CAPÍTULO 3 · Parte I · Deterioração e ensaios
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/a59kp020
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/nw9fq709

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONCRETO APLICADO NA RETENÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS

Isabella Lobo Filgueiras de Miranda Gomes[1]*, Jhenifer Ketelin Neves Souza[2]; Clédola Cássia Oliveira de Tello[3]
*Autor de contato: isabella.lobo.fmg@gmail.com

[1] Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil
[2,3] Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Brasil

RESUMO

Para garantir a segurança socioeconômica e ambiental da expansão do uso da energia nuclear, é necessária a construção de um repositório para o armazenamento definitivo de rejeitos radioativos. Com o objetivo de utilizar concreto como barreiras de engenharia no depósito final desses rejeitos, este estudo analisou o desempenho de concretos com fibras ancoradas e corrugadas com teores de 1,5% e 2,0%. Para esta aplicação, o concreto deve atender à requisitos normativos, como resistência à compressão e à tração maiores que 54 MPa e 5 MPa, respectivamente. O estudo mostrou que somente concretos com o teor de 2,0% de fibras atenderam aos requisitos normativos. Os resultados dos ensaios de porosidade mostraram que todas as formulações apresentaram baixo índice de vazios, sendo classificadas como concreto durável. Nos ensaios de degradação, os concretos apresentaram bons resultados, sendo o com fibras ancoradas o mais resistente aos efeitos deletérios. Conclui-se que o concreto com 2,0% de fibras ancoradas é o mais promissor para o uso nos contêineres de concreto.
Palavras-chave: durabilidade; desempenho; rejeito radioativo.

ABSTRACT

To ensure the socioeconomic and environmental safety of expanding the use of nuclear energy use, it is necessary to have a final storage for radioactive wastes. Aiming at using concrete as engineered barriers in the final disposal system for these wastes, this study analyzed the performance of concretes with crimped and hooked-end fibers at contents of 1.5% and 2.0%. For this application, the concrete has meet regulatory requirements, such as compressive and tensile strengths greater than 54 MPa and 5 MPa, respectively. The study showed that only the concretes with a 2.0% fiber content meet these regulatory requirements. Porosity test results indicated that all formulations had a low void index, classified as durable concrete. In degradation tests, the concretes performed well, with the hooked-end fiber variant being the most resistant to deleterious effects. It was concluded that concrete with 2.0% hooked-end fibers is the most promising for use in concrete containers.
Keywords: durability; performance; radioactive waste.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente há um impulso global para o crescimento e o desenvolvimento de fontes energéticas com menos emissão de CO_2, como eólica, solar, hidrelétrica e nuclear. De acordo com a IAEA (2025), a utilização da energia nuclear evitou a emissão de 70 Gt de CO_2 nos últimos 50 anos. Apresentando elevado potencial de crescimento, a energia nuclear tornou-se uma possibilidade, devido à baixa emissão de gases de efeito estufa, além da capacidade de ajustar a geração de energia de acordo com a demanda e ser utilizada também em outros setores, como da saúde e alimentício.

No Brasil, o Plano Decenal de Expansão de Energia da EPE (2026), demonstra o crescimento anual de sua demanda energética. Atualmente a produção de eletricidade a partir da energia nuclear, fornecida por duas usinas, representa cerca de 3% do que é gerado no país. Para garantir a segurança socioeconômica e ambiental da expansão do uso da energia nuclear, é necessário um depósito definitivo para o armazenamento dos rejeitos radioativos (Tavares, 2019).

O Centro Tecnológico Nuclear e Ambiental (CENTENA), além de abrigar o depósito definitivo para o armazenamento de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação, desempenhará papel fundamental no avanço da tecnologia nuclear no Brasil, promovendo atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) (CDTN, 2024). Para garantir a retenção dos radionuclídeos e evitar sua migração para o meio ambiente, será empregado um sistema de múltiplas barreiras, composto por barreiras naturais, como camadas de solo e argilas, e por barreiras de engenharia, incluindo contêineres e módulos de concreto.

