem, como por exemplo, o squeeze de cimento pode ser ineficiente devido a:

- Os canais de migração de gás ser difíceis de localizar;
- O canal de migração pode ser muito pequeno para ser preenchido com cimento;
- A pressão fornecida durante um squeeze pode ser suficiente para fraturar a coluna de cimento, ou mesmo para fraturar a formação rochosa.

Portanto, prevenir o problema de migração de gás é preferível a corrigir o problema. O mecanismo de entrada de gás após a cimentação ainda não está totalmente esclarecido. As teorias recentes buscam modelar o fenômeno, mas não incluem todos os fatores deste complexo problema. Portanto, estudos devem ser realizados para definir com maior precisão a resistência do cimento necessária para evitar a migração de gás e o efeito deste fenômeno na pasta de cimentação.

De forma geral, a migração do gás ocorre quando a pressão da coluna hidrostática de cimento é menor do que a pressão que o gás da formação rochosa está exercendo, permitindo que o gás migre para regiões de menor pressão.

Existem fatores do ambiente em questão que favorecerão o fenômeno. A figura 5 abaixo ilustra a migração de gás sendo favorecida para as situações que serão explanadas posteriormente.

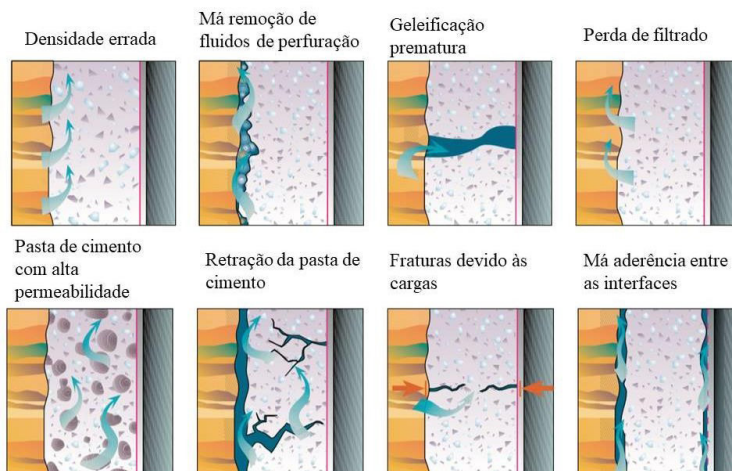


Figura 5 Mecanismos de entrada de gás no anular cimentado

Fonte: Modificado pelo autor de Bonnet,A. e Pafitis, D. (1996).

Densidade incorreta

Uma das primeiras soluções para contornar o problema de migração de gás foi o aumento da densidade da pasta de cimento. Este método visa criar uma pressão hidrostática superior à pressão de poros que o gás está exercendo. Esta abordagem é limitada devido aos riscos de se perder a circulação do anular ou de fraturar a formação rochosa.

Segundo Beirute (1984) e Smith et al. (1985), a pressão hidrostática no anular não é constante durante a operação de cimentação devido às diferenças de densidade entre a lama de perfuração, pasta cimentícia e os fluxos de gás. Caso haja uma queda na pressão hidrostática da coluna de cimento, um processo irreversível de entrada de gás pode se iniciar.

Para tanto, é necessário à utilização de simuladores computacionais para garantir que as pressões hidrostáticas nos pontos críticos permaneçam maior que a pressão de poros e menor que a pressão de faturamento.

Má remoção do fluido de perfuração

A remoção adequada dos fluidos de perfuração é essencial para evitar migração de gás. A presença de fluidos diferentes da pasta de cimento entre duas zonas pressurizadas favorece a criação de canais preferencias de entrada de gás para o cimento, além de influenciar na adesão entre cimento e revestimento e cimento e formação rochosa (BONNET,A. e PAFITIS, D., 1996).

Geleificação prematura

A Força Gel representa a resistência ao movimento que um fluido (de perfuração, de completação ou pasta de cimento) adquire ao longo do tempo. Em pastas de cimento, a força gel é desenvolvida quando ela passa por um estado de transição fluido-sólido. No estado de transição, a pasta já desenvolveu força gel suficiente para suportar parcialmente a coluna hidrostática, restringindo a transmissão de pressão, e impedir o influxo de gases da formação rochosa para o anular cimentado. (CAMPOS *et al*, 2002)

A geleificação, portanto, é um processo no qual um fluido de perfuração ou de completação adquire consistência de geleia e desenvolve força gel. Na pasta de cimento, caracteriza-se como um estado de transição do líquido para o sólido. Este fluido, quando em repouso ou exposto a baixa taxa de cisalhamento, tem sua viscosidade aumentada e passa a apresentar comportamento reológico semelhante ao de um gel.

Durante a cimentação, após o encerramento do bombeio de cimento, a pasta cimentícia começa a geleificar, causando uma redução na pressão hidrostática, desbalanceado o controle hidrostático do anular, favorecendo a entrada de gás (NELSON, 1990).

Perda de filtrado

A perda de filtrado é a perda dos fluidos do poço , seja de completação ou de perfuração) para a formação rochosa. Ela ocorre nas operações de cimentação devido à pressão do anular ser maior que a da formação rochosa. O processo é atenuado quando

um reboco de baixa permeabilidade é formado contra a superfície da formação rochosa ou quando a pressão hidrostática do anular e da formação se igualam. (Nelson, 1990)

A perda de filtrado favorece a migração de gás devido a três principais fatores: os fluidos filtrados para a formação deixam espaços vazios no anular; a perda de filtrado controla a permeabilidade do reboco e a perda de filtrado contribui para a queda de pressão no espaço anular. (NUNES,2014).

Pasta de cimento com alta permeabilidade

Pastas com alta permeabilidade oferecem pouca resistência à entrada de gás. Além disso, após o início da geleificação da pasta, a matriz cimentícia entra em um estado transitório em que apesar de parte da estrutura estar formada, a outra parte apresenta o comportamento de fluido. A alta permeabilidade nesta situação pode ser o gatilho para a entrada de gás caso a pressão da formação seja superior que a do anular. (BONETT E PAFITIS, 1996).

Cheung e Beirute (1985) verificaram que pastas contendo látex em sua formulação oferecem uma boa resistência a entrada de gás, já pastas contendo apenas os aditivos de controlador de filtrado e as espumadas, não possuem a propriedade necessária para evitar a migração.

Retração da pasta de cimento

A retração da pasta de cimento é um processo que pode ocorrer devido à formação de hidratos. Estes hidratos possuem volume menor do que os reagente (água e anidros). A retração excessiva aumenta a porosidade do meio podendo formar micro anulares que favorecem a passagem de gás. Além disso, a retração do cimento pode ocasionar um fluxo da pasta no espaço anular, ocasionando a queda de pressão hidrostática (ROCHA,2010).

Segundo Nelson e Guillot (2006), a variação do volume externo da pasta de cimento pode alcançar 1%. A contração interna da matriz de cimento representa de 4 a 6% do volume inicial da pasta de cimento. Esta variação de volume é chamada de retração química.

