



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANILO JOSÉ DA COSTA BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL
UTILIZANDO CIMENTO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO
PORTLAND**

Recife

2024

DANILO JOSÉ DA COSTA BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL
UTILIZANDO CIMENTO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Victor Marcelo Estolano de Lima.

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Barbosa, Danilo José da Costa.

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL
UTILIZANDO CIMENTO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO PORTLAND
/ Danilo José da Costa Barbosa. - Recife, 2024.
120f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco,
Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de pós-graduação em
Engenharia Civil.

Orientação: Antônio Acácio de Melo Neto.

Coorientação: Victor Marcelo Estolano de Lima.

1. escória de alto forno; 2. Cimento Portland; 3. ligante
álcali-ativado; 4. sustentabilidade; 5. metassilicato de sódio.
I. Neto, Antônio Acácio de Melo. II. Lima, Victor Marcelo
Estolano de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 624

DANILO JOSÉ DA COSTA BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL
UTILIZANDO CIMENTO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADO E CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 25/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Participação presencial

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Profa. Dra. Maristela Gomes da Silva (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

Participação por videoconferência

Profa. Dr. Marcelo Strozi Cilla (Examinador Externo)
Universidade Federal da Bahia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, e por todas as conquistas que me foram proporcionadas.

Agradeço a minha família em especial ao meu irmão, Carlos Fraga, e aos meus pais, Severina Patrícia e Hudenberg de Moura, pelo apoio, amor, dedicação e ensinamentos repassados durante toda a minha vida. Sem eles nada disso seria possível.

Ao meu orientador, o prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto, pela oportunidade, pelos ensinamentos repassados e pela dedicação em contribuir da melhor forma nos trabalhos de seus orientandos. E aos meu coorientador, o prof. Dr. Victor Estolano, por ser sempre solícito repassar seus conhecimentos e contribuir significativamente na realização deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, principalmente: Igor Fernandes, Tacila Bertulino e Victor Estolano que foram e são minhas referências de dedicação à pesquisa científica e que tiveram a paciência e generosidade de ensinar sobre a utilização dos equipamentos e a rotina do laboratório, além do auxílio prestado.

Agradeço a CIMENTO MIZU S/A, a CIMENTO NACIONAL e a PERNAMBUCO QUÍMICA S/A pela doação de materiais e colaboração com o desenvolvimento desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE, pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida.

Por fim, agradeço a todos os demais colegas que contribuíram de alguma maneira com este trabalho.

*“Por isso vê lá onde pisa, respeite a camisa que a gente suou
Respeite quem pode chegar onde a gente chegou”*

Jorge Aragão, Paulinho Rezende e Flavio Cardoso

RESUMO

O cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil. Estima-se que o processo de produção do cimento seja responsável por cerca de 6% das emissões de CO₂ do planeta. Nos últimos anos, diversos estudos têm investigado ligantes compostos por cimento Portland, materiais precursores e ativadores alcalinos, com o intuito de mitigar o impacto ambiental associado à fabricação dos aglomerantes. Este estudo objetiva desenvolver um compósito de baixo impacto ambiental, utilizando cimento Portland, escória de alto-forno e metassilicato de sódio. Foram desenvolvidos ligantes variando a proporção cimento Portland/escória em quatro relações distintas (25/75, 50/50, 75/25 e 0/100), além de serem produzidas amostras com cimento Portland como referência. Os teores de Na₂O no ativador alcalino foram ajustados em 6%, 7% e 8%, mantendo-se a relação água/ligante em 0,48 e o teor de aditivo em 0,60%. As propriedades no estado fresco foram avaliadas através de ensaios de mini-abatimento e viscosidade no copo Ford para pastas, mesa de consistência para argamassas e abatimento do tronco de cone para concretos. No estado endurecido, foi realizada a avaliação da resistência à compressão, enquanto a microestrutura das pastas foi analisada através do ensaio de difração de raios-X. De maneira geral, as misturas entre cimento Portland, escória e metassilicato de sódio apresentaram uma diminuição da fluidez em comparação com o cimento Portland e o ligante de escória álcali-ativada. Nos ensaios de resistência à compressão, o aumento do teor de Na₂O mostrou um efeito positivo nas misturas contendo 25% de cimento Portland, mas apresentou um efeito negativo nos ligantes com teores de cimento Portland iguais ou superiores a 50%. A análise por difratograma de raios-X indicou que o metassilicato de sódio pode ter interferido no processo de hidratação dos ligantes álcali-ativados. O concreto composto por cimento Portland, escória e metassilicato de sódio alcançou 37,9 MPa aos 28 dias, apresentando resultados semelhantes ao concreto de cimento Portland. No entanto exibiu valores inferiores ao concreto de escória álcali-ativada. Conclui-se que a produção de cimento híbrido é viável e adequada para uso na construção civil em termos de trabalhabilidade e de resistência mecânica.