Dentre os diferentes tipos de concretos existentes no mercado, o autoadensável destaca-se devido a sua trabalhabilidade e à elevada resistência inicial. Para que o concreto possa ser utilizado como barreira de engenharia, deve atender aos requisitos descritos na norma ANSN 6.09 “Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médios níveis de radiação” (CNEN, 2022), que estabelece parâmetros como resistência à compressão e à tração maiores que 54 MPa e 5 MPa, respectivamente. Com o objetivo de incrementar as propriedades mecânicas do concreto e certificar que ele atinja os requisitos determinados, estuda-se a incorporação de fibras de aço. De acordo com Figueiredo (2011), as fibras de aço têm como função a redução de fissuração e o aumento da ductibilidade do concreto.

Entre os diversos parâmetros analisados em concretos, há grande preocupação em relação a sua durabilidade. Entre os agentes agressivos que provocam degradação, destacam-se os íons sulfatos. Estes são transportados em meio aquoso para o interior do concreto, por agentes como chuva ácida, águas residuais industriais, do subsolo, do esgoto, do mar, e até mesmo águas agrícolas contaminadas por fertilizantes. Os íons reagem com os compostos hidratados do cimento, formando produtos como a etringita tardia que provocam a expansão do material e, consequentemente fissuração, além da perda de resistência mecânica (Gomes, 2022).

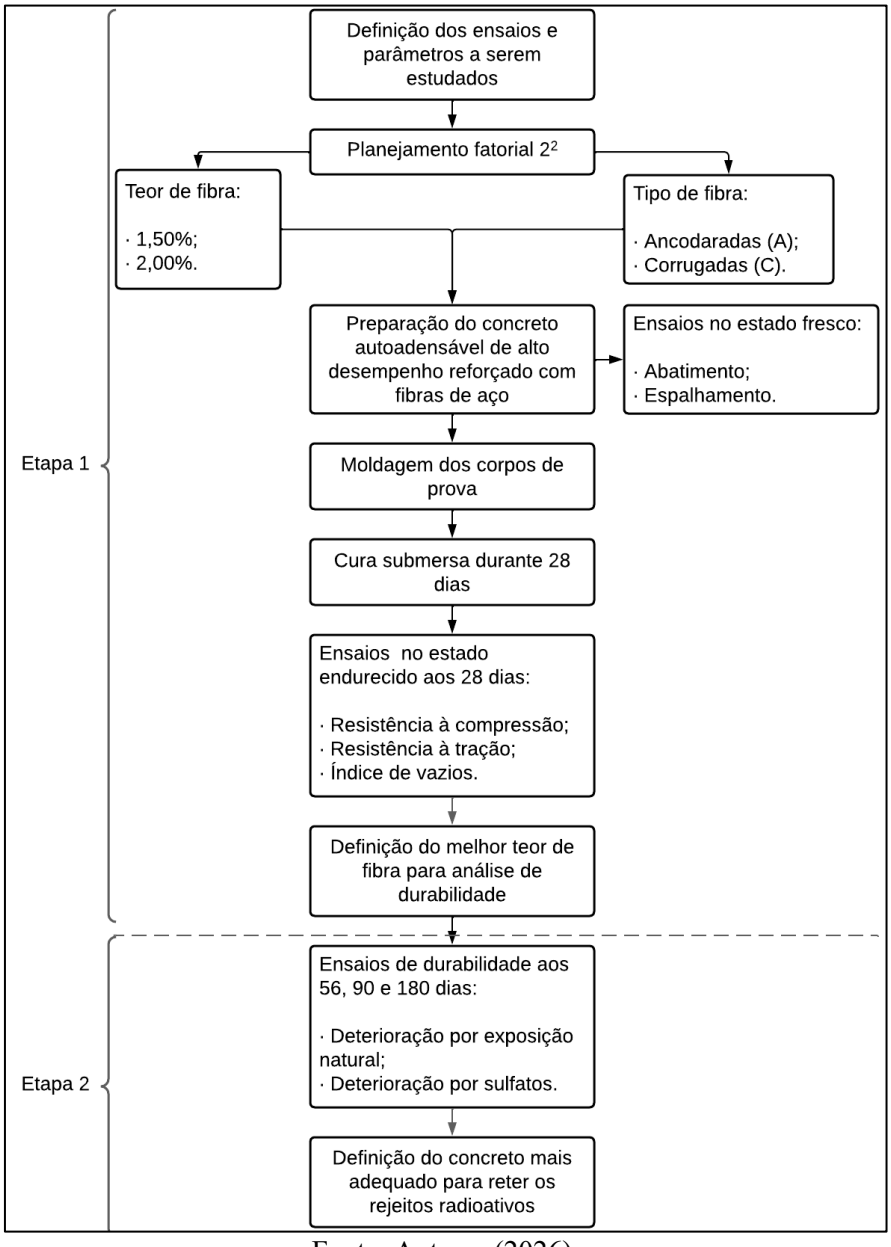
De acordo com IPEN (2025) e CDTN (2024), o depósito final possui operação prevista de 60 anos e vigilância de 300 anos, sendo necessário estudos em relação à durabilidade do concreto no longo prazo. Logo, o estudo deste artigo possui o objetivo de definir o melhor tipo e teor de fibras de aço para a produção de concreto autoadensável de alto desempenho, destinado à fabricação de contêineres. Além disso, busca-se avaliar a durabilidade desse concreto por meio de testes simulando degradação natural e acelerada, com o objetivo de garantir que os rejeitos radioativos sejam armazenados de forma segura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Planejamento dos experimentos

