

Influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável

Evaluation of the influence of the viscosity modifying admixture on the properties of self-compacting concrete

Wilson Flexeiras de Oliveira Evaristo¹, Victor Ludovico de Almeida¹,
Valdirene Maria Silva Capuzzo¹

¹Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900, Brasília, DF, Brasil.
e-mail: wilsonfoevaristo@gmail.com, vlalmeida1994@gmail.com, valdirenemia@unb.br

RESUMO

A autoadensabilidade do Concreto Autoadensável (CAA) é garantida pelo alcance de alta fluidez, a habilidade de passar por obstáculos sem sofrer bloqueio e da resistência à segregação. No entanto, tal fluidez pode causar efeitos de segregação do agregado e de exsudação da água, os quais podem ser controlados com a incorporação de aditivos modificadores de viscosidade. A presente pesquisa avaliou a influência de aditivos químicos, com foco no aditivo modificador de viscosidade. Foram produzidos cinco concretos com dois tipos de Aditivos Superplastificantes (SP), polímeros à base de policarboxilatos, sendo que, no concreto de referência, foi usado apenas um desses aditivos. Nos demais concretos, foi incorporado à mistura de concreto o Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV), composto por poliéteres solúveis em água de altos pesos moleculares, nos teores de 0,5% e 1,5% do peso do cimento. Ainda, foi confeccionado outro concreto com a utilização de um aditivo experimental também à base de policarboxilatos que atua como superplastificante e modificador de viscosidade. De forma a atingir o escopo desta pesquisa, no estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento, caixa-L e funil-V. Foi fixado como parâmetro de controle da autoadensabilidade o resultado do ensaio da caixa-L em $0,85 \pm 0,05$ como controle de habilidade passante. De modo a caracterizar a estabilidade da suspensão dos aditivos químicos, foi executado o ensaio de potencial zeta. Já no estado endurecido, foi realizado no CAA o ensaio de resistência à compressão simples nas idades de 7, 14 e 28 dias. Além deste, foram realizados os ensaios de tração por compressão diametral e de absorção de água por imersão na idade de 28 dias. Ademais, para avaliar os produtos de hidratação, foi executada a análise termogravimétrica em pastas de cimento com os teores de aditivos químicos de cada CAA. Os resultados desta pesquisa mostraram que o aditivo modificador de viscosidade, atuando juntamente com os aditivos superplastificante, produziu traços com propriedades no estado fresco variáveis. A utilização do aditivo AMV influenciou o processo de hidratação do cimento e, por conseguinte as propriedades mecânicas do concreto.

Palavras-chave: Concreto autoadensável (CAA). Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV). Aditivo Superplastificante (SP).

ABSTRACT

The properties of Self-Compacting Concrete (SCC) are ensured by the high flowability, the ability to pass through obstacles without being blocked and the resistance to segregation. However, such fluidity can cause effects of aggregate segregation and water exudation, which can be controlled with the incorporation of viscosity modifying admixtures. The present study evaluated quantitatively the influence of chemical admixtures, focusing on the viscosity modifying admixture. Two types of polycarboxylate-based Superplasticizer Admixtures (SP) were used to produce five different self-compacting concretes, one of these admixtures was

incorporated into the composition of the reference concrete of this study. A water-soluble polyethers-based Viscosity Modifying Admixture (VMA) with a high molecular weight was added to the mixes of the other four concretes in the contents of 0.5% and 1.5% of the weight of the cement. Also, another concrete was produced with the use of an experimental polycarboxylate-based admixture that acts as superplasticizer and viscosity modifier. To reach the scope of this study and to evaluate the properties of fresh concrete, the slump flow test, the L-box test and V-funnel test were performed. It was set as a specification for each concrete the value of $0.85 \pm 0,05$ for the HP parameter, which is determined by the L-box test. To characterize the suspension stability of the chemical admixtures, the zeta potential test was performed. In the hardened state, the simple compressive strength test was performed at the ages of 7, 14 and 28 days. In addition, other tests were performed at the age of 28 days such as the diametrical compression test and water absorption by immersion test. In addition, to evaluate hydration products, thermogravimetric analysis was performed on cement pastes with the contents of chemical admixtures of each SCC. The results of this research showed that the viscosity modifying admixture along with the Superplasticizer Admixtures (SP) produced traces with variable fresh properties. The use of the VMA influenced the cement hydration process and, therefore, the mechanical properties of the concrete.

Keywords: Self-Compacting Concrete (SCC); Viscosity Modifying Admixture (VMA); Superplasticizer Admixture (SP).

1. INTRODUÇÃO

A procura por materiais que possibilitem a execução de obras mais economicamente viáveis na construção civil, resultando em estruturas de maior desempenho, tem motivado diversos avanços na tecnologia do concreto. Exemplo disso é o Concreto Autoadensável (CAA), o qual tornou-se, nas duas últimas décadas, um dos principais progressos nesse campo [1].

A fim de que seja considerado um concreto autoadensável, o material deve possuir elevada fluidez, viscosidade e coesão entre os seus componentes, para que sejam garantidas as principais propriedades de autoadensabilidade: a habilidade de preenchimento das formas sobre o efeito apenas de seu peso próprio; a habilidade de passar entre obstáculos, tais como armaduras, sem sofrer bloqueio; a manutenção da estabilidade até o momento posterior ao lançamento, sem que haja segregação de seus componentes. Além disso, o material deve também atender aos mesmos requisitos de resistência e durabilidade dos concretos convencional e de alto desempenho [1].

Apesar da característica de alta trabalhabilidade, garantida por meio da utilização de aditivos superplastificantes, o concreto autoadensável deve manter-se estável durante os processos de transporte e lançamento, devendo apresentar certa resistência à segregação. Para tanto, é necessário controlar a coesão e a viscosidade da mistura [2]. Com intuito de atingir esse objetivo, muitas vezes são adicionados materiais finos à composição do material. Entretanto, isso gera um concreto com área superficial das partículas maior, ocasionando maior consumo de água, além de causar não uniformidade na mistura, consequência da variação granulométrica. Dessa forma, pode-se substituir os finos por Aditivos Modificadores de Viscosidade (AMV) [3].

Na ausência de aditivos superplastificantes, que atuam, na mistura, como dispersantes, as partículas de cimento tendem a aglomerar ao entrar em contato com a água, devido a diversos tipos de interação, quais sejam: forças de atração entre as partículas (forças de Van der Waals), forças eletrostáticas e interação entre as moléculas de água e dos hidratos. A aglomeração das partículas implica na retenção de parte da água de mistura e, por conseguinte, gera uma rede de canais entre essas. Esta rede de vazios tende a reter água que, consequentemente, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura. Portanto, com a utilização de dispersantes, pode-se evitar a sedimentação de partículas e a consequente segregação de fases [4]. A dispersão, resultado da ação dos aditivos na mistura, faz com que a área superficial das partículas de cimento esteja mais disponível para que ocorra o contato com a água de mistura. Com isso, há recrudescimento da taxa de hidratação e, consequentemente, aumento da resistência inicial da matriz de cimento [5, 6].

O desempenho dos aditivos e a capacidade destes adsorverem-se às partículas de cimento é determinada pelos seguintes parâmetros: a interação eletrostática da macromolécula com o cimento; a densidade de carga aniônica desta, ambas proporcionais à quantidade de grupos carboxílicos da cadeia principal; o comprimento das cadeias laterais, que determina a espessura da camada de polímero que se forma em volta dos grãos e o tipo de interação entre as partículas adsorvidas pelas cadeias dos polímeros, que, por sua vez, resultam na repulsão estérica entre as partículas de cimento [7, 8, 9].

