

EMPREGO DE ADITIVOS REDUTORES DE RETRAÇÃO PLÁSTICA E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

João Pedro de Souza Armando^a

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Mara Monaliza Linhares Pereira^b

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Arthur Aviz Palma e Silva^c

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Valdirene Maria Silva Capuzzo^d

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

RESUMO

O concreto é amplamente usado na construção civil por sua versatilidade, resistência e baixo custo, mas a retração durante o endurecimento pode causar fissuras que comprometem sua durabilidade e resistência final. Este estudo avaliou a influência do aditivo redutor de retração (ARR) e do superplastificante nas propriedades de estado fresco (massa específica, retração plástica e avaliação de superfície) e endurecido (resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade). Foram produzidos três traços – sem aditivos (referência), com ARR e com superplastificante – e os ensaios mostraram que ambos eliminaram a fissuração em comparação ao traço controle, embora o ARR tenha reduzido a resistência à compressão e à tração em todas as idades analisadas. Esses resultados ressaltam a importância de compreender a retração e destacam ARR e superplastificantes como ferramentas essenciais para concretos mais duráveis e resilientes.

PALAVRAS-CHAVE: Retração plástica, aditivo redutor de retração, concreto, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Concrete is widely utilized in civil construction due to its versatility, strength, and cost-effectiveness. However, shrinkage during the hardening process can lead to cracking, thereby compromising its durability and final strength. In this context, the present study aimed to evaluate the behavior of concrete considering the influence of a shrinkage-reducing admixture (SRA) and a superplasticizer on its fresh and hardened properties. Three concrete mixtures were produced: one without additives (reference mix), one with SRA, and one with a superplasticizer. The fresh-state properties and mechanical characteristics of the hardened concrete were assessed. The experimental results demonstrated the clear effectiveness of both the SRA and the superplasticizer in mitigating shrinkage, as evidenced by the absence of cracking compared to the reference mix. However, the inclusion of the SRA was observed to reduce both compressive and tensile strengths at the evaluated ages. In summary, this study not only underscores the importance of understanding and addressing shrinkage in concrete but also highlights the significant contribution of SRAs and superplasticizers as essential tools in the pursuit of more durable and resilient construction materials.

KEYWORDS: Plastic shrinkage, shrinkage-reducing admixture, concrete, mechanical properties.

^a jope.armando@gmail.com ^b maramonaliza19@gmail.com ^c eng.aviz@gmail.com ^d valdirenemaria@unb.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das práticas mais antigas da humanidade, remontando aos tempos pré-históricos, quando as primeiras edificações eram erguidas utilizando materiais naturais, como pedra, argila e madeira. Ao longo dos séculos, avanços técnicos e o aprimoramento de tecnologias possibilitaram a construção de estruturas cada vez mais amplas e sofisticadas.

O concreto é uma dessas tecnologias. Amplamente utilizado no âmbito da construção civil, esse material consiste na mistura de cimento, água, agregados (como areia e brita) e, em alguns casos, aditivos. Esta mistura é moldável em diversas formas antes de endurecer. No entanto, durante o processo de endurecimento, podem ocorrer fissuras nas peças de concreto. Essas fissuras resultam da movimentação da água dentro do material e da exsudação e evaporação, que podem ocorrer de forma isolada ou conjunta (Recena, 2014).

O aparecimento de fissuras, resultado da retração, é influenciado por vários fatores, dentre eles, a velocidade de retração, a rigidez do material e o nível de confinamento da peça (Rato, 2006). O processo de deformação plástica de materiais cimentícios pode ser separado em duas fases bem definidas. Primeiramente, o material se deposita de modo que água do traço tenda a ir para superfície, esse é o assentamento plástico (Shi C., Zhang, Li, Chong, Xie, 2016). Em seguida, a água do processo de exsudação começa a evaporar, criando meniscos de água entre as partículas sólidas causando um acúmulo de pressão capilar, assim, se iniciam os processos de retração plástica (Etxeberria M., Vazquez, Marí, Barra, 2007). Caso esse acúmulo de pressões atinja um nível crítico, ocorre a fissuração da peça.