Para a análise de desempenho do concreto autoadensável de alto desempenho reforçado com fibras de aço foi utilizada a metodologia resumida no fluxograma da Figura 1. A pesquisa foi dividida em duas principais etapas: a primeira consistiu nos ensaios de desempenho para determinação do teor de fibras mais adequado e a segunda na análise de durabilidade do concreto.

Figura 1 – Fluxograma resumindo a metodologia utilizada neste trabalho.



Fonte: Autores (2026).

A primeira parte da pesquisa, realizou-se um planejamento fatorial de dois níveis (2^2) em relação ao tipo e teor de fibras. Em relação ao teor de fibras, de acordo com Shimosaka (2017), a adição varia de 0,38% vol. a 2,8% vol., logo optou-se por teores de incorporação intermediários, uma vez

que adições acima de 2,0% podem interferir significativamente na trabalhabilidade do concreto. A partir de estudos realizados por Tavares (2019) e avalição de bibliografia, dentre os diferentes tipos de fibras disponíveis no mercado, foram selecionadas as fibras de aço devido ao alto módulo de elasticidade e ao baixo alongamento na ruptura, atuando como reforço nas idades iniciais do concreto. Assim, analisaram-se dois tipos de fibras de aço, as com ancoragem nas extremidades (A) e as corrugadas (C), em dois teores de incorporação de 1,5% e 2,0%, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Planejamento fatorial completo 2^2.

Fatores		Código da batelada
Tipo de fibra	Teor de fibra	
A	1,5%	CA-1,5
		CA-2,0
C	2,0%	CC-1,5
		CC-2,0

Fonte: Autores (2022).

A partir da análise estatística fatorial, foi realizado um estudo referente à durabilidade do concreto com o teor de fibra de melhor desempenho, para determinação da composição mais indicada para a aplicação da proposta. De acordo com Gomes (2022), para ensaios de durabilidade de concreto em processo de degradação natural ou acelerada, é necessário um tempo longo de análise. Diante disto, foram realizadas análises em três idades diferentes, 56, 90 e 180 dias de ensaio.

2.2 Materiais

Utilizaram-se para cada batelada o cimento CP V – ARI, sílica ativa, areia média, britas 0 e 00, nas seguintes proporções 1:0,10:1,49:1,19:1,19, com fator a/c de 0,30 e 3% de superplastificante (Tavares, 2019). A quantidade das fibras de aço adicionadas à pasta é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Dosagem do concreto autoadensável de alto desempenho reforçado com fibras de aço utilizado.