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos são polímeros de estrutura combinada, composta por uma cadeia principal, que se adsorve às partículas do aglomerante e por cadeias laterais de com-

primentos diversos, estas são neutras e agem de forma a estabilizar o sistema por impedimento estérico [10]. Estudos demonstram que os aditivos a base de policarboxilatos agem de forma a retardar a hidratação do cimento, uma vez que esses induzem a formação de uma camada que envolve os grãos, esta acaba por impedir o contato das partículas com a água e, por conseguinte, a dissolução destas [11]. O grau com o qual aditivos compostos por policarboxilatos retardam a pega e o enrijecimento dos produtos gerados na hidratação depende da estrutura molecular do composto químico, sendo que aqueles que possuem maior densidade de carga aniônica tendem a produzir maior retardo no processo de hidratação do aglomerante [12, 13]. Ainda, conforme a pesquisa de Haneabra *et al.* [14], os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos incorporam ar no concreto, sendo que, em alguns estudos, foi identificado um aumento de até de 8% no conteúdo de ar devido ao uso desses aditivos [15].

Os agentes modificadores de viscosidade são usados na forma de polímeros orgânicos e sintéticos solúveis em água (éteres de celulose, óxidos de polietileno, poliácridamidas, álcoois polivinílicos), os quais aumentam a viscosidade da mistura de concreto, de flocculantes orgânicos solúveis em água (resinas naturais, copolímeros poliestirenicos e polieletrólitos sintéticos), os quais aumentam as forças de atração entre as partículas de cimento por adsorção, de emulsões orgânicas (dispersões aquosas de argilas e emulsões acrílicas), as quais introduzem pequenas partículas adicionais à mistura, de materiais inorgânicos extrafinos (bentonita, sílica ativa e alguns tipos de cinzas volantes), os quais aumentam a capacidade de retenção de água da mistura [16, 17].

Quanto aos mecanismos de ação, os aditivos modificadores de viscosidade podem atuar de duas formas: agindo sobre as partículas de finos, como é o caso dos AMV à base de celulose e acrílico; ou atuando sobre a água livre da mistura, o que ocorre nos produtos à base de glicol e biopolímeros [18]. Quando a ação ocorre sobre as partículas de finos, o aumento da viscosidade gera redução da fluidez da pasta, uma vez que os finos serão adsorvidos pelo aditivo modificador de viscosidade, diminuindo o efeito dos agentes superplastificantes [19]. Isso não acontece quando o processo ocorre atuando sobre a água livre do concreto, tornando esse tipo de AMV preferível para obtenção de um concreto com fluidez e viscosidade adequadas. Quando atua na água, o AMV promove viscosidade moderada por meio da formação de uma rede que detém a água e sustenta os agregados, fornecendo coesão ao mesmo tempo que evita os processos indesejáveis de segregação e exsudação [20].

Quando um aditivo modificador de viscosidade é usado em uma mistura de concreto com relação água e cimento (a/c) baixa (inferior a 0,30), seu uso pode interferir no processo de hidratação do cimento e reduzir o ganho de resistência à compressão com o tempo. No entanto, quando usado em misturas típicas (com relação água e cimento superior a 0,40), as quais requerem a incorporação de um AMV para aumentar sua estabilidade, o uso do aditivo tende a não afetar significativamente o ganho de resistência à compressão com o tempo [17, 21]. De acordo com Leemann *et al.* [22], a resistência à compressão de concretos aos 28 dias de concretos não é afetada pelo uso de aditivos modificadores de viscosidade. Ainda, algumas pesquisas indicam que o uso do AMV resulta em uma redução do teor de ar nos concretos [23, 24], porém outros estudos indicam que sua utilização acarreta um maior índice de vazios [25].

O estudo das propriedades reológicas de argamassas de concretos autoadensáveis indicou que, a uma proporção constante de água e cimento (a/c), a adição de AMV causa uma diminuição do espalhamento da argamassa e um aumento do seu tempo de fluxo (teste do funil V) [22].

A utilização do aditivo modificador de viscosidade auxilia na obtenção das propriedades necessárias para que o concreto seja considerado autoadensável, gerando nele um comportamento pseudoplástico, ou seja, ocorre redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Como trata-se de um material fluido, com uma alta taxa de cisalhamento, a viscosidade diminui, facilitando o processo de lançamento. Sendo assim, após aplicação do concreto e redução das taxas de cisalhamento, a viscosidade tende a aumentar e garante a capacidade de retenção de água e de manutenção da sustentabilidade das partículas [26].

Segundo Sakata [27], a adição de agente de viscosidade no concreto estabiliza a fluidez, fazendo o material fluir facilmente em pequenos espaços e possibilitando, assim, o atingimento da propriedade de autoadensabilidade. Além disso, o AMV é vantajoso em produções de larga escala, uma vez que reduz a sensibilidade da mistura às variações nas proporções de dosagem [19]. Por fim, cabe ressaltar que aditivos modificadores de viscosidade também são utilizados como reforços na estabilidade do concreto, juntamente com aditivos superplastificantes [28].

Para a produção dos concretos autoadensáveis desta pesquisa, foram utilizados três tipos de aditivo superplastificante, polímeros à base de policarboxilatos, sendo que um destes também atua como modificador de viscosidade, e um o aditivo modificador de viscosidade à base de poliéteres de altos pesos moleculares.

Sendo assim, este estudo teve o intuito de contribuir para a melhor compreensão dos efeitos de aditi-

vos modificadores de viscosidade nas propriedades reológicas e nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração do concreto autoadensável, assim como no processo de hidratação de pastas de cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais

Neste estudo, foram utilizados, para a composição de concretos, os materiais que seguem: cimento CP V ARI; agregado miúdo natural de origem quartzosa; agregado graúdo britado de origem calcária; aditivos superplastificantes; aditivo modificadores de viscosidade e água.

O resultado dos ensaios de caracterização do cimento, os limites normativos dos parâmetros e as respectivas normas utilizadas para a determinação destes estão dispostos na Tabela 1. Constatou-se, a partir dos resultados dos ensaios de caracterização do cimento, que estes atendem aos limites normativos.

Tabela 1: Caracterização física do cimento.

PROPRIEDADE		RESULTADO	LIMITES – NBR 16697:2018 [29]	NORMA
Massa específica (g/cm ³)		3,06	-	NBR 16605:2017 [30]
Finura (Blaine – m ² /kg)		4459	> 3000	NBR 16372:2015 [31]
Pasta de consistência normal	Quantidade de água (g)	159,25	-	NBR 16607:2018 [32]
	Consistência (mm)	5,5	-	
Tempo de pega	Início de pega (min)	130	> 60	NBR NM 16607:2018 [33]
	Fim de pega (min)	210	< 600	
Resistência à Compressão	1 dia (MPa)	15,9	> 14	NBR 7215:2019 [34]
	3 dias (MPa)	28,2	> 24	
	7 dias (MPa)	37,7	> 34	

A caracterização dos agregados foi realizada de acordo com as especificações das normas brasileiras NBR NM 52:2009 [35] e NBR NM 248:2003 [36]. Os resultados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização física dos agregados.

DETERMINAÇÕES	AGREGADO MIÚDO		AGREGADO GRAÚDO
	AREIA FINA	AREIA MÉDIA	
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,65	2,75
Módulo de finura	1,09	2,49	6,00
Dimensão máxima (mm)	1,20	4,80	12,50

As principais características dos aditivos utilizados neste estudo estão dispostas na Tabela 3. Os dados referentes ao pH, à dosagem recomendada e ao aspecto/cor foram obtidos das fichas técnicas dos aditivos e os demais por intermédio dos ensaios de caracterização de aditivos para argamassas e concreto, cujos requisitos estão dispostos na NBR 11768(3) [37].

Neste estudo, foram utilizados três aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos (SP1, SP2 e SP-AMV). Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos atuam na dispersão das partículas de cimento por repulsão estérica, fazendo-se uso de cadeias moleculares de diversos comprimentos que se projetam na superfície das partículas de cimento, e por dispersão eletrostática [8, 38, 39, 40]. Ressalta-se que o aditivo SP-AMV, de acordo com informações de seu fornecedor, atua como modificador de viscosidade e que esse é experimental, não possuindo, pois, ficha técnica. Relativamente à composição do outro aditivo modificador de viscosidade empregado na composição dos concretos autoadensáveis, esta é constituída por poliéteres solúveis em água de altos pesos moleculares.

Tabela 3: Principais características dos aditivos químicos.