A fissuração precoce tem altas chances de gerar um impacto permanente nas características mecânicas da estrutura de concreto. Além disso, essas fissuras podem aumentar durante o processo de endurecimento do concreto, permitindo a entrada de agentes agressivos, podendo ocasionar um processo de corrosão da estrutura metálica embutida e degradação precoce do componente estrutural (Bayasi, McIntyre, 2002; Swaddiwudhipong, Lu, Wee, 2003).

O uso de aditivos para o controle da retração em peças de concreto é algo extensivamente retratado na literatura. O aditivo redutor de retração (ARR) é um componente químico adicionado ao concreto para minimizar a quantidade de retração que ocorre à medida que o concreto endurece e seca. Esse aditivo

atua de diversas formas, controlando a evaporação de água, modificando as tensões internas, melhorando a coesão da matriz cimentícia (Melo Neto, Cincotto, Repette, 2007). A maior parte dos ARR's são líquidos orgânicos com base em derivados do glicol (Melo Neto, Cincotto, Repette, 2007). Bentz explica o funcionamento dos ARR's, em resumo, os aditivos redutores de retração reduzem a tensão superficial e alteram a viscosidade da água presente nos poros do concreto, isso incorre na redução da pressão capilar e, consequentemente, da retração plástica, influenciada por esse fator (Bentz, 2005; Bentz, 2006).

Além dos ARR's, outro aditivo importante é o superplastificante, que é adicionado ao concreto para melhorar a trabalhabilidade da mistura sem aumentar o teor de água/cimento. Esse aditivo contribui para a manutenção das propriedades mecânicas do traço, permitindo uma mistura mais fluida e manejável sem comprometer a resistência do concreto.

Desse modo, o presente artigo visa comparar duas adições: o aditivo redutor de retração e o aditivo superplastificante, tanto na capacidade de avaliar a retração plástica no concreto, quanto nas suas propriedades de resistência à tração e à compressão e seu módulo de elasticidade.

2. METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV - ARI, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018). Atualmente, esse tipo de cimento possui um dos maiores teores de clínquer disponíveis no mercado e, portanto, tem uma influência mínima de materiais cimentícios suplementares na mistura. A caracterização do aglomerante está apresentada na Tabela 1. A caracterização química foi obtida através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), utilizando um instrumento EX 720 da marca Shimadzu.

Tabela 1. Caracterização física e química do cimento Portland.

Propriedades	Critérios Normativos	CPV - ARI	Método de Ensaio
Tempo de Pega Inicial (min)	≥ 60	140	ABNT NBR 16607 (2018)
Tempo de Pega Final (min)	≤ 600	180	
Massa Específica (g/cm ³)	-	3,10	ABNT NBR 16605 (2017)
Diâmetro abaixo do qual estão 10% das partículas (D10) (µm)	-	1,30	Granulometria a Laser
Diâmetro abaixo do qual estão 50% das partículas (D50) (µm)		13,10	
Diâmetro abaixo do qual estão 90% das partículas (D90) (µm)		31,76	
Resistência à Compressão (MPa))	1 dia	≥ 14	ABNT NBR 7215 (2019)
	3 dias	≥ 24	
	7 dias	≥ 34	
Composição Química em Óxidos (%)	SiO ₂	-	Fluorescência de Raios-X (FRX)
	CaO	-	
	MgO	-	
	Al ₂ O ₃	-	
	Fe ₂ O ₃	-	
	K ₂ O	-	
	TiO ₂	-	
	ZnO	-	
	SO ₃	$\leq 4.5\%$	
	MnO	$\leq 6.5\%$	
Perda ao fogo (%)	$\leq 6.5\%$	6,12	

Fonte: Silva, p. 5, (2023)

2.1.2 Agregado miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado na presente pesquisa foi

a areia lavada de rio, à base de quartzo, e extraída do Rio Corumbá, na região de Brasília, no Distrito Federal. A caracterização do agregado miúdo mostrou uma massa específica igual a 2,65 g/cm³ e módulo de finura de 2,36. O agregado graúdo escolhido foi obtido a partir da britagem de rochas calcíneas de calcário, com dimensão máxima de 19 mm. Os testes de caracterização para o agregado graúdo mostraram uma massa específica igual a 2,71g/cm³ e um módulo de finura igual a 3,31.

