

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



TÍTULO DO TRABALHO:

AVALIAÇÃO INICIAL PARA ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO: UMA ABORDAGEM GEOMECÂNICA PARA ROCHAS ARENÍTICAS E VULCÂNICA MÁFICA

AUTORES:

Lucas Silva Pereira Sátiro^{1*}, Kallianne M^a das V. E. da Silva², Gabriel S. do Lago¹, Maria Clara de M. Lourenço³, Luana Rabelo Holanda³, Marcos Allyson F. Rodrigues³, Alcides. O. Wanderley Neto⁴

INSTITUIÇÃO:

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/UFRN, ²Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFRN, ³Departamento de Engenharia de Petróleo/LABRES/UFRN, ⁴Instituto de Química/LTT/UFRN

AVALIAÇÃO INICIAL PARA ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO: UMA ABORDAGEM GEOMECÂNICA PARA ROCHAS ARENÍTICAS E VULCÂNICA MÁFICA

Resumo

O aquecimento global tem sido responsável pelo aumento da temperatura global nas últimas décadas, tendo como uma das causas principais as altas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Nesse contexto, muito tem se discutido sobre medidas para redução das emissões dos gases do efeito estufa, a fim de evitar cenários irreversíveis ao clima. Entre as alternativas, destaca-se o armazenamento geológico de carbono (*Carbon Capture and Storage* - CCS), como tecnologia que oferece uma destinação permanente ao CO₂. De modo geral, a cadeia de CCS compreende a captura, transporte e armazenamento do gás e monitoramento do reservatório. O armazenamento de CO₂ no meio poroso pode alterar o estado de tensões litostáticas em uma escala de tempo relativamente curta, sendo a integridade do reservatório imprescindível para garantir o armazenamento. Centrado nas características geomecânicas e visando o armazenamento geológico de carbono, o presente trabalho engloba uma das etapas iniciais de avaliação, necessárias para a análise de potenciais sítios para CCS. Aqui, objetiva-se avaliar a resistência de rochas de afloramento coletadas no NE brasileiro comparáveis tanto a reservatórios areníticos - para cenários de armazenamento - como também amostras de rocha vulcânica máfica, seja para aplicação como selo, seja para sítio de armazenamento não convencional. Para complementar, amostras de pedreira tipo arenitos padrão (Bandera Gray, Gray Berea e Boise) foram também avaliadas. Realizou-se a caracterização geomecânica a partir de ensaios laboratoriais de UCS (*Unconfined Compressive Strength*), no qual obteve-se a máxima tensão uniaxial (σ) suportada pelo corpo de prova (plugue de rocha), além do Módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Além disso, foi realizado o ensaio de compressão diametral, método indireto para cálculo da resistência à tração (F). A respeito das amostras de afloramento no NE brasileiro, os arenitos apresentaram seus parâmetros nas seguintes faixas: $35,3 \leq \sigma \leq 48,3$ MPa, $8,13 \leq E \leq 14,21$ GPa e $0,11 \leq \nu \leq 0,18$; enquanto as amostras da rocha vulcânica registraram valores para σ de 195,21 e 220,10 MPa, para E de 61,36 e 62,51 GPa e para ν de 0,21 e 0,22. No que tange a resistência à tração, calculou-se valores na faixa de 6,55 a 10,03 MPa para as amostras areníticas e de 19,92 e 27,42 MPa para as vulcânicas. Entre as amostras de arenito padrão, os valores de resistência à tração são de 2,51 e 4,15 MPa para o Bandera Gray, de 6,01 e 7,08 MPa para o Gray Berea e de 5,02 e 6,92 MPa para o Boise. A caracterização geomecânica dessas amostras foi comparada com a literatura e com os cenários de reservatórios brasileiros. Os resultados registrados denotam conformidade com as referências apresentadas, corroborando que o método de avaliação e as amostras são representativos para estudos de desenvolvimento iniciais de projetos CCS na região do nordeste brasileiro.

