

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

FATORES IMPACTANTES NA PREDIÇÃO DO PERFIL TÉRMICO DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO: REVISÃO SISTEMÁTICA DE MODELOS MATEMÁTICOS

AUTORES:

Michele Fripp Lazzari Schaefer^{1,2}, Jader Riso Barbosa², Ianto Oliveira Martins³, Alexandre Kupka²

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Ciências do Mar, Universidade Federal de São Paulo, ²Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, ³Divisão de Química Tecnológica, Instituto de Química, Universidade de Brasília

FATORES IMPACTANTES NA PREDIÇÃO DO PERFIL TÉRMICO DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO: REVISÃO SISTEMÁTICA DE MODELOS MATEMÁTICOS

Resumo

Entre os vários aspectos que a Integridade de Poços abrange, a preocupação com a as etapas de construção de poços é o que refletirá diretamente na garantia de barreiras primárias e secundárias bem estabelecidas. Dessa forma, a construção de poços demanda meticulosidade desde de sua concepção, durante as fases de planejamento e de projeto, em que são utilizadas simulações numéricas que permitem inferir possíveis cenários de falha durante esse processo. Um dos maiores problemas capazes de ocorrer é a falha por expansão ou contração dos fluidos presentes em anulares confinados, o que pode resultar em reações drásticas dos elementos tubulares metálicos, levando-os a rupturas. A depender das condições operacionais e configuração dos poços, estas implicam na ocorrência de problemas que impossibilitam a continuidade das operações podendo, inclusive, repercutir em impactos ambientais graves. Geralmente, essa é uma questão mais abordada durante as operações de produção ou injeção. Entretanto, alguns estudos apontam a relevância de sua análise também durante as operações anteriores à produção, como a perfuração das fases do poço e as atividades envolvidas nesta. Para que essa análise seja efetiva e confiável, os modelos matemáticos devem ser o mais fidedigno possível à natureza multifísica das operações inerentes à construção de poços. Com isso, este artigo faz um levantamento de diversas modelagens propostas para a predição de temperatura durante a perfuração de poços, apresentando os fatores considerados em cada uma, bem como o impacto dos mesmos na inferência do perfil de temperaturas.

Palavras-chave: perfuração, perfil térmico, integridade de poço, modelagem térmica de poços

Abstract

Among the various aspects covered by Well Integrity, the concern with well construction is that it will directly impact on the guarantee of well-established primary and secondary barriers. Thus, well construction demands accuracy since its conception, during planning and design phases, in which numerical simulations are used to infer possible failure scenarios. One of the biggest problems that can occur is failure by expansion/contraction of the fluids present in confined annuli, resulting in drastic reactions of metallic tubular elements, leading to rupture. Depending on operational conditions and well configuration, this implies on problems that make it impossible to continue operating the well and may even have serious environmental consequences. This is usually a question that is most often addressed during production or injection operations. However, some studies indicate the relevance of having it also analyzed during operations prior to production, such as well drilling and all the activities related to it. For an effective and reliable analysis, mathematical models must be as faithful as possible to the multiphysics nature of operations inherent in well construction. Thus, this article makes a survey of several proposed models of temperature prediction during well drilling, presenting the considered factors in each one, as well as the impact of them in the temperature profile inference.

Keywords: well drilling, well temperature, well integrity, temperature modeling

Introdução

A ocorrência de problemas em função de falhas por expansão ou contração dos fluidos presentes em anulares confinados costuma ser mais abordada durante as operações de produção ou injeção. Entretanto, alguns estudos apontam a relevância de sua análise também durante as operações anteriores

à produção, como a perfuração das fases do poço e as atividades envolvidas nesta (PATILLO et al., 2004; MCSPADDEN et al., 2008). De acordo com Lachenbruch and Brewer (1959), o restabelecimento da temperatura de equilíbrio do poço após um período perfurando depende, principalmente, da quantidade de energia trocada pela formação durante a perfuração.

Os sistemas de perfuração são compostos por diferentes regiões ao longo do poço, de forma que diversas temperaturas são estabelecidas. Conhecer essas temperaturas é a chave para um projeto de poço bem sucedido. Isso porque elas impactam o processo de perfuração de diferentes formas como, por exemplo, alterando as propriedades reológicas dos fluidos, o que pode levar a uma ineficiente limpeza do poço e carreamento dos cascalhos (ABDELHAFIZ et al., 2020). Além disso, as temperaturas de fundo de poço afetam a viscosidade e a densidade do fluido o que, por consequência, impacta nas quedas de pressão por atrito e no desempenho da broca (KUTASOV & EPPELBAUM, 2015).