Material	Quantidade (kg)	Código
Fibra A – 1,5%	1,714	CA-1,5
Fibra A – 2,0%	2,285	CA-2,0
Fibra C – 1,5%	1,714	CC-1,5
Fibra C – 2,0%	2,285	CC-2,0

Fonte: Autores (2022).

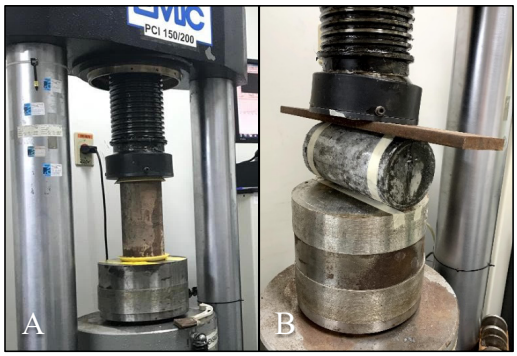
2.3 Ensaios no estado fresco

Por se tratar de um concreto autoadensável, foi realizado também o ensaio de espalhamento, seguindo a norma ABNT NBR 15823-2 “Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — Método do cone de Abrams”. Este ensaio permite avaliar a fluidez do concreto em fluxo livre para sua classificação como autoadensável. O ensaio de abatimento foi realizado complementarmente, por ser um ensaio básico de concreto, de acordo com a norma ABNT NBR 16889 “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. O método permite determinar a coesão e consistência da massa do concreto ainda fresco, a partir do seu assentamento (ABNT, 2020).

2.4 Ensaios no estado endurecido

Ao final dos ensaios no estado fresco, o concreto foi moldado em corpos de prova cilíndricos seguindo o determinado na norma ABNT NBR 5738 "Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova" (ABNT, 2016). Após as primeiras 24 horas de cura, os corpos de prova foram desmoldados e iniciou-se o processo de cura submersa, durante 28 dias, em solução saturada de $Ca(OH)_2$. Finalizado o período de cura submersa, os corpos de prova foram rompidos para avaliação da resistência mecânica na primeira etapa da pesquisa. Realizaram-se os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, como apresentado na Figura 2, de acordo com as normas ABNT NBR 5739 "Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos" e ABNT NBR 7222 "Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos", respectivamente (ABNT, 2018; ABNT, 2011).

Figura 2 – Ensaios de rompimentos dos corpos de prova: (A) Resistência à compressão; (B) Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autores (2022).

Para a determinação do índice de vazios, foram realizados os ensaios descritos na norma ABNT NBR 9778 "Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009). Inicialmente os corpos de prova foram aquecidos em estufa à 105 ± 5 ºC, durante 72 horas e, ao final, determinou-se a massa seca (m_s). Posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por 72 horas e em seguida, submersos em um recipiente com água em ebulição durante 5 horas. Ao final deste período, aguardou-se o resfriamento natural e pesaram-se os corpos de prova utilizando uma balança hidrostática, obtendo-se a massa saturada da amostra imersa em água após fervura (m_i). Por fim, foi realizada a pesagem das amostras, secas por um pano úmido, obtendo-se a massa saturada após imersão e fervura (m_{sat}). A partir dos resultados calculou-se a porcentagem de índice de vazios do concreto (I_v), utilizando a Equação 1.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s - m_i} * 100 \quad (1)$$

A partir dos resultados dos ensaios do concreto endurecido foi realizada a análise de variância (ANOVA) para determinação estatística se há ou não semelhança entre as médias dos resultados. Desta análise será determinada se a variação de tipo e teor de fibra tem interferência na formulação, e assim pode-se definir qual o teor mais indicado para os estudos de durabilidade.