Fraturas devidas às cargas de subsuperfície

Fraturas na matriz de cimento podem ser geradas devido às tensões de compressão, tração ou de ambas. Eles também ocorrem devido às mudanças de temperatura, de pressão do poço, tensões tectônicas e movimentação das formações. Essa fraturas criam caminhos para a migração de gás (ROCHA,2010)

Má aderência entre as interfaces

A aderência é a propriedade que impede o escorregamento do aço em relação ao cimento que o envolve. As tensões exercidas causam a deformação uniforme nos materiais que estão com boa aderência, assegurando que a deformação seja igualmente distribuída entre o cimento e aço (FREITAS, 2011).

Portanto, a aderência deficiente entre a formação rochosa-aço e aço-cimento podem gerar falhas estruturais na matriz cimentícia, seja devido a má distribuição das cargas, seja por espaços vazios que proporcionam canais preferencias de migração.

TESTES LABORATORIAIS – AVALIAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

O planejamento do sistema de pastas de cimento a ser utilizado na operação de cimentação do poço de petróleo é de suma importância para o sucesso desta operação. Ele deve ser feito com base nos testes laboratoriais que simulam as situações em que o cimento estará submetido no poço (pressão e temperatura) (CAMPOS *et al*, 2002).

O procedimento utilizado neste trabalho foi o PROCELAB – Procedimentos e Métodos de Laboratoriais Destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos, manual interno da PETROBRAS. O PROCELAB é baseado nas principais normas utilizadas Mundialmente, como: API RP B 10B- API Recommended Practice for Testing Well Cements, 22ª edição, e a API Spec 10A – API Specification for Cements and Materials for Well Cementing , 22ª Edição.

Quanto mais parâmetros forem dimensionados e avaliados acerca do fluido, mais precisa será a operação. Para tanto, as características que podem ser avaliadas são:

EQUIPAMENTO DE MISTURA - MISTURADOR DE PALHETAS

Para a determinação das demais propriedades da pasta de cimento, é necessário iniciar o processo pela mistura da pasta de cimento. Para tanto, o misturador de palhetas rotativas é utilizado. A API estabelece o critério de mistura com as seguintes características: mistura durante 15 segundos em velocidade de 4000 rpm, seguida por mais um período de 35 segundos em velocidade de 12000 rpm, sendo a energia total da mistura de aproximadamente 5,9 KJ/KG (CAMPOS *et al*, 2002).

O equipamento é composto pelo motor na parte inferior, onde é acoplado o copo. As palhetas ficam localizadas na parte inferior e fornecem ao sistema o cisalhamento da mistura, conforme mostra a Figura 6 abaixo.



Figura 6 Misturador de Palhetas

Fonte: CAMPOS *et al*, 2002.

DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO

A determinação do peso específico da pasta de cimento é importante para o cálculo da pressão hidrostática da coluna de cimento frente à pressão de poros e demais pressões de subsuperfície. (CAMPOS *et al*, 2002)

Pode-se utilizar uma balança de lama (Figura 7) que funciona a partir de uma haste metálica graduada que contém dois recipientes em suas extremidades, onde num lado fica local para a pasta de cimento e do outro lado ficam pequenas esferas padronizadas de chumbo. A medição é feita por uma graduação de equilíbrio que determina o peso específico da pasta.



Figura 7: Balança de lama

Fonte: Retirado do catálogo online Made-in-china. Acesso em 06/12/2019 às 08:29.

Outro método para a avaliação do peso específico é através da balança pressurizada. O funcionamento deste equipamento é semelhante ao da balança de lama, no entanto, a o recipiente de pesagem é pressurizado com a injeção deste mesmo fluido, com o auxílio de um embolo. A vantagem deste equipamento é que não haverá a presença de bolhas de ar, portanto o erro da medida é menor.

TEOR DE ÁGUA LIVRE

O Teor de água livre representa a quantidade de água que segrega do restante da mistura da pasta de cimento. Pastas com maior teor de água possuem maior trabalhabilidade, no entanto, tendem a ter menor resistência ao cisalhamento. (SOBRAL, 2000)

Este ensaio tem por objetivo estimar a susceptibilidade de uma pasta ter seu volume total reduzido em função da segregação. A pasta homogeneizada deve ser vertida em uma proveta graduada de 250 ml (figura8) e vedada sua parte superior. Após um período de 2 horas, a água sobressalente é recuperada com uma seringa e transferida para uma proveta de 5ml. A medida obtida é chamada de teor de água livre.



Figura 8: Proveta de água livre

Fonte: Retirado do site laborglas.com.br. Acesso em 23/11/2019 às 17:43.

TESTE DE CONSISTENTOMETRIA

Neste ensaio, o equipamento simula as condições geológicas para determinar a velocidade de espessamento ou tempo de pega da pasta de cimento. O tempo de pega da pasta representa quanto tempo a pasta de cimento estará no seu estado fluído e bombeável. Esta medida é de extrema importância para que se tenha a informação do tempo disponível para cimentar com segurança.

O consistômetro é composto por um cilindro rotativo (onde fica alocado a pasta de cimento) e palhetas estacionárias. O conjunto fica alocado em uma câmara capaz de fornecer temperatura e pressão compatíveis com as de um poço. Através da rotação do copo e do torque exercido nas palhetas, o aparelho registra a voltagem gerada e, através de curvas de calibração, a voltagem é transformada para a Unidade de Consistentometria – Uc. Afigura 9 abaixo ilustra o equipamento.



Figura 9: Consistômetro pressurizado

Fonte: Retirado de do site eurosul.com. Acesso em 23/11/2019 às 17:00.

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS

O viscosímetro é o equipamento usualmente empregado para a determinação das propriedades reológicas. Ele mede a tensão de cisalhamento na presença de diversas taxas de deformação selecionadas. O mecanismo é através da rotação do rotor e bob acoplados que movimento o fluido presente no copo estacionário. Através da deformação presente na mola do bob, mede-se o torque exercido. A figura 10 abaixo ilustra o equipamento.



Figura 10: Viscosímetro rotacional

Fonte: Retirado de do site Chandlereng.com.Acesso em 23/11/2019 às 17:20.

EQUIPAMENTO DE TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Este ensaio tem por objetivo determinar o esforço máximo que o corpo de prova feito de cimento consegue suportar.

Pelo método destrutivo, o corpo de prova é submetido a uma câmara aquecida e que pode ser pressurizada ou não. Enquanto a temperatura sobe da ambiente até a de um poço de petróleo, a pressão mantém-se constante. Após um determinado período de tempo, o corpo de prova é submetido a um banho de resfriamento e só então, submetido a uma prensa hidráulica com uma dada taxa de carregamento.

Um dos tipos de prensa utilizados é a prensa de CHANDLER. (figura 11) Ela tem o comando automatizado e indicador de força aplicada digital e opera a partir da compressão de um de seus pratos contra o corpo de prova, o qual está apoiado sobre o outro prato da prensa que se encontra estático. A prensa submete a força de compressão no corpo de prova até a ruptura do mesmo.