Palavras-chave: UCS, geomecânica, armazenamento de Carbono.

Abstract

Global warming has been responsible for the increase in global temperature over recent decades, with high carbon dioxide (CO₂) emissions being one of the main causes. In this context, there has been much discussion about measures to reduce greenhouse gas emissions to avoid irreversible

climate scenarios. Among the alternatives, geological carbon storage (Carbon Capture and Storage - CCS) stands out as a technology that provides a permanent destination for CO₂. Generally, the CCS chain includes capturing, transporting, and storing the gas, as well as monitoring the reservoir. CO₂ storage in a porous medium can alter the state of lithostatic stresses on a relatively short time scale, making reservoir integrity essential for ensuring storage. Focused on geomechanical characteristics and aimed at geological carbon storage, this work represents one of the initial assessment steps necessary for analyzing potential CCS sites. It aims to evaluate the strength of outcrop rocks collected in northeastern Brazil, comparable to both sandstone reservoirs – for storage scenarios – and mafic volcanic rock samples, either for use as seals or unconventional storage sites. Additionally, standard sandstone samples (Bandera Gray, Gray Berea, and Boise) were also evaluated. Geomechanical characterization was carried out through UCS (Unconfined Compressive Strength) laboratory tests, which determined the maximum uniaxial stress (σ) supported by the test body (rock plug), as well as Young's Modulus (E) and Poisson's ratio (ν). Additionally, a diametral compression test was performed, an indirect method for calculating tensile strength (F). Regarding the outcrop samples from northeastern Brazil, sandstones presented parameters in the following ranges: $35.3 \leq \sigma \leq 48.3$ MPa, $8.13 \leq E \leq 14.21$ GPa, and $0.11 \leq \nu \leq 0.18$; while volcanic rock samples recorded σ values of 195.21 and 220.10 MPa, E values of 61.36 and 62.51 GPa, and ν values of 0.21 and 0.22. For tensile strength, values ranged from 6.55 to 10.03 MPa for sandstone samples and from 19.92 to 27.42 MPa for volcanic samples. Among the standard sandstone samples, tensile strength values are 2.51 and 4.15 MPa for Bandera Gray, 6.01 and 7.08 MPa for Gray Berea, and 5.02 and 6.92 MPa for Boise. The geomechanical characterization of these samples was compared with literature and Brazilian reservoir scenarios. The recorded results demonstrate compliance with the references presented, corroborating that the assessment method and samples are representative for preliminary CCS project development studies in the northeastern region of Brazil.

Keywords: UCS, geomechanics, Carbon Storage.

Introdução

É amplamente reconhecido que as atividades antrópicas, especialmente após a revolução industrial, têm intensificado o fenômeno natural do efeito estufa. Diante desse cenário, anualmente, diversos países se reúnem na Conferência das Partes (COP) para discutir e estabelecer medidas de combate às mudanças climáticas. Entre as metas, é previsto restringir o aumento da temperatura em 1,5°C até o final do século em relação aos níveis pré-industriais (Acordo de Paris, 2015), requerendo medidas eficientes e imediatas de redução das emissões dos gases do efeito estufa. Sendo um dos principais, o dióxido de carbono (CO₂), tem-se o CCS (*Carbon Capture and Storage*) como tecnologia com potencial de armazenamento da ordem de 1000 GtCO₂, mais que o suficiente para atender a meta, além de viabilizar a descarbonização de cadeias com maiores dificuldades como as cimenteiras (IPCC, 2023).