2.1.3 Aditivos

Em busca do principal objetivo da pesquisa, foram utilizados dois aditivos: o aditivo redutor de retração e o superplastificante. O aditivo redutor de retração (ARR) utilizado, de nome comercial “Eclipse”, foi produzido pela Grace Brasil. De acordo com o fabricante, o ARR utilizado é de base química glicol, não contém água, porém em doses elevadas seu volume deverá ser considerado no ajuste da água final, e sua massa específica é de 0,91 g/cm³. O aditivo superplastificante utilizado foi o Master Glenium 51, da marca Master Builders Solutions. Esse aditivo é um aditivo redutor de água tipo 2 (hiper plastificante), de pega normal, líquido e livre de cloretos. É feito à base de éter policarboxílico modificado, que possui como mecanismo de atuação reduzir consideravelmente a água necessária para dosagem do concreto, e é considerado de terceira geração. Conforme o fabricante, esse material possui uma aparência líquida branca turva, uma densidade variando de 1,067 a 1,107 g/cm³, com um pH variando de 5 a 7, um teor de sólidos igual a 28,5 a 31,5 %, e uma viscosidade menor que 150 cps.

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL

O método de dosagem utilizado para a produção do concreto analisado foi o chamado Método Helene & Terzian (1993). Esse método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca, através de um traço intermediário dos demais materiais previstos. Além disso, a mistura foi realizada com o objetivo de obter uma consistência no valor de 120 ± 20 mm. Para tal metodologia, realizou-se três misturas, utilizando um teor de argamassa fixo igual a 54% e os traços estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Dosagem das misturas realizadas no estudo.

CP	Materiais (kg)					
	a	b	c	d	e	f
REF	15	33,6	41,4	9	0	0
SUP	15	33,6	41,4	7,5	0,044	0
ARR	15	33,6	41,4	8,7	0	0,3

a Cimento
b Areia
c Brita
d Água
e Superplastificante
f ARR

Fonte: Autor

Conforme indicado na Tabela 2, para as misturas REF, utilizou-se uma relação água/cimento (a/c) igual a 0,6, enquanto na mistura ARR utilizou-se uma relação a/c de 0,58 devido ao aditivo redutor de retração ter sido adicionado em substituição à água, para não ultrapassar o valor da consistência desejada. Já na mistura SUP, avaliou-se a ação do superplastificante com uma relação água/cimento igual a 0,5, com o intuito de reduzir a quantidade de água na mistura sem comprometer o limite estabilidade da consistência. É importante notar que para todas as misturas foi atendido o valor de consistência estabelecido, sendo que para o traço REF foi necessário inserir mais água, já que não se utilizou nenhum tipo de aditivo químico.

2.3 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

2.3.1 Massa específica

A massa específica foi aferida baseando-se na ABNT NBR 13278 (2005), que consiste na medição da massa do concreto e o volume dessa massa necessário para que seja preenchido um recipiente de volume conhecido. Em seguida, calculou-se a razão entre a massa e o volume, obtendo o valor da densidade no estado fresco do material.

2.3.2 Retração Plástica

Para a avaliação da retração plástica, foi utilizado um molde de teste específico para a pesquisa, e monitoramento de fissuras por retração plástica do concreto. Conforme estabelecido pela ASTM C1579 (2013), construiu-se um molde de comprimento igual a 600 mm. Na Figura 1 está representado o molde utilizado.