Figura 11: Prensa de Chandler

Fonte: Retirado do site Chandlereng.com. Acesso em 23/11/2019 às 17:50.

Também se pode obter as características de resistência a compressão através do método Ultrassônico (UCA) não destrutivo (figura12). Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência a compressão utilizando-se as informações do tempo que a onda ultrassônica leva para atravessar o corpo de prova, fornecendo ao final do ensaio dois gráficos para análise: Resistência a compressão (psi) X tempo e Tempo de Trânsito x tempo.



Figura 12: Ultrasonic Cement Analyser (UCA)

Fonte: Retirado do site Chandlereng.com. Acesso em 23/11/2019 às 18:00.

METODOLOGIA

Neste capítulo, são descritos os procedimentos experimentais relativos a montagem dos corpos de prova, dosagem e preparo das pastas de cimento, ensaio de resistência ao cisalhamento e teste de teor de água livre.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados com tempo de cura de 7 e 14 dias e as pasta de cimento foram curadas a temperatura ambiente. A pasta de cimento foi composta por cimento Portland, água, aditivo superplastificante e adição de metacaulinita.

Foram criados dois tipos de corpos de prova:

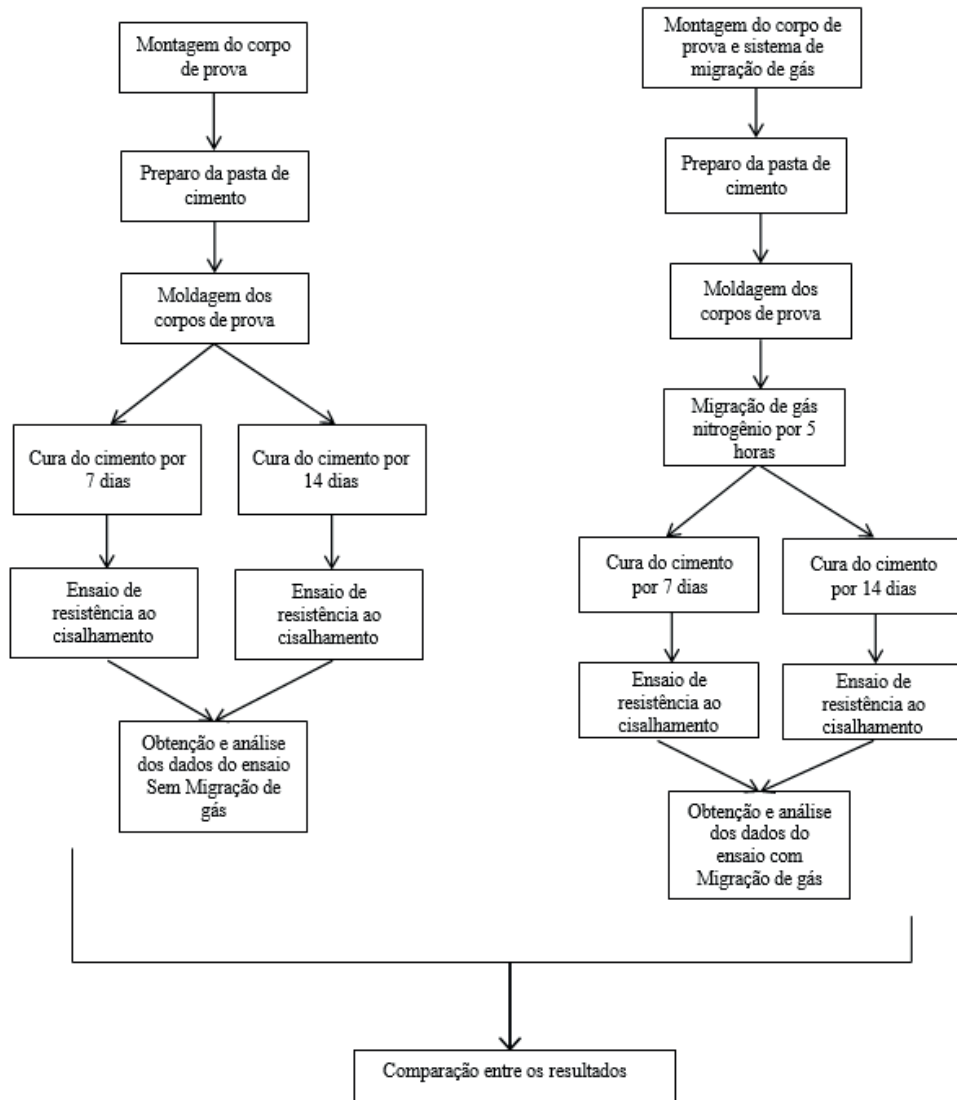
- Corpo de prova que simula o anular de um poço cimentado em um trecho aço-cimento-aço. Neste sistema, não há migração de gás e os resultados para estes ensaios foram utilizados como “parâmetro 0” para calcular o decréscimo de resistência ao cisalhamento quando, posteriormente, for submetido à migração de gás.
- Corpo de prova que simula o anular de um poço cimentado em um trecho aço-cimento-aço com migração de gás. Para este sistema, foi acoplado um tubo de cobre conectado a um cilindro de gás nitrogênio que forneceu o gás para o experimento. O fluido migrou por 5 horas. Os resultados deste ensaio foram comparados ao “parâmetro 0”.

FLUXOGRAMA

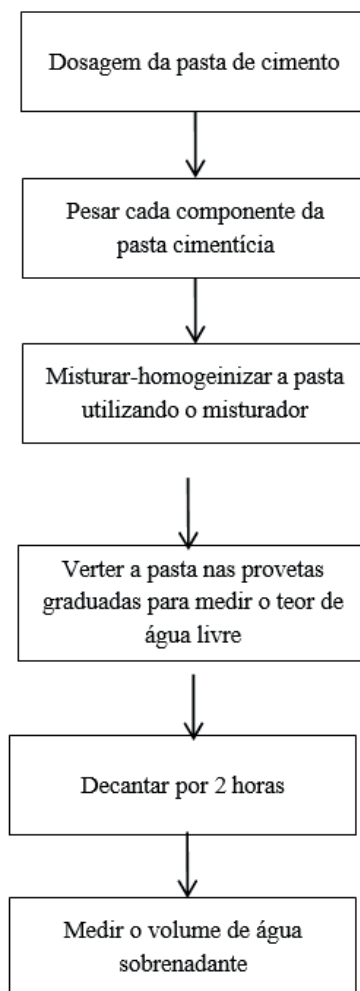
Nesta seção, são apresentados os fluxogramas dos ensaios de resistência à compressão sem migração de gás e com migração de gás e Teor de Água Livre.

I) Ensaio de resistência ao cisalhamento sem migração de gás

II) Ensaio de resistência ao cisalhamento com migração de gás



III) Ensaio de Teor de água livre



MONTAGEM DO CORPO DE PROVA PARA O SEM MIGRAÇÃO DE GÁS

O corpo de prova elaborado simula um anular de poço de petróleo cimentado em um trecho aço-cimento-aço. Foram utilizados dois tubos de aço carbono, um de 127 mm e outro 254 mm de diâmetro, sendo a espessura dos tubos utilizados foi de 3 mm .