Dessa maneira, entende-se a importância da compreensão da relação dessas temperaturas com diferentes variáveis envolvidas no processo de troca térmica durante a atividade de perfuração de poços. Segundo Kutasov & Eppelbaum (2015), a temperatura do poço durante a perfuração é uma função complexa da geometria do poço, profundidade, taxa de penetração, vazão do fluido de perfuração, duração dos períodos de estática, efeitos de broca e propriedades do fluido e da formação. Além disso, conforme descrito por Chen et. al (2024), ao se considerar a excentricidade da coluna de perfuração, o regime de fluxo no anular é alterado, pois o caminho do fluido torna-se irregular e a vazão local varia, o que pode alterar significativamente a taxa de transferência de calor.

McSpadden et al. (2008), abordaram a influência do perfil térmico inicial (não perturbado vs. termicamente afetado pela cimentação) no comportamento termo estrutural do poço, concluindo que a consideração do gradiente geotérmico como temperatura inicial do poço pode não ser a mais conservativa, pois pode haver casos em que ocorre elevação térmica em zonas cimentadas.

Conforme levantado por Kutasov & Eppelbaum (2015), o efeito do processo de recuperação da temperatura do poço, que fora perturbada pela perfuração, impacta também no planejamento da operação de cimentação do revestimento. A análise da temperatura durante a hidratação da pasta de cimento, que consiste em uma etapa exotérmica, é necessária para determinar quando ela começará a desenvolver resistência compressiva. A experiência de campo indica que anomalias de temperatura nesta etapa podem ser muito significativas (KUTASOV et al., 2015; MCSPADDEN et al., 2008). Outrossim, avaliações da temperatura após a cimentação são usadas para localizar o topo do cimento posicionado no anular entre revestimento e formação, o que é um dos principais objetivos da operação.

Diante do exposto, para que a análise dos efeitos térmicos em poços de petróleo seja efetiva e confiável, garantindo a segurança e eficiência das operações, os modelos matemáticos devem ser o mais fidedigno possível à natureza multifísica das operações inerentes à construção de poços. Com isso, este artigo faz um levantamento de diversas modelagens propostas para a predição de temperatura durante a perfuração de poços, apresentando os fatores considerados em cada uma, bem como o impacto dos mesmos na inferência do perfil de temperaturas.

Metodologia

Com o intuito de se entender o impacto de diferentes fatores na predição da temperatura durante a perfuração do poço, foi realizada uma revisão sistemática de artigos pesquisados em bases como ScienceDirect, OnePetro e Scopus.

A seleção dos artigos se deu em virtude da forma como fora abordada a modelagem matemática do fluxo termo-fluidodinâmico no poço em termos de variáveis e fenômenos considerados.

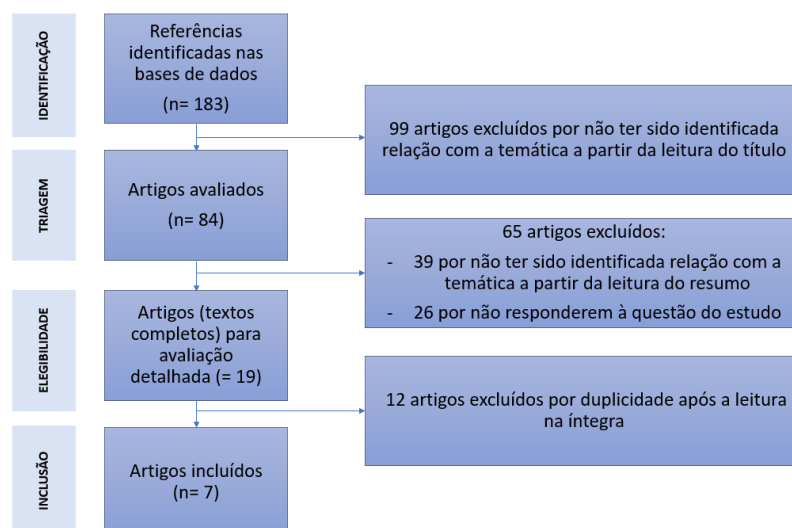
Nesse sentido, foram procurados artigos publicados entre 2014 e 2024, na língua inglesa utilizando as seguintes palavras-chave: “well circulating”, “well temperature”, “well drilling temperature”, “well temperature modeling”. Algumas referências de anos anteriores à 2014 foram utilizadas neste trabalho para embasar determinados tópicos.