Palavras-chave: escória de alto forno; Cimento Portland; ligante álcali-ativado; sustentabilidade; metassilicato de sódio.

ABSTRACT

Portland cement is the most utilized material in civil construction. The cement production process is estimated to be responsible for approximately 6% of global CO₂ emissions. In recent years, various studies have investigated binders composed of Portland cement, precursor materials, and alkaline activators to mitigate the environmental impact associated with manufacturing binders. This study aims to develop a low environmental impact composite using Portland cement, blast furnace slag, and sodium metasilicate. Binders were developed by varying the Portland cement/slag ratio in four proportions (25/75, 50/50, 75/25, and 0/100) and producing samples with Portland cement as a reference. The Na₂O content in the alkaline activator was adjusted to 6%, 7%, and 8%, maintaining a water/binder ratio of 0.48 and an additive content of 0.60%. Fresh state properties were evaluated through mini-slump and Ford cup viscosity tests for pastes, flow table for mortars, and slump cone for concretes. In the hardened state, compressive strength was evaluated, while the microstructure of the pastes was analyzed through X-ray diffraction (XRD) testing. Generally, Portland cement, slag, and sodium metasilicate mixtures exhibited reduced fluidity compared to Portland cement and alkali-activated slag binders. In the compressive strength tests, the increase in Na₂O content positively affected mixtures containing 25% Portland cement; however, it shows a negative effect on binders with Portland cement contents equal to or greater than 50%. XRD analysis indicated that sodium metasilicate may have interfered with the hydration process of the alkali-activated binders. The concrete composed of Portland cement, slag, and sodium metasilicate achieved 37.9 MPa at 28 days, presenting results similar to Portland cement concrete but inferior to alkali-activated slag concrete. It is concluded that the production of hybrid cement is viable and suitable for use in civil construction in terms of workability and mechanical strength.

Keywords: blast furnace slag; Portland cement; hybrid alkali activated cement; sustainability; sodium metasilicate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – A importância dos principais fatores na resistência à compressão dos ligantes álcali-ativados.	27
Figura 2 – Picos de alita e portlandita (A) e C ₃ A e etringita (B) em pastas com 7 dias.	31
Figura 3 - DRX das pastas de cimento (HPC), HPC com adição de silicato de sódio (linha rosa), HPC com adição de 4% de microcápsulas L500 (linha azul) e HPC com adição de 4% de microcápsulas T130.....	33
Figura 4 - Fluxograma do programa experimental.	35
Figura 5 - Equipamento para análise da difração de raios-X.	37
Figura 6 - Difratoograma de raios-X da escória de alto forno anidra.....	39
Figura 7 - Distribuição granulométrica acumulada do agregado miúdo.	41
Figura 8 - Distribuição granulométrica acumulada do agregado graúdo.	41
Figura 9 - Nomenclatura das amostras.	42
Figura 10 - Volume de agregado graúdo por m ³ de concreto.....	47
Figura 11 - Produção dos concretos	51
Figura 12 - Corpos de prova de argamassas (A) e pastas (B) moldados.....	52
Figura 13 - Corpos de prova moldados de concreto SL-MT7 (A), concreto HIB25-MT8 (B) e concreto de cimento Portland (C).....	53
Figura 14 - Máquina Shimadzu.	57
Figura 15 - Difratoograma de raios-x das pastas com 1 dia (a) e 28 dias (b).....	59
Figura 16 –Principais Picos sobrepostos de alita e belita das pastas de cimento Portland e dos ligantes HIB25, HIB50 e HIB75 com 1 dia e 28 dias.	61
Figura 17 - Comparação entre os picos 18º e 34º do portlandita das pastas de cimento Portland e dos ligantes HIB25, HIB50 e HIB75 com 1 dia (a) e 28 dias (b). 62	
Figura 18 – Picos de alita e belita das pastas OPC(a), HIB75(b), HIB50(c), HIB25(d).	63
Figura 19 - Picos de portlandita das pastas OPC(a), HIB75(b), HIB50(c), HIB25(d). 64	