Eles foram posicionados de forma que o tubo de 127 mm de diâmetro ficasse acima do tubo de 254mm (com a utilização de uma base), conforme ilustra o projeto gráfico abaixo.

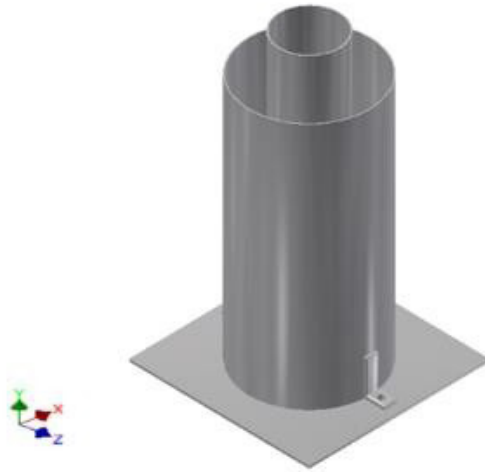


Figura 13: Projeto dos corpos de prova - tubos de aço.

Fonte: Autor (2019).

A diferença de altura projetada para os dois tubos concêntricos foi de 10 centímetros. A base criada, além de fornecer a altura necessária, teve o objetivo de simular uma rocha reservatório. Ela foi elaborada contendo uma camada de poliestireno expandido, cavaco metálico (para simular da rocha reservatório na base dos tubos) e poliuretano (para o cimento não obstruir a entrada do tubo de cobre para o ensaio com migração de gás). A base está ilustrada na figura 14.

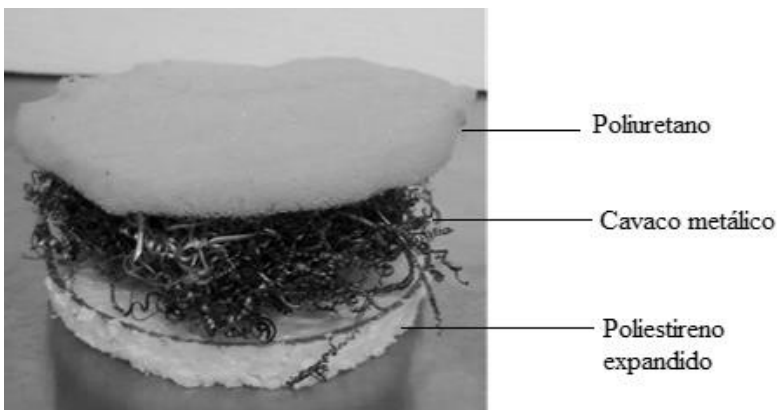


Figura 14: Montagem da base simulando reservatório.

Fonte: Autor (2019).

MONTAGEM PARA O ENSAIO DE CIMENTAÇÃO COM MIGRAÇÃO DE GÁS

O corpo de prova utilizado para a moldagem do cimento com a migração de gás seguiu os mesmos parâmetros descritos no item 7.2, no entanto, para fazer com que o gás migrasse pelo cimento, foi realizado um furo a 2 cm da base do corpo de prova.

Um sistema provedor de gás foi instalado próximo ao CP. Este sistema é composto por um cilindro de gás nitrogênio, a válvula de abertura do cilindro, um controlador de pressão e um tubo de cobre de 6,35 mm de diâmetro.

O sistema foi conectado ao CP através do tubo de cobre, conforme a figura 15.

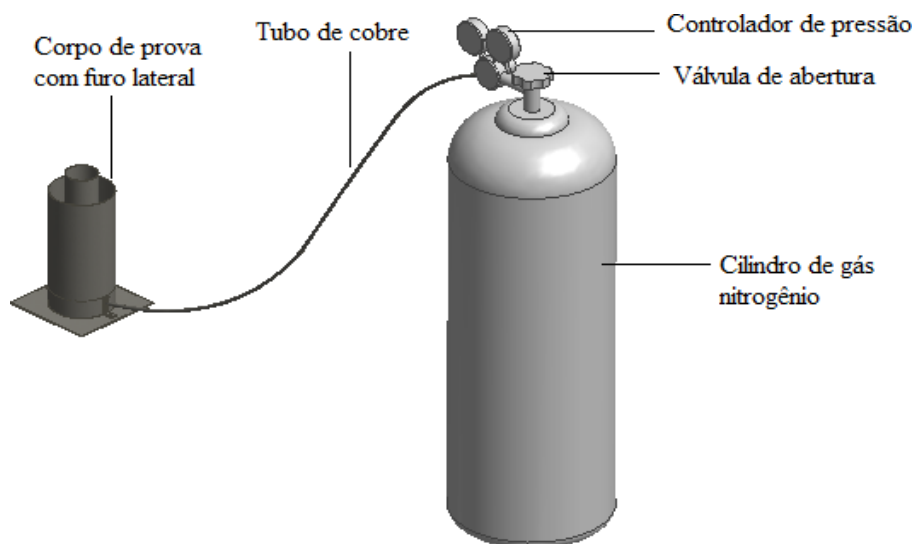


Figura 15: Sistema de migração de gás acoplado ao corpo de prova.

Fonte: Autor (2019).

ADITIVOS QUÍMICOS

Foi utilizado para a preparação da pasta de cimento o aditivo líquido ADVA™ CAST 525 fornecido pela empresa Amtech Químicos para Construção. Este aditivo é um superplastificante desenvolvido para dar maior trabalhabilidade, permitindo assim diminuir o fator água-cimento.

MATERIAIS CIMENTANTES

Foi utilizado o cimento CP I S 40 fabricado pela empresa CEMEX. Segunda a NBR 5732 contém de 95 a 99% de clínquer e de 1 a 5% de escória de alto forno, material pozolânico e material carbonático.

A metacaulinita foi utilizada em substituição de 10% do cimento. É um aditivo

mineral obtido através da calcinação do argilomineral caulinita e representa uma alternativa economicamente viável para substituição parcial do cimento na produção de argamassa e de concreto de alto desempenho. (Désir e Castro, 2001).

PREPARO DAS PASTAS DE CIMENTO E MOLDAGEM

A pasta de cimento foi elaborada com fator água-cimento de 0,6, 10% de substituição do cimento por metacaulinita e 1% de aditivo líquido em relação ao peso de cimento.

A mistura foi realizada utilizando-se um misturador para pasta de cimento. O procedimento para a mistura foi seguido conforme o PROCELAB: 15 segundos na velocidade de 4000 rpm \pm 200 rpm e 35 segundos na velocidade de 12000 rpm \pm 500. O misturador utilizado foi desenvolvido pelos alunos do curso de Engenharia de Petróleo e Gás da UFAM e atende as normas do API e PROCELAB. A figura 16 abaixo mostra o misturador.