A primeira seleção foi baseada na leitura de títulos que compreendiam o teor da pesquisa, seguido da leitura dos resumos. Neste ponto foi possível constatar se o artigo em questão supria o

objetivo primário da pesquisa (modelagem da temperatura do poço durante a perfuração e/ou circulação) e, a partir disso, foram selecionados aqueles cuja leitura seria pertinente na íntegra.

Essa metodologia básica na busca e seleção de artigos resultou em uma triagem representada pelo fluxograma apresentado na figura 1, em que são apresentados os números de artigos identificados, avaliados e excluídos ou incluídos neste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma PRISMA com detalhes da estratégia de busca das referências utilizadas neste trabalho



Fonte: Elaboração própria.

Resultados e Discussão

O trabalho de Kutasov & Eppelbaum (2015) enfatiza a importância da determinação do perfil térmico durante a cimentação, principalmente em virtude do calor liberado na etapa de hidratação da pasta, e apresenta diversas maneiras de determinação do perfil de temperatura durante a perfuração, cimentação e *shut-in* (parada de poço). Adicionalmente, apresentam as relações entre temperatura do poço e da formação durante operações de perfuração, descida de revestimento, cimentação e parada de poço. Baseados em várias literaturas e experiências de campo, identificaram que para poços perfurados em águas ultraprofundas a temperatura do fluido de perfuração é basicamente uma função da profundidade e do tempo.

Dessa forma, Kutasov & Eppelbaum (2015) dissertaram sobre a melhor maneira de se calcular a temperatura na interface com a formação. Os autores comentam sobre as duas formas mais usadas em estudos sobre poços, uma que trata como temperatura ou fluxo prescrito ao longo da profundidade do poço e outra que utiliza a lei de resfriamento de Newton, sendo esta última, teoricamente, mais apropriada para condições de regime permanente. Entretanto, sabe-se que igualmente é aplicada com sucesso em áreas em que as temperaturas se alteram lentamente com o tempo. Já a utilização de condições de temperaturas prescritas são bem sucedidas em casos de altas taxas de troca térmica, o que ocorre em situações de fluxo turbulento totalmente desenvolvido no poço.

Mao et al. (2018) desenvolveram um modelo transiente para perfuração de poços horizontais, porém aplicável à perfuração de poços verticais, pois desconsidera a influência do ganho de ângulo no perfil térmico durante a perfuração. Foram realizadas análises de diversas variáveis importantes para a operação, tais como densidade do fluido, vazão de deslocamento do fluido e tempo de circulação. Além de observações lógicas de que as temperaturas do fluido na coluna e no anular aumentam com a profundidade do poço, e que o fluido do anular é sempre mais quente que aquele no interior da coluna, os autores identificaram que a temperatura do fluido no poço, a uma determinada profundidade, aumenta

com a densidade do fluido e gradiente geotérmico. Em relação à temperatura do fluido dentro da coluna de perfuração (COP), observaram que a mesma diminuiu conforme o aumento da viscosidade do fluido. Já para o fluido no anular na porção superior do poço, a temperatura aumentou com o incremento de viscosidade do fluido, entretanto o contrário ocorreu para a porção inferior.

Abdelhafiz et al. (2020) desenvolveram um modelo transiente essencialmente térmico em que as velocidades do fluido são consideradas constantes em cada caso de circulação abordado. Ainda assim, pode ser aplicado para regimes de fluxo laminar e turbulento a partir da aplicação do coeficiente convectivo de troca térmica (CHTC). O modelo segue a estrutura de analogia ao sistema de resistências térmicas, sendo o poço dividido em quatro regiões, cada qual representada a partir de uma equação de energia que leva em consideração os fenômenos de troca térmica presentes.

A partir dos resultados obtidos, constataram que a vazão do fluido de perfuração é um dos principais parâmetros que impactam o perfil térmico do poço, pois afeta a troca térmica por convecção, a qual combina efeitos de advecção de energia térmica e a condução de calor junto à parede. Para o CHTC, um valor constante para o número de Nusselt foi utilizado para o fluxo laminar e, para o fluxo turbulento, a correlação de Gnielinski (1975) foi implementada.