Figura 1. Molde utilizado para avaliação da retração plástica.
Fonte: Autor

Para auxiliar o desenvolvimento de fissuras associadas à retração plástica utilizou-se um ventilador como estabelecido pela norma. Ajustou-se a velocidade para alcançar a velocidade mínima do vento, sendo controlado a uma velocidade de 4,7 m/s. Dessa forma, facilitou-se a evaporação de água, e consequente formação de fissuras. Além disso, a temperatura e umidade do ambiente foram controladas por meio de um termo-higrômetro digital, como representado na Figura 2.



Figura 2. Aparato de controle da umidade e temperatura.
Fonte: Autor

2.3.3 Análise das imagens por meio da Avaliação de Superfície

Segundo as diretrizes da ASTM C1579 (2013), é possível empregar uma variedade de ferramentas, como microscópios ópticos portáteis, comparadores de fissuras ou sistema de análise de imagens, para conduzir a análise de fissuras. Com base nesse princípio, adotou-se o método conhecido como Avaliação de Superfície Inteira, uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Esse método implica na avaliação completa da amostra, utilizando documentação fotográfica para capturar uma imagem que represente todo seu aspecto.

O método de Avaliação da Superfície Inteira é uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Essa abordagem permite uma visualização integral das fissuras presentes, possibilitando uma avaliação

abrangente de sua distribuição, tamanho e padrões (Palma e Silva, 2022). Ao capturar uma imagem que englobe toda a superfície, essa metodologia facilita a identificação de áreas críticas e a compreensão da extensão de fissuras, o que é essencial para avaliação da integridade do material, nesse caso a amostra de concreto. Além disso, essa técnica oferece a vantagem de ser relativamente rápida e de fácil implementação, sendo interessante para estudos de caracterização de fissuras em diversos contextos. Nesse estudo, realizou-se a análise de fissuras por meio da captura de fotografias em alta resolução em intervalos de 20 minutos, registrando o comportamento de toda a amostra. Em seguida, analisou-se as imagens por meio do software especializado para dimensionamento e mensuração da área das fissuras, ainda seguindo a ASTM C1579 (2013). O programa utilizado para tal análise foi o Fiji/ImageJ.

As fotografias foram consistentemente capturadas a uma distância fixa de 30 cm da amostra, com o objetivo de melhorar a precisão na avaliação do tamanho das fissuras, tornando-o mais apropriado para análises comparativas. A captura de imagens foi realizada por vinte quatro horas, garantindo a solidificação da amostra. A Figura 3 representa a amostra logo no início do ensaio.

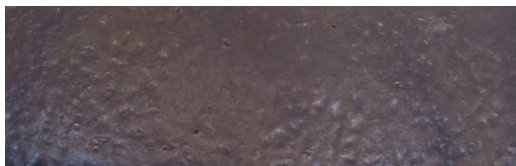


Figura 3. Superfície da amostra no início do ensaio.
Fonte: Autor

Com o objetivo de melhorar a visualização das fotografias realizadas, converteu-se a para 8-bit, retirando a coloração e transformando em preto e branco. Além disso, foi introduzido o filtro de redução de ruído não local nas imagens que está disponível como um plugin do Fiji/ImageJ. Ademais, corrigiu-se a coloração das imagens por meio da correção do histograma, ajustando as faixas de coloração cinza, como representado na Figura 4.

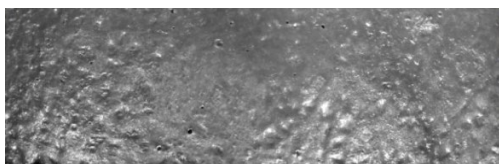


Figura 4. Superfície com ajustes de imagem.
Fonte: Autor

Para realizar a medição das fissuras, também se utilizou o software Fiji/ImageJ. Realizou-se a segmentação da imagem também por meio do plugin fornecido. Em seguida, com o objetivo de facilitar a identificação e segmentação das fissuras nas imagens, utilizou-se o plugin Trainable Weka Segmentation. Esse plugin combina a segmentação manual com algoritmos. Assim, ele oferece resultados mais precisos para reconhecimento e segmentação de fissuras. Por fim, foi possível uma visualização clara das fissuras formadas ao final do ensaio, como representado na Figura 5.