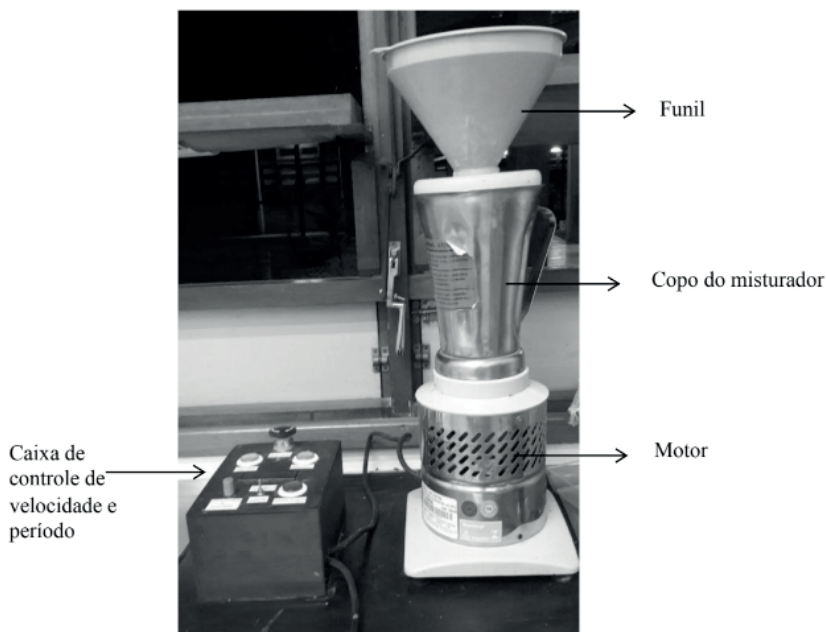


Figura 16: Misturador desenvolvido pelos alunos da UFAM

Fonte: Autor (2019).

Após a mistura, a pasta foi vertida no espaço anular do CP. Para o ensaio sem migração de gás, os CP's foram armazenados para dar o tempo de cura de 7 e 14 dias.

Para o ensaio com a migração de gás, após a pasta ser vertida no espaço anular, a migração de gás foi realizada durante 5 horas e só após isto, os CP's foram armazenados para a cura à temperatura ambiente.

Em ambos os ensaios, a temperatura de hidratação do cimento foi medida com o auxílio de um Termopar Minipa MT-350, com range de -30°C até 550°C, conforme a figura

17 abaixo. Não houve alterações da temperatura.



Figura 17: Termopar Minipa MT-350

Fonte: Autor (2019) .

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Após o tempo de cura de 7 e 14 dias, os corpos de prova foram preparados para o ensaio de resistência ao cisalhamento. Foram retiradas as bases selantes dos CP's e o poliestireno expandido, criando-se um espaço vazio para rompimento dos CP's.

Os CP's foram rompidos através de um prensa hidráulica, onde a força aplicada estava indicada no manômetro acima da prensa, conforme a figura 18 abaixo.

Manômetro

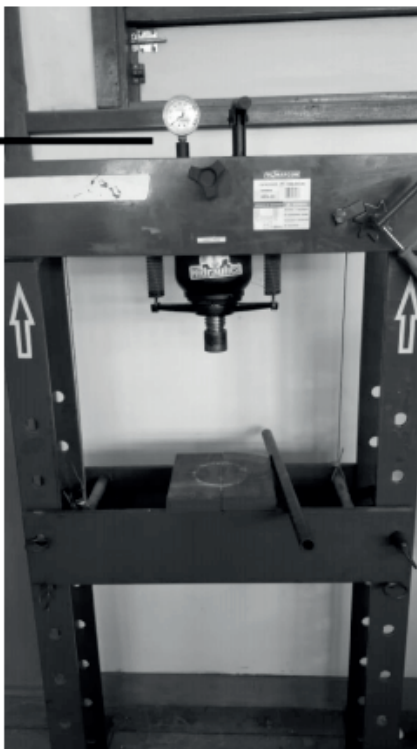


Figura 18: Prensa hidráulica utilizada para o rompimento dos CP's

Fonte: Autor (2019).

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PARTE LABORATORIAL

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Misturador alternativo elaborado no laboratório de Processos I do curso de Engenharia de Petróleo e Gás da Universidade Federal do Amazonas;
- Regulador de pressão para gás nitrogênio da marca Condor com manômetros de baixa pressão até 232,06 psi (1,6 MPa) e alta pressão até 4568,68 psi (31,5 MPa);
- Paquímetro eletrônico WURTH com resolução de 0,01 mm;
- Termopar Minipa MT-350, com range de -30°C até 550°C, precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ entre as temperaturas de -30°C e 101°C;
- Prensa hidráulica Marcon com capacidade de 30 toneladas.

TEOR DE ÁGUA LIVRE

O teste de Teor de água livre foi realizado posteriormente ao de resistência à compressão.

Após a homogeneização da pasta cimentícia, foi vertida 250 ml do fluido em uma proveta graduada de 500 ml. A parte superior da proveta foi vedada com filme de politereftalato de etileno para impedir a evaporação. Após duas horas de espera-decantação da pasta, verificou-se a quantidade de água sobrenadante com o auxílio de uma seringa para remover o fluido. A figura 12 abaixo mostra as o teste de teor de água livre sendo realizado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CORPOS DE PROVA E MOLDAGEM

As bases dos corpos de prova foram montadas com o mesmo diâmetro do tubo de 254 mm. As espessuras das camadas desta base estão especificadas na tabela 3.

Material	Espessura (cm)
Poliestireno expandido	1,46
Cavaco metálico	1,82
Poliuretano	1,54

Tabela 3. Espessura média dos componentes da base.

A base para simulação do reservatório preencheu todo o diâmetro interno do tubo de 254 mm.

O poliestireno expandido foi utilizado para proporcionar altura e rigidez à montagem. O cavaco metálico foi utilizado nesta altura devido à porosidade e permeabilidade que ele oferece, características necessárias para que o tubo de cobre inserido nesta região pudesse fornecer o gás nitrogênio sem muita obstrução ou pressão contrária. Já o poliuretano foi utilizado para não permitir a passagem completa de cimento para a região abaixo dela, portadora do sistema de migração de gás.

Após a montagem dos CP's, a pasta de cimento foi misturada e vertida dentro deles. Para manter fixado o tubo interno, foram utilizados centralizadores de poliestireno expandido de mesmo tamanho, conforme mostra a figura 19 abaixo.