A maioria dos modelos são formulados de forma desacoplada em relação às equações de energia e de quantidade de movimento. Em compensação, Zhang et al. (2021) formularam um modelo em que pressão e temperatura são resolvidas de forma acoplada, baseado no fluxo mássico dinâmico. Este modelo foi elaborado pensando na perfuração de poços em que a janela operacional é muito estreita e, para tanto, o método de gradiente variável é empregado. Uma das particularidades desse método é o emprego de esferas de vidro (HGS) junto ao fluido de perfuração. Isso demanda a instalação de separadores na coluna de perfuração para que as esferas sejam alocadas em trechos em que a lama deve ser mais leve enquanto o fluido segue para outra região que demanda um peso diferente.

Dessa forma, a ideia principal do artigo foi o desenvolvimento de um separador mais eficiente e, a partir do modelo acoplado proposto, puderam analisar os efeitos de alguns parâmetros importantes para a otimização do sistema, como os impactos do fluxo mássico e da densidade e fração volumétrica de HGS na temperatura e pressão no anular. Foi efetuada também uma comparação entre o sistema de perfuração pelo método de gradiente variável e uma perfuração tradicional.

Os resultados demonstraram que a temperatura no fundo do poço diminui com o aumento da vazão volumétrica de fluido, devido ao aumento da capacidade térmica do escoamento. Contudo, à medida que o fluido ascende pelo anular, sua temperatura aumenta ao longo do trajeto devido à troca térmica mais intensa entre o fluido e a formação. Este resultado é coerente com o objetivo da circulação que é o condicionamento do poço, ou seja, resfriar o poço, uniformizando a temperatura do mesmo após um determinado tempo de circulação de fluido.

Li et al. (2023), baseados nas características de troca térmica do fluido de perfuração e nas diferentes características estruturais de cada região por onde ele passa, elaboraram um modelo para simular as alterações da temperatura do fluido, mediante análise de sensibilidade de diferentes fatores, como tempo de operação, densidade do fluido de perfuração, profundidade da lâmina d'água (LDA) e vazão do fluido, para sistemas de perfuração sem riser (RMR).

Os resultados mostraram que alterações no tamanho da LDA impactam apenas no fluido circulante no ambiente marinho em sistemas RMR, já a temperatura do fluido abaixo do leito marinho permanece estável. Alterações na vazão afetam principalmente a temperatura do fluido circulante, impactando no tempo de transferência de calor, sendo mais notável que a geração de calor por atrito.

Mao et al. (2023) incrementaram o modelo anteriormente desenvolvido (Mao et. al., 2018) propondo um modelo físico dividido em regiões do poço (interior da COP, coluna de perfuração, anular e formação) e inseriram um termo fonte para representar a contribuição térmica da broca durante a perfuração na equação que representa o balanço térmico na região da coluna de perfuração.

Para o termo fonte, Mao et al. (2023) implementaram o modelo de Memarzadeh and Miska (1984) para uma broca PDC (*polycrystalline diamond compact*), inserindo um fator de correção por se tratar de um modelo empírico. Além do coeficiente de fricção, este modelo considera parâmetros como o peso sobre a broca (WOB – técnica fundamental para a perfuração mais eficiente e segura) e a velocidade de rotação da COP. Conforme esperado, ao compararem os modelos com e sem efeitos de

broca considerados, Mao et al. (2023) encontraram um aumento da temperatura utilizando o modelo com broca.

Chen et al. (2024) analisaram o efeito da excentricidade do poço, desenvolvendo um modelo transiente que compreende diversas fontes de calor durante a atividade de perfuração. A excentricidade do poço foi considerada a partir da determinação de um coeficiente de transferência de calor por convecção forçada que, por sua vez, é função de um diâmetro efetivo do poço. Dessa forma, o CHTC entre o fluido e a parede do poço ou revestimento/cimento pode ser corrigido a fim de se ter a troca térmica mais próxima do que ocorre em poços excêntricos.

Já para modelar a rotação da coluna, os autores consideraram que o modelo de transferência de calor no anular pode ser simplificado para um sistema de transferência de calor por convecção cilíndrica concêntrica, onde o cilindro interno (coluna de perfuração) gira enquanto o cilindro externo (poço) permanece estático. O modelo também considera o efeito do calor gerado pela broca durante a perfuração, sendo este adicionado com um termo fonte na equação de balanço térmico.