2.5 Ensaios para análise de durabilidade

Na Figura 3 apresentam-se os ensaios de degradação, o concreto foi avaliado em relação a sua durabilidade em dois ambientes diferentes, um simulando a degradação natural (A) e o outro simulando a degradação acelerada (B), ou seja, em ambiente agressivo, durante três idades de ensaios previamente definidas, 56, 90 e 180 dias. A exposição natural foi realizada para compreender o comportamento do concreto quando em situação de exposição ao meio ambiente. Os corpos de prova foram colocados em um local limpo no CDTN, livre de interferência humana, sendo exposto continuamente à variação de temperatura e umidade reais. Os ensaios de degradação por íons sulfatos foram realizados adaptando a metodologia utilizada por Pereira (2011), submetendo os corpos de prova à imersão completa em solução de sulfato de sódio de concentração de 5% vol., durante todo o período de ensaio. Ao final realizou-se o ensaio de resistência à compressão de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 3 – Ensaios de degradação. (A) Natural. (B) Acelerado em solução de Na_2SO_4.



Fonte: Autores (2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados primeiramente para classificar o concreto, seguida da avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade.

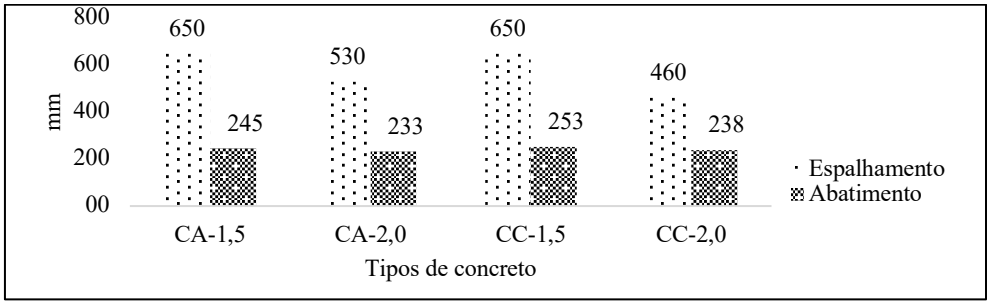
3.1 Classificação do concreto e influência da adição de fibras

No estado fresco foram analisados os resultados dos ensaios de espalhamento e abatimento. Em relação ao ensaio de espalhamento, a norma ABNT NBR 15823-2 apresenta três classificações quanto ao diâmetro do espalhamento: SF1 (de 550 mm a 650 mm) ideal para estruturas pouco armadas; SF 2 (de 660 mm a 750 mm), indicado para a maioria das aplicações; e SF3 (de 760 mm a 850 mm), ideal para estruturas com alta densidade de armadura (ABNT, 2017). Quanto ao abatimento, ABNT NBR 8953 classifica o concreto de acordo com seu abatimento: S10 (de 10 mm a 50 mm), S50 (de 50 mm a 100 mm), S100 (de 100 mm a 160 mm), S160 (de 160 mm a 220 mm) e S220 (acima de 220 mm) (ABNT, 2015).

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no concreto fresco. Considerando-se a média dos resultados de espalhamento, o concreto é do tipo SF 1. Entretanto, os resultados com teores de 2,0%, variando entre 460 mm e 530 mm, apresentaram menor espalhamento. De acordo com Silva (2010), a presença de teores elevados de fibras interfere diretamente no espalhamento do concreto, sendo este o principal fator identificado. Como apresentado por Shimosaka (2017), a adição de 2,0% se enquadra nos limites superiores de incorporação, interferindo significativamente na trabalhabilidade do concreto. Por outro lado, o abatimento não sofreu este tipo de interferência, apresentando resultados mais homogêneos,

variando entre 233 mm e 245 mm, classificando o concreto como S220. Com os resultados dos dois ensaios o concreto estudado se classifica como autoadensável, ideal para elementos estruturais esbeltos com armaduras, confirmando sua aplicação proposta.

Figura 4 – Média dos resultados dos ensaios de abatimento e espalhamento para cada formulação.



Fonte: Autores (2021).

3.2 Análise de desempenho mecânico do concreto endurecido

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência mecânica, rompidos aos 28 dias de cura. Para que os concretos estudados possam ser aplicados na retenção dos rejeitos radioativos no sistema de deposição, os valores de resistência à compressão e à tração, devem ser maiores que 54 MPa e 5 MPa, respectivamente. Dos resultados apresentados, os de tração superaram o requisito mínimo, entretanto na compressão, os concretos com teores de 2,0% foram os únicos que atingiram o valor mínimo esperado.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração.