Figura 20 - Mini abatimento das pastas com 6% de ativador.	66
Figura 21 - Pasta HIB50-MT6 com 35 minutos de ensaio.	67
Figura 22 - Mini abatimento das pastas com 7% de ativador.	68
Figura 23 - Mini abatimento das pastas com 8% de ativador.	69
Figura 24 - Mini abatimento das pastas de escória álcali-ativadas sem cimento Portland.	69
Figura 25 - Mini abatimento da pasta SL-MT7.	70
Figura 26 - Mini abatimento das pastas com 25% de cimento Portland e 75% de escória.	71
Figura 27 – Mini abatimento das pastas com 50% de cimento Portland e 50% de escória.	71
Figura 28 - Mini abatimento das pastas com 75% de cimento Portland e 25% de escória.	72
Figura 29 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 6%.	73
Figura 30 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 7%.	73
Figura 31 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 8%.	75
Figura 32 - Viscosidade das pastas de escórias álcali-ativada.	75
Figura 33 - Viscosidade das pastas com 25% de cimento Portland e 75% de escória.	76
Figura 34 - Viscosidade das pastas com 50% de cimento Portland e 50% de escória.	77
Figura 35 - Viscosidade das pastas com 75% de cimento Portland e 25% de escória.	77
Figura 36 - Correlação dos resultados de viscosidade e espalhamento das pastas.	79
Figura 37 - Resumo da resistência à compressão das pastas.	81
Figura 38 - Resistência à compressão das pastas com 1 dia.	82
Figura 39 - Resistência à compressão das pastas com 3 dias.	83
Figura 40 - Resistência à compressão das pastas com 7 dias.	84

Figura 41 - Resistência à compressão das pastas aos 28 dias.....	85
Figura 42 - Evolução percentual da resistência à compressão das pastas em função da idade.	87
Figura 43 - Resumo do espalhamento das argamassas.	88
Figura 44 - Resumo da resistência à compressão das argamassas.	89
Figura 45 - Resistência à compressão das argamassas aos 3 dias.....	90
Figura 46 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias.....	91
Figura 47 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.....	93
Figura 48 – Abatimento dos concretos.....	96
Figura 49 - Resistência à compressão dos concretos aos 3 dias.....	98
Figura 50 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.....	99
Figura 51 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de pega dos diferentes tipos de cimentos do trabalho de Zhang (2020).....	29
Tabela 2 - Características físicas e químicas da escória de alto forno.....	38
Tabela 3 - Composição química do cimento CP V-ARI obtida por FRX.....	39
Tabela 4 - Características físicas e mecânicas do cimento CP IV-ARI MAX.....	39
Tabela 5 - Características técnicas do metassilicato de sódio.	40
Tabela 6 - Dados técnicos do aditivo superplastificante HYPEKEM 74M.	40
Tabela 7 - Traços das misturas sem aditivo.	44
Tabela 8 - Avaliação da consistência das pastas sem aditivo.....	44
Tabela 9 - Resultados das misturas com aditivo.	45
Tabela 10 - Proporções de material e nomenclatura das misturas.	46
Tabela 11 - Quantidade de material, em massa (g), utilizada nos ensaios do estado fresco das pastas.	49
Tabela 12 - Quantidade de material, em massa (g), utilizada na resistência à compressão das pastas.	49
Tabela 13 - Quantidade de material, em massa (g), para a resistência à compressão das argamassas.....	50
Tabela 14 - Quantidade de material, em massa (Kg), para produção dos concretos.....	51
Tabela 15 - Tempos de medição do ensaio de mini abatimento	54
Tabela 16 - Resultados de R^2 da correlação entre viscosidade e espalhamento das pastas.....	78
Tabela 17 - Características dos concretos no estado fresco.....	95
Tabela 18 - Resistência à compressão dos concretos	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OPC	Cimento Portland
SL-MT6	Cimentos com 100% de escória e teor de Na_2O de 6%
SL-MT7	Cimentos com 100% de escória e teor de Na_2O de 7%
SL-MT8	Cimentos com 100% de escória e teor de Na_2O de 8%
HIB25-MT6	Cimentos compostos por 25% de cimento Portland e 75% de escória e teor de Na_2O de 6%
HIB25-MT7	Cimentos compostos por 25% de cimento Portland, 75% de escória e teor de Na_2O de 7%
HIB25-MT8	Cimentos compostos por 25% de cimento Portland, 75% de escória e teor de Na_2O de 8%
HIB50-MT6	Cimentos compostos por 50% de cimento Portland, 50% de escória e teor de Na_2O de 6%
HIB50-MT7	Cimentos compostos por 50% de cimento Portland, 50% de escória e teor de Na_2O de 7%
HIB50-MT8	Cimentos compostos por 50% de cimento Portland, 50% de escória e teor de Na_2O de 8%
HIB75-MT6	Cimentos compostos por 75% de cimento Portland, 25% de escória e teor de Na_2O de 6%
HIB75-MT7	Cimentos compostos por 75% de cimento Portland, 25% de escória e teor de Na_2O de 7%
HIB75-MT8	Cimentos compostos por 75% de cimento Portland, 25% de escória e teor de Na_2O de 8%
HIB25's	Refere-se aos cimentos HIB25-MT6, HIB25-MT7 e HIB25-MT8
HIB50's	Refere-se aos cimentos HIB50-MT6, HIB50-MT7 e HIB50-MT8
HIB75's	Refere-se aos cimentos HIB75-MT6, HIB75-MT7 e HIB75-MT8