Esta tecnologia consiste na captura do gás de uma fonte emissora estacionária, ou diretamente do ar; seu transporte; posterior injeção para armazenamento em subsuperfície; e monitoramento do

armazenamento. Sua implantação requer um reservatório íntegro, que garanta contenção pela rocha selante e meio geológico estável geomecanicamente (Ketzer J. M. M., 2014). A caracterização geomecânica, abrange parâmetros relevantes como o Módulo de Young (E) - que mensura a rigidez do material por meio da relação entre a tensão (σ) e a deformação axial (ϵ), de modo que quanto maior for o módulo, maiores são as tensões necessárias para a promoção de deformação em regime elástico; e o coeficiente de Poisson (ν), adimensional, expressando uma relação entre a deformação radial (ϵ_2) e axial (ϵ_1) do Corpo de Prova (CP), fundamental para compreender o comportamento de deformação tridimensional da amostra (Aadnøy, 2014). Nesse sentido, o presente trabalho visa expor uma abordagem geomecânica inicial para a análise de potenciais sítios para CCS no NE brasileiro, mediante caracterização geomecânica de amostras de afloramento areníticas e vulcânica máfica, ainda combinadas a arenitos oriundos de pedreiras norte-americanas (tipo Bandera Gray, Gray Berea e Boise). Sendo os arenitos avaliados para sítio de armazenamento e a rocha vulcânica máfica tanto para selo, quanto para reservatório não convencional.

Metodologia

A partir da coleta de amostras de afloramentos do NE brasileiro, foram confeccionados plugues de rocha de comprimento:diâmetro de 3":1,5" (Figura 1) para o ensaio UCS, atendendo a relação 2:1 (ASTM - *American society for testing and materials* - D4543, 2019). Para o ensaio de tração, as dimensões variaram com diâmetros de 1" e 1,5" e comprimento em função do primeiro, obedecendo entre eles uma razão entre 0,2 e 0,75, abrangendo também amostras comerciais padrão adquiridas. Totalizando em 21 Corpos de Prova (CP) cilíndricos (plugues) (Tabela 1).

Figura 1 – Exemplos de cada grupo da amostra



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 – Detalhamento da amostra

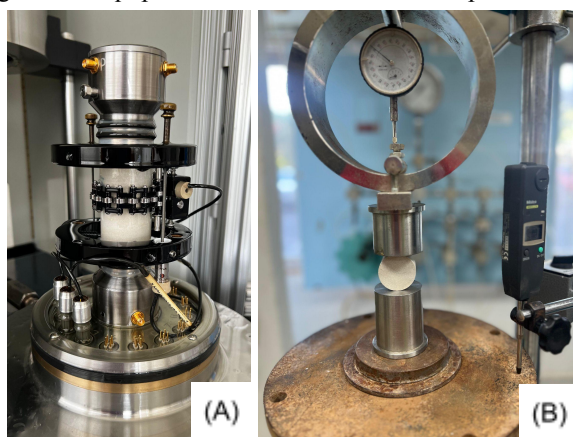
Origem	Tipo de Rocha	Aplicação	Grupo	ID	Ensaio
Afloramento	Arenito	Reservatório	Formação A	A1, A2	UCS
				A3	Tração
				BP1, BP2	UCS
			Formação B	BP3, BP4	Tração
				BT1, BT2	UCS
				BT3, BT4	Tração
Padrão	Arenito	Reservatório	Formação C	C1, C2	UCS
				C3, C4	Tração
				Bandera Gray (BG)	BG3, BG4
			Bandera Gray (BG)	GB3, GB4	Tração
				Gray Berea (GB)	GB3, GB4
				Boise (B)	B3, B4

Fonte: Autoria própria.

Previamente aos ensaios de resistência, verificou-se se os plugues eram isentos de fissuras e/ou deformações, com superfícies (topo e base) planas sem irregularidades e/ou rugosidade. Destaca-se que para a Formação B, por apresentar laminações e ser a formação de principal interesse, selecionou-se uma duplicata de laminação perpendicular e outra transversal ao eixo longitudinal do plugue, ou seja, à direção de aplicação da carga durante o ensaio.