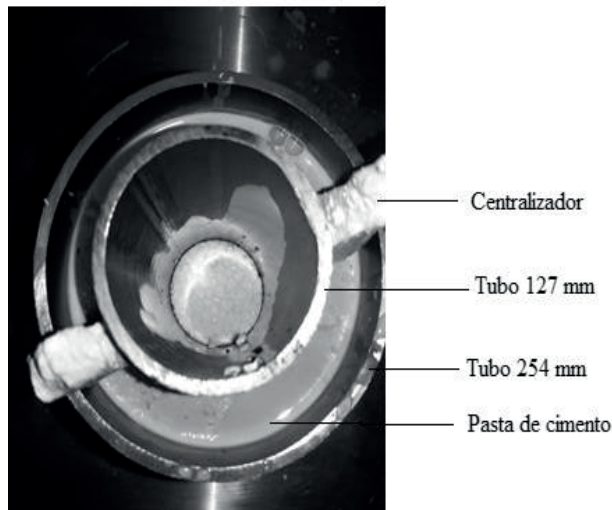


Figura 19: Vista superior do corpo de prova sem migração de gás.

Fonte: Autor (2019).

O ensaio com migração de gás foi montado utilizando-se o corpo de prova com o furo lateral e o tubo de cobre acoplado ao cilindro de Gás Nitrogênio como mostra a Figura 20.



Figura 20: Vista lateral do corpo de prova com migração de gás.

Fonte: Autor (2019).

A simulação de migração de gás apresentou momentos críticos, onde a pressão do gás fornecida pelo cilindro causou extravasão de cimento. Isto pode ter sido causado devido ao gás ter criado canais preferenciais de migração, facilitando a sua saída para a região de menor pressão (superfície).

Por outro lado, a simulação apresentou situações em que o cimento impediu a passagem do gás. Neste último caso, observou-se o impedimento através do regulador de pressão. Pode ter sido causado pela entrada de cimento no tubo de cobre ou então pela pressão hidrostática da coluna de cimento ter sido maior que a pressão fornecida pelo gás.

Portanto, esta simulação não foi com pressão de gás constante, pois o fluxo de gás estava sendo controlado a todo o momento pelo regulador de pressão.

Durante o processo, foi possível observar a migração de gás devido à presença de pequenas bolhas na superfície do cimento, como ilustra a figura 21. Após o cimento estar no estado endurecido, à superfície do cimento apresentou o topo de canais preferenciais que foram criados durante a migração do gás.



Figura 21: Superfície do cimento com bolhas

Fonte: Autor (2019).

A presença de metacaulinita na formulação do cimento causou certa segregação na pasta cimentícia. Pode ser observado através da superfície da pasta de cimento que continham trechos mais esbranquiçados e com textura diferenciada.

Portanto, a utilização de metacaulinita nesta proporção pode não ser adequada para a utilização em pastas de cimento para a cimentação de poços de petróleo devido à segregação que ocasiona.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A tensão de cisalhamento da interface aço-cimento foi calculada conforme a Equação 1, onde “F” é a força e “A” a área de contato.

A força de ruptura foi obtida no ensaio de cisalhamento utilizando-se a prensa hidráulica. A área sujeita ao cisalhamento foi obtida através do cálculo da região lateral do tubo de revestimento externo do anular cimentado.

$$\text{Tensão cisalhante} = F/A \quad (1)$$

A área foi calculada sabendo-se que: a altura do tubo externo foi de 20 cm para todos os corpos de prova, a altura média do poliestireno expandido e utilizando-se as medições de nível não cimentado após o endurecimento da pasta de cimento, que corresponde ao “espaço vazio” ilustrado na figura 19 abaixo. Como o cavaco metálico e o poliuretano também foram cimentados, estes foram considerados parte da área de contato, trecho indicado como “poliuretano + cavaco metálico – Área porosa” na figura 19.

O esquema da figura 22 abaixo ilustra os trechos cimentados e não cimentados.

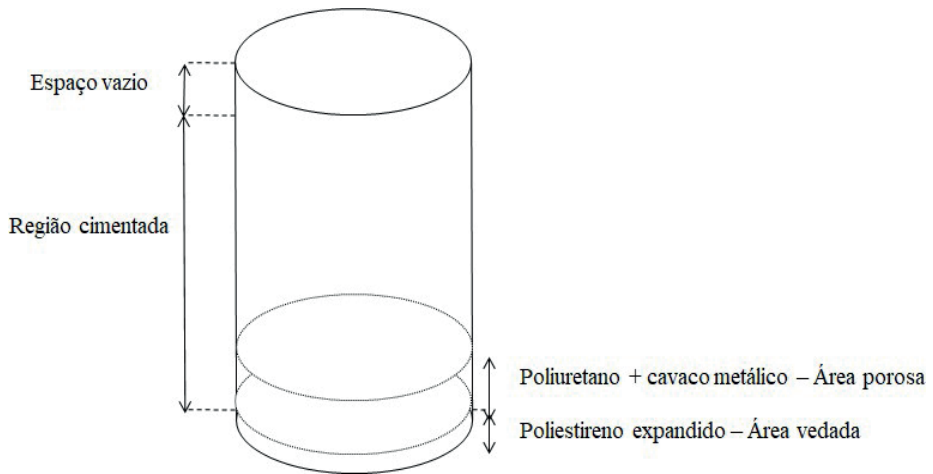


Figura 22: Esquema das regiões cimentadas e não cimentadas.

Fonte: Autor (2019).

O nível cimentado foi calculado através da Equação 2.

$$H_{\text{Cimentado}} = H_{\text{tubo}} - H_{\text{Média poliestireno}} - H_{\text{Espaço vazio}} \quad (2)$$

A área foi calculada através da Equação 3, onde “D” equivale ao diâmetro interno do tubo de 254mm de diâmetro. Para este cálculo foi utilizado o diâmetro do tubo maior porque durante a realização do ensaio na prensa hidráulica observou-se a ruptura do corpo de prova na interface do tubo de aço de 254mm com a pasta de cimento. Esperava-se que ocorresse a ruptura do tubo de 127mm, no entanto, a pasta de cimento permaneceu aderida a superfície deste tubo. A tabela 4 apresenta os valores calculados.

$$\text{Área cimentada} = \pi * D * H_{\text{cimentado}} \quad (3)$$

Corpo de prova	Nível não cimentado- H _{não cimentado} (cm)	Nível cimentado- H _{cimentado} (cm)	Área cimentada (cm ²)	Área cimentada(m ²)
14 dias sem migração de gás	3,12	15,44	1216,91	1,21
14 com migração de gás	4,91	13,64	1075,05	1,07
7 dias sem migração de gás	4,23	14,34	1130,22	1,13
7 dias com migração de gás	3,51	15,04	1185,38	1,18

Tabela 4. Cálculo da área cimentada dos corpos de prova.

Os valores para a força de ruptura foram obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento utilizando-se a prensa hidráulica. Com os valores da força e da área cimentada, pode ser obtido os valores para tensão de cisalhamento, como mostra a tabela 5.

Corpo de prova	Força de Cisalhamento (N)	Área cimentada (m ²)	Tensão de Cisalhamento (KPa)
14 dias sem migração de gás	14709,91	1,22	12,09
14 com migração de gás	11767,92	1,07	10,95
7 dias sem migração de gás	14709,92	1,13	13,01
7 dias com migração degás	10787,34	1,18	9,10

Tabela 5. Cálculo da tensão de cisalhamento para os corpos de prova.