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	TIPOS DE ATIVADORES ALCALINOS.....	20
2.2	LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS	21
2.2.1	Escória de alto forno.....	22
2.3	EFEITOS DA ADIÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO EM MISTURAS COM CIMENTO PORTLAND.....	23
2.4	COMPÓSITO COMPOSTO POR CIMENTO PORTLAND E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	24
2.4.1	Misturas de cimento Portland e escória de alto-forno sem ativação alcalina	24
2.4.2	Ligantes compostos por cimento Portland, escória de alto forno e ativador alcalino	26
2.5	REAÇÕES ENTRE O SILICATO DE SÓDIO E HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	31
2.5.1	Silicato de sódio com o cimento Portland	32
2.5.2	Reações entre ativadores alcalinos.....	33
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
3.1	MATERIAIS	36
3.1.1	Caracterização dos materiais	36
3.1.2	Escória de alto forno.....	38
3.1.3	Cimento Portland.....	39
3.1.4	Metassilicato de Sódio.....	40
3.1.5	Aditivo superplastificante	40
3.1.6	Agregado miúdo	41
3.1.7	Agregado Graúdo	41
3.2	PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	42
3.2.1	Definição das variáveis.....	42
3.2.2	Dosagem	46
3.2.3	Produção	48
3.2.4	Moldagem.....	52

3.2.5	Cura.....	53
3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	53
3.3.1	Ensaio de consistência	53
3.3.2	Viscosidade no Copo Ford	55
3.3.3	Difração de raios-X.....	56
3.3.4	Ensaio de ultrassom	56
3.3.5	Resistência à compressão.....	56
3.3.6	Massa específica e teor de ar incorporado.....	57
3.3.7	Análise estatística.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	ANÁLISE EM PASTAS	58
4.1.1	Difração de Raios X.....	58
4.1.2	Ensaio de mini abatimento	65
4.1.3	Viscosidade no Copo Ford	72
4.1.4	Comparação entre os ensaios de viscosidade e de mini abatimento	78
4.1.5	Resistência à compressão das Pastas	80
4.2	ANÁLISE EM ARGAMASSA	88
4.2.1	Mesa de consistência	88
4.2.2	Resistência à compressão.....	89
4.3	ESCOLHA DO LIGANTE PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	93
4.3.1	Ensaio no estado fresco	93
4.3.2	Ensaio no estado endurecido	94
4.4	ANÁLISE EM CONCRETO.....	95
4.4.1	Características do concreto no estado fresco.....	95
4.4.2	Resistência à compressão.....	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1.1	Conclusões.....	100
5.1.2	Sugestões para trabalhos futuros	102
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS AOS 1, 3, 7 E 28 DIAS	110
	APÊNDICE B – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS AOS 3, 7 E 28 DIAS	112

APÊNDICE C – ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 1 DIA	114
APÊNDICE D - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 3 DIAS	115
APÊNDICE E - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 7 DIAS	116
APÊNDICE F - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 28 DIAS	117
APÊNDICE G - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 3 DIAS.....	118
APÊNDICE H - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 7 DIAS.....	119
APÊNDICE I - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 28 DIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos o contexto e as justificativas para a realização deste estudo, bem como os objetivos e a estrutura que compõem este trabalho.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho insere-se na linha de pesquisa dos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag), dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE, que enfatiza o reaproveitamento de resíduos e a utilização de subprodutos na construção civil.

No Brasil, as 93 fábricas de cimento produziram 63 milhões de toneladas de cimento Portland em 2022, embora tenham capacidade para produzir 94 milhões de toneladas por ano. A indústria cimenteira atualmente é responsável por cerca de 6% das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Apesar disso, o Brasil destaca-se como um dos países com menor emissão de dióxido de carbono na produção do cimento. Entre os anos de 1990 e 2021, o setor reduziu as emissões de 700 Kg CO₂/t_{cimento} para 572 Kg CO₂/t_{cimento}, enquanto a média mundial de emissão de gases poluentes é de 611 Kg CO₂/t_{cimento}. A redução das emissões dos poluentes é proveniente da utilização de combustíveis alternativos de maior eficiência energética e do crescente uso de matérias-primas, substituindo parcialmente o clínquer do cimento. No Brasil, o percentual de adições no cimento aumentou de 16% para 29% entre 1990 e 2021, fazendo do país o segundo maior utilizador de adições no mundo. As adições mais utilizadas nos cimentos são as escórias de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário e argilas calcinadas (SNIC, 2022).