Entre os fatores analisados, os resultados mais impactantes são os que seguem. Ao considerar a variação nas propriedades do fluido de perfuração, a temperatura na seção inferior do anular diminuiu com a profundidade do poço. A análise da excentricidade mostrou que, conforme esta aumenta, a temperatura do anular diminui. Já um aumento da taxa de penetração indicou aumento na temperatura do anular, pois a energia mecânica da broca é convertida em energia térmica. À medida que a rotação da broca aumenta, a temperatura do anular ao longo do poço segue diretamente proporcional a esta, devido ao efeito de aquecimento por fricção. Por fim, a variação das propriedades dos fluidos teve um impacto maior na temperatura do anular, comparado aos demais fatores analisados.

Muitos dos modelos pesquisados foram validados com dados de campo, obtendo boa concordância entre o perfil térmico gerado pelo modelo matemático e o perfil térmico real do poço durante a atividade de perfuração, apresentando uma discrepância entre 2% e 7%, aproximadamente.

Nas tabelas a seguir estão sintetizadas as principais informações das referências consultadas e, a partir das quais, pôde-se elaborar as conclusões de acordo com os objetivos estabelecidos neste trabalho.

Quadro 1 - Hipóteses, fatores analisados e principais conclusões das referências consultadas

Referência	Hipóteses	Fatores Analisados	Principais Conclusões
Mao et al. (2018)	- A excentricidade do poço, os efeitos do cascalho, a movimentação da coluna e a velocidade de fluxo no fundo do poço não foram considerados. - O fluxo do fluido é unidimensional.	- Densidade, viscosidade e vazão de deslocamento do fluido - Tempo de circulação - Profundidade do poço - Gradiente Geotérmico	A temperatura do fluido no anular é sempre maior que a do fluido no interior da coluna. No poço aumenta com a densidade do fluido e o gradiente geotérmico.
Abdelhafiz et al. (2020)	- Velocidade do fluido constante. - A espessura da parede da COP é considerada muito pequena comparada ao anular e ao raio da coluna.	- Fluxo do fluido de perfuração - Gradiente geotérmico	O fluxo do fluido, o regime de fluxo e o gradiente geotérmico possuem um efeito significativo no perfil térmico do poço.
Zhang et al. (2021)	- O impacto dos cascalhos, a flutuação de pressão quando o HGS adentra o anular e o atrito entre HGS e fluido de perfuração não foram considerados.	- Fluxo volumétrico do fluido - Fração volumétrica e densidade das esferas de vidro	A temperatura no fundo do poço diminui com o aumento do fluxo volumétrico do fluido, enquanto a temperatura do anular aumenta.

Li et. al (2023)	- Propriedades constantes da formação. - A alteração radial de temperatura do fluido e o efeito dos cascalhos não foram considerados.	- Tempo de operação - Densidade do fluido - Taxa de bombeamento	Alterações na taxa de bombeamento impactam mais que o calor friccional.
Mao et. al (2023)	- O fluxo do fluido é unidimensional. - A temperatura na interface é sempre igual à temperatura original da formação.	- Densidade e vazão do fluido - Velocidade de rotação Peso sobre broca	O efeito do WOB é mais impactante do que a velocidade de rotação da coluna.
Chen et. al (2024)	- A condução de calor do fluido dentro do poço é insignificante comparada à convecção de calor axial.	- Propriedades do fluido - Excentricidade da COP - Rotação da broca - ROP	A variação das propriedades dos fluidos teve um impacto maior na temperatura do anular, comparado aos demais fatores.

Fonte: Elaboração própria.

Conclusões

Após a leitura das referências selecionadas, pôde-se ter uma ideia de quais parâmetros mais impactam no perfil térmico de um poço e, portanto, merecem consideração no desenvolvimento e validação de modelos térmicos. Foram identificados os seguintes parâmetros como os mais impactantes: propriedades físicas dos fluidos, vazão de deslocamento, tempo de circulação, efeito dos cascalhos, parâmetros de broca e excentricidade da coluna de perfuração. Em relação às hipóteses assumidas que podem ser consideradas como razoáveis para a modelagem térmica, uma vez que os modelos que as empregaram foram em sua maioria validados com dados de campo, foram: fluxo unidimensional do fluido, gradiente geotérmico não impactado pela troca térmica e velocidade do fluido constante.

No trabalho de Chen et al. (2024), foi possível observar que a variação nas propriedades do fluido de perfuração pode afetar indiretamente outros parâmetros dos fluidos, influenciando a distribuição de temperatura do poço. Portanto, desconsiderar as variações dependentes da temperatura das propriedades do fluido de perfuração, pode levar a erros significativos no dimensionamento de vários parâmetros do poço, o que pode repercutir em incidentes.