A análise dos dados da Tabela 5 indica que houve uma redução da resistência ao cisalhamento nos corpos com a migração de gás, quando comparados aos corpos de prova sem a migração de gás. Este é um resultado esperado visto que foi possível observar que o gás migrou (Figura 18), e assim sendo, observou-se migração de gás através da pasta de cimento e durante a pega da pasta cimentícia produziu-se micro canais. Esses micro canais influenciaram o resultado da tensão cisalhante na interface aço-cimento.

A redução percentual da resistência ao cisalhamento para os corpos de prova com 14 dias foi de 20,0%. Para os corpos de prova com 7 dias, a redução percentual foi de 26,7%.

Os resultados obtidos para os corpos sem a migração de gás indicam uma

anormalidade: o corpo de prova com 7 dias apresentou maior resistência ao cisalhamento quando comparado ao corpo de prova de 14 dias. Isto pode ter ocorrido devido a diferenças da área de contato da interface aço-cimento calculada em função da altura do cavaco metálico, que simula a rocha reservatório.

TEOR DE ÁGUA LIVRE

A presença de metacaulinita na mistura conferiu à pasta maior viscosidade, dificultando a entrada da pasta de cimento na proveta graduada.

Para maior precisão, foram feitos três ensaios de água livre, conforme mostra a figura 20 abaixo. Após a espera de duas horas, verificou-se a quantidade de água sobrenadante através de uma seringa e utilizou-se a Equação 4 para o cálculo de Teor de água livre. A tabela 5 descreve os resultados obtidos.

$$\text{Teor de água livre (\%)} = 100 * \text{Vol. água sobrenadante} / \text{Vol. pasta de cimento} \quad (4)$$



Figura 23: Teste de teor de água livre

Fonte: Autor (2019).

Proveta	Volume de água sobrenadante (ml)	Teor de água livre (%)	Média (%)
1	0,50	0,20	
2	0,30	0,12	0,15
3	0,30	0,12	

Tabela 6: Dados obtidos a partir do teste de água livre

A média de Teor de água livre encontrada foi de 0,15 %. Segundo Rocha (2010), aspastas de cimento com teor de água livre adequadas para controlar a migração de gás

possuem um teor de água menor que 0,25%. Portanto, quanto a este requisito, a pasta cimentícia atenderia aos padrões para evitar a migração de gás.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente trabalho e as recomendações para a continuação de futuros trabalhos nesta área de estudo

CONCLUSÕES

Durante o ensaio de migração de gás, o sistema que foi submetido por um período de 5 horas de migração de gás apresentou momentos críticos durante o procedimento. Isto porque apresentou picos de pressão que ocasionaram o extravasamento da pasta de cimento. Durante o procedimento, também houve a interrupção do fluxo de gás devido a interdição do tubo de cobre pela pasta de cimento. Estes episódios puderam ser observados através do controlador de fluxo de gás que estava instalado na saída do cilindro de gás nitrogênio.

Após a moldagem e cura de 7 e 14 dias, os CP's foram submetidos à prensa hidráulica para obter a máxima tensão suportada pelo CP.

Os resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento indicaram a redução da resistência em 20,00% para os CP's de 14 dias de cura. Para os CP's com 7 dias de cura, a redução da resistência foi de 26,7%. Este é um resultado esperado visto que foi possível observar que o gás migrou (Figura 17), e assim sendo, observou-se migração de gás através da pasta de cimento e durante a pega da pasta cimentícia produziu-se micro canais. Esses micro canais influenciaram o resultado da tensão cisalhante na interface aço-cimento.

Na comparação entre os corpos de prova de 7 e 14 dias observou-se uma anormalidade: os CP's com menos tempo de cura apresentaram resistência ao cisalhamento superior aos de 14 dias de cura. Isto pode ter sido ocasionado devido às diferentes áreas de contato da interface aço-cimento calculada em função da altura do cavaco metálico, que simula a rocha reservatório.

A fim de complementar os estudos acerca desta pasta cimentícia, foram realizados os testes de teor de água livre. O resultado médio do teor de água livre medido foi de 0,15%, a qual representa um valor satisfatório quanto ao máximo teor de água livre previsto pela literatura.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para obter resultados com maiores parâmetros, recomenda-se para trabalhos futuros a consideração da influência da temperatura de subsuperfície atuando no sistema cimento- migração de gás, ou seja, que seja realizado o estudo com a cura de cimento aquecida. Além da temperatura, pode-se considerar a influência da pressão hidrostática da coluna de cimento sobre o tubo de cobre.

Os estudos comparativos podem também ser em relação à efetividade dos aditivos controladores de migração de gás. O aditivo utilizado nesta pesquisa não teve o objetivo de evitar o problema, e sim melhorar a trabalhabilidade da pasta. Atualmente, há diversos estudos envolvendo a utilização de látex natural como aditivo controlador de migração de

gás devido a ele proporcionar maior força gel para a pasta de cimento.

Outros estudos podem ser realizados alterando o material do corpo de prova. Neste trabalho foram utilizados CP's de aço carbono para simular o anular cimentado, no entanto, outros materiais podem ser utilizados, como por exemplo

Recomenda-se, que seja estudado o desempenho de outras dosagens de pasta de cimento com a determinação de suas respectivas propriedades físicas e químicas. Para tanto, existem simuladores computacionais que fazem a simulação de algumas propriedades de pasta de cimento, conforme a ilustração no anexo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Anjos, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados.** Tese de Doutorado. UFRN. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal – RN, 2009.

Boletim técnico: guia básico de utilização do cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2002.

Bonett, A, and Pafitis, D. **Getting to the root of gas migration.** Netherlands: N. p., 1996. Web.

Beirute, R. M.: **“The Phenomenon of Free Fall During Primary Cementing.”**paper SPE 13045. 1984.

Campos, G., Simão, C. A., Conceição, A. C. F. **Curso básico sobre cimentação primária,** Rio de Janeiro: Petrobras, 2002.

Carter, L.G. and Slagle, K.A.: **“A Study of Completion Practices to Minimize Gas Communication,”** 1. Pet. Tech. 1972.

Cheung, P. R., & Beirute, R. M. **Gas Flow in Cements,** 1985.

Crook, R., Heathman, J. **Predicting potential gas-flow rates to help determinethe best cementing practices.** Halliburton Energy Services Inc, 1998.

Deep Water Horizon. Accident Investigation Report. Executive Summary. BP.8/09/2010;

Desir, J. J., Alexandre, J., Castro, A. M. **Estudo da atividade pozolânica metacaulinita.** Anais do 45° Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis-SC (2001).

Dicionariodopetroleo.com.br/dictionary/gelificacao/. Acesso em 20/11/2019 às 15:37.

Freitas, J. J. Efeito de adições poliméricas na aderência de pastas de cimento a **tubos metálicos após ciclagem térmica.** Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal – RN, 2011.

Garcia, J. A., Clark, C.R.: **“An Investigation of Annular Gas Flow Following Cementing Operations,** “ paper SPE 5701 presented at the 1976 SPE Symposium on Formation Damage Control, Houston, Jan. 29-30.