Inicialmente, foi realizado o ensaio de compressão uniaxial (UCS), por meio do sistema triaxial GCTS *testing systems* modelo RTR-1000 (Figura 2A). Seguido pelo ensaio de tração indireta, mais conhecido como ensaio brasileiro, ou ainda ensaio de compressão diametral, realizado em uma prensa servo controlada (Figura 2B) com capacidade de 100 kN, com uma constante do anel dinamométrico e um deflectômetro para medir o deslocamento axial da amostra.

Figura 2 – Equipamentos e amostras de rocha posicionadas.



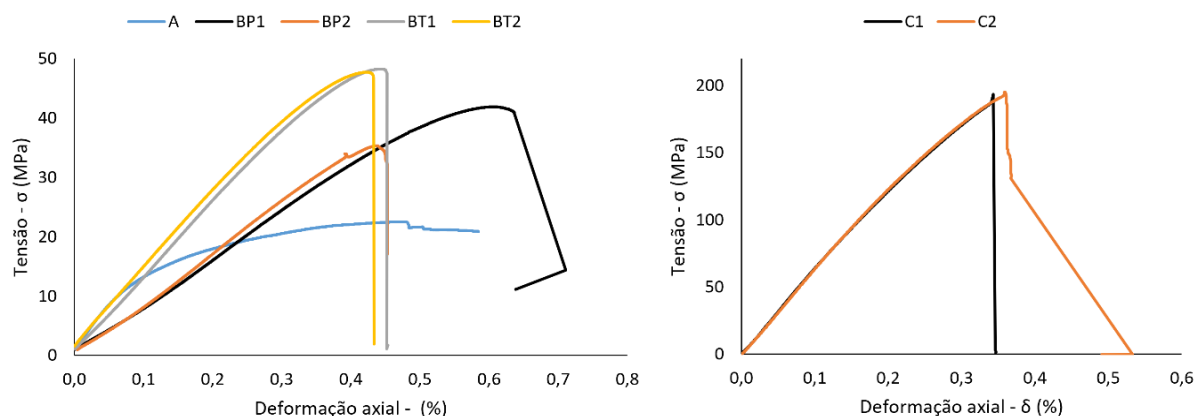
Fonte: Autoria própria.

O primeiro ensaio submete o CP cilíndrico a um carregamento axial a uma taxa constante, sem pressão confinante e com taxa de deformação radial de 0,03%/min. São registradas a tensão axial, deformação axial e radial, fornecendo ainda: o módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν), resistência à compressão uniaxial e gráficos tensão/deformação. O segundo ensaio é normatizado pela ASTM D3967 (2016) e baseia-se na aplicação da carga (P) diametralmente em geratrizes opostas até a ruptura do CP. Ao final, os resultados foram analisados e interpretados, comparando-os com a literatura e com dados públicos disponíveis sobre bacias do NE brasileiro. Assim validando a qualidade e a credibilidade da pesquisa.

Resultados e Discussão

Para o ensaio UCS, todas as amostras representativas de afloramento foram rompidas em duplicatas, entretanto, no caso da formação A, um dos plugues se fragmentou ainda durante a aplicação de cargas iniciais, invalidando o ensaio, obtendo resultados apenas para o CP A2. Obteve-se curvas de tensão *versus* deformação (Figura 3) e parâmetros geomecânicos (Tabela 2).

Figura 3 – Gráficos Tensão *versus* Deformação para arenitos (à esquerda) e rocha vulcânica máfica (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Resultados do ensaio UCS para as amostras de arenito e de rocha vulcânica de afloramentos

Tipo	ID	Poisson	Young (GPa)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)	Observações
Arenito	A1	-	-	-	-	Ensaio inconclusivo
	A2	0,07	14,97	22,50	0,46	-
	BP1	0,15	8,13	41,91	0,61	Laminação perpendicular
	BP2	0,11	8,57	35,36	0,44	Laminação perpendicular
	BT1	0,16	13,10	48,28	0,44	Laminação transversal
	BT2	0,18	14,21	47,73	0,43	Laminação transversal
Vulcânica	C1	0,21	61,36	220,10	0,32	-
Máfica	C2	0,22	62,51	195,21	0,36	-