O modelo proposto por Zhang et. al (2021), embora um dos poucos resolvidos de forma acoplada para temperatura e pressão, assume algumas hipóteses que o tornam menos generalizado para perfuração de poços, uma vez que desconsidera o impacto de alguns fatores importantes para a análise do fenômeno, a exemplo da influência dos cascalhos e da temperatura e pressão na viscosidade e calor específico do fluido de perfuração.

Algumas das principais conclusões retiradas das referências consultadas e consideradas relevantes para a modelagem térmica de poços foram:

- Os fenômenos mais relevantes para a modelagem da temperatura durante atividades envolvidas na perfuração de poços são convecção e difusão;
- Os modelos basicamente seguem estruturas análogas a resistências térmicas;
- As maiores trocas térmicas são na seção de poço aberto quando comparado aos trechos revestidos e cimentados;
- Com o aumento do fluxo mássico, a pressão no anular aumenta, enquanto a temperatura no fundo do poço diminui.

Muitos modelos foram validados com dados de campo, obtendo boa concordância entre o perfil térmico gerado pelo modelo matemático e o perfil térmico real do poço durante a atividade de perfuração, mostrando-se bem representativos. Isso permite inferir que, mesmo com simplificações e hipóteses adotadas, possibilitando soluções numéricas mais céleres, os modelos aplicam-se de forma satisfatória na simulação das atividades envolvidas na perfuração de poços. Entretanto, observou-se a

escassa existência de modelos multifásicos que considerem os efeitos do cascalho, bem como o calor gerado pela broca. Sendo esse último, relativamente simples de se implementar.

Outra questão que entre as referências pesquisadas não foi abordada é a consideração do movimento da coluna durante a perfuração, tanto angular quanto vertical (reciprocção), prática inerente e padronizada da operação com importantes impactos no perfil térmico e na pressão do poço. Também foram poucos os modelos que resolveram pressão e temperatura acoplados e que variaram os parâmetros do fluido com a temperatura, dinamicamente. A maioria dos modelos permite apenas a análise desses fatores mantendo-os constante em cada simulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro através do projeto N° 2022/00367-0 (SAP 4600673912) – Modelo Numérico Transiente para Predição do Aumento de Pressão em Anular Confinado e à Universidade Federal de São Paulo pela concessão de Afastamento para Qualificação da autora Michele Fripp Lazzari Schaefer.

Referências Bibliográficas

ABDELHAFIZ, M. M.; HEGELE, L. A.; OPPELT, J. M., Numerical transient and steady state analytical modeling of the wellbore temperature during drilling fluid circulation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 186, 2020.

CHEN X.; WANG S.; He M.; Xu M. A comprehensive prediction model of drilling wellbore temperature. **Ocean Engineering**, 296, 15 mar. 2024.

KUTASOV, I. M., EPPELBAUM, L. V. **Wellbore and Formation Temperatures During Drilling, Cementing of Casing and Shut-in**. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

LACHENBRUCH, A.H.; BREWER M.C. Dissipation of the Temperature Effect of Drilling a Well in Arctic Alaska, U.S. **Geological Survey Bull.** 1083-C, 1959, 74-109.

LI, X.; ZHANG J.; YE W.; LIU X.; SUN X. A new transient simulation model and changing characteristics for circulating fluid temperature in a deepwater riserless mud recovery system. **Ocean Engineering**, 281, 1 ago. 2023.

MAO, L.; ZHANG, Z. Transient Temperature prediction model of horizontal wells during drilling shale gas and geothermal energy. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 169, 2018.

MAO, L.; WEI C.; JIA H.; LU K. Prediction model of drilling wellbore temperature considering bit heat generation and variation of mud thermophysical parameters. **Energy**, 284, 2023.

MCSPADDEN, A. R.; GLOVER, S. **Importance of Predicted Cementing Temperatures fo Critical HP/HT Casing Design: Guidelines and Case Studies**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, USA, 2008.

PATILLO, P. D.; COCALES, B. W.; MOREY, S. C. **Analysis of an Annular Pressure Buildup Failure during Drill Ahead**. SPE Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas, USA, 2004.

ZHANG, R.; LI J.; LIU G.; YANG H.; YUE T.; WANG J. The coupled model of wellbore temperature and pressure for variable gradient drilling in deep water based on dynamic mass flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 205, 2021.