Jennings, S. S., Al-Ansari, A. A., & Al-Yami, A. S. **Gas Migration After Cementing Greatly Reduced.** Middle East Oil Show. SPE .2003.

Kutchak, K., Jones, P., & Van Meter, S. (2018). **Multiple Enhanced Mechanical Property Cements Help Prevent Pre- and Post-Fracturing Gas Migration.** SPE/AAPG Eastern Regional Meeting. doi:10.2118/191773-18erm-ms

LIMA, P. R. L. **Análise Teórica e Experimental de Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal.** 2004. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

Miranda, A. **Comportamento das propriedades físicas e durabilidade das pastas de cimentação para poços de petróleo.** Artigo publicado no Rio Oil & Gas: IBP2144_18, 2018.

Nelson, E. B. **Well Cementing**. Sugar Land : Elsevier Science, 1900.

Nunes, E. R. D **Influência da vermiculita expandida na formulação de pastas leves para evitar a migração de gás em cimentação de poços petrolíferos**. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Natal – RN, 2014.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Interciência, 2. Ed: Rio de Janeiro, 2001

Tinsley, J.M., Miller, E.C., and Sutton, D.L.: “**Study of Factors Causing Annular Gas Flow Following Primary Cementing**,” J. Pet. Tech. (Aug. 1980) 1427-37

Renpu, W., **Engenharia de Completação de Poços**. Elsevier, 3ª edição. Rio de Janeiro, 2016.

ROCHA, J. M. S. **Estudo da Migração de Gases em Pastas de Cimentação para Uso em Poços de Petróleo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

Smith. R. C.. Beirute. R. M.. iund Holmnn. G. B.: “**Postanalysis of Abnormal Cementing Jobs Using ii Cementing Simulator**.” paper SPE 1420 I, 1985.

Sobral, H. S. **Estudo Técnico. Propriedade do Concreto Fresco**. ABCP. São Paulo, 2000.

Souza, W. R. M., **Simulação Numérica do comportamento mecânico da bainha de cimento de um poço de petróleo em estado confinado submetido à injeção de vapor**. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo. Natal – RN, 2017.

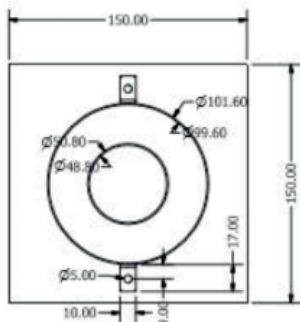
ORIOLO, M.; PERA, J. **Pozzolanic Activity of Metakaolin under Microwave Treatment**. Cement and Concrete Research, Oxford, v. 30 p. 209-216, 2000.

Velayati, A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., **Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study**. IJMGE Int. J. Min. & Geo-Eng. Vol.49, No.2, December 2015, pp.281-288

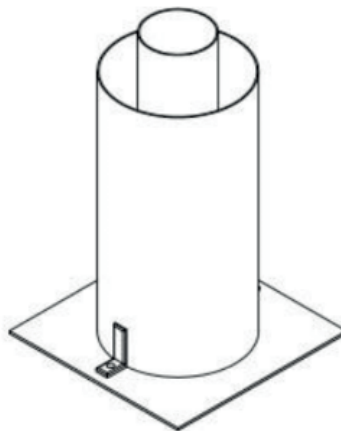
WILD, S.; KHATIB, J. M. **Portlandite Consumption in Metakaolin Cement Pastes and Mortars**. Cement and Concrete Research, Oxford, v. 27, p. 137-146, 1997.

APÊNDICE

Vista superior do Corpo de prova



Vista em perspectiva do Corpo de prova



Vista lateral do Corpo de prova

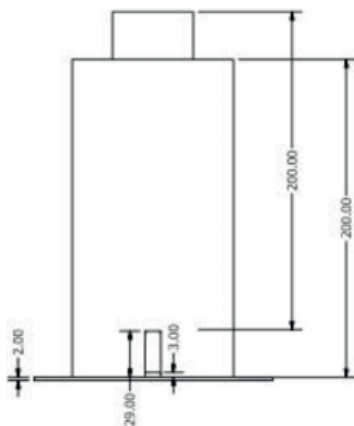


Figura 1: Projeto do Corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento

Fonte: Autor (2019).

The screenshot shows a software window titled "Slurry Additives" with a table of material properties. The table has the following columns: Material, Bulk Weight lb/ft3, Specific Gravity, Absolute Volume gal/lb, Absolute Volume ft3/lb, Activity %, Dry/ Liquid, Liquid Base, Water Req Min gal/lb, and Water Req Max gal/lb. The data rows are as follows:

Material	Bulk Weight lb/ft3	Specific Gravity	Absolute Volume gal/lb	Absolute Volume ft3/lb	Activity %	Dry/ Liquid	Liquid Base	Water Req Min gal/lb	Water Req Max gal/lb
LA-2		1.10	0.1089331	0.0145632	54				
LAP-1L (locally blended in Nigeria)		1.022			9.9				
Latex-2000	0.997	0.997	0.1202	0.0161	50	Liquid	Water		
Liquid HEC		0.96	0.1248192	0.016687	40	Liquid...			
Max Seal		1.32							
Microblock		1.40	0.0855903	0.0114417	50	Liquid	Water		
Micro-Matrix Cmt Ret		1.15	0.1042	0.0139	25	Liquid	Water		
MICROMAX L		2.16			70				
Microsilica L (Fesil similar to Microblock)		1.40	0.0855903	0.0114425	50				
MOC-A		0.98	0.1222719	0.0163465					

The interface includes an "OK" button at the bottom right and the "RedBook" logo in the bottom right corner. The "HALLIBURTON" logo is visible in the bottom left corner.

Figura 2: Interface do Software eRedbook Halliburton – Escolha de aditivos para pasta de cimentação


Fonte: Retirado do Software eRedbook Halliburton. Acesso em 05/12/2019 às 22:43.

SOBRE OS AUTORES

NATÁLIA HINKELMANN PADILHA - Graduada em Engenharia de Petróleo e Gás pela Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, nataliahinkpadilha@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/3821941514299091>

ANDREZA DE OLIVEIRA MIRANDA - Graduada em Engenharia de Petróleo e Gás pela Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, andrezaomirandaa@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/9748988163803323>

SÁVIO RAIDER MATOS SARKIS - Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Luterana do Brasil, Manaus - AM, saviosarkis@ufam.edu.br, <http://lattes.cnpq.br/6674204758775154>




ESTUDO DA ANÁLISE DE TENSÕES CISALHANTES NA INTERFACE AÇO - CIMENTO DEVIDO À MICRO CANALIZAÇÃO PRODUZIDA POR GÁS

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora

Ano 2021



ESTUDO DA ANÁLISE DE TENSÕES CISALHANTES NA INTERFACE AÇO - CIMENTO DEVIDO À MICRO CANALIZAÇÃO PRODUZIDA POR GÁS

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora

Ano 2021