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3, apresenta os intervalos de referência para a resistência à compressão uniaxial:

Tabela 3 – Resultados do ensaio	
Classificação quanto a compressão simples	
Tipo	Range (MPa)
Muito branda	$1 < \sigma < 5$
Branda	$5 < \sigma < 25$
Medianamente resistente	$25 < \sigma < 50$
Resistente	$50 < \sigma < 100$
Muito resistente	$100 < \sigma < 250$
Extremamente resistente	> 250

Fonte: ISRM, 1981.

Dessa forma, o arenito A se classifica como rocha branda, o arenito B como moderadamente resistente e a rocha vulcânica máfica como extremamente resistente. A seguir a Tabela 4, apresenta alguns tipos de rocha e seus parâmetros (Vallejo, 2002, p. 157), constatando-se que o arenito A apresenta resistência inferior e o arenito B conforme aos intervalos de referências para os três

parâmetros abordados, enquanto a vulcânica máfica se equipara a rochas ígneas como Basalto e Diabásio.

Tabela 4 – Parâmetros de referência

Rocha	Rochas comparáveis			
	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	Young (GPa)	Poisson
Arenito	29,42-230,46	4,9-19,61	2,9-59,8	0,1-0,4
Basalto	58,84-343,23	4,9-24,52	31,38-98,06	0,19-0,38
Diabásio	127,49-357,94	53,94	67,7-94,1	0,28

Fonte: Adaptado Vallejo, 2002.

Avaliando os resultados do ensaio Brasileiro obtidos para afloramentos do NE (Tabela 5), ainda de acordo com os intervalos da literatura apresentados acima, a resistência à tração para o arenito A foi inferior ao esperado, enquanto os da formação B, se mantiveram dentro dos padrões. Em relação a rocha vulcânica máfica, a resistência se adequou melhor a do basalto ($4,9 < \sigma < 24,52$ MPa), estando mais próximo do limite superior da resistência.

Tabela 5 – Resultados do ensaio Brasileiro - Afloramentos NE

ID	A3	BP3	BP4	BT3	BT4	C3	C4
F (MPa)	3,53	6,55	8,68	8,79	10,03	19,92	27,42
t (min)	3,32	5,50	6,50	6,50	8,00	5,00	6,00

Fonte: Autoria própria.

Entre os arenitos padrão (Tabela 6), o Bandera Gray apresentou resistências inferiores ao valor mínimo. Os demais atenderam conforme a referência, sendo do maior para o menor, o Gray Berea e o Boise. Comparativamente à tração, o Gray Berea se assemelhou ao afloramento B, com este apresentando valores um pouco superiores ao primeiro.

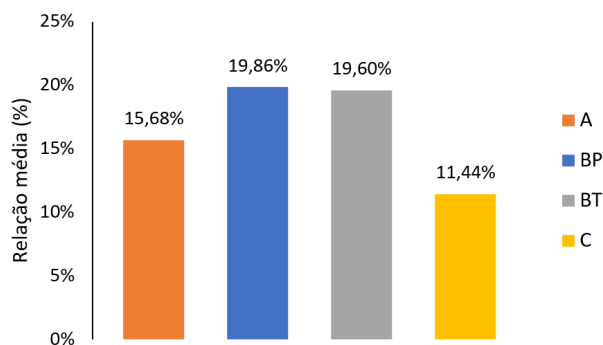
Tabela 6 – Resultados do ensaio Brasileiro - Padrão USA

ID	BG3	BG4	GB3	GB4	B3	B4
F (MPa)	4,15	2,51	6,01	7,08	5,02	6,92
t (min)	4,25	3,49	4,56	4,19	4,52	4,19

Fonte: Autoria própria.