Código do concreto	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
CA-1,5	53,6	7,88
CA-2,0	63,1	7,95
CC-1,5	46,6	7,88
CC-2,0	56,1	7,34

Fonte: Autores (2022).

Com o objetivo de avaliar o efeito que é estatisticamente significativo nos resultados de resistência à compressão foi realizada uma análise de variância, como apresentado na Tabela 4. Para que o fator tenha interferência estatística significava, o Valor-P deve ser menor que 0,05 (Gomes, 2022). Analisando cada fator, foi observada interferência estatística somente quando há variação do teor de fibras.

Tabela 4 – Análise de Variância do ensaio de resistência à compressão com 95% de confiança.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	2	279,570	139,785	5,47	0,055
Linear	2	279,570	139,785	5,47	0,055
Tipo de fibra	1	98,333	98,333	3,85	0,107
Teor de fibra	**1**	**181,237**	**181,237**	**7,10**	**0,045**
Erro	5	127,660	25,532		
Total	7	407,229			

Fonte: GOMES (2021).

Na Tabela 5 apresenta-se a análise de variância dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Diferentemente, nos resultados da resistência à compressão, não foi identificada interferência estatisticamente significativa, uma vez que o Valor-P de todos os fatores foi acima de 0,05, logo todas as médias analisadas são estatisticamente iguais. Portanto, a variação tanto do tipo quanto do teor de fibras, não altera os resultados de tração.

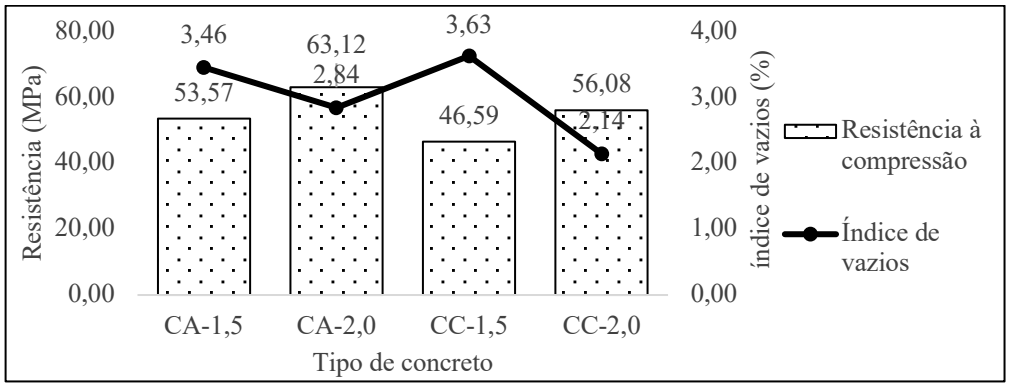
Tabela 5 – Análise de Variância do ensaio de resistência à tração com 95% de confiança.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	**Valor-P**
Modelo	3	0,4825	0,1608	0,38	**0,771**
Linear	2	0,2934	0,1467	0,35	**0,724**
Tipo de fibra	1	0,1000	0,1876	0,45	**0,540**
Teor de fibra	1	0,1058	0,1058	0,25	**0,642**
Interações de 2 fatores	1	0,1891	0,1891	0,45	**0,539**
Tipo*Teor	1	0,1891	0,1891	0,45	**0,539**
Erro	4	1,6768	0,4192		
Total	7	2,1593			

Fonte: GOMES (2021).

De acordo com Tavares (2019) e com os resultados apresentados, a incorporação de fibras não interfere nos resultados de resistência à tração, logo na Figura 5 comparam-se somente os resultados de índice de vazios com os de resistência à compressão. De acordo com Helene e Terzian (1992), para classificar um concreto como durável, seu índice de vazios deve ser abaixo de 10%, sendo assim as quatro formulações analisadas classificam-se como duráveis. Analisando o teor de fibras separadamente, observa-se que em ambos os tipos, quando o teor aumenta para 2,0% há uma diminuição do índice de vazios, sendo este um fator favorável para a resistência mecânica do concreto, uma vez que ocorre aumento nos resultados de resistência à compressão. De acordo com Figueiredo (2011), o teor de fibras interfere de forma significativa na coesão da pasta. Este fator torna-se favorável quando o concreto endurece, auxiliando no empacotamento dos componentes do concreto, e reduzindo a porosidade do material.