Apesar da constante busca da indústria cimenteira por maior sustentabilidade, os níveis de emissões de dióxido de carbono ainda permanecem significativamente altos. Neste contexto, estão sendo conduzidas pesquisas para substituir o cimento Portland por outros aglomerantes de menor impacto ambiental. A escória de alto forno, um coproduto da indústria siderúrgica na fabricação do ferro gusa, é uma dessas alternativas devido às suas propriedades e produtos de hidratação semelhantes aos do cimento Portland. No Brasil, a produção de aço gera aproximadamente 600 kg de resíduos por tonelada de aço bruto, dos quais 40% são escória de alto forno. Entre 2015 e 2020, foram geradas cerca de 8 milhões de

toneladas de escória de alto forno por ano, sendo cerca de 90% destinada à indústria da construção civil (Aço Brasil, 2017, 2020).

A escória de alto forno álcali-ativada apresenta boa durabilidade, baixo calor de hidratação e alta resistência à compressão. No entanto, ainda existem alguns desafios a serem estudados para a sua utilização na construção civil, como a elevada retração e o rápido início de pega (Araújo Júnior, 2019; John, 1995; Lopes, 2023; Melo Neto, 2002, 2008; Queiroz, 2023). Uma nova alternativa para reduzir as emissões de poluentes na produção de cimento é a utilização de ligantes compostos por escória de alto-forno, cimento Portland e um ativador alcalino. A redução do impacto ambiental proporcionada por esses ligantes pode ser superior a 100% em comparação ao cimento Portland tradicional (Batuecas *et al.*, 2021). Este compósito apresenta menor retração em relação aos cimentos de escória álcali-ativada, mantendo resultados comparáveis aos do cimento Portland. A utilização de um ativador sólido contribui para reduzir ainda mais a retração do material, sem interferir na composição dos produtos de hidratação (Xue *et al.*, 2022).

As proporções de cimento Portland e escoria de alto forno, bem como o tipo e teor de alcalinidade do ativador, influenciam diretamente nas propriedades mecânicas das pastas, argamassas e concretos preparados com esses produtos. A depender da composição da mistura, os ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória podem apresentar resistência à compressão superior, inferior ou similar ao cimento Portland, entretanto apresentam resultados inferiores aos cimentos de escória álcali-ativada (Acevedo-Martinez *et al.*, 2012; Mohapatra; Pradhan, 2022; Xue *et al.*, 2022).

Pesquisas que utilizam ligantes compostos por cimento Portland, escória de alto-forno e metassilicato de sódio concentram-se em misturas com 10% a 30% de cimento Portland. Assim, esta pesquisa propõe a confecção de aglomerantes com diferentes proporções de cimento Portland e escória de alto-forno, analisando seus comportamentos tanto no estado fresco quanto no endurecido, com o objetivo de produzir um compósito de baixo impacto ambiental.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal produzir um concreto de baixo impacto ambiental utilizando cimento Portland, escória de alto forno e metassilicato de sódio.

Os objetivos específicos deste trabalho estão descritos a seguir:

- Avaliar as propriedades mineralógicas dos aglomerantes;
- Analisar o comportamento de pastas e argamassas de cimentos álcali-ativados nos estados fresco e endurecido, comparando-os com o cimento Portland;
- Investigar a influência da variação do teor de Na_2O do ativador alcalino nas propriedades do estado fresco e endurecido das pastas e argamassas;
- Selecionar um aglomerante álcali-ativado composto por cimento Portland e escória de alto-forno para a confecção de um concreto de baixo impacto ambiental;
- Analisar as propriedades do concreto de baixo impacto ambiental composto por cimento Portland e escória de alto-forno, comparando-o com o concreto de cimento Portland e com o concreto de escória álcali-ativada.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos, além das referências bibliográficas. No Capítulo 1 está escrito a introdução do trabalho, com a contextualização e justificativa do tema abordado nesta pesquisa, além dos objetivos e a estrutura do trabalho.

A revisão bibliográfica está delineada no Capítulo 2, o qual foi subdividido em cinco seções. Na primeira parte (2.1), são abordados os tipos de ativadores alcalinos e seu impacto nas propriedades dos cimentos. Na seção 2.2, é discutido o tema dos cimentos álcali-ativados, com foco na utilização da escória de alto forno. A terceira parte apresenta uma revisão de alguns estudos sobre a ativação de cimentos Portland. Na seção 2.4, é realizada uma compilação de pesquisas sobre ligantes álcali-ativados, compostos por cimento Portland, escória de alto forno e ativador alcalino. Por fim, na seção 2.5, é apresentada uma revisão da literatura sobre as reações entre os silicatos e o hidróxido de sódio.