No que tange a relação tração/compressão (Figura 4), esse valor pode ser entre 5 e 10%, no entanto algumas rochas sedimentares apresentam relação entre 14 e 16% (Vallejo, 2002). Destaca-se que as amostras de afloramento NE apresentaram relações médias conforme a referência. Além disso, o arenito B apresentou relação média ainda melhor, superior a 19%.

Figura 4 – Relações médias Tração/Compressão.



Fonte: Autoria própria.

Também, através da plataforma REATE (Projeto da ANP e CPRM, que disponibiliza dados públicos de bacias sedimentares terrestres brasileiras), foram consultados parâmetros geomecânicos de testemunho (amostras de subsuperfície) da bacia sedimentar alvo. Os reservatórios areníticos apresentaram tensão de ruptura de cerca de 94,80 MPa a 2014 m de profundidade, com $E=26,48$ GPa e $\nu=0,12$. Logo a tensão de ruptura dos arenitos analisados representou cerca de 45%, e o módulo de Young cerca de 41% dos valores observados em poços. Enquanto Poisson apresentou valores iguais com apenas uma medição inferior ao observado nos poços.

Conclusões

Pode-se concluir que entre os arenitos de afloramento avaliados, a formação A se manteve fora de alguns intervalos de referências e até apresentou resultados de ensaio inconclusivos. Por outro lado, a formação B apresentou um melhor desempenho geomecânico, especialmente visando representação para reservatórios, incluindo uma relação Tração/Compressão acima do que se costuma observar. A rocha vulcânica máfica da formação C, caracterizou-se como de alta resistência se equiparando a basaltos e diabásios, que a depender de outros parâmetros a serem avaliados (permporosidade por exemplo), pode ter finalidade de rocha selante ou até mesmo reservatórios não convencionais. Além disso, entre as amostras padrão, o arenito Gray Berea foi o que mais se aproximou da formação B, com esta apresentando melhores resultados que as rochas padrão. Vale ressaltar que o presente trabalho trata de uma avaliação inicial, recomendando-se estudos mais aprofundados para uma caracterização geomecânica mais detalhada.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela Repsol Sinopec Brasil, por meio da cláusula de P,D&I da Agência Nacional do Petróleo e Biocombustíveis (ANP) para o projeto “CO2SAND - Pesquisa, Análise e Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação do Potencial de Captura, Armazenamento e Aprisionamento de CO2 em Reservatórios Areníticos da Bacia do Parnaíba, Nordeste Brasileiro”. Pelo subsídio de orientações, análises e infraestrutura, também se agradece ao Laboratório de Engenharia de Reservatórios de Petróleo (LABRES/UFRRN) e Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG/UFPE).

Referências Bibliográficas

REATE - Projeto REATE. ANP e CPRM. [S.l.]: ANP, 2024. Disponível em: <https://reate.cprm.gov.br/arquivos/index.php/s/zTQ17CWbL2Wvx5f?path=%2F>. Acesso em: 20 ago. 2024. Base de dados.

Ketzer, J. M. M. (org.) *et al.* **Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂ = Brazilian atlas of CO₂ capture and geological storage**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2016. p. 95.

CCS Brasil. **1º Relatório Anual de CCS no Brasil**. [S.l.]: CCS Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.ccsbr.com.br/relatorios-anuais> . Acesso em: 10 ago. 2024.

H. Lee; J. Romero (eds) *et al.* **SUMMARY FOR POLICYMAKERS. In: Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 09 ago. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3967-16**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ISRM (International Society for Rock Mechanics). **Rock Characterization, Testing and Monitoring**. In: BROWN, E. (Ed.). Oxford: Pergamon Press, 1981.

Aadnøy, Bernt; Looyeh, Reza. **Mecânica de rochas aplicadas: perfuração e projeto de poços**. Tradução: Ana Luiza Marques Ayres da Silva. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

Vallejo, Luis I. Gonzalez de. *et al.* **Ingeniería Geológica**. 1. ed. Madri: Pearson Educación, 2002. 715 p.