Figura 5 – Comparação entre os resultados de resistências à compressão e índice de vazios.



Fonte: Autores (2022).

3.3 Efeito do meio no desempenho do concreto endurecido

Diante dos resultados e análises apresentadas anteriormente, a segunda etapa deste trabalho foi realizada somente com os concretos com maior teor de fibra, 2,0%, variando apenas o tipo de fibra. Ao final das idades de 56, 90 e 180 dias, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da degradação natural, observa-se que todos os concretos apresentaram aumento inicial da resistência, quando comparados aos resultados dos concretos sem degradação, analisados aos 28 dias. Uma das hipóteses, é que este aumento pode ser atribuído às reações contínuas de endurecimento do concreto até 56 dias. Diferentemente, as amostras de 90 dias, independente do tipo de fibra adicionado, apresentaram perda de resistência. Este fenômeno está associado à degradação do concreto pelas intempéries ambientais ao qual estava exposto. O aumento de resistência observado aos 180 dias pode ser atribuído ao fenômeno de cicatrização autógena. De acordo com Freitas *et al*. (2024), os mecanismos mais importantes envolvidos neste fenômeno são a contínua hidratação dos compostos do clínquer ou a carbonatação do hidróxido de cálcio, que possibilita que as fissuras cicatrizem ao longo do tempo, vedando microfissuras, o que pode conferir maior resistência ao concreto.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão referente à degradação natural.

Tipo de Fibra	Tempo (dias)	Resistência à compressão após degradação natural (MPa)
Ancorada	56	64,60
	90	60,51
	180	73,21
Corrugada	56	82,20
	90	47,81
	180	62,12

Fonte: Autores (2026).

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios simulando degradação acelerada por sulfatos. Os concretos com fibras corrugadas (CC) apresentaram diminuição da resistência com o tempo, pois de acordo com Melo (2010), há formação de etringita secundária ou tardia no concreto em idades avançadas, devido à reação de monossulfatos no interior do material. O surgimento da etringita tardia pode resultar na expansão dos corpos de prova, aumentando a possibilidade de fissuração do concreto e, consequentemente, perda de resistência. Por outro lado, os corpos de prova com fibras ancoradas (CA) não apresentaram este mesmo comportamento. De acordo com IBRACON (2024), as fibras com ancoragem proporcionam maior aderência à matriz do concreto e por isso, a propagação de fissuras causadas devido à formação de etringitas, é controlada de modo mais eficiente.

Como nesta etapa a diferença entre as formulações é o tipo de fibras, é necessária a análise da distribuição e aderência destas fibras no concreto. O aumento na resistência também pode ser atribuído à cicatrização autógena (Freitas *et al.*, 2024). Os mecanismos de ataque e de recuperação coexistem, visto que as amostras estavam submersas. Avaliando os resultados acredita-se que devido ao controle do aumento de fissuras proporcionado pela fibra ancorada, neste caso o mecanismo de recuperação predominou em relação ao mecanismo de degradação.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão referente à degradação acelerada por sulfatos.

Tipo de Fibra	Tempo (dias)	Resistência à compressão após degradação acelerada (MPa)
Ancorada	56	47,50
	90	60,51
	180	73,21
Corrugada	56	64,80
	90	50,16
	180	34,59

Fonte: Autores (2026).

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados concretos com adição de fibras comparando-se dois tipos, ancoradas e corrugadas, e dois teores, 1,5% e 2,0%. Os ensaios de espalhamento realizados no concreto fresco mostraram que todas as formulações são classificadas como SF1 e os ensaios de abatimento mostraram que o concreto se classifica como S220. Com os resultados dos dois ensaios é possível determinar que o concreto estudado se classifica como autoadensável ideal para elementos estruturais esbeltos com armaduras, confirmando sua aplicação.

Todas as formulações com teor de 2,0% atenderam integralmente aos requisitos de resistência à compressão e à tração maior que 54 MPa e 5 MPa, respectivamente. Entretanto, o mesmo não ocorreu com os concretos com teor de 1,5%. A análise estatística do efeito do teor e do tipo de fibras mostrou que apenas o teor de fibras alterou significantemente a resistência à compressão do concreto, mostrando que o maior teor de fibras conferiu maior resistência. Quanto ao tipo de fibra, a análise estatística mostrou que não há variações significativas nos resultados. Entretanto, observou-se que os concretos com fibras ancoradas apresentaram resultados maiores nos ensaios de resistência à compressão. Em relação aos ensaios de resistência à tração não houve diferença significativa entre os valores, ou seja, a variação no teor e no tipo de fibra estudadas não interferiram na resistência à tração. Nos ensaios de porosidade, todos os concretos estudados apresentaram índice de vazios abaixo de 10%, de acordo com os parâmetros de Helene e Terzian (1992), logo estes concretos são classificados como duráveis.

Acerca dos ensaios de degradação, os concretos com fibras corrugadas apresentaram maior resistência aos 56 dias, em ambas as exposições quando comparados aos concretos produzidos com fibras ancoradas. Entretanto, após seis meses de ensaios, os concretos com fibras ancoradas apresentaram maior resistência, mostrando que no longo prazo eles resistem melhor aos possíveis efeitos deletérios causados pela exposição ambiental e aos íons sulfatos. De acordo com os resultados obtidos, o concreto com teor de 2,0% de fibras ancoradas mostrou-se o mais promissor para o uso nos contêineres de concreto, por apresentar melhores resultados antes e depois dos processos de degradação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear pela infraestrutura oferecida durante a pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

6. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015. Versão Corrigida: 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005. Versão Corrigida 2:2009.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. **Sobre o CENTENA**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cdtn/pt-br/projetos-especiais/centena. Acesso em: 29 de jan. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ANSN 6.09: **Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médios níveis de radiação.** 11p. Rio de Janeiro, 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal da Expansão Energética 2026**. 2025. Disponível em: https://bibliotecadigital.gestao.gov.br/bitstream/123456789/912/2/Plano%20Decenal%20de%20Energia%202026.pdf. Acesso em: 30 de jan. 2026.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 256 f. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP, Brasil, 2011.

FREITAS, E. M. DA S. G. DE; FORMAGINI, S.; GONÇALVES, A. B. **Potencial de cicatrização autógena em concretos com sílica ativa.** Caderno Pedagógico, Curitiba, v. 21, n. 12, p. 01-19, 2024.

GOMES, I. L. F. M. **Estudo da físico-químico do concreto aplicado como barreira de engenharia na deposição de rejeitos**. 119 p. Dissertação de Mestrado (Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Entendendo o concreto com fibras.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, [S. l.], ano 7, n. 118, 2024.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **A new era for nuclear energy beckons as projects, policies and investments increase**. 2025. Disponível em: https://www.iea.org/news/a-new-era-for-nuclear-energy-beckons-as-projects-policies-and-investments-increase. Acesso em: 26 fev. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Equipes da CNEN e do Projeto Centena visitam instalações de armazenamento de rejeitos radioativos em Abadia de Goiás.** 2025. Disponível em: https://ipenfm.ipen.br/post/20602/equipes-da-cnen-e-do-projeto-centena-visitam-instalacoes-de-armazenamento-de-rejeitos-radioativos-em-abadia-de-goias. Acesso em: 28 jan. 2026.

MELO, S. K. **Estudo da formação de etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** 150 p. Dissertação de Mestrado (Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

PEREIRA, S. S. J. **Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudos de suas propriedades visando sua utilização.** 145p. Dissertação de Mestrado (Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2011.

SHIMOSAKA, T. J. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis.** 123 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2017.

SILVA, E. P. **Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado.** 54 p. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

TAVARES, B. L. **Contêineres de concreto para acondicionamento de rejeitos radioativos**. 118 p. Dissertação de Mestrado (Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2019.