O Capítulo 3 descreve e caracteriza os materiais empregados na pesquisa, além de detalhar o planejamento experimental adotado, incluindo a escolha e proporção de cada componente. Também são delineados os procedimentos de preparação e produção das amostras de pastas, argamassas e concretos, assim como os ensaios realizados. No Capítulo 4, os resultados obtidos experimentalmente

são expostos e discutidos. São analisados o comportamento físico, mecânico e microestrutural das pastas, argamassas e concretos produzidos com diferentes combinações de ligantes. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais, decorrente dos resultados alcançados no trabalho, além de sugestões para estudos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi elaborada com o objetivo de fornecer informações essenciais para o entendimento do tema. Este capítulo foi dividido em cinco seções: tipos de ativadores alcalinos (2.1); cimentos álcali-ativados (2.2); cimento Portland com ativação alcalina (2.3); compósito álcali-ativado (2.4); reações entre o silicato de sódio e o hidróxido de cálcio (2.5).

2.1 TIPOS DE ATIVADORES ALCALINOS

A ativação alcalina é um processo que envolve a formação de ligantes por meio da mistura de materiais ricos em sílica, alumina e/ou cálcio com soluções alcalinas. Os ativadores alcalinos comumente utilizados em materiais cimentícios são hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, silicato de sódio, metassilicato de sódio (Ribeiro, 2021). As propriedades mecânicas dos ligantes álcali-ativados produzidos com cimento Portland e escória de alto forno são influenciadas pelo tipo de ativador alcalino, pelo teor de Na_2O da solução alcalina, pelo módulo de sílica (M_s) e pela relação entre o ativador e o ligante (Mohapatra; Pradhan, 2022).

Pesquisas indicam que o ativador de silicato de sódio tende a proporcionar maiores valores de resistência à compressão em comparação com hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio, especialmente em argamassas de escória de alto forno (Melo Neto, 2008). Tanto o silicato de sódio quanto o metassilicato de sódio apresentam comportamentos semelhantes em termos de resistência mecânica. No entanto a utilização de silicato de sódio resulta em valores de resistência à compressão mais elevados em cimentos de escória de mesma idade (Lima *et al.*, 2022; Saedi; Behfarnia; Soltanian, 2019).

As diferentes composições dos ativadores alcalinos influenciam os valores de pH das pastas de escória. Ativadores com alta concentração de Na_2O aumentam o pH das pastas, enquanto uma alta concentração de sílica produz pastas com pH mais baixo. Portanto, o módulo de sílica dos ativadores alcalinos está inversamente relacionado ao pH da solução. A alteração nos tempos de pega, por sua vez, não está relacionada aos valores de pH, mas sim à quantidade de ativador utilizado na mistura. Uma maior adição de ativador alcalino à mistura resulta em tempos de pega mais curtos e elevadas propriedades mecânicas nas idades iniciais (Chang, 2003).

Estudos sobre o tempo de pega de pastas de escória produzidas com silicato

de sódio e metassilicato de sódio mostraram que a adição de silicato de sódio reduz os tempos de pega em comparação com o metassilicato de sódio. O silicato de sódio, desenvolve reações de hidratação mais rápidas, resultando em maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e, conseqüentemente, menores tempos de pega e maiores resistências à compressão. Por outro lado, os cimentos de escória ativados com cal hidratada apresentam uma taxa de reação de hidratação mais lenta, resultando em maiores tempos de pega e menores resistência à compressão. A resistência mecânica dos cimentos álcali-ativados está diretamente ligada à quantidade de ativador alcalino presente na mistura. A elevação do teor de Na_2O , quando utilizado o mesmo material como ativador, aumenta a resistência mecânica do cimento. No entanto, quantidades excessivas de ativador alcalino podem causar algumas manifestações patológicas como eflorescência e fissuras, podendo reduzir a resistência final do material (Jia; Wang; Luo, 2023; John, 1995; Lima *et al.*, 2022; Melo Neto, 2002; Saludung *et al.*, 2021).

2.2 LIGANTES ÁLCALI-ATIVADOS

Os ligantes álcali-ativados são materiais formados por meio das reações entre um precursor (aluminossilicatos) amorfo ou vítreo e um ativador alcalino. Quando endurecido, este material pode apresentar uma resistência mecânica superior à do cimento Portland. Os ligantes álcali-ativados são classificados em dois grupos: os com baixo teor de cálcio (geopolímeros) e os com alto teor de cálcio. A sílica ativa, o metacaulim e as cinzas volantes são alguns dos precursores utilizados para a fabricação de cimentos álcali-ativados que apresentam baixo teor de cálcio. O principal produto de hidratação formado por esses cimentos é o hidrato de aluminossilicato alcalino (N-A-S-H). O precursor rico em cálcio e silício mais utilizado na preparação de cimentos alcalinos é a escória de alto forno. Este precursor forma, como principal produto de hidratação, o silicato de cálcio hidratado com a presença de alumínio em sua estrutura (C-A-S-H), produto semelhante ao gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) produzido durante a hidratação do cimento Portland (Pacheco-Torgal, 2015).

O teor de cálcio nos materiais precursores é crucial para o desenvolvimento da resistência mecânica. Pastas, argamassas e concretos fabricados com precursores de alto teor de cálcio demonstram um desenvolvimento inicial de

resistência à compressão maior do que aqueles produzidos com precursores de baixo teor de cálcio (Mohapatra; Pradhan, 2022).

2.2.1 Escória de alto forno

A escória de alto forno, frequentemente referida simplesmente como escória ao longo deste trabalho, é um coproduto gerado pela indústria siderúrgica. Esse material é produzido durante a fabricação de ferro-gusa em altos fornos. De acordo com o Instituto Aço Brasil, a escória de alto forno, junto com a escória aciaria e outras escórias, constitui o principal subproduto da fabricação do aço, representando aproximadamente 70% do total de resíduos. Especificamente, a escória de alto forno representa mais de 40% do volume total desses resíduos. Na produção de uma tonelada de ferro-gusa, são gerados entre 200 e 300 kg de escória de alto forno (Aço Brasil, 2017, 2020).

Os principais compostos químicos da escória são sílica (SiO_2), óxido de cálcio (CaO) e alumina (Al_2O_3), podendo também conter menores quantidades de óxido de magnésio (MgO), óxido de ferro (FeO), óxido titânio (TiO_2), óxido de manganês (MnO_2) e sulfato (S). As propriedades essenciais para o uso da escória como cimento álcali-ativado incluem: ser granulado com conteúdo fase vítrea entre 85% e 95%, apresentar desordem estrutural, ser alcalina e ter superfície específica entre 400 e 600 m^2/Kg (ABNT, 1990; John, 1995; Pacheco-Torgal, 2015).

A reatividade da escória tende a aumentar à medida que a proporção da fase vítrea cresce. A presença de uma estrutura desordenada contribui para um maior grau de amorfismo do material, o que, por sua vez, eleva a reatividade. O índice de classificação da escória é calculado pela relação $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$. Quando o resultado dessa equação é superior a 1, a escória é classificada como básica; caso contrário, é considerada ácida. Escórias básicas apresentam reatividade mais elevada em comparação às ácidas, tornando-as mais adequadas para processos de ativação alcalina (Pacheco-Torgal, 2015).

A finura da escória segue o mesmo princípio observado em outros ligantes: quanto maior a superfície específica, maior será a taxa de dissolução, o que contribui para acelerar o processo de pega e aumentar a resistência mecânica do material. (Saedi *et al.* (2019) observaram que cimentos produzidos com escória com finura Blaine de 290 m^2/kg demonstraram tempos de pega mais longos e menor resistência à compressão em comparação com os de finura Blaine de 420 m^2/kg .

Os produtos gerados durante a hidratação da escória álcali-ativada podem variar conforme a composição química da escória e tipo de ativador utilizado. Contudo, o principal produto da hidratação da escória é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Além disso, outros produtos como hidrotalcita, hidrogranada, aluminato tetracálcico, monossulfoaluminato (AFm) e calcita podem ser formados (Lima *et al.*, 2022; Melo Neto, 2008).

A escória, quando em contato com água pura, hidrata-se de forma muito lenta, o que inviabiliza seu uso como aglomerante. Isso ocorre devido à formação de uma película sobre a superfície dos grãos anidros, impedindo a continuidade das reações. No entanto, quando a escória é misturada com água de pH elevado, sua velocidade de dissolução aumenta e produtos hidratados estáveis são formados. Nesse contexto, para que ocorra a dissolução da escória, é necessário um ataque hidroxílico, ou seja, um ataque por íons de OH^- , promovido por algum ativador alcalino (VOÏNOVITCH; DRON; ILLER, 1982 *apud* John, 1995).

2.3 EFEITOS DA ADIÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO EM MISTURAS COM CIMENTO PORTLAND

A avaliação dos efeitos da ativação alcalina em cimentos Portland tem sido objeto de estudo há bastante tempo. Na construção civil, duas das aplicações do silicato de sódio são como acelerador de pega dos cimentos Portland e como sistema de proteção de superfícies de concreto (Fonseca, 2021; Medeiros, 2008). Kazemian *et al.* (2010) analisaram o comportamento da viscosidade de pastas cimentícias nos primeiros segundos de mistura e observaram que a pasta sem ativador alcalino apresentava alta viscosidade inicial, que posteriormente diminuía e se mantinha estável. A adição de silicato de sódio com 1% de Na_2O causou oscilações na viscosidade da pasta. Já a adição de silicato de sódio com 30% de Na_2O resultou em uma baixa viscosidade nos primeiros 20 segundos, seguida por um aumento acentuado da viscosidade (Kazemian *et al.*, 2010). Em testes de tempo de pega com pastas com relação água/cimento (a/c) de 0,50, a adição de silicato de sódio com 7,5% de Na_2O reduziu os tempos de pega em 46%. Em pastas com relação a/c de 0,40, a redução foi ainda maior, chegando a 53%. (Fonseca, 2021). O menor tempo de pega dos cimentos Portland álcali-ativado é causado pela rápida interação entre o cimento Portland e o silicato de sódio, levando à formação de maiores quantidades de produtos hidratados e resultando em um aumento

acentuado da viscosidade das misturas. O maior tempo de pega nas misturas com maior relação a/c ocorre porque uma maior quantidade de água facilita a dispersão das partículas, reduzindo a intensidade das reações (Chang, 2003; Fonseca, 2021; Guo *et al.*, 2019; Kazemian *et al.*, 2010; Lianzhen *et al.*, 2023; Witzleben, 2020).

A velocidade de reação dos cimentos Portland álcali-ativados está diretamente relacionada com a relação cimento/silicato de sódio (C/S). Uma diminuição dessa relação acelera o enrijecimento da mistura, enquanto uma maior relação C/S aumenta o tempo de trabalhabilidade da mistura (Lianzhen *et al.*, 2023). Witzleben (2020), observou que teores de Na₂O da ativação alcalina entre 2% e 10% reduziram significativamente os valores de resistência à flexão e resistência à compressão das pastas de cimentos Portland álcali-ativados com silicato de sódio. Fonseca (2021) destacou que o uso de silicato de sódio com teores de Na₂O de 2,5%, 5% e 7,5% ocasionaram a perda de resistência das pastas após 28 dias.

Brykov *et al.* (2002) e Brykov; Danilov; Larichkov (2006) observaram que o módulo de sílica ($Ms=SiO_2/Na_2O$) dos ativados alcalinos está diretamente relacionado com o tempo de pega e ao pH da solução dos poros da pasta de cimento. Em pastas de cimento Portland álcali-ativadas, o tempo de pega é reduzido à medida que o Ms aumenta. Pastas de cimento Portland álcali-ativados com alto módulo de sílica apresentaram um pH mais baixo do que o da pasta de cimento Portland. Por outro lado, a adição de um ativador com baixo Ms, como o metassilicato de sódio, elevou o pH da pasta. A adição de 5% de metassilicato de sódio aumentou o pH da mistura para 13,5, enquanto a utilização de 5% de silicato de sódio com Ms de 2,0 e 2,8 produziu pastas com pH de 12,3 e 11,4, respectivamente (Brykov *et al.*; 2002 e 2006).

2.4 COMPÓSITO COMPOSTO POR CIMENTO PORTLAND E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Nesta seção, serão discutidas pesquisas que exploram o uso de misturas compostas por cimento Portland e escória de alto-forno.

2.4.1 Misturas de cimento Portland e escória de alto-forno sem ativação alcalina

As misturas de cimento Portland e escória de alto-forno, quando feitas sem ativadores alcalinos, apresentam uma resistência mecânica reduzida à medida que a

quantidade de escória aumenta. Isso ocorre porque a escória necessita de um ativador eficaz para acelerar seu processo de hidratação. Embora o cimento Portland seja considerado um ativador, ele não desempenha essa função de maneira eficiente. Como resultado, essas misturas mostram baixos valores de resistência à compressão nas primeiras idades (Acevedo-Martinez *et al.*, 2012; Elahi *et al.*, 2012). Acevedo-Martinez *et al.* (2012) e Elahi *et al.* (2012), observaram que a redução da resistência à compressão em pastas compostas por cimento Portland e escória é mais perceptível nas primeiras idades. Com o passar do tempo, os resultados resistência à compressão das argamassas produzidas com cimento Portland e escória de alto forno se aproximou dos valores de resistência da argamassa feita apenas com cimento Portland, independentemente da quantidade de escória adicionada à mistura (Acevedo-Martinez; Gomez-Zamorano; Escalante-Garcia, 2012; Lizