

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

BRUNO JOSÉ DA SILVA

**EFEITO DO TIPO DE CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES
DOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS
AUTOADENSÁVEIS**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

BRUNO JOSÉ DA SILVA

**EFEITO DO TIPO DE CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES
DOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS
AUTOADENSÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador:
Profa. Andrea Murillo Betioli, Dra

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Silva, Bruno José
**EFEITO DO TIPO DE CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES
DOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS**
/ Bruno José Silva; orientação de Andrea Murillo
Betioli. - Florianópolis, SC, 2023.
45 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.
Inclui Referências.**

1. Argamassa autoadensável. 2. Cimento portland.
3. Tipo de cimento. 4. Estado fresco. 5. Estado endurecido.
I. Betioli, Andrea Murillo. II. Instituto Federal
de Santa Catarina. III. **EFEITO DO TIPO DE CIMENTO
PORTLAND NAS PROPRIEDADES DOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO
DE ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS.**

**EFEITO DO TIPO DE CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DOS
ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS**

BRUNO JOSÉ DA SILVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de junho, 2023.

Banca Examinadora:

Andrea Murillo Betioli, Doutora

Alexandre Lima de Oliveira, Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina

Juliana Machado Casali, Doutora
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me incentivaram a me dedicar aos estudos, nosso maior patrimônio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Joel e Rosiméri, por tudo. Por terem me dado não só amparo financeiro e psicológico para me dedicar aos estudos, mas por sempre me incentivar a me aprimorar a cada dia. Vocês são o maior exemplo que posso seguir, se eu me tornar 1% do que vocês são, serei realizado.

À Hanah, minha esposa e companheira, por ter aceitado viver a vida ao meu lado e me apoiar incondicionalmente, apesar de todas as loucuras; por ter me incentivado e acreditado em mim; por ser a pessoa mais incrível que alguém possa conhecer; por me fazer feliz todos os dias.

Aos meus padrinhos Marcelo e Elaine, por todo apoio que sempre me deram, me tratando como filho de vocês, por todos os bons momentos e todos os aprendizados.

Aos meus sogros, Fabrício e Mirela, por me acolherem e me apoiarem incondicionalmente, sempre me incentivando a buscar o meu melhor.

Ao meu irmão e minha cunhada, Gustavo e Luísa, por serem os melhores amigos que alguém pode ter, serem as pessoas mais leais que alguém pode ter ao lado.

Aos meus queridos amigos Andrey e Roberto, por sempre estarem presente, vocês são irmãos para mim.

Aos meus amigos e companheiros de curso, especialmente ao Geraldo e Guilherme, por sempre me incentivarem a ser o melhor profissional, por dividirem os momentos de brincadeira e de trabalho intenso.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, bem como aos professores e técnicos que compõem o Departamento Acadêmico de Construção Civil, por todo o conhecimento a mim transmitido, por toda excelência no ensino, por se dedicarem à formação de novos profissionais. Agradeço especialmente aos professores e ao técnico que atuam no Laboratório de Materiais da Construção Civil.

Agradeço em especial à minha orientadora, Andrea Murillo Betioli. Foram 4 anos de trabalho conjunto, sendo que, durante esse período, você sempre confiou na minha capacidade e no meu trabalho, agradeço a todo o conhecimento a mim transmitido, a confiança em mim depositada e, principalmente, por ser a professora incrível que és.

Sem moradia o homem não pode viver com dignidade visto que a moradia é a base para a fruição de outros direitos concernentes às atividades básicas imprescindíveis para se viver (IRENO JUNIOR *apud* CARVALHO e CARDOSO, 2021)

RESUMO

A argamassa autoadensável é um material relativamente novo no Brasil que, por não precisar de adensamento durante a aplicação, garante ganhos de produtividade. Diversos autores desenvolveram composições para este material e, no geral, obtiveram um alto consumo de cimento, além da tendência do uso do CP V-ARI, que garante rápida resistência em baixas idades, além de reduzir riscos de exsudação. O tipo de cimento utilizado, bem como seu consumo por m³, influem diretamente nas propriedades das argamassas autoadensáveis, onde cimentos mais finos tendem a dar mais estabilidade a argamassa, reduzindo a exsudação e segregação. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de três tipos diferentes de cimento (CP II-Z 40, CP II-F 32 e CP V ARI) nos estados fresco e endurecido de argamassas autoadensáveis, a partir da elaboração de curvas de dosagem com cada cimento, realizando a comparação, ao final, com argamassas produzidas com resistência à compressão de 20 MPa. A partir das curvas traçadas, foi possível observar maiores resistências aos 28 dias, maior incorporação de agregados e menor consumo de cimento utilizando o CP V ARI, seguido do CP II-Z 40 e do CP II-F 32. Ao realizar as argamassas com resistência à compressão de 20 MPa, foi possível observar menor consumo de cimento e, conseqüentemente, menor índice de ligante utilizando o CP V ARI, seguido do CP II-Z40 e do CP II-F 32. Tais resultados foram influenciados pela classe de resistência dos cimentos, onde o CP II-F 32 possui uma resistência característica mais baixa que os outros cimentos, e pela finura dos cimentos utilizados, onde o CP V ARI foi o cimento mais fino utilizado, seguido do CP II-Z 40 e do CP II-F 32, além da área superficial específica, que impactou diretamente na demanda de água e na capacidade de incorporação de agregado.

Palavras-chave: Argamassa autoadensável. Cimento Portland. Tipo de Cimento. Estado Fresco. Estado Endurecido.

ABSTRACT

Self-compacting mortar is a relatively new material in Brazil which, as it does not require compaction during application, guarantees productivity gains. Several authors developed compositions for this material and, in general, achieved a high cement consumption, in addition to the tendency to use CP V-ARI, which guarantees rapid resistance at low ages, in addition to reducing the risk of exudation. The type of cement used, as well as its consumption per m³, directly influence the properties of self-compacting mortars, where thinner cements tend to give more stability to the mortar, reducing exudation and segregation. The present work aimed to evaluate the impact of three different types of cement (CP II-Z 40, CP II-F 32 and CP V ARI) in the fresh and hardened states of self-compacting mortars, based on the elaboration of curves of dosage with each cement, performing the comparison, at the end, with mortars produced with compressive strength of 20 MPa. From curves, it was possible to observe greater resistance at 28 days, greater incorporation of aggregates and lower cement consumption using CP V ARI, followed by CP II-Z 40 and CP II-F 32. When making mortars with compressive strength of 20 MPa, it was possible to observe lower cement consumption and, consequently, lower binder content using CP V ARI, followed by CP II-Z40 and CP II-F 32. Such results were influenced by the strength class of the cements, where CP II-F 32 has a lower characteristic strength than the other cements, and by the fineness of the cements used, where CP V ARI was the finest cement used, followed by CP II- Z 40 and the CP II-F 32.

Keywords: Self-compacting mortar. Portland Cement. Type of cement. Fresh state. Hardened state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Argamassa ensada em laboratório (a) e aplicada em obra (b)	17
Figura 2 – Granulometria com distribuição acumulada (a) e distribuição discreta (b) dos diferentes tipos de cimento	26
Figura 3 – Granulometria da areia natural de lagoa	27
Figura 4 – Granulometria do filer calcário	28
Figura 5 – Argamassa piloto executada	29
Figura 6 – (a) exemplo de mesa onde é realizado o ensaio, (b) realização do ensaio com a medição do índice de consistência.....	31
Figura 7 – Mini Funil V para argamassas autoadensáveis	32
Figura 8 – (a) Espalhamento e (b) tempo de escoamento no funil V das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c. As retas indicam o intervalo de espalhamento desejado de 28 ± 2 cm	35
Figura 9 – (a) Densidade de massa e (b) teor de ar incorporado das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c ..	35
Figura 10 – (a) Resistência à tração na flexão e (b) à compressão das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c ..	36
Figura 11 – (a) Densidade de massa aparente e (b) modulo de elasticidade dinâmico das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c	37
Figura 12 – Curvas de dosagem das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e relação a/c, onde a estrela, o triângulo e o quadrado representam os pontos com resistência de 25 MPa utilizando os cimentos CP II Z 40, CP II F 32 e CP V ARI, respectivamente.....	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características conforme EFNARC (2001)	24
Quadro 2 – Características em casos específicos conforme EFNARC (2001)	24
Quadro 3 – Traço unitário das argamassas utilizando CP II-Z 40	32
Quadro 4 – Consumo de materiais por m ³ das argamassas autoadensáveis com diferentes tipos de cimento com resistência à compressão de 20 MPa	36
Quadro 5 – Índice de ligante das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento (CP II-Z 40, CP II-F 32 e CP V ARI)	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de composição do cimento Portland.....	19
Tabela 2 – Requisitos físicos e mecânicos.....	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
a/ms	Relação água/materiais secos
ARI	Alta resistência inicial
CP	Cimento Portland
NBR	Norma técnica brasileira
RPP	Resíduo de polimento de porcelanato
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
VMA	<i>Viscosity Modifying Admixture</i> (Aditivo modificador de viscosidade)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo Geral	16
1.3	Objetivos Específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Argamassa Autoadensável	17
2.1.1	Cimento Portland	18
2.1.2	Agregados miúdos	21
2.1.3	Adições minerais.....	21
2.1.4	Aditivos	22
2.2	Propriedades das argamassas autoadensáveis	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	Caracterização dos materiais.....	26
3.2	Dosagem e mistura das argamassas autoadensáveis	28
3.2.1	Dosagem da argamassa autoadensável piloto.....	29
3.2.2	Determinação das curvas de dosagem	30
3.3	Avaliação das características do estado fresco e endurecido das argamassas autoadensáveis.....	30
3.3.1	Consistência	31
3.3.2	Fluidez	31
3.3.3	Resistência à tração na flexão e à compressão	32
3.3.4	Módulo dinâmico.....	32
3.3.5	Validação das curvas de dosagem.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Inovar pode ser definido como o ato de realizar algo novo ou que nunca havia sido feito antes e é por meio da inovação que é possível potencializar resultados econômicos e de produtividade (FURTADO, 1951). A inovação na construção civil ao longo dos anos permitiu a execução de obras de maior complexidade, redução no custo e cronograma, maior segurança no canteiro de obras, além de diversos outros benefícios.

Dos diversos materiais que inovam no mercado da construção civil, é possível destacar a argamassa autoadensável para execução de contrapiso, que permite a redução no esforço para o lançamento e espalhamento do material, reduzindo a etapa de vibração e quantidade de funcionários necessária, além do tempo de execução (OKAMURA e OUCHI, 2003; MARTINS, 2009; YANG, ZHANG e YAN, 2016; OLIVEIRA, CORDEIRO e BESSA, 2022).

Apesar de seus benefícios, a argamassa autoadensável é um material relativamente novo no Brasil, pesquisas sobre o tema tiveram início em 2008 (MARTINS, 2009), não possui norma nacional e, como pode ser observado por Duarte *et al.* (2022), não possui um método de dosagem consagrado, diferente dos concretos autoadensáveis, grande parte das pesquisas utilizam métodos que se baseiam nesses concretos ou em pastas à base de cimento. Silva *et al.* (2022) observaram que, por falta de métodos e de normativas brasileiras, há uma variação no consumo de cimento entre diversos autores de 250 e 1000kg/m³, resultando em diferentes resistências mecânicas, mas observou-se uma tendência no uso do cimento Portland tipo V-ARI, que pode ser explicada, segundo Carvalho (2015), Oliveira *et al.* (2018), Chaves (2019) e Mendes (2019), pela maior área superficial, que resulta em menor exsudação, bem como liberação mais rápida de frente de trabalho.

O alto consumo de cimento Portland, além do uso de CP V-ARI acarreta um alto impacto ambiental, visto que 1 tonelada de cimento Portland emite durante o processo de calcinação do calcário aproximadamente 842kg CO₂/t de clínquer (WBCSD, 2016). O uso de diferentes tipos de cimento Portland pode contribuir com a menor emissão de CO₂, já que o teor de clínquer em cada tipo é diferente, enquanto o CP V-ARI é, segundo NBR 16697 (ABNT, 2018), composto por 90 a 100% de

clínquer e sulfato de cálcio, outros cimentos possuem menores teores, como o CP II F, composto por 75 a 89% de clínquer e sulfato de cálcio.

Alves (2020) observou a viabilidade do uso de todos os tipos de cimento para a produção de argamassas autoadensáveis, porém, por não ter variado o traço utilizado, obteve propriedades bastante distintas, principalmente no estado endurecido, já que a resistência à compressão das argamassas variou entre aproximadamente 26 e 49 MPa. Essa variação pode ser explicada pelas diferentes resistências características dos cimentos Portland. Assim, faz-se necessário analisar o impacto do tipo de cimento Portland em argamassas autoadensáveis padronizando as resistências desejadas e reduzindo a influência das adições minerais utilizadas na argamassa, o que permitirá a comparação de consumo de cimento, custo por m³ e índice de ligante, o qual pode ser definido como o consumo necessário de aglomerante para se obter 1 MPa de resistência.

1.1 Justificativa

A escolha do tipo de cimento Portland utilizado na produção de argamassas autoadensáveis pode resultar em benefícios técnicos, ambientais e econômicos, sendo estas as principais bases que justificam esta pesquisa.

Do ponto de vista técnico, o tipo de cimento Portland utilizado influencia em diversas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos endurecidos, como resistência, retração, permeabilidade, resistência às intempéries e fluência (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Do ponto de vista ambiental, o teor de clínquer presente no cimento influencia diretamente na quantidade de CO₂ emitido no seu processo de fabricação, sendo que cimentos com menor teor de clínquer possuem menor impacto ambiental.

Do ponto de vista econômico, o cimento Portland, no geral, corresponde à maior parcela na composição de custo dos compósitos cimentícios e, como aponta a SINAPI/SC (IBGE, 2022), o preço mediano para diferentes tipos de cimento Portland mais comuns no mercado (CP II, CP III, CP IV e CP V) chega a variar aproximadamente 9%.

A partir dos pontos supracitados, o tipo de cimento Portland possui grande impacto em diversos aspectos, sendo que a definição do cimento Portland mais adequado possui potencial para reduzir o impacto ambiental e viabilizar econômica e tecnicamente o uso de argamassas autoadensáveis.

A utilização de um método que seja capaz de definir o tipo de cimento Portland mais adequado contribui não apenas para a compreensão do impacto do tipo de cimento Portland nas propriedades da argamassa autoadensável, mas também é um primeiro passo para um método de dosagem, onde permite o tecnologista que desenvolve o produto definir qual o cimento Portland mais adequado para a situação.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral é avaliar a influência de diferentes tipos e consumos de cimento Portland no estado fresco e endurecido de argamassas autoadensáveis, visando contribuir com a dosagem dessas argamassas.

1.3 Objetivos Específicos

O objetivo geral foi atingido a partir dos seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito do tipo e teor de cimento Portland na fluidez, coesão e densidade de massa de argamassas autoadensáveis;
- b) Avaliar o efeito do tipo e teor de cimento Portland no módulo dinâmico e resistência mecânica de argamassas autoadensáveis;
- c) Avaliar o efeito do tipo e teor de cimento Portland no consumo por m³ e o índice de ligante em argamassas autoadensáveis a partir das curvas de dosagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Argamassa Autoadensável

Mehta e Monteiro (2014) definem a argamassa como uma mistura de areia, cimento Portland e água, sendo que o proporcionamento dos materiais que a constituem impacta diretamente as suas propriedades no estado fresco e estado endurecido.

Diferentes tipos de argamassas existem a fim de atender às mais diversas finalidades e aplicações, podendo-se destacar as autoadensáveis para execução de contrapiso, onde normalmente são utilizadas argamassas secas ou plásticas. Devido à falta de normalização brasileira de argamassas autoadensáveis, é necessário realizar adaptações das normativas existentes para concretos autoadensáveis, considerando a argamassa como um concreto sem brita. Assim, a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) define como concreto autoadensável aquele capaz de fluir pelo seu peso próprio preencher a fôrma e passar por embutidos, enquanto mantém sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento do material, sendo possível estender esta mesma definição para argamassas autoadensáveis, exemplificada na Figura 1, onde é possível observar a alta fluidez da argamassa sendo ensaiada em laboratório (Figura 1 a) e aplicada em obra (Figura 1 b).

Figura 1 –Argamassa ensaiada em laboratório (a) e aplicada em obra (b)



(a)



(b)

Fonte: o autor.

O contrapiso produzido com argamassa autonivelante¹ ou autoadensável possui diversas vantagens, entre elas: não há necessidade do uso do transporte vertical em obra (elevador), quando o material é bombeado por bomba lança ou estacionária, permite minimizar o espaço de armazenamento dos agregados no canteiro de obras; ganho de produtividade, já que o material é aplicado com quantidade reduzida de trabalhadores; ganho no planejamento da obra, devido à execução mais rápida; é uma solução econômica e de fácil uso. (ALTOÉ *et. al.*, 2015)

Conforme Nakamura e Bucher (1997), as argamassas autoadensáveis são compostas basicamente por cimento Portland, agregado miúdo, aditivos e adições minerais, sob a composição de 25 a 45% de cimento Portland, relação água/materiais secos de 0,20 a 0,30, areia quartzosa de 40 a 60% e aditivos e adições entre 10 a 15%, que tem como objetivo modificar as características no estado fresco e estado endurecido, viabilizando sua utilização, dando fluidez sem perder sua estabilidade. Silva *et. al.* (2022) observaram que em relação à composição das argamassas autoadensáveis, os consumos de cimento nas pesquisas variam entre 250 e 1000kg/m³.

2.1.1 Cimento Portland

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o Cimento Portland terá influência direta nas propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa devido às suas características físicas, como área superficial específica, e sua composição química, como teor de C₃S. Torres, Romano e Pileggi (2017), por exemplo, observaram influência do tipo de cimento Portland em características como teor de ar incorporado e porosidade em materiais cimentícios.

Segundo Martins (2009), apesar do tipo de cimento Portland não ser normatizado, é viável o uso de qualquer tipo disponível no mercado, as suas

¹ Segundo Martins (2009) a argamassa autonivelante é um tipo de argamassa autoadensável a qual deve obrigatoriamente ser constituída por uma superfície horizontalmente nivelada, portanto, toda argamassa autonivelante é autoadensável, mas o contrário não é verdadeiro.

características, como finura, impactarão diretamente nas propriedades mecânicas e reológicas das argamassas autonivelantes.

Silva *et al.* (2022) observam o uso de diversos tipos de cimento Portland por pesquisadores brasileiros (CP II F, CP II Z, CP V e CP II E), porém, observou-se uma predominância no uso do CP V ARI, que, conforme Souza e Lara (2005), uma finura maior do cimento Portland colabora no controle da exsudação e possui resistência inicial maior, o que resulta na liberação da frente de trabalho mais rápida.

Esses diferentes tipos de cimento Portland são definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que estipula os limites de composição química (Tabela 1) e de requisitos físicos e mecânicos (Tabela 2).

Tabela 1 – Limites de composição do cimento Portland.

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático		
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5				
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10		
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15		
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6-14	0 – 15		
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25		
Cimento Portland de alto forno		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10		
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 – 85	0	15-50	0 – 10		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI	90 – 100	0	0	0 – 10	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40	-	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural				-		-	50 – 74	-	-

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

É possível observar que, apesar da norma definir diferentes tipos de cimento Portland com faixas de adição mineral e teor de clínquer e sulfato de cálcio, há grande variação desses teores admissíveis para o mesmo tipo de cimento Portland, sendo possível encontrar materiais que se enquadrem na mesma designação, mas que sejam completamente diferentes.

Tabela 2 – Requisitos físicos e mecânicos.

Sigla	Classe	Finura		Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 μm (%)				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S	25	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	-
CP II-E CP II-F	32	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	-
CP II-Z	40	$\leq 10,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	-
CP III	25	$\leq 8,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	-
CP IV	32	$\leq 8,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	-
	40	$\leq 8,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$	-
CP V	ARI	$\leq 6,0$		≥ 60	≤ 5	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	-	-
CPB – E	25	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	≥ 78
	32	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	
	40	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	
CPB - NE	-	$\leq 12,0$		≥ 60	≤ 5	-	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$	≥ 82

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

Percebe-se, a partir das propriedades supracitadas, que o tipo de cimento Portland tem alto potencial de alterar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais à base de cimento Portland, além de modificar a demanda de cimento e água.

2.1.2 Agregados miúdos

Assim como os aglomerantes, as propriedades físicas e mineralógicas dos agregados influenciam as propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Betioli *et al.* (2021) observou, por exemplo, que a substituição de uma areia natural de rio por areia natural de britagem foi capaz de reduzir a demanda de água, neste caso, possibilitando a produção de argamassas mais sustentáveis, com menor índice de ligante, havendo influência da granulometria, área superficial, dentre outros. Da mesma forma, Inéia (2017) também observou a viabilidade do uso de pó de pedra basáltico como agregado para argamassas autoadensáveis.

Ribeiro *et al.* (2013) ressaltam que a composição granulométrica dos agregados utilizados impacta diretamente sobre a qualidade de argamassas e concretos, principalmente nos aspectos de trabalhabilidade, compacidade e resistência à compressão.

Duarte *et al.* (2022) observaram que a escolha do agregado impacta diretamente no estado fresco e endurecido de argamassas autoadensáveis, onde a substituição de areia natural de lagoa por pó de pedra permitiu uma redução na demanda de água, no teor de ar incorporado e no índice de ligante das argamassas. Segundo os pesquisadores, o módulo de finura do agregado e o empacotamento da composição influenciaram diretamente nas propriedades da argamassa autoadensável.

Ao comparar o uso de diferentes tipos de areias em argamassas autoadensáveis, Benabed *et al.* (2012) observam a direta influência do agregado nas propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas, onde agregados com menor módulo de finura aumentaram a demanda de água, enquanto preenchem os vazios e melhoram o desempenho no estado endurecido.

2.1.3 Adições minerais

Os concretos autoadensáveis, e estende-se este conceito para argamassas autoadensáveis, requerem uma grande quantidade de material pulverulento e uma baixa relação água/material fino (SCHUTTER *et al.*, 2008). Conforme estes autores, a adição pode ser de diferentes tipos:

- Inerte, exemplo o filer calcário;
- Pozolânica, exemplo o cinza volante ou sílica ativa;
- Hidráulica, exemplo o da escória de alto forno.

O uso de adições resulta em diversos benefícios, sendo possível destacar controle da resistência à compressão, redução do calor de hidratação, e a melhora na estabilidade e no comportamento reológico do material (SCHUTTER *et al*, 2008).

Na argamassa autoadensável, os efeitos das adições minerais são diversos. Por terem uma alta área superficial, colaboram reduzindo a exsudação da argamassa. Conforme observado por Sahmaran *et al.* (2006), as adições minerais são capazes de influenciar nas propriedades no estado fresco, beneficiando a fluidez das argamassas, impactada não só pelo diâmetro das partículas de adição, mas também pela forma e textura da superfície.

O uso de cinza volante em argamassas autoadensáveis é capaz de proporcionar aumento de fluidez, causado pela sua forma esférica e superfície lisa, reduzindo o atrito na interface do agregado (RIZWAN e BIER, 2012).

Ao utilizar o resíduo de polimento de porcelanato (RPP) como adição mineral, a composição granulométrica e área superficial alteram diretamente as propriedades no estado fresco e estado endurecido das argamassas autoadensáveis, enquanto a adição de RPP com partículas de menor diâmetro promoveu um aumento na fluidez enquanto reduziu a demanda de água (BETIOLI *et al.*, 2021). A incorporação de teores ideais de adição mineral nas argamassas pode permitir uma melhora na trabalhabilidade e na resistência mecânica (NÉCIRA e ABADOU, 2021).

Apesar de ser capaz de beneficiar algumas propriedades das argamassas autoadensáveis, há um teor máximo de adição capaz de ser incorporada, visto que teores mais altos podem prejudicar essas propriedades, podendo reduzir, por exemplo, a fluidez, devido a sua finura e alta área superficial (BENABED *et al.*, 2012).

2.1.4 Aditivos

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), os dois principais aditivos utilizados em concretos autoadensáveis são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade, o que pode ser considerado também para argamassas autoadensáveis.

Quanto ao uso de superplastificantes, os autores aconselham o uso de aditivos à base de policarboxilatos, que atuam dispersando e defloculando as partículas de cimento Portland, por serem de alta eficiência, sendo capazes de reduzir a água na mistura em até 40%, mantendo a consistência.

Os aditivos modificadores de viscosidade são produtos à base de polissacarídeos que melhoram a coesão de compósitos cimentícios no estado fresco, reduzindo a segregação e a perda de água por exsudação, substituindo assim o uso de componentes finos, como fíleres ou o próprio cimento Portland. (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008)

O uso de modificadores de viscosidade pode aumentar a tensão de escoamento e viscosidade em concretos e, conseqüentemente, o uso combinado com superplastificantes para reduzir este aumento na tensão de escoamento pode ser necessário (KHAYAT e GHEZAL, 2003). Tutikian e Dal Molin (2008) destacam, ainda, que o uso de aditivos modificadores de viscosidade não é imprescindível, visto que este substitui os componentes finos na contribuição à viscosidade da argamassa.

2.2 Propriedades das argamassas autoadensáveis

Atualmente não existem normas brasileiras com definição de parâmetros e ensaios para argamassas autoadensáveis, desta forma, a seguir serão apresentadas normas internacionais utilizadas ou adaptadas em pesquisas nacionais.

A norma americana C1708 (ASTM, 2018) descreve os métodos de ensaio para avaliar as principais características de argamassas autoadensáveis no estado fresco: fluxo inicial (consistência), retenção de fluxo (perda de consistência), viscosidade e tempo de cicatrização (intervalo de tempo em que a argamassa possui capacidade de voltar ao seu estado original de nivelamento, sem apresentar deformações), mas não define parâmetros mínimos.

A EFNARC (2001) define as especificações para produção de pisos com cimento Portland modificado com polímero, que pode ser considerada uma argamassa autoadensável, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características conforme EFNARC (2001)

Propriedade	Método normatizado	Requisito
Resistência à compressão	EN 13892-2	≥ 20 MPa
Resistência à flexão	EN 13892-2	≥ 5 MPa
Resistência à abrasão	EN 13892-4	AR 2, ou melhor
	EN 13892-5	RWA 10, ou melhor
Resistência ao arrancamento do substrato	EN 1542	≥ 1 MPa
Resistência ao impacto	ISO 6272	≥ 4 Nm

Fonte: adaptado de EFNARC (2001).

Ainda, a EFNARC (2001) define os requisitos em casos específicos, quando exigidos pelo projeto, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Características em casos específicos conforme EFNARC (2001)

Propriedade	Método normatizado	Requisito
Consistência (quando bombeada)	EN 13454-2	≥ 220 mm
	EN 12706	≥ 130mm
Resistência ao escorregamento	EN 13036-4	≥ 40, quando testada úmida
Permeabilidade ao vapor de água	EN 12086	≤ 4 g/(m ² .d)

Fonte: adaptado de EFNARC (2001).

No geral, são realizados ensaios para medida das seguintes propriedades das argamassas autoadensáveis no estado fresco: consistência, fluidez, propriedades reológicas, tempo de início e fim de pega.

Os requisitos definidos pela EFNARC (2001) não são parâmetros definitivos para argamassas autoadensáveis, visto que a norma define parâmetros para produção de pisos com cimento modificado com polímero. Entende-se que, por ter capacidade de fluir pelo seu peso próprio e preencher formas sem necessidade de adensamento, duas propriedades são essenciais em argamassas autoadensáveis: consistência e resistência à segregação, sendo que a argamassa deve ter consistência tal qual seja capaz de se espalhar pelo peso próprio e preencher os vazios das formas sem que haja a separação das partículas (MARTINS, 2009). Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010) pontuam que o principal fator que impacta na fluidez das argamassas autoadensáveis é a relação a/c, mas que também reduz a estabilidade, gerando segregação e exsudação. Tais efeitos podem ser reduzidos ao utilizar VMA ou adições minerais.

Diversos pesquisadores apontam outros requisitos de fluidez para definir uma argamassa como autoadensável. Nakakura e Bucher (1997), por exemplo, citam um espalhamento no cone de Kantro de 130 a 140 mm quando a argamassa tem como fim a regularização e 160 a 165 mm quando o fim é o acabamento. Percebe-se que, apesar da EFNARC (2001) determinar um espalhamento mínimo de 220 mm na mesa de consistência.

A EFNARC (2001) define como requisito mínimo a resistência à compressão de 20 MPa e a resistência à tração na flexão de 5 MPa. Assim como no estado fresco, a EFNARC (2001) não define os parâmetros para argamassas autoadensáveis, mas sim para pisos com cimento modificado com polímero. Nakakura e Bucher (1997) estipulam uma resistência à compressão entre 25 e 35 MPa e uma resistência à tração na flexão de 8 a 11 MPa aos 28 dias.

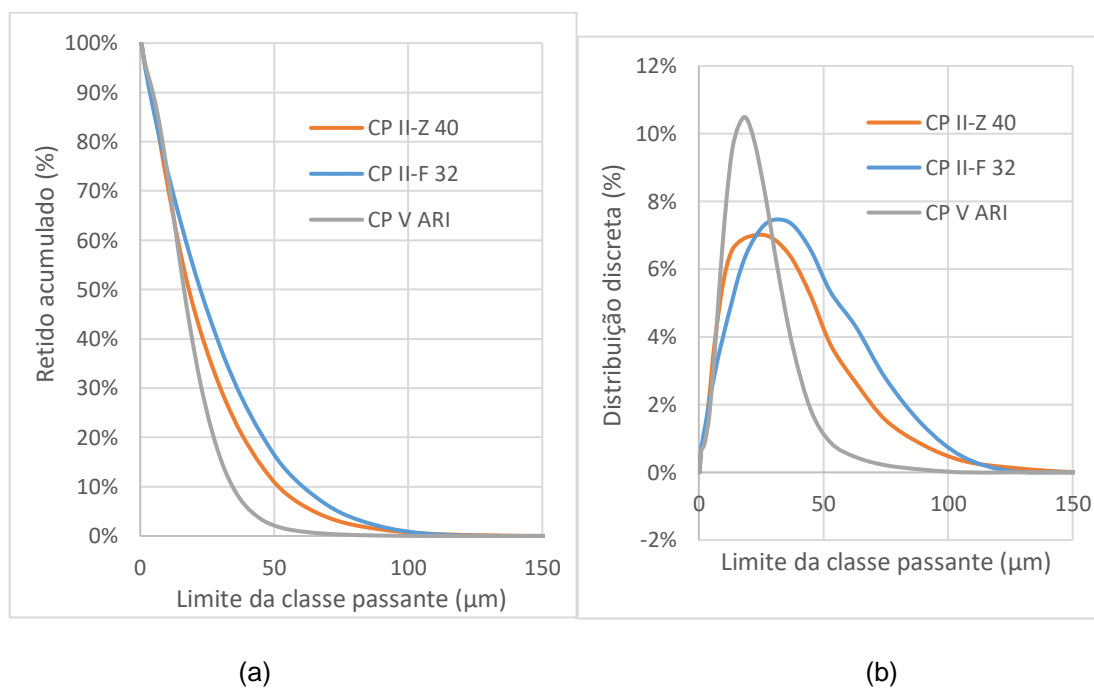
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do presente trabalho foram utilizados 3 diferentes tipos de cimento Portland cada uma: CP II-F 32, CP II-Z 40 e CP V-ARI, sendo que, para cada cimento Portland, houve uma curva de dosagem.

3.1 Caracterização dos materiais

Foram utilizados os cimentos Portland CP II-Z 40 (composto com pozolana), com massa específica de $3,03 \text{ g/cm}^3$ e área superficial específica de $1,41 \text{ m}^2/\text{g}$, CP II-F 32 (composto com fíler), com massa específica de $3,07 \text{ g/cm}^3$ e área superficial específica de $1,52 \text{ m}^2/\text{g}$ e o CP V ARI (de alta resistência inicial), com massa específica de $3,10 \text{ g/cm}^3$ e área superficial específica de $1,33 \text{ m}^2/\text{g}$. A partir da distribuição granulométrica a laser dos cimentos Portland, apresentada na Figura 2, é possível observar a diferença da finura dos tipos de cimento, sendo o CP V ARI o mais fino, seguido pelo CP II-Z 40 e pelo CP II-F 32.

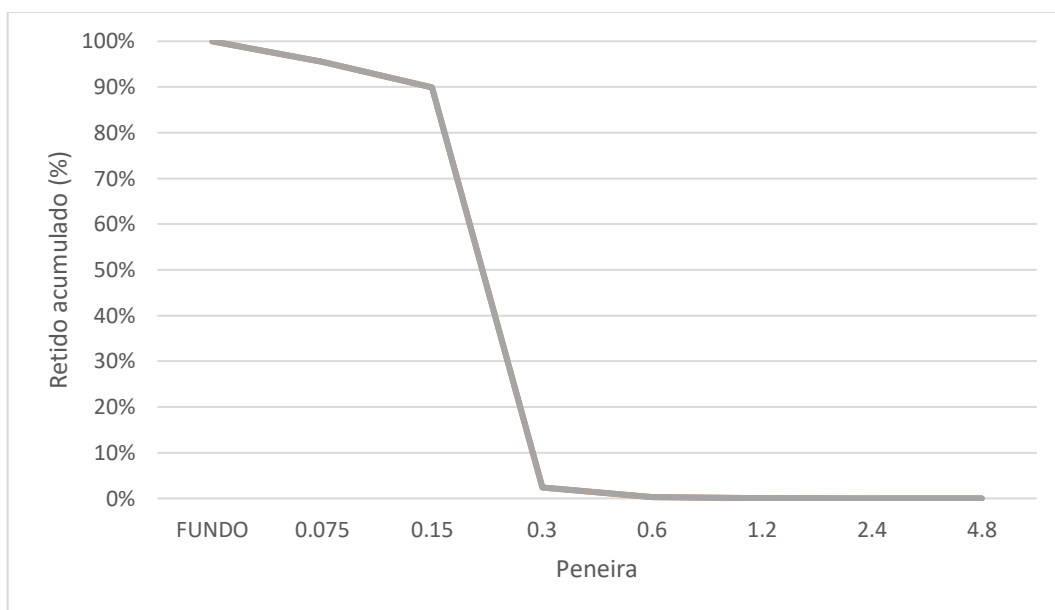
Figura 2 – Granulometria com distribuição acumulada (a) e distribuição discreta (b) dos diferentes tipos de cimento



Fonte: o autor.

A fim de evitar impacto do agregado nas diferentes curvas, foi utilizado apenas um tipo de agregado miúdo, sendo uma areia natural de lagoa, com massa específica de $2,612 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura de 0,93, teor de pulverulento de 4,52%, dimensão máxima característica de 0,3mm e distribuição granulométrica apresentada na Figura 3.

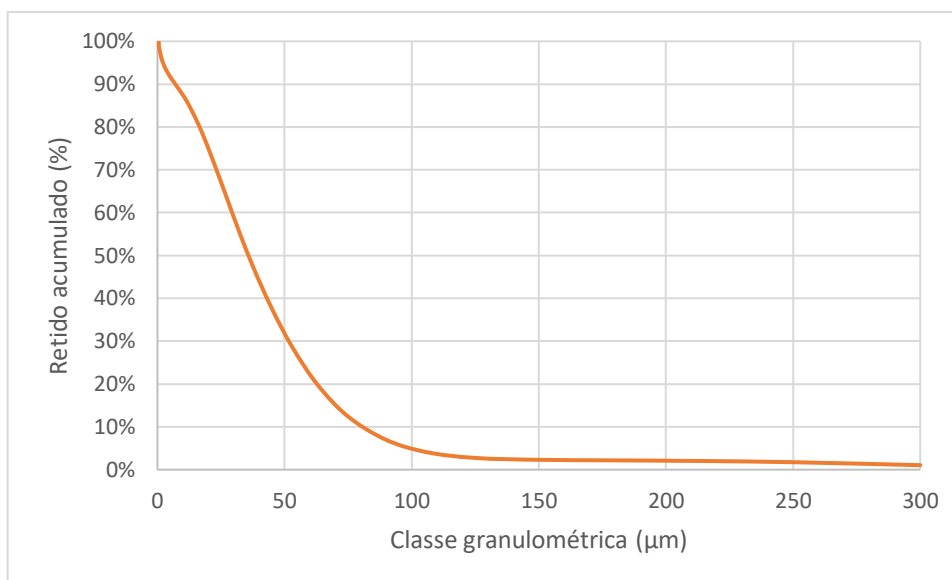
Figura 3 – Granulometria da areia natural de lagoa



Fonte: o autor.

O aditivo superplastificante utilizado é um aditivo sintético de polímeros policarboxilatos com massa específica média de $1,070 \text{ g/cm}^3$ e dosagem recomendada entre 0,2% e 5,0%.

A fim de controlar a exsudação, foi utilizado um filer calcário como fino complementar, visando não utilizar aditivo modificador de viscosidade. O filer calcário utilizado tem massa específica de $2,700 \text{ g/cm}^3$, área superficial específica de $1,12 \text{ m}^2/\text{g}$ e a distribuição granulométrica apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Granulometria do fíler calcário

Fonte: o autor.

3.2 Dosagem e mistura das argamassas autoadensáveis

Para a dosagem das curvas, foi mantido constante o espalhamento de 28 ± 2 cm, como utilizado por Betioli *et. al.* (2021), a fim de possibilitar avaliar a dosagem das argamassas com mesmo espalhamento.

A mistura foi realizada em misturador planetário, com aproximadamente 1500 ml de material, e consistiu na mistura dos materiais secos da pasta, composta por cimento e fíler calcário, adicionando aproximadamente 50% da água final da argamassa e todo o aditivo dosado após 1 minuto, em baixa rotação. Após 60 segundos de mistura da pasta, foram adicionados o agregado e o restante da água até obter-se o espalhamento desejado, dentro do tempo máximo de 90 segundos. Por fim, foi feita a mistura da argamassa completa por mais 90 segundos (baixa rotação) e, logo em seguida, os ensaios de caracterização do estado fresco da argamassa.

O teor de aditivo superplastificante foi fixo para que não haja variação entre as argamassas. O teor de fíler também foi adotado como constante, porém, para definir esse teor necessário a fim de evitar a exsudação, foi necessário realizar a dosagem de uma argamassa piloto.

3.2.1 Dosagem da argamassa autoadensável piloto

Como não há método de dosagem consagrado para argamassa autoadensável consagrado no Brasil, conforme observado por Duarte *et al.* (2022), foi realizada a dosagem da primeira argamassa utilizando o CP II-Z 40 com relação água/cimento de 0,85 e aditivo superplastificante na dosagem de 0,7% sobre a massa de cimento. Esses valores foram baseados nos traços utilizados por Betioli *et al.* (2021), que obtiveram resistências próximas à 20 MPa com essas proporções.

Após a mistura da pasta constituída de cimento, água e aditivo superplastificante em argamassadeira planetária a baixa rotação, foi adicionada areia até obter-se o espalhamento dentro da faixa especificada de 28 ± 2 cm. Para reduzir a exsudação, foi adicionado filer calcário e, para manter o espalhamento dentro da faixa estipulada, adicionado água. Por fim, obteve-se um teor de 30,35% de fíler sobre a massa do CP II-Z 40. É possível, na Figura 5, observar que não houve grandes sinais de exsudação e segregação.

A proporção final de material foi 1:0,30:3,00:0,88:0,007 (cimento:fíler:areia:água:aditivo, em massa).

Figura 5 – Argamassa piloto executada



Fonte: o autor.

3.2.2 Determinação das curvas de dosagem

Para a determinação das curvas de dosagem, foram definidos 3 relações água/cimento, sendo essas aproximadamente 0,55, 0,7 e 0,85. A substituição do cimento CP II-Z 40 pelos outros tipos foi realizada mantendo o volume do cimento constante e foi mantida a sequência de mistura do traço citada no item 3.2.

Como o teor de filer foi mantido constante, as argamassas foram dosadas utilizando apenas a adição de areia até o espalhamento alvo, podendo haver diferença da exsudação, avaliada visualmente. Mesmo que alguma argamassa apresentasse maior exsudação, não foi realizada qualquer intervenção, a fim de manter o teor de filer constante.

Após a produção das argamassas, foram realizados os ensaios no estado fresco e para o estado endurecido foram moldados 3 corpos de prova prismáticos com medidas de 4x4x16 cm que foram mantidos nos moldes por 7 dias e depois mantidos por 21 dias em ambiente com umidade relativa de 75% e temperatura de 23 ± 2 °C, até a data de ensaio aos 28 dias, devido às limitações logísticas da execução deste trabalho.

3.3 Avaliação das características do estado fresco e endurecido das argamassas autoadensáveis

Após a execução das argamassas, estas foram avaliadas quanto à consistência, a partir do ensaio da mesa de consistência definido pela NBR 13276 (ABNT, 2016), utilizando somente a medida de espalhamento inicial após a remoção do molde; segregação e exsudação, a partir da análise visual; fluidez, a partir do funil V para argamassa, adaptado da NBR 15823-5 (ABNT, 2017); densidade de massa e teor de ar incorporado, a partir do ensaio definido pela NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para o estado endurecido, aos 28 dias de idade, foram avaliadas: a densidade de massa aparente; resistência à tração na flexão e à compressão, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), realizado em prensa EMIC DL 30000; módulo de elasticidade dinâmico, a partir da propagação de pulso ultrassônico, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008).

3.3.1 Consistência

Dentro das normatizações brasileiras, um dos principais ensaios de consistência de argamassa é a medida de espalhamento (Figura 6) – definido pela NBR 13276 (2016), mas sem a realização dos golpes. Segundo Souza e Lara (2005), esse ensaio tem como parâmetro reológico indireto a viscosidade por conta da aplicação dos golpes, porém, por se tratar de argamassas autoadensáveis e não haver a aplicação de golpes durante o ensaio, a tensão de escoamento será influente no ensaio, e a viscosidade impactará no tempo necessário para o escoamento.

Figura 6 – (a) exemplo de mesa onde é realizado o ensaio, (b) realização do ensaio com a medição do índice de consistência



(a)

(b)

Fonte: o autor.

3.3.2 Fluidez

Outro ensaio amplamente utilizado, especialmente em concretos autoadensáveis, é a medida indireta de viscosidade pelo método do funil V, definida pela NBR 15823-5 (2017) – sendo adaptada a dimensão do funil para argamassas autoadensáveis (Figura 5).

Figura 7 – Mini Funil V para argamassas autoadensáveis



Fonte: o autor.

3.3.3 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão tem como ensaio definido pela NBR 13279 (ABNT, 2020) que consiste na aplicação de uma carga pontual com o corpo de prova apoiado em 2 apoios simples, até sua ruptura. A resistência à compressão é determinada a partir do ensaio, também definido pela NBR 13279 (ABNT, 2020), utilizando o mesmo corpo de prova submetido à tração na flexão, onde este é comprimido por dois pratos retangulares. Para a realização dos ensaios, foi utilizado uma prensa EMIC DL 30000.

3.3.4 Módulo dinâmico

A partir da velocidade de pulso ultrassônico, conforme NBR 15630 (ABNT, 2009), é possível determinar o módulo elasticidade dinâmico. O ensaio é realizado acoplado dois transdutores em faces opostas do corpo de prova e realizando a propagação de um pulso ultrassônico. A partir do tempo de propagação deste pulso ultrassônico é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico.

3.3.5 Validação das curvas de dosagem

A fim de validar as curvas de dosagem, foram realizados pontos com resistência à compressão de 20 MPa dosados a partir das curvas obtidas com os 3 diferentes cimentos Portland. Os pontos executados foram determinados a partir da regressão não linear das curvas água/cimento x resistência à compressão; m x água/cimento e m x consumo de cimento.

Com o objetivo de normalizar a comparação entre as argamassas, foi calculado o índice de ligante das mesmas (Equação 1), que é a razão entre o consumo de cimento e a resistência à compressão, ou, ainda, quantos quilos de aglomerante são necessários para se obter 1 MPa de resistência à compressão.

$$\text{Índice de ligante} = \frac{\text{Consumo de cimento}}{\text{Resistência à compressão}} \quad (1)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução da metodologia proposta, foram obtidas as argamassas autoadensáveis utilizando os cimentos Portland CP II-Z40, CP II-F 32 e o CP V ARI para as três relações água/cimento. O traço unitário de cada uma delas encontra-se no Quadro 3.

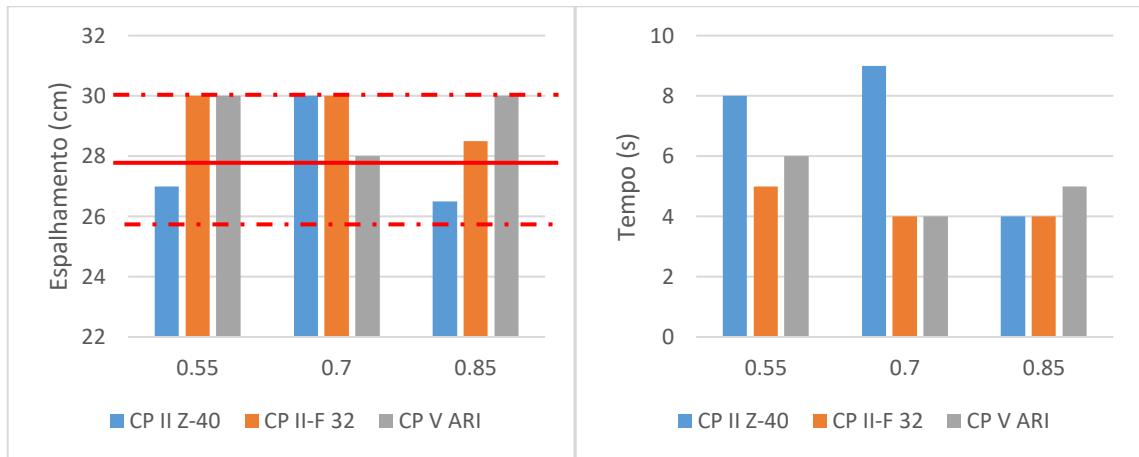
Quadro 3 – Traço unitário das argamassas autoadensáveis utilizando o cimento CP II-Z 40, CP II-F 32 e o CP V ARI

Traço Unitário									
Material	CP II-Z 40			CP II-F 32			CP V ARI		
Cimento	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Água	0,88	0,70	0,55	0,90	0,70	0,56	0,87	0,70	0,55
Fíler	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Areia Natural	3,00	2,38	1,80	2,76	1,98	1,53	3,14	2,41	1,80
Aditivo	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007

O uso de diferentes tipos de cimento Portland influenciou na quantidade de agregado incorporada, causada pela diferença na sua finura. Cimentos Portland mais finos, CP II-Z 40 e CP V ARI, permitiram maior incorporação de agregado. Essa diferença entre incorporação de agregado pode ser explicada pela diferença na área superficial específica, onde o cimento com maior área superficial específica permitiu menor incorporação de agregado, devido à maior demanda de água.

As propriedades das argamassas no estado fresco podem ser observadas na Figura 6, para (a) a consistência e (b) fluidez, na Figura 7, para (a) a densidade de massa e (b) teor de ar incorporado.

Figura 8 – (a) Espalhamento e (b) tempo de escoamento no funil V das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c. As retas indicam o intervalo de espalhamento desejado de 28 ± 2 cm

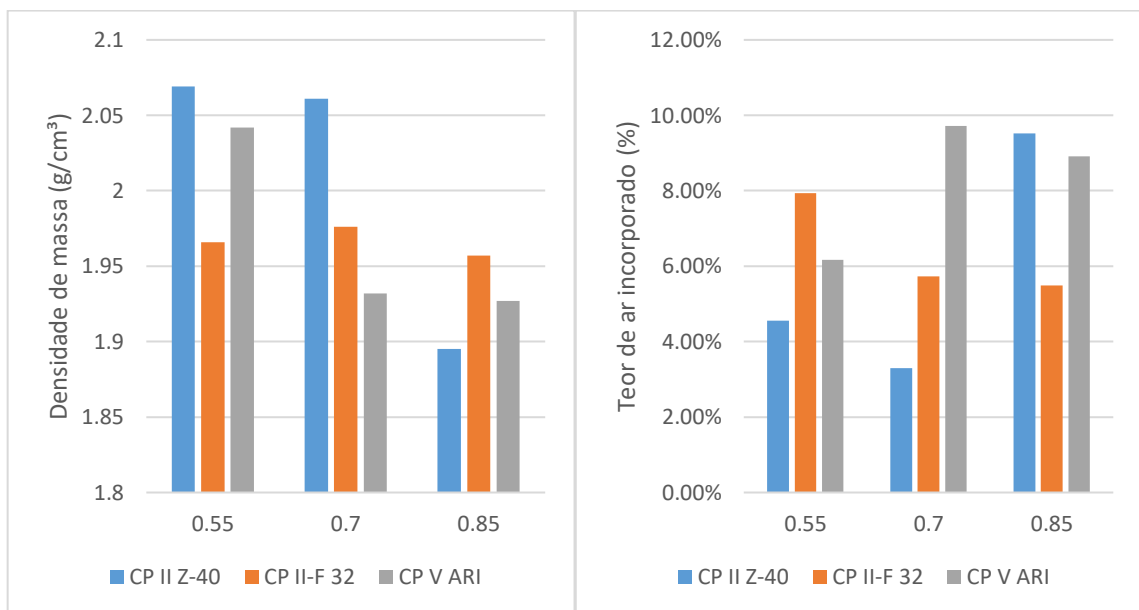


(a)

(b)

Fonte: o autor.

Figura 9 – (a) Densidade de massa e (b) teor de ar incorporado das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c



(a)

(b)

Fonte: o autor.

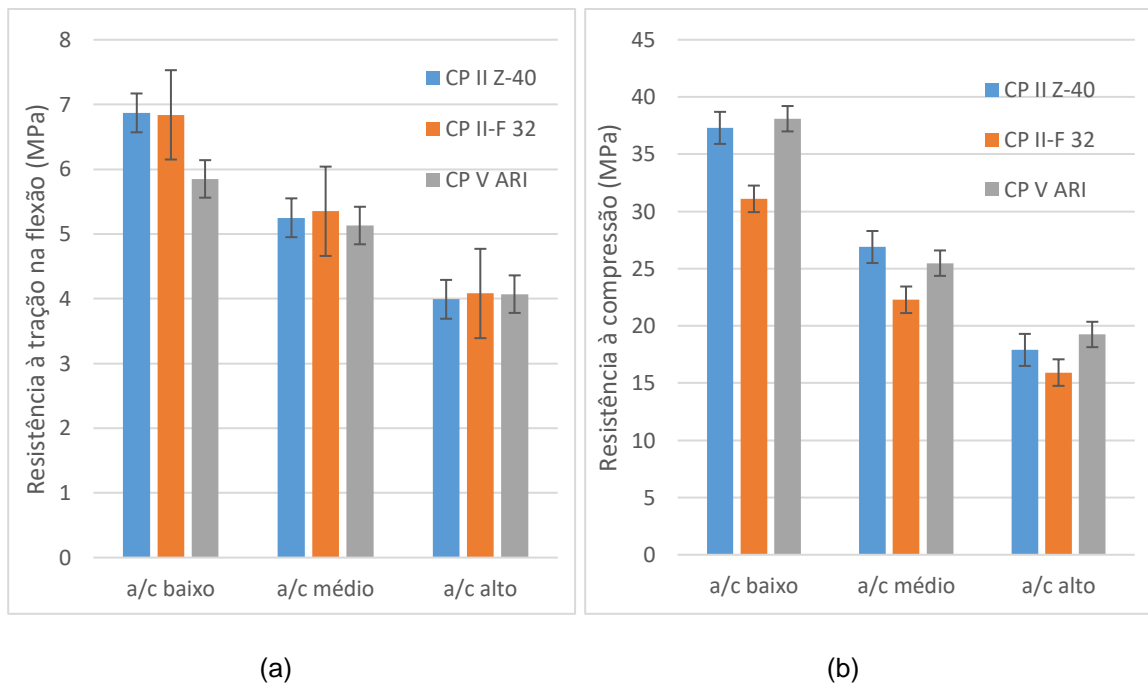
Pode-se observar que todas as argamassas mantiveram o espalhamento dentro da faixa estipulada, além de uma fluidez próxima, visto que o tempo de funil se manteve próximo. O tipo de cimento Portland mostrou possível influência no teor de

ar incorporado, onde foi possível observar teores mais altos no uso de CP II-F 32 e CP V ARI.

Além disso, observa-se que o uso do CP II-Z 40 acarretou uma densidade de massa mais elevada, o que pode ser explicado pela maior incorporação de agregados e, conseqüentemente, menor volume de água no m³, o que resulta numa maior estabilidade e resistência à segregação e à exsudação (KATSIADRAMIS *et al.*, 2010)

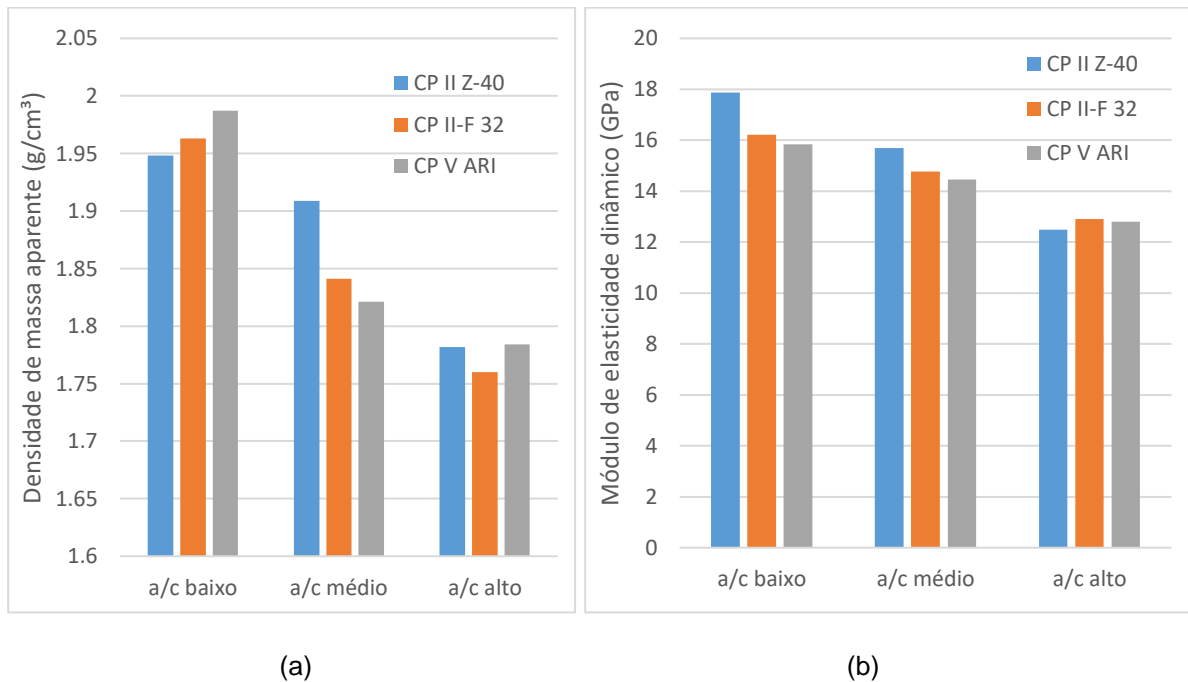
Já no estado endurecido, apresentado na Figura 8, para (a) a resistência à tração na flexão e (b) à compressão, e na Figura 9, para a densidade de massa aparente e o módulo de elasticidade dinâmico, pode-se observar uma variação de resistência mecânica entre os cimentos, mais acentuada em relações a/c mais baixas.

Figura 10 – (a) Resistência à tração na flexão e (b) à compressão das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c



Fonte: o autor.

Figura 11 – (a) Densidade de massa aparente e (b) módulo de elasticidade dinâmico das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e de relação a/c

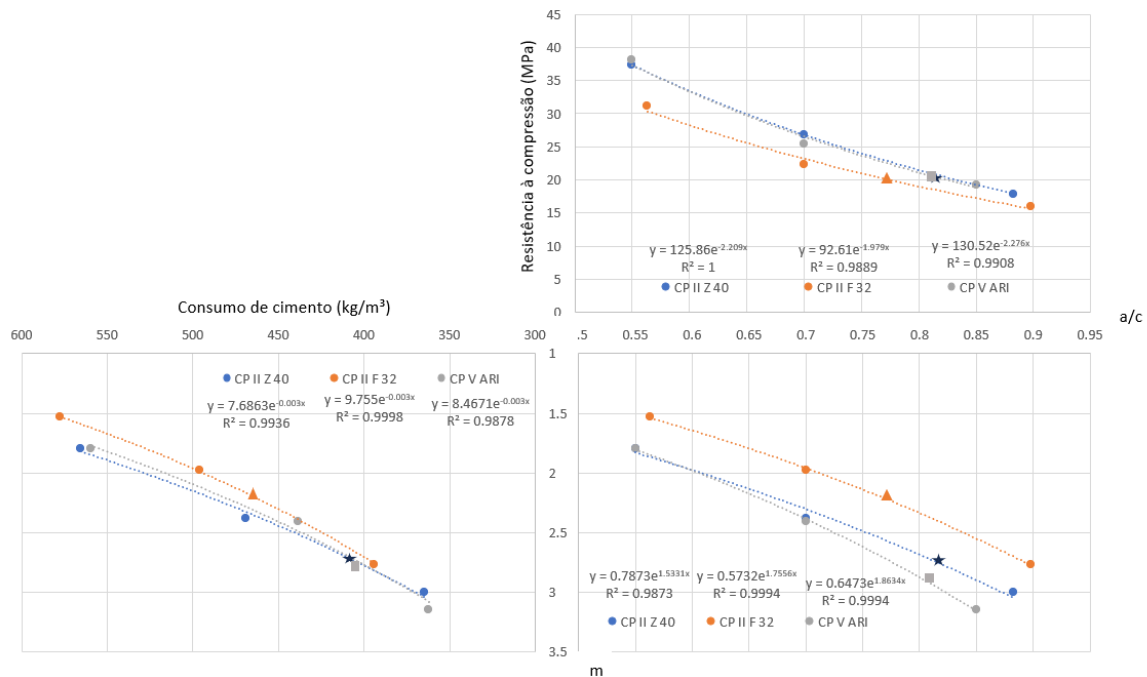


Fonte: o autor.

A partir da caracterização das argamassas autoadensáveis, foi possível traçar as curvas de dosagem, apresentadas na Figura 10. A partir das curvas, é possível observar um desempenho inferior do CP II F 32 em relação à resistência à compressão, isso ocorreu devido a menor classe de resistência característica do cimento Portland.

Além disso, é possível observar uma maior incorporação de agregado no CP II-Z 40 e no CP V ARI, quando comparado ao CP II-F 32, e, conseqüentemente, menor consumo de cimento no CP II-Z 40 e no CP V ARI, quando comparado ao CP II-F 32, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 12 – Curvas de dosagem das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento e relação a/c, onde a estrela, o triângulo e o quadrado representam os pontos com resistência de 25 MPa utilizando os cimentos CP II Z 40, CP II F 32 e CP V ARI, respectivamente



Fonte: o autor.

A partir das curvas traçadas, é possível observar que a escolha do tipo de cimento Portland a ser utilizado em argamassas autoadensáveis deve levar em conta, principalmente, a classe de resistência do cimento Portland, buscando sempre a classe de maior resistência possível, visto que permite atingir resistências mais altas em relações a/c próximas. Além disso, o uso de cimentos Portlands mais finos permitiu a incorporação de maior quantidade de agregados, o que resultou em menor consumo de cimento. Essa incorporação maior de agregados em cimentos mais finos pode ser explicada pela área superficial específica, que impacta diretamente na demanda de água.

Quanto ao tipo de adição utilizada no cimento (cinza volante no caso do CP II-Z 40 e fíler calcário no caso do CP V ARI), não é possível afirmar que haja benefício direto no uso de qualquer um dos tipos.

Além da classe de resistência, a granulometria impacta na escolha do tipo de cimento Portland para argamassas autoadensáveis, enquanto argamassas com os cimentos mais finos permitiu resistências mais altas com maior incorporação de agregado e menor consumo de cimento Portland. É possível que a variação dos teores de fíler e de aditivo superplastificante apresente resultados diferentes dos obtidos.

Ao realizar os pontos de validação das curvas (identificados na Figura 10 por uma estrela, para o CP II-Z 40; por um triângulo, para o CP II-F 32; e por um quadro, para o CP V ARI) para uma resistência de 20 MPa, foi possível constatar que esse aumento no consumo de cimento, como mostra o consumo de materiais no Quadro 4. É possível observar que, para argamassas com resistência à compressão padronizada de 20 MPa, o CP V ARI apresentou menor consumo de cimento (2,16% em relação ao CP II-Z 40 e 14,16% em relação ao CP II-F 32) e menor demanda de água no m³ (3,16% em relação ao CP-II Z 40 e 8,65% em relação ao CP II-F 32).

Quadro 4 – Consumo de materiais por m³ das argamassas autoadensáveis com diferentes tipos de cimento com resistência à compressão de 20 MPa

Material	CP II Z 40	CP II F 32	CP V ARI
Cimento	423,34	482,51	414,20
Água	352,518	373,696	341,372
Fíler	128,47	144,52	122,86
Areia Natural	1194,70	1077,24	1245,34
Aditivo Superplastificante	2,96	3,38	2,90

Dessa forma, é possível observar a influência do tipo de cimento Portland não apenas nas propriedades das argamassas autoadensáveis, mas como em todo o processo de dosagem, interferindo no consumo de cimento e demanda de água.

A eficiência dos cimentos Portland de maior classe de resistência (CP II-Z 40 e CP V ARI) fica ainda mais clara ao analisar o índice de ligante, sendo a quantidade de cimento Portland necessária para obter-se 1 MPa de resistência à compressão. No Quadro 5 observa-se que para atingir 1 MPa é necessária uma quantidade menor de cimento CP V ARI, seguido do CP II-Z 40 e CP II-F 32.

Quadro 5 – Índice de ligante das argamassas autoadensáveis com os diferentes tipos de cimento (CP II-Z 40, CP II-F 32 e CP V ARI)

	CP II Z 40	CP II F 32	CP V ARI
Índice de ligante	21,167	24,126	20,710

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, é possível observar a influência direta do tipo de cimento Portland nas propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas autoadensáveis e, além disso, uma influência direta na dosagem dessas argamassas.

Essa influência pode ser explicada pelas próprias propriedades física e químicas dos cimentos Portland, onde cimentos mais finos e com classe de resistência mais alta reduziram o consumo de cimento por m³ e a demanda de água, mostrando ser melhores opções ao realizar-se a escolha dos materiais constituintes para os teores de fíler e aditivos superplastificantes utilizados, sendo que a variação destes teores pode resultar em características diferentes.

Dentre os cimentos Portland testados, pode-se concluir que o cimento tipo CP V ARI é o mais recomendado para utilização em argamassas autoadensáveis, visto que resultou em menor consumo de cimento Portland com a mesma resistência, quando comparado aos demais cimentos, além de se manter dentro das faixas estipuladas para as propriedades no estado fresco.

Além da influência do tipo de cimento Portland nas propriedades do estado fresco e estado endurecido de argamassas autoadensáveis, a metodologia utilizada mostrou-se eficaz durante o processo de dosagem das argamassas, podendo servir como base para um futuro método de dosagem.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho não apenas verificou influência do tipo de cimento Portland, mas também propôs, de certa forma, uma metodologia para definição do melhor tipo de cimento Portland para argamassas autoadensáveis. Como ainda não há um método consolidado, é necessário dar prosseguimento ao desenvolvimento de um método de dosagem.

É possível, também, expandir a quantidade de diferentes tipos de cimento Portland, visto que outros tipos como CP II-E, CP III e CP IV não foram testados.

Todas as curvas foram desenvolvidas com apenas um tipo de agregado miúdo, sendo que, no geral, as argamassas são compostas por mais de um tipo de agregado. Propõe-se verificar com outros tipos de agregados e composições de diferentes agregados a fim de verificar a influência destes nessa dosagem.

Recomenda-se, também, avaliar o aditivo a ser utilizado, visto que o presente trabalho utilizou apenas um superplastificante e em apenas um teor, sendo necessário avaliar diferentes teores e diferentes aditivos e sua influência no consumo de cimento Portland.

Avaliar a influência do tipo de cimento no parâmetro reológico de argamassas autoadensáveis, visto que estas são normalmente bombeadas e esses parâmetros influenciam diretamente.

Além disso, é importante que futuros trabalhos avaliem o custo por m³ das argamassas autoadensáveis obtidas, visto que, mesmo tendo um consumo de cimento mais alto, é possível que o custo por kg do cimento viabilize, financeiramente, seu uso em detrimento de outros tipos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Brenda M. O. **Argamassa autonivelante para contrapiso: efeito do tipo de cimento no comportamento físico-mecânico**. 2020. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

ALTOÉ, Cássio R. *et al.* Contrapiso Autonivelante. In: SIMPÓSIO SUL CAPIXABA DE ENGENHARIA, 2015, São Camilo. **Anais [...]**. São Camilo: Anec, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 6 p., 2016.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 8 p., 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 13 p., 2005.

_____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 6 p., 2005.

_____. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 8 p., 2008.

_____. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável – Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 20 p., 2017.

_____. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável – Parte 5: determinação da viscosidade – método do funil V**. Rio de Janeiro, 8 p., 2017.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 16 p., 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1708: Standard test methods for self-leveling mortars containing hydraulic cements**. West Conshohocken, 8 p., 2019.

BETIOLI, Andrea M. *et al.* Efeito do tipo de fino e do agregado miúdo nas propriedades da argamassa autoadensável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2021. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRACON, 2021. p. 1–10.

BENABED, Benchaa *et al.* Properties of self-compacting mortars made with various type of sand. **Cement and Concrete Composites**, s. l., v. 34, n. 10, p. 1167-1173, 2012.

- CARVALHO, Henrique D. S. **Análise da retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do cimento portland**. 2015. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- CARVALHO, Ricardo W. Q.; CARDOSO, Kelly C. C. **Uma análise do princípio da função social da posse como instrumento de promoção da dignidade humana ao efetivar o direito à moradia**. JUS: s.l. 2021.
- CHAVES, Patrícia S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito**. 2019. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- DUARTE, Geraldo B. *et al.* Influência da composição de agregado miúdo de rio e proveniente do processo de britagem em argamassas autoadensáveis. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, 2022.
- DUARTE, Lauren K. *et al.* Levantamento dos métodos de dosagem de argamassas autoadensáveis no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–11.
- EFNARC. **Specification & guidelines for polymer-modified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use**. Farnham, 23 p., 2001.
- FURTADO, Celso. Formação de capital e desenvolvimento econômico. **Revista brasileira de Economia**, v. 6, n. 3, p. 7-45, 1952.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SINAPI – sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil: preço de insumos**. Santa Catarina: IBGE, 2022.
- INÉIA, Adriano. **Viabilização da substituição da areia natural pelo pó de pedra basáltica na argamassa autonivelante**. 2017. 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2017.
- KATSIADRAMIS, N. J.; SOTIROPOULOU, A. B.; PANDERMARAKIS, Z. G. Rheological and mechanical response modifications for a self-leveling mortar. In: **EPJ Web of Conferences**, s. l., v. 6, 2010. p. 23002.
- KHAYAT, K.; GHEZAL, A. Effect of viscosity-modifying admixture-superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar. In: WALLEVIK, O.; NIELSSON, I. (org.). **International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**, [s.l.]: RILEM Publications SARL, 2003. p. 369-385.
- LIBRE, Nicolas Ali; KHOSHNAZAR, Rahil; SHEKARCHI, Mohammad. Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1262-1271, 2010.

MARTINS, Elizane J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante**. 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MENDES, Gabriela A. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de Resíduos do Corte de Mármore e Graníticos (RCMG): Análise das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014. 782 p.

NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. Pisos auto-nivelantes: propriedades e instalações. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II. **Anais [...]**. Salvador, 1997.

NÉCIRA, Brahim; ABADOU, Yacine. Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. **World Journal of Engineering**, s. l., v. 18, n. 6, 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, Thais V.; CORDEIRO, Luciana N. P.; BESSA, Sofia A. L. Experimental study of self-leveling mortars produced with recycled concrete aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, [s.l.], v. 17, dez. 2022. p. 1-10.

OLIVEIRA, T. V.; COSTA, M. C.; SOUSA, M. S.; CORDEIRO, L. N. P.; Avaliação do Efeito do Uso de Diferentes Cimentos e de Combinações Distintas de Aditivos sobre a Reologia de Argamassas Autonivelantes. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. C. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2013. 112 p.

RIZWAN, Syed A.; BIER, Thomas A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**, s. l., v. 27, n. 1, p. 398-403, 2012.

SAHMARAN, Mustafa *et al.* The effect of chemical admixture and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composite**, s. l., v. 28, n. 5, p. 432-440, 2006.

SCHUTTER, G. D. *et al.* **Self-compacting concrete**. Boca Raton: Whittles Publishing, 2008. 334 p.

SILVA, Bruno J. *et al.* Levantamento das composições utilizadas na produção de argamassas autoadensáveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–11.

SOUZA, J. G. G.; LARA, P. L. O. Reologia e trabalhabilidade das argamassas. In: BAUER, Elton (org.). **Revestimento de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB; Sinduscon, 2005. p. 23-29.

TORRES, D. R.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Influência da variação da velocidade de rotação e do tipo de cimento nas propriedades de argamassas de revestimento nos estados fresco e endurecido. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, out. 2017. p. 508-516.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008. 148 p.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Getting the numbers right – cement industry energy and CO₂ performance. Geneva, 2016. 20 p.

YANG, Lin; ZHANG, Yunsheng; YAN, Yun. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 127, jul. 2016. p. 204-213.