ADITIVO	TEOR RECOMENDADO (% DO PESO DE CIMENTO)	ASPECTO/COR	PH	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	TEOR DE SÓLIDOS (%)
SP1	0,2 a 1,0	Líquido/branco turvo	5,0 – 7,0	1,087	30,00
SP2	0,5 a 1,0	Líquido/alaranjado	5,0 – 7,0	0,988	25,38
AMV	0,5 a 2,0	Líquido/incolor	5,0 – 7,0	0,870	9,79
SP-AMV	-	Líquido/alaranjado	-	0,965	25,22

De modo a avaliar a estabilidade coloidal dos aditivos químicos, foi realizado o ensaio de potencial zeta [41, 42, 43]. O parâmetro obtido no ensaio é uma medida da magnitude da repulsão ou da atração eletrostática ou das cargas entre partículas, sendo um dos parâmetros fundamentais que influem na estabilidade do material. A partir desse parâmetro, pode-se analisar a dispersão, a agregação ou a floculação do aditivo [41]. Foi utilizado o equipamento da empresa *Malvern*, modelo *Zetasizer Nano ZS90*. O ensaio foi realizado à temperatura de 25°C com a célula de imersão *Folded capillary cell* e água como solvente.

O equipamento determina a carga ou potencial zeta das partículas e das moléculas com a medição das velocidades enquanto essas movem-se devido à eletroforese. As partículas e moléculas com potencial zeta migram para os eletrodos do equipamento na presença de campo magnético. A agilidade com a qual essas partículas e moléculas movem-se é proporcional à intensidade do campo magnético e ao potencial zeta. Conhecido o campo magnético, com as medições das velocidades das partículas e das moléculas, fazendo-se uso de laser Doppler, obtém-se o potencial zeta [42]. Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de determinação do potencial zeta dos aditivos químicos.

Tabela 4: Resultados do ensaio de determinação do potencial zeta dos aditivos químicos.

ADITIVO	POTENCIAL ZETA
SP1	- 9,840
SP2	- 0,396
AMV	- 13,60
SP-AMV	- 12,80

Os resultados obtidos no ensaio, dispostos na Tabela 4, demonstram que os aditivos utilizados neste estudo apresentam cargas negativas. De acordo com Liang *et al.* [43], a estabilidade da suspensão está relacionada a maiores valores absolutos de potencial zeta e de densidade de carga superficial, de modo que as soluções com potenciais zeta maiores tendem a ser mais estáveis, uma vez que as cargas geram repulsão entre as partículas, superando a tendência natural de agregação destas. Dessa forma, pode-se constatar que o aditivo SP2 apresenta menor estabilidade coloidal em comparação com os demais aditivos, uma vez que possui menor valor absoluto de potencial zeta.

2.2 Dosagem de concretos autoadensáveis

Para a confecção dos traços de concreto autoadensável, realizou-se a dosagem obedecendo os valores indicados pelo Instituto Americano de Concreto (ACI) para consumo de cimento, volume de pasta, volume de argamassa e de agregado graúdo [44]. Os teores de aditivo modificador de viscosidade, foram definidos obedecendo a dosagem recomendada na ficha técnica desse material, de modo que foram adotados os valores de 0,5% e 1,5% do peso de cimento da mistura para avaliar o efeito desse aditivo nos concretos. Os teores de aditivos superplastificantes foram determinados durante o processo de confecção dos concretos, tendo como valor inicial 0,5% do peso de cimento da mistura, sendo este ajustado até que fosse obtido o valor de $0,85 \pm 0,05$ para o parâmetro de autoadensabilidade HP no ensaio de caixa L. Na Tabela 5, é apresentada a dosagem de referência utilizada neste estudo.

Tabela 5: Dosagem de referência dos concretos autoadensáveis.

TRAÇO	CIMENTO (kg/m ³)	AREIA FINA (kg/m ³)	AREIA MÉDIA (kg/m ³)	BRITA (kg/m ³)	ÁGUA (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	AMV (kg/m ³)
T1 (SP1)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	3,90	0,00
T2 (SP1 + 0,5% AMV)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	3,78	1,97
T3 (SP1 + 1,5% AMV)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	2,60	5,91
T4 (SP2 + 0,5% AMV)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	3,71	1,97
T5 (SP2 + 1,5% AMV)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	3,35	5,91
T6 (SP-AMV)	394,19	556,79	347,99	835,19	204,66	3,71	0,00

2.3 Métodos de ensaio

A determinação das características no estado fresco dos concretos deste estudo foi realizada de acordo com a NBR 15823(1) [45], a qual estabelece que, para o concreto ser classificado como autoadensável, é necessário que este enquadre-se, no mínimo, na classificação prescrita para os ensaios de espalhamento (*slump flow test*), T500 ou funil V, anel J ou caixa L. Tendo em vista este fato, foram realizados os ensaios de espalhamento, T500, funil-V e caixa-L conforme os requisitos normativos da NBR 15823(2) , NBR 15823(4) e NBR 15823(5) [46- 48], respectivamente.

As propriedades mecânicas de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e de absorção de água por imersão foram determinadas conforme as referências normativas NBR 5739 [49], NBR 7222 [50] e NBR 9778 [51], respectivamente. O ensaio de resistências à compressão simples foi realizado nas idades de 7, 14 e 28 dias, e os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por imersão na idade de 28 dias. Tendo em vista que foi averiguada diferenças nos resultados de resistência à compressão e de resistência à tração por compressão diametral dos concretos, procedeu-se à análise de significância dessas alterações. Dessa forma, foi realizado a análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão com nível de significância (α) de 5%. Nos casos em que houve diferença significativa entre os resultados de propriedades mecânicas dos concretos, ou seja, o valor p da ANOVA foi inferior ao nível de significância, sendo a hipótese nula rejeitada, foi realizado o teste de Tukey, de modo a avaliar a variação em relação à composição referência T1.

A análise termogravimétrica foi realizada para pastas de cimento Portland aos 28 dias de idade. Os teores de aditivos químicos superplastificantes e modificadores de viscosidade foram os mesmos da dosagem dos concretos. Não foi realizado ensaio para a pasta com os teores da composição T4, uma vez que esta produziu concreto o qual sofreu processo de segregação. Com isso, foram analisadas 5 amostras de pastas de cimento transformadas em pó com massa de cerca de 10mg. A taxa de aquecimento usada foi de 10°C/min no intervalo de 30 a 1200°C, com utilização de cadinho de alumina e atmosfera de N₂ com fluxo de 100mL/min. Os teores dos compostos hidratados, assim como os teores de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio remanescentes na matriz hidratada são determinados, utilizando as curvas de análises térmica (TG) e térmica diferencial (DTG), a partir das perdas de massa nos intervalos de temperatura das três contribuições endotérmicas típicas das reações decorrentes do aumento progressivo de temperatura das amostras de pasta de cimento. Esses intervalos de temperatura correspondem aos processos de desidratação (LDH), de 35 a 385°C, de desidroxilação (LDX), de 385 a 485°C, e de descarbonatação (LDC), de 485°C a 1000°C [52- 54]. Um pico adicional de desidratação ($\approx 0.1\text{H}_2\text{O}/\text{Si}$) ocorre após 800°C e está relacionado à decomposição de C-S-H em wollastonita (CaSiO₃) [55, 56].

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Propriedades dos concretos no estado fresco

Estão dispostas, na Tabela 6, as propriedades dos concretos no estado fresco. Ademais, na Figura 1, são apresentados os aspectos visuais dos concretos no ensaio de espalhamento.

Tabela 6: Propriedades dos concretos no estado fresco.

CONCRETO	DIÂMETRO DE ESPALHAMENTO (mm)		TEMPO DE ESCOAMENTO (s)				HABILIDADE PASSANTE (HP)	
	RESULTADOS	CLASSE	T ₅₀₀ (ESPALHAMENTO)		T _v (FUNIL V) – 30 s		RESULTADOS	CLASSE
			RESULTADOS	CLASSE	RESULTADOS	CLASSE		
T1 (REF)	785	SF3	2,38	VS2	10,4	VF2	0,90	PL2
T2	795	SF3	1,78	VS1	18,2	VF2	0,90	PL2
T3	698	SF2	2,52	VS2	3,3	VF1	0,82	PL2
T4	803	--	2,05	--	60,5	--	0,85	--
T5	698	SF2	3,03	VS2	18,4	VF2	0,85	PL2
T6	660	SF2	2,03	VS2	29,0	VF2	0,85	PL2

REF.: Referência

A partir da análise dos resultados dispostos na Tabela 6, observa-se que, com exceção do concreto T4 que, conforme apresentado na Figura 1 (a), segregou, os demais atenderam aos critérios estabelecidos na norma NBR 15823(1) [45]. Relativamente ao ensaio de espalhamento, nota-se que os concretos produzidos neste estudo pertencem às categorias SF2 e SF3, sendo que T1 e T2 enquadram-se na SF3 e T3, T5 e T6 na SF2. No tocante ao critério T₅₀₀, parâmetro de avaliação da viscosidade, constata-se que o concreto T2 pertence à classe VS1, com tempo de escoamento inferior a 2 segundos, e os demais traços (T1, T3, T5 e T6) pertencem à classe VS2 (T₅₀₀ superior a 2 s). No que se refere à habilidade passante, determinada pelo ensaio da caixa L, nota-se que todos os traços de concreto atendem ao intervalo definido inicialmente para o parâmetro HP, qual seja $0,85 \pm 0,05$. Dessa forma, todos os concretos produzidos pertencem à classe PL2. Relativamente ao ensaio do funil V, o qual avaliou a viscosidade de concretos sob fluxo confinado, observou-se que, de acordo com a NBR 15823(1) [45], o traço T3 pertence à classe VF1 e os demais traços enquadram-se na classe VF2, com tempo de escoamento superior a 9 segundos. Constata-se, ainda, que o traço T4 possui tempo de escoamento consideravelmente superior aos demais, evidenciando o que pôde ser observado no ensaio de espalhamento e apresentado na Figura 1(a) o fenômeno de segregação e exsudação do concreto. Os demais concretos apresentaram aspecto similar ao concreto T5, apresentado na Figura 1(b).

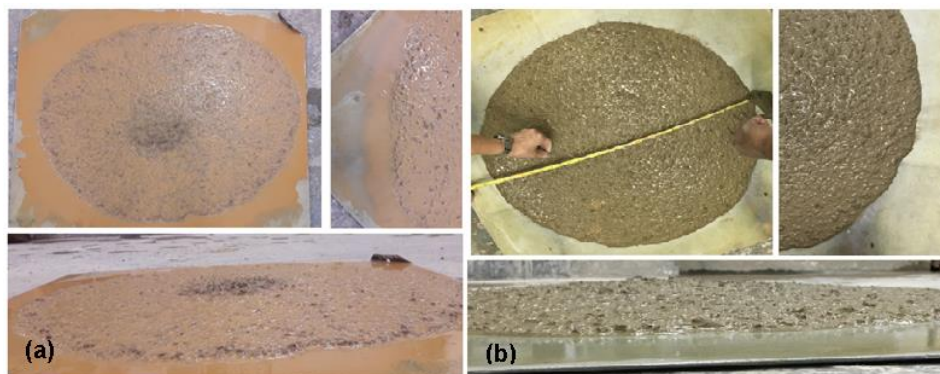


Figura 1: Ensaio de espalhamento: traços de concreto T5 (b) e T4 (a).". Tendo em vista que o processo de edição já foi concluído, é possível fazer essa correção?

Ainda, tendo em vista a fixação do parâmetro HP como referência para a determinação do teor de plastificante, observa-se que a redução do teor desse aditivo e o aumento do teor de AMV resultaram em um concreto que não segregou (traço T5) e que possuiu tempo de escoamento inferior ao concreto T4. Dessa

forma, é possível constatar as funções dos aditivos na mistura: o plastificante atuou na fluidez e o modificador de viscosidade na estabilidade da mistura, ou seja, no mantimento das características de coesão e viscosidade, evitando a segregação do concreto [20, 57]. A mesma avaliação a respeito do tempo de escoamento pode ser realizada para os traços T2 e T3. Novamente, houve a redução do tempo de escoamento sob fluxo confinado ao aumentar o teor de aditivo modificador de viscosidade e reduzir o teor de aditivo superplastificante. No ensaio de espalhamento, nota-se também que, para os traços T2, T3, T4 e T5, a redução do teor de aditivo superplastificante e recrudescimento do teor de AMV resultaram em traços de concretos com espalhamentos menores (traços T3 e T5), o que também foi constatado na pesquisa de Leemann *et al.* [22]

3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

3.2.1 Resistência à compressão

Na Figura 2, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão, realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias, para cada composição de concreto.

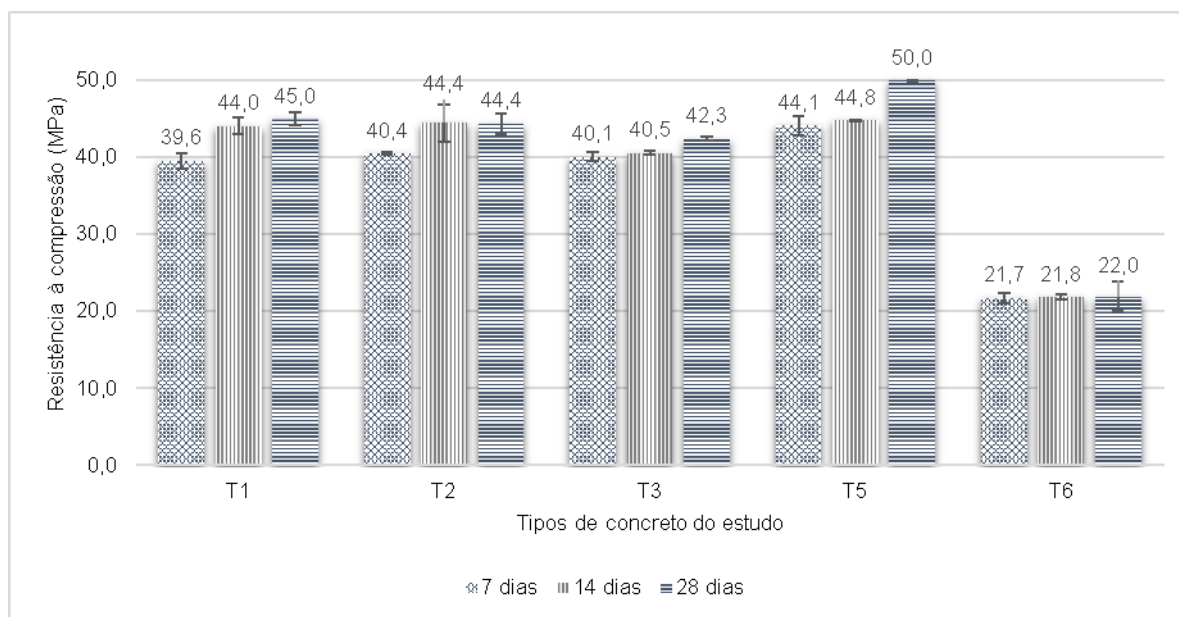


Figura 2: Resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade.

Por intermédio dos resultados dispostos na Figura 2, observa-se que, com relação à composição de referência T1, houve uma redução da resistência à compressão aos 28 dias de 1,33%, 5,82% e de 51,18%, respectivamente, para os concretos T2, T3 e T6. Somente o concreto T5 apresentou aumento de resistência à compressão de 11,09% em relação à referência T1. Nas demais idades (7 e 14 dias), os concretos T2 e T3 apresentaram tendências tanto de aumento quanto de redução, considerando a referência T1. Em contrapartida, os concretos T5 e T6 mantiveram o comportamento de aumento e redução, respectivamente, da resistência à compressão relativamente à referência T1.

Procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e ao teste Tukey com intuito de avaliar de significância das diferenças entres os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade. Essas análises estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7: ANOVA e Teste de Tukey para a resistência à compressão aos 28 dias de idade.

ANOVA (VALOR p)	TESTE DE TUKEY (ANÁLISE DE VARIÂNCIA EM RELAÇÃO AO CONCRETO DE REFERÊNCIA T1)			
	VALOR p (T2)	VALOR p (T3)	VALOR p (T5)	VALOR p (T6)
$2,18 \cdot 10^{-8}$	0,992246	0,395294	0,033960	0,000176

Da análise do resultado do teste de Tukey, infere-se que, dentre os concretos do estudo, apenas os concretos T5 e T6 podem ser avaliados como sendo estatisticamente diferentes do concreto referência T1. As

demais composições de concreto do estudo não possuem variação da resistência à compressão significativa em relação ao concreto referência T1, com um nível de confiança de 95%.

Relativamente ao aditivo AMV e ao superplastificante SP1, usados nos concretos T2 e T3, pode-se notar que a utilização desses aditivos em diferentes dosagens não gerou uma diferença significativa no tocante a resistência à compressão. Ademais, com a utilização de um diferente aditivo superplastificante (SP2) em conjunto com o AMV, foi possível observar que a dosagem de 0,5% desse aditivo (em relação ao peso de cimento) não foi suficiente para estabilizar a mistura, resultando em um concreto o qual sofreu processo de segregação (concreto T4, Figura 1 a). Em contrapartida, nota-se que a dosagem de 1,5% de AMV gerou um concreto T5 com desempenho relativamente à resistência compressão superior ao do concreto de referência T1 aos 28 dias de idade.

Estudos sobre a influência do aditivo modificador de viscosidade apontam que este pode comprometer o desenvolvimento da resistência à compressão com o tempo, resultando em uma pequena redução deste parâmetro [3, 58]. Esse fenômeno pôde ser observado no recrudescimento de resistência à compressão nos concretos T2, T3 e T6, sendo esta diminuição não significativa para os dois primeiros, o que comprova os resultados de outras pesquisas [17, 21, 22]. Já o concreto T6, o qual foi dosado com o aditivo SP-AMV, apesar de ter atendido aos requisitos normativos de um CAA obteve resultado de resistência à compressão significativamente inferior à referência do estudo, o que ressalta a necessidade de atenção na utilização de produtos em caráter experimental. Esse resultado pode estar associado ao fato de aditivos químicos à base de policarboxilatos apresentarem tendência a incorporar ar à mistura de concreto, podendo comprometer o desenvolvimento da resistência à compressão [14].

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 3, estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizado aos 28 dias, para cada composição de concreto.

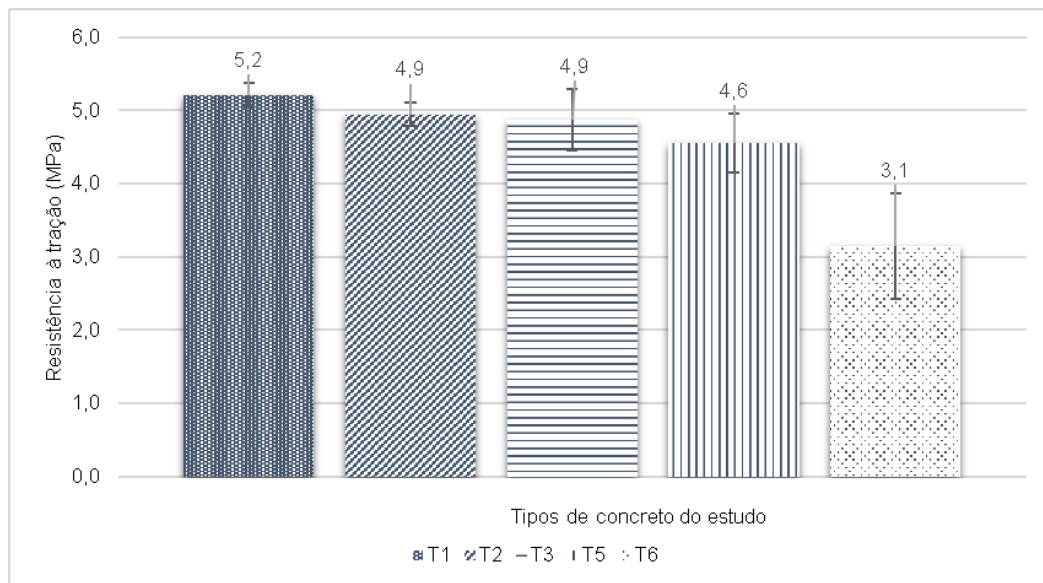


Figura 3: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

Nota-se que, relativamente ao concreto referência T1, todas as demais composições obtiveram resultados de resistência à tração com redução de 4,99% para o concreto T2, 6,33% para o concreto T3, 12,67% para o concreto T5 e 39,73% para o concreto T6.

A análise de variância entre os resultados de resistência à tração por compressão diametral resultou em valor p de $1,71 \times 10^{-4}$, indicando diferença significativa entre os resultados. No tocante à avaliação da variação da propriedade mecânica em relação à referência T1, determinada pelo teste de Tukey, somente a discrepância do resultado concreto T6 foi significativa com valor de p de $3,02 \times 10^{-4}$. Os demais concretos T2, T3 e T5 apresentaram valores p de 0,87, 0,75 e 0,19, respectivamente. Com isso, apenas o concreto T6 é estatisticamente diferente da referência T1 em relação à resistência à tração.

De acordo com Mehta e Monteiro [59], o aumento de resistência a compressão resulta em um aumen-

to de resistência à tração, porém com velocidade decrescente. Ainda, a relação entre resistência à tração e à compressão está em um intervalo de 7 a 11%. Este fato é também observado nos estudos de Campos *et al.*[60]. A relação entre as resistências à tração e à compressão dos concretos deste estudo variou de 6,98% a 10,98%.

3.2.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Estão dispostos, na Tabela 8, os resultados de massa específica, índices de vazios e de absorção de água, obtidos por intermédio do ensaio de absorção de água por imersão, realizado aos 28 dias, conforme a norma ABNT NBR 9778 [40].

Tabela 8: Dados do ensaio de absorção de água por imersão

COMPOSIÇÃO	ABSORÇÃO (%)	ÍNDICE DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm ³)
T1	5,03	11,75	2,65
T2	5,31	12,26	2,63
T3	5,87	13,33	2,62
T5	4,46	10,42	2,61
T6	6,83	14,08	2,40

Mediante análise desses dados, é possível notar que o concreto de menor resistência à compressão (T6) possui a menor massa específica, 9,43% inferior ao concreto referência T1, maiores índices de vazios e de absorção de água, sendo estes parâmetros, respectivamente, 19,83% e 35,79% superiores aos índices da composição de referência. Ainda, o concreto de maior resistência à compressão (T5), apresentou resultados de massa específica, índices de absorção e de vazios inferiores em 1,51%, 11,33% e 11,32%, respectivamente, aos dados do concreto de referência T1. Novamente, pode ser observada a relação entre os índices de absorção de água e de vazios e a resistência à compressão.

Determinados estudos sobre a influência de aditivos químicos nas propriedades de concretos autoadensáveis sugerem que a utilização de aditivos modificadores de viscosidade pode gerar uma incorporação de ar no concreto, resultando em maior porosidade, devido à capacidade do aditivo de reduzir a tensão superficial da água da mistura [24]. Outros estudos indicam que há uma tendência de redução do conteúdo de ar do concreto com a utilização do aditivo modificador de viscosidade, uma vez que este melhora a coesão da mistura [23, 24]. A incorporação de ar pode ser observada nos dados do ensaio de absorção de água por imersão dos concretos T2 e T3, os quais obtiveram maiores índices de absorção de água e de vazios em comparação com um concreto autoadensável que não utilizou o aditivo AMV (T1). Já a redução do conteúdo de ar dos concretos pode ser constatada ao comparar-se os resultados dos concretos T1 e T5, porém essa diferença pode estar relacionada ao fato de concreto T5 possuir em sua composição um aditivo superplastificante diferente do concreto de referência (T1). A pesquisa sobre os efeitos dos aditivos químicos na porosidade de concretos autoadensáveis indicou que os resultados de índices de vazios variam de acordo com os tipos de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade utilizados [61].

Relativamente ao concreto T6, cuja composição possui o aditivo experimental à base de policarboxilatos, que atua tanto como superplastificante quanto modificador de viscosidade, o resultado do ensaio de absorção de água reforça as pesquisas que indicam que os aditivos à base de policarboxilatos incorporam ar no concreto [14, 15].

3.3 Análise termogravimétrica das pastas de cimento

A análise termogravimétrica foi realizada para pastas de cimento Portland aos 28 dias de idade. Os teores de aditivos químicos superplastificantes e modificadores de viscosidade foram os mesmos apresentados na Tabela 4. Foram analisadas 5 pastas com massa de cerca de 10mg. A taxa de aquecimento usada foi de 10°C/min no intervalo de 30 a 1200°C. Com os dados obtidos no ensaio, foram obtidas as curvas da análise térmica (TG) e análise térmica diferencial (DTG), apresentadas nas Figuras 4 e 5.

Segundo Hoppe Filho *et al.* [43], o teor de água quimicamente combinada (AQC) é determinado pela perda de massa ocorrida no intervalo de temperatura de 35 e 385 °C e está relacionado à formação de C-S-H e das fases aluminato hidratadas. Ainda, a quantificação de hidróxido de cálcio é obtida mediante a multiplicação da perda de água na faixa de temperatura de 385 a 485°C pela relação entre a massa molecular do hidróxido de cálcio e da água (4,11). Da mesma forma, o carbonato de cálcio é obtido por intermédio da multi-

plicação da perda de massa referente ao intervalo de 485 a 1000°C pela relação de massa molecular de carbonato de cálcio e dióxido de carbono (2,27). Os intervalos de temperatura correspondem aos processos de desidratação (LDH), de 35 a 385°C, de desidroxilação (LDX), de 385 a 485°C, e de descarbonatação (LDC), de 485°C a 1000°C. Ressalta-se que, para realizar a comparação entre os resultados da análise termogravimétrica, foi necessário corrigir as perdas de massa para uma mesma base de não voláteis [53]. Com isso, a massa residual foi normalizada para 100%.

3.3.1 Avaliação da influência do aditivo AMV no processo de hidratação do cimento

Na Figura 4, são apresentadas as curvas de análises térmica (TG) e térmica diferencial (DTG) para as pastas correspondentes aos concretos T1, T2 e T3. Ressalta-se que a referência do estudo e os concretos T2 e T3 possuem em suas composições o mesmo aditivo superplastificante SP1, sendo que ao T2 foi acrescido 0,5% de AMV sobre o peso de cimento e ao T3 1,5%. Dessa forma, a análise termogravimétrica dessas pastas permite avaliar a influência do aditivo modificador de viscosidade no processo de hidratação do cimento.

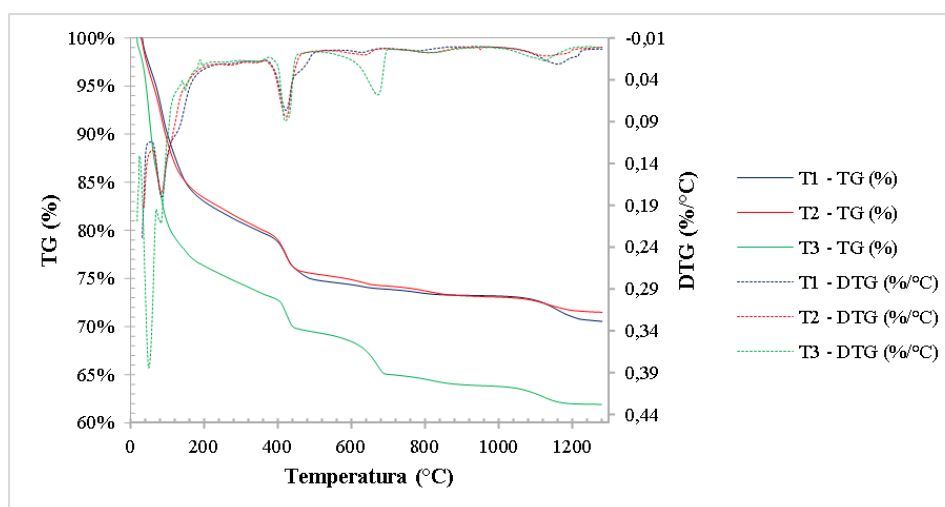


Figura 4: Curvas de TG e DTG para as pastas de cimento T1, T2 e T3.

Constata-se, mediante a observação das curvas de TG e DTG das pastas T1 e T2, que essas tiveram comportamentos similares durante o ensaio termogravimétrico e apresentaram perdas de massa de 29,5% e 28,5%, respectivamente. Em contrapartida, nota-se que a pasta de cimento T3, a qual teve perda de massa de 38,1%, apresentou comportamento diferente das demais, com processo de desidratação, relacionado à perda de água quimicamente combinada do C-S-H, com início anterior aos demais e término posterior. Com relação ao pico de desidratação após os 800 graus, nota-se que este foi de maior intensidade para a pasta T1, sendo que para T2 e T3 o comportamento das curvas foi similar. Ainda, relativamente ao processo de desidroxilação, ou seja, perda de água referente ao CH, o início e término se deu em temperaturas mais elevadas. Ademais, no processo de descarbonatação, o qual está relacionado a presença de carbonato de cálcio, no intervalo de 500 a 800°C, é possível observar uma depressão de maior intensidade. Na Tabela 9, são apresentados os resultados das análises térmicas das pastas de cimento T1, T2 e T3.

Tabela 9: Análise termogravimétrica comparativa das pastas de cimento T1, T2 e T3.

PASTA	LDH: AQC – C-S-H (%)	HIDROXIDO DE CALCIO (%)		CARBONATO DE CALCIO (%)		MASSA RESIDUAL (%)	FATOR DE NORMALIZAÇÃO
		H ₂ O	LDX: Ca (OH) ₂	CO ₂	LDC: Ca-CO ₃		
T1=SP1	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	20,18%	4,97 %	20,43%	1,64 %	3,72%	70,54%	1,418
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	28,62%	7,05 %	28,97%	2,33 %	5,28%	100,00%	
T2=SP1+0,5AMV	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	16,46%	4,07 %	16,73%	2,60 %	5,90%	71,49%	1,399
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	23,03%	5,69 %	23,40%	3,64 %	8,26%	100,00%	
T3=SP1+1,5AMV	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	27,27%	3,37 %	13,85%	5,85 %	13,28%	61,91%	1,615
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	44,04%	5,44 %	22,37%	9,45 %	21,45%	100,00%	

Relativamente aos teores de C-S-H, nota-se que a pasta T2 apresentou o menor teor, sendo 19,5% e 15,5% inferior aos teores das pastas T1 e T3, respectivamente. Com o aumento da dosagem de AMV, foi observado maior teor de C-S-H, o que indica que o aditivo contribuiu para a formação do composto. Por outro lado, a comparação referente aos teores de CH indica que o incremento de AMV resultou em menores teores de hidróxido de cálcio. Apesar dessas diferenças relativas aos teores dos produtos de hidratação, os resultados dos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas indicaram que não houve diferenças significativas entre os concretos T1, T2 e T3.

Constata-se que as pastas de cimento T2 e T3 apresentaram teores de carbonato de cálcio superiores à referência, sendo que o resultado da pasta T3 foi 2,5 vezes superior ao resultado da pasta T1. Tendo em vista que não foram utilizadas adições minerais além daquelas inerentes ao processo de produção do cimento CP V, essa diferença de teor de carbonato de cálcio pode indicar que o uso de AMV retardou o processo de hidratação. Estudos indicam que a utilização de aditivos modificadores de viscosidade pode prejudicar o desenvolvimento da resistência à compressão com tempo, o que evidencia o possível retardamento do processo de hidratação causado por esse aditivo químico [3, 25].

3.3.2 Influência dos aditivos superplastificantes SP1, SP2 e SP-AMV na hidratação do cimento

Na Figura 5, estão dispostas as curvas de análises térmica (TG) e térmica diferencial (DTG) para as pastas correspondentes aos concretos T3, T5 e T6, sendo que foram utilizados, na pasta de cimento T3, o aditivo superplastificante SP1 e o aditivo modificador de viscosidade AMV, na pasta T5, o aditivo superplastificante SP2 e o AMV, e, na pasta T6, o aditivo experimental SP-AMV com função de superplastificante e de modificador de viscosidade.

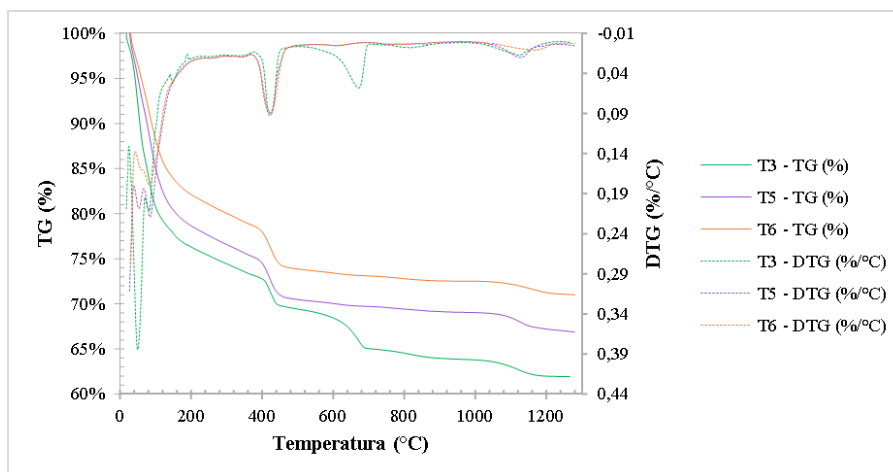


Figura 5: Curvas de TG e DTG para as pastas de cimento T3, T5 e T6.

Por intermédio da análise das curvas de TG e DTG das pastas de cimento T3, T5 e T6, é possível notar que o início do processo de desidratação ocorreu em temperaturas mais baixas para T3 e em temperaturas similares para T5 e T6. Com relação ao pico de desidratação, que ocorre após os 800 graus, observa-se comportamento similar para as pastas T3 e T5. Relativamente ao processo de desidroxilação, constata-se que o aspecto das curvas indica tendência semelhantes para as três pastas. No processo de decarbonatação, somente a pasta T3 apresentou uma depressão de maior intensidade. As perdas de massa total das pastas T3, T5 e T6 foram de 38,1%, 33,1% e 29,0%, respectivamente. Na Tabela 10, está disposta a análise comparativa dos resultados do ensaio termogravimétrica das pastas de cimento T3, T5 e T6.

Tabela 10: Análise termogravimétrica comparativa das pastas de cimento T3, T5 e T6.

PASTA	LDH: AQC – C-S-H (%)	HIDROXIDO DE CALCIO (%)		CARBONATO DE CALCIO (%)		MASSA RESIDUAL (%)	FATOR DE NORMALIZAÇÃO
		H ₂ O	LDX - Ca (OH) ₂	CO ₂	LDC-CaCO ₃		
T3=SP1+1,5AMV	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	27,27%	3,37%	13,85%	5,85%	13,28%	61,91%	1,615
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	44,04%	5,44%	22,37%	9,45%	21,45%	100,00%	
T5=SP2+1,5AMV	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	23,61%	4,66%	19,15%	1,76%	4,00%	66,87%	1,495
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	35,30%	6,97%	28,63%	2,63%	5,97%	100,00%	
T6=SP-AMV	Perdas de massa do ensaio termogravimétrico (TG/DTG)						
	20,84%	4,75%	19,52%	1,64%	3,72%	71,00%	1,408
	Perdas de massa corrigidas para a mesma base de não voláteis						
	29,34%	6,69%	27,49%	2,31%	5,24%	100,00%	

Com relação aos teores de C-S-H, observa-se que a pasta T3 apresentou o maior teor, sendo 19,8% e 33,4% superior aos teores das pastas T5 e T6, respectivamente. A comparação dos processos de desidroxilação das pastas também indicou que a pasta T3 apresentou menor teor de CH. A mesma tendência do processo de desidratação pôde ser observada em relação ao processo de decarbonatação, no qual o teor de carbonato de cálcio da pasta T3 foi consideravelmente superior ao das demais pastas. Embora a pasta de cimento T3 tenha maior quantidade de CSH, ao comparar com o resultado da pasta T5, cujo concreto obteve melhor desempenho nas propriedades mecânicas, é importante ressaltar que o concreto T3 possui maior índice de vazios.. Por isso, a resistência foi mais baixa do que a resistência do concreto T5 aos 28 dias. Esse fato alerta para a necessidade do estudo da compatibilização dos aditivos químicos utilizados em concretos autoadensáveis,

de modo a se obter o comportamento desejado para o material. O resultado da pasta T6, a qual foi dosada com aditivo experimental SP-AMV, indica que o processo de hidratação produziu teores de produtos de hidratação semelhantes à pasta do concreto de referência T1, porém seu desempenho nas propriedades mecânicas foi significativamente inferior.

4. CONCLUSÃO

Este estudo visou a avaliar a influência de aditivo modificador de viscosidade nas propriedades reológicas e mecânicas de concretos autoadensáveis. Levando em consideração os resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- O incremento dos teores de Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV) resultou em uma redução do espalhamento dos concretos autoadensáveis, assim como uma redução do tempo de escoamento sob fluxo confinado.

- O uso do aditivo AMV associado ao superplastificante SP1 não alterou significativamente a resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos, embora constatou-se, pela análise termogravimétrica, que o teor de AMV interferiu na formação dos produtos de hidratação desses concretos. O AMV juntamente com o aditivo superplastificante (SP2) resultou em uma melhora significativa da resistência à compressão do concreto. Enquanto que o aditivo experimental (SP-AMV) reduziu significativamente as propriedades mecânicas do concreto. Sendo assim, ressalta-se que o tipo e o teor de aditivo modificador de viscosidade e aditivo superplastificante alteram as propriedades mecânicas do concreto.

- O processo de incorporação de ar devido à utilização do aditivo AMV foi constatado quando este aditivo foi associado a um dos superplastificantes do estudo (SP1), já sua associação a outro aditivo superplastificante (SP2) resultou em uma redução do índice de vazios do concreto, o que evidencia que esses processos estão relacionados aos tipos e teores de aditivos químicos utilizados na mistura. O aditivo experimental também apresentou a característica de incorporar ar à mistura, porém, diferentemente do aditivo AMV, esse aumento também interferiu nas propriedades mecânicas.

- A análise termogravimétrica indicou que o tipo de aditivo modificador de viscosidade interferiu na formação dos produtos de hidratação do cimento. Esse tipo de aditivo, mesmo melhorando a qualidade dos produtos de hidratação, caso incorpore muito ar à mistura, pode prejudicar o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto autoadensável. A utilização de aditivos modificadores de viscosidade requer que seja feita uma avaliação da interferência desses no processo de hidratação do cimento e no índice de vazios do concreto.

- A associação dos aditivos químicos superplastificantes e modificadores de viscosidade produziu resultados que indicam a necessidade do estudo da compatibilização dos aditivos químicos e seus teores quando utilizados em concretos autoadensáveis, de modo a se obter o comportamento desejado para o material.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília (UnB), ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAP-DF (Processo: 0193.001700/2017) e às empresas BASF Brasil e Grace Construction Products – GCPAT, pelo apoio ao estudo realizado.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] GOMES, P.C.C., BARROS, A.R. *Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável*. 1ª edição, pág. 165, editora PINI, 2009.

[2] MARANGON, E. *Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de aço*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

[3] TUTIKIAN, B.F., DAL MOLIN, D.C. *Concreto autoadensável*. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2008.

[4] AÏTCIN, P.C.; JOLICOEUR, C., MACGREGOR, J.G. "Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't", *Concrete International*, v. 16, n. 5, pp. 45-52, 1994.

[5] YOUSUF, M., MOLLAH, A.P., PALTA, P., *et al.* "Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer in the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences", *Cement and Concrete Research*. V, 25, n. 3, pp. 671-682, 1995.

[6] HOVER, K.C. "Concrete mixture proportioning with water-reducing admixtures to enhance durability: a quantitative model". *Cement and Concrete Composites*. V. 20, v. 2-3, pp. 113-119, 1998.

- [7] PLANK, J., PÖLLMANN, K., ZOUAOUI, N., *et al.* “Synthesis and Performance of Methacrylic Ester Based Polycarboxylate Superplasticizers Possessing Hydroxyl Terminated Poly (Ethylene Glycol) Side Chains”. *Cement and Concrete Research*, v. 38, pp. 1210-1216, 2008.
- [8] PLANK, J., SACHSENHAUSER, B. “Experimental Determination of the Effective Anionic Charge Density of Polycarboxylate Superplasticizers in Cement Pore Solution”. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 1-5, 2009.
- [9] WINNEFELD, F., BECKER, S., PUKUSCH, J., *et al.* “Effects of the Molecular Architecture of Comb-Shaped Superplasticizers on Their Performance in Cementitious Systems”. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, p. 251-262, 2007a.
- [10] FLATT, R.J., SCHOBBER, I., RAPHAEL, E., *et al.* “Conformation of Adsorbed Comb Copolymer Dispersants”. *Langmuir*, v. 25, pp. 845-855, 2009
- [11] UCHIKAWA, H., HANEHARA, S., SAWAKI, D. “The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared with Organic Admixture”. *Cement and Concrete Research*, v. 27, p. 37-50, 1997.
- [12] WINNEFELD, F., ZINGG, A., HOLZER, L., *et al.* “Interaction of Polycarboxylate-Based Superplasticizer and Cements: influence of polymer structure and C₃A content of cement”. In: *International Congress on the Chemistry of Cement*, 12., Montreal. Proceedings... Montreal, 2007b.
- [13] WINNEFELD, F., ZINGG, A., HOLZER, L., *et al.* “Interaction of Polycarboxylate-Based Superplasticizers with Cements Containing Different C₃A Amounts”. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, pp. 153-162.
- [14] HANEHARA S., YAMADA, K. “Rheology and early age properties of cement systems”. *Cement and Concrete Research*, v. 21, pp. 175-195, 2008.
- [15] SZWABOWSKI, J., ŁAZŃIEWSKA-PIEKARCZYK, B. “The increase of air-content in mix under influence of carboxylate superplasticizers acting”. *Cem Wapno Beton*, v. 4, pp. 205-214, 2008.
- [16] KHAYAT, K. “Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview”. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, n. 2-3, pp. 171-188, 1998.
- [17] MAILVAGANAM, N., Miscellaneous admixtures. Chapter 1.5, pp. 994-995. *Concrete Admixtures Handbook*, 2nd edition, ed. V. S. Ramachandran. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1995.
- [18] AITCIN, P.C. “Concreto de Alto Desempenho”. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.
- [19] YURUGI, M., SAKAI, G., SAKATA, N. “Viscosity agent and mineral admixtures for highly fluidized concrete”. In: *Proceedings Concrete under Severe Conditions, Environment and Loadings*, v. 2, pp. 995-1004, 1995.
- [20] EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use”. Londres: EFNARC, mai. 2005. 63p.
- [21] KHAYAT, K. “Effects of anti-washout admixtures on properties of hardened concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 93, n. 2, pp.134-146, 1996.
- [22] LEEMANN, A., WINNEFELD, F. “The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete”. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 5, pp. 341-349, 2007.
- [23] LACHEMI M., HOSSAIN K.M.A., LAMBROS. V., *et al.* “Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures”. *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 917-926, 2004.
- [24] KHAYAT, K H. “Optimization and performance of the air-entrained self-consolidating concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 97, pp. 526, 2000.
- [25] SHADKAM, H.R., DADSETAN S., TADAYON, M., *et al.* “An investigation of the effects of limestone powder and Viscosity Modifying Agent in durability related parameters of self-consolidating concrete (SCC)”. *Construction and Building Materials*, Dez. 2017.
- [26] MELO, K.A. *Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filer calcário*. Dissertação de M. Sc., PPGEC/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, SC, Brasil, 2005.
- [27] SAKATA, N., MARUYAMA, K., MINAMI, M. “Basic Properties and Effects of Welan Gun on Self-Consolidating Concrete”. In: *International Rilem Conference on Production Methods and Workability of Concrete*. P. J. M. Bartos, D. L. Marrs and D. J. Cleand (editores), E & fn Spon, p.p 237-253, 1996.

- [28] DOMONE, P.L., CHAI, H.W. “Design Testing of Self-Compacting Concrete”. In: *International Rilem Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, P.J.M. Bartos, D.L. Marrs e D.J. Ceand (editores), E & FN Spon, pp. 223-252, 1996.
- [29] KHAYAT, K.H., GUIZANI, Z. “Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 94, n.4, pp. 332-340, 1997.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregados – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-3: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 2019.
- [38] ALONSO, M., PALACIOS, M., PUERTAS, F., *et al.* “Influência de la Estructura de Aditivos Basados en Policarboxilato Sobre el Comportamiento Reológico de Pastas de Cemento”. *Materiales de Construcción*, v. 57, n. 286, pp. 65-81, abr./jun. 2007.
- [39] GRIESSER, A. *Cement: superplasticizer interactions at ambient temperatures*. Tese de D. Sc., Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Suíça, 2002. 147 f.
- [40] HUI, W., HUILING, G., JIAHENG, L., *et al.* “Research on Synthesis and Action Mechanism of Polycarboxylate Superplasticizer”. *Frontiers of Chemistry in China*, v. 2, pp. 322-325, 2007.
- [41] MALVERN. Zetasizer Nano Series User Manual. User Manuals, England, 2004,
- [42] MALVERN Panalytical. Zetasizer Nano Series Catalog. Catalogs, England, 2012.
- [43] LIANG, L , WANG, L., NGUYEN, AV., *et al.* “Heterocoagulation of alumina and quartz studied by zeta potential distribution and particle size distribution measurements”. *Powder Technology*, v. 309, pp. 1-12, 2017.
- [44] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, 2007.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto Autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.
- [46] 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.
- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-4: Concreto Autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.
- [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-5: Concreto Autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade –Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [50] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- [51] 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.

- [52] HOPPE FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E., *et al.* “Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chappelle modificado”. *Revista Matéria*, v. 22, n.3, 2017.
- [53] MONTEAGUDO, S.M., MORAGUES, A., GÁLVEZ, J C., *et al.* “The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases”. *Thermochimica Acta*, v. 592, pp.37-51, 2014.
- [54] TAYLOR, H.F.W., *Cement chemistry*. London, Thomas Telford Publishing, 1997.
- [55] MITSUDA, T., TAYLOR, H.F.W. “Normal and anomalous tobermorite”. *Mineralogical Magazine* v. 42, pp. 229–235. 1978.
- [56] MYERS, R.J.E., L’HOPITAL, J.L., PROVIS, B.L. “Effect of temperature and aluminium on calcium (alumino)silicate hydrate chemistry under equilibrium conditions”. *Cement and Concrete Research*, v. 68, pp. 83–93. 2015.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1 – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- [58] PANESAR, D.K.; SHINDMAN, B. “The effect of segregation on transport and durability properties of self-consolidating concrete”. *Cement And Concrete Research*, [s.l.], v. 42, n. 2, p.252-264, fev. 2012. Elsevier BV.
- [59] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, São Paulo, IBRACON, 2014.
- [60] CAMPOS, R.S., BARBOSA, M.P., PIMENTEL, L.L., *et al.* “Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável”. *Revista Matéria* (Rio J.) [online]. 2018, v.23, n.1, e-11964. Epub Mar 05, 2018.
- [61] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, B. “Effect of viscosity type modifying admixture on porosity, compressive strength and water penetration of high performance self-compacting concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 1035-1044, 2013.

ORCID

Wilson Flexeiras de Oliveira Evaristo <https://orcid.org/0000-0002-3087-0037>
Valdirene Maria Silva Capuzzo <https://orcid.org/0000-0001-6923-7565>
Victor Ludovico de Almeida <https://orcid.org/0000-0002-3442-0682>