Figura 5. Representação da fissura obtida com o tratamento da imagem.
Fonte: Autor

Para os resultados da avaliação das fissuras por meio da Avaliação da Superfície Inteira, as fissuras foram quantificadas através da porcentagem da área total da amostra. Em seguida, os percentuais de área fissurada encontrados foram correlacionados com a área total da amostra em milímetros quadrados (mm^2). Assim, essa análise garantiu uma escala consistente da evolução e mensuração das fissuras.

2.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Cada valor foi obtido a partir da média do ensaio de 3 corpos de prova.

2.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Para estudar a influência dos aditivos utilizados nas propriedades mecânicas do concreto, foram realizados os ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias. Para a realização do ensaio, foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensões iguais a 100 x 200 mm, seguindo as diretrizes normativas da ABNT NBR 5739 (2018). Os concretos foram curados em câmara úmida a partir do primeiro dia de desmoldagem até a idade do ensaio.

2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Seguindo as diretrizes da NBR 7222 (2011), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em

corpos de prova cilíndricos foi conduzido em conformidade com os procedimentos padronizados após 28 dias de cura. Assim, os corpos de prova foram cuidadosamente posicionados na máquina de ensaio, onde foram aplicadas cargas progressivas de forma uniforme até a fratura.

2.4.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias foi realizado seguindo as prescrições da ABNT NBR 8522 (2008). Os corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm foram submetidos a quatro ciclos de carga e descarga, com uma velocidade controlada de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Durante esses ciclos, as deformações foram registradas com extensômetros posicionados em locais opostos. Após a obtenção dessas medidas, os corpos de prova foram novamente carregados até a ruptura, e o módulo de elasticidade foi calculado em GPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

3.1.1 Massa específica

A massa específica foi determinada logo após a confecção dos concretos, em que um recipiente de volume conhecido foi preenchido com duas camadas de concreto, adensadas com vibrador, e em seguida, obteve sua massa registrada. Os resultados da massa específica de cada mistura estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de massa específica para todas as misturas.

MISTURA	REF	SUP	ARR
Massa Específica (g/cm ³)	2,39	2,42	2,38

Fonte: Autor

Observa-se a partir dos resultados que a mistura com o superplastificante apresentou a maior massa específica quando comparado com os demais traços, enquanto a mistura com ARR apresentou a menor massa específica, já o traço SUP tem uma menor relação água/aglomerante, por isso tende a apresentar uma maior massa específica. No entanto, essa flutuação é esperada em um procedimento experimental, e não foi considerada significativa.

3.1.2 Avaliação da Superfície Inteira

A avaliação da amostra de concreto por Avaliação da Superfície Inteira foi realizada por 24 horas. Observou-se que as misturas ARR e SUP não apresentaram qualquer fissuração na superfície de concreto, enquanto a mistura sem nenhum tipo de aditivo, a mistura REF, apresentou em sua superfície fissuras localizadas principalmente na região central da amostra. Para facilitar a visualização da evolução da fissuração, realizou-se um gráfico representado na Figura 6, que mostra a porcentagem da área fissurada em relação à área total da superfície do concreto, metodologia explicitada no item 2.3.3 do presente artigo.

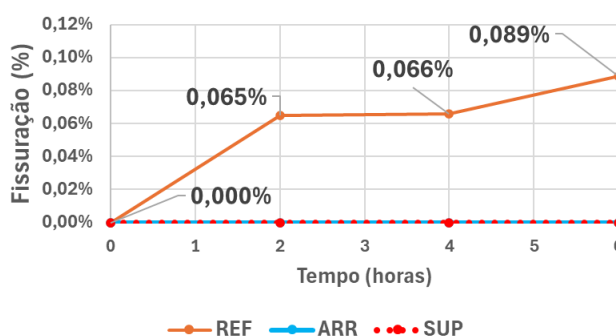


Figura 6. evolução da fissuração das misturas.

Fonte: Autor.

Observou-se que a maior evolução das fissuras do traço REF se desenvolveu durante as primeiras duas horas do experimento, passando de uma superfície não fissurada para 0,065% de fissuração, ou seja, com 78,0 mm² de área de fissura. Notou-se ainda uma estabilização das fissuras após as duas horas de duração, que aumentou de 0,065% para 0,066%, ou seja, apenas 1,2 mm² de área em duas horas. E, por fim, com seis horas de experimento apresentou 106,8 mm² de área fissurada. Observou-se que após seis horas de experimento a área fissurada não evoluiu e pode-se inferir que esse tempo representa o tempo de fim de pega do concreto presente na amostra. É importante destacar a eficácia do aditivo redutor de retração e do superplastificante. As misturas que foram adicionadas a esses aditivos não apresentaram qualquer sinal de fissuração na superfície das amostras durante a experimentação e o percentual de fissuração ficou estagnado e igual a zero.

A eficiência do ARR foi claramente observada ao longo do experimento, uma vez que a amostra em que foi utilizado não apresentou qualquer sinal de fissuração superficial, destacando sua capacidade de minimizar a retração plástica do concreto.

Para mitigar a retração plástica, a terceira estratégia adotada foi reduzir a relação água/aglomerante e utilizar o superplastificante para compensar a consistência do concreto. Observou-se que o uso dessa adição não só melhorou a trabalhabilidade, evidenciado pela facilidade do espalhamento do concreto na forma, mas também contribuiu significativamente para a redução do risco de fissuras.

3.2 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 Resistência à compressão simples

Para a avaliação das propriedades mecânicas realizou-se o ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias, e os resultados dos traços avaliados estão apresentados na Figura 7.

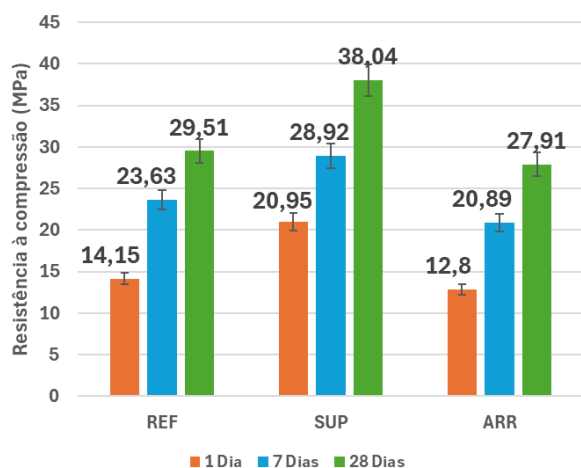


Figura 7. Resistência à compressão de cada mistura.
Fonte: Autor.

A partir do gráfico representado na Figura 7, observa-se que a presença do aditivo superplastificante aumentou a resistência à compressão, quando comparado aos demais. Quando analisada a resistência à 1 dia e aos 7 dias, os resultados apresentaram a mesma tendência de acréscimo, com valores de 48,1% e 22,4% respectivamente. Aos 28 dias, a mistura em sua presença revelou um acréscimo de 28,9% na resistência à compressão do concreto em relação ao traço de referência. Isso pode ser explicado pela presença do aditivo produzir uma hidratação mais eficaz, sendo possível reduzir a relação água/cimento, gerando uma estrutura mais homogênea que produz uma certa melhoria da resistência, além de realizar o controle da retração plástica.

Ainda com base no gráfico apresentado, observa-se que o ARR causou um decréscimo na resistência à

compressão. Quando analisada a resistência aos 7 dias, o decréscimo de resistência é ainda maior, representando uma perda de 11,6%. Aos 28 dias, enquanto a mistura REF obteve uma resistência de 29,51 MPa, a mistura ARR apresentou resistência de 27,91 MPa, o que representou uma perda de 5,4%. O aditivo redutor de retração tem como seu mecanismo de ação a redução da tensão superficial da água do poro. Conforme Brooks et al. (2020), isto faz com que ocorra um retardo da aglomeração das partículas e, consequentemente, um retardo do desenvolvimento das reações de hidratação. Esse retardo das reações aumenta a porosidade do material, e, consequentemente, provoca a diminuição da resistência mecânica da mistura.

Dessa forma, o aditivo superplastificante é o mais vantajoso quando se trata da resistência à compressão do concreto. A presença desse aditivo resultou em melhorias significativas na resistência mecânica do material em todos os intervalos de tempo avaliados, bem como no controle completo do aparecimento de fissuras, tanto um quanto o outro podem ser atribuídos ao fato de o aditivo superplastificante possibilitar a redução do teor água/cimento do traço.

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7222:2011 e os resultados obtidos estão representados na Figura 8.

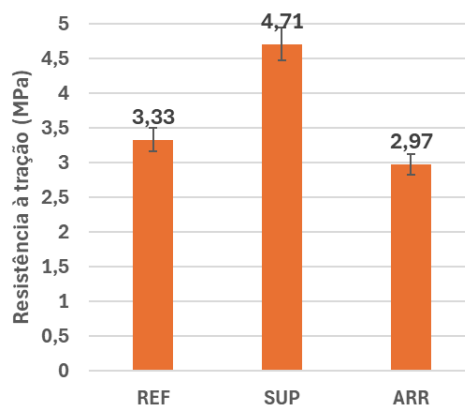


Figura 8. Resistência à tração de cada mistura.
Fonte: Autor.

Baseando-se nos dados obtidos, o traço SUP, com uma menor relação água/aglomerante, demonstrou um aumento de 42,4% na resistência à tração em relação à referência, refletindo melhorias significativas na resistência e na redução da

fissuração, enquanto se manteve a consistência do concreto. Essa tendência de melhoria também se refletiu na resistência à compressão. Por outro lado, o traço ARR exibe uma redução de 9,1% ainda em relação ao traço de referência, sugerindo uma menor resistência, o que também se observou na resistência à compressão, e uma menor capacidade de suportar cargas sem sofrer danos. Dessa forma, infere-se que o aditivo superplastificante foi o que apresentou um melhor resultado, tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração.

3.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi avaliado em três corpos de prova na idade de 28 dias e os resultados médios para os três traços realizados estão representados na Figura 9.

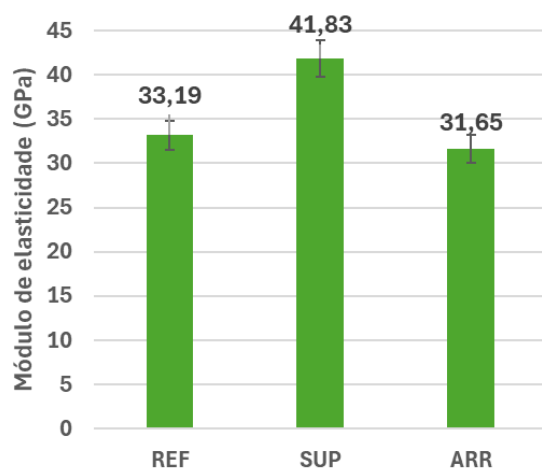


Figura 9. Módulo de elasticidade de cada mistura.
Fonte: Autor.

Ao analisar o módulo de elasticidade, verificou-se que a adição do aditivo superplastificante resultou em um aumento significativo, refletindo a redução na relação água/aglomerante. Aos 28 dias, a mistura com superplastificante apresentou um módulo de elasticidade de 41,8 GPa, comparado a 33,2 GPa da mistura de referência, o que representa um incremento de 26,0%. Esse aumento está associado à melhoria geral nas propriedades do concreto, incluindo maior resistência e menor fissuração, devido à menor quantidade de água na mistura. Verificou-se que, assim como ocorreu na resistência à compressão, a presença do aditivo redutor de retração causou uma diminuição no módulo de elasticidade, porém menos acentuada. Aos 28 dias, a mistura de referência obteve um módulo de elasticidade de 33,2 GPa, enquanto a mistura contendo o redutor de retração igual a 31,2 GPa,

representando uma perda de 4,6%. A queda do módulo de elasticidade já era esperada, haja vista que essa propriedade está relacionada com a resistência à compressão do material. Além disso, observa-se que os percentuais de perda de resistência à compressão e do módulo de elasticidade, 5,4% e 4,6%, respectivamente, estão muito próximos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que ambos os aditivos analisados – o redutor de retração (ARR) e o superplastificante – demonstraram eficácia no controle da retração plástica, com eliminação total das fissuras nas amostras. No entanto, suas influências sobre as propriedades mecânicas foram distintas: enquanto o ARR comprometeu a resistência à compressão e à tração, o superplastificante proporcionou ganhos significativos nessas propriedades, além de um aumento no módulo de elasticidade.

Esses achados corroboram diretamente os objetivos propostos no estudo, que buscavam avaliar os efeitos dos aditivos tanto na retração quanto no desempenho mecânico do concreto. Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que o superplastificante é a alternativa mais vantajosa para obras em que a integridade mecânica e a durabilidade são prioritárias, especialmente sob risco de fissuração por retração plástica.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações deste estudo. Os ensaios foram realizados com apenas uma composição para cada aditivo e em condições controladas de laboratório, o que pode não representar com precisão o desempenho em campo. Além disso, os efeitos de longo prazo dos aditivos, como a durabilidade frente a agentes agressivos, não foram investigados.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se: avaliar diferentes dosagens dos aditivos, buscando um equilíbrio entre controle da retração e resistência mecânica; investigar o comportamento dos concretos com aditivos em condições ambientais variadas e em escalas reais de aplicação; analisar o impacto desses aditivos na durabilidade e na vida útil das estruturas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13278:2014 - Argamassa - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABNT. NBR 16607; Cimento Portland—Determinação dos Tempos de Pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. NBR 7215: Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT. NBR NM 53: Coarse aggregate – determination of the bulk specific gravity, apparent specific gravity and water absorption (in Portuguese), Rio de Janeiro, 2009.
- ASTM C 1579. 2013. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fibre Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). West Conshohocken: ASTM International.
- Bayasi, Z., McIntyre, M., Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, *ACI Mater. J.* 99 (4) (2002) 337–344.
- Bentz, D.P. Curing with Shrinkage-Reducing Admixtures: Beyond Drying Shrinkage Reduction. *Concrete International*, v.27(10), 2005, pp.55-60.
- Bentz, D.P. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v.4(3), 2006, pp.423-429.
- Etxeberría, M. Vazquez, E.; Marí, A.; Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37.
- Helene, P.; Terzian, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo, p. 349, 1993.
- Melo Neto, A. A., Cincotto, M. A., & Repette, W. L. (2007). Efeito do aditivo redutor de retração (SRA) no cimento Portland de alta resistência inicial. In *Congresso Construção*.
- Palma e Silva, A. A. (2022). Microconcretos de alta resistência contendo polímero superabsorvente e metacaulim, Publicação E.DM – 01A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- Rato, V. 2006. Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.
- Ravina, D., Shalon, R. 1968. Plastic shrinkage cracking, *ACI J.* 65 (4) 282–294.
- Shi C.; Li Y.; Zhang J.; Li W.; Chong L.; Xie Z. 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate; A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112.
- Swaddiwudhipong, H.R. Lu, T.H. Wee. 2003. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, *Cem. Concr. Res.* 33 (12) 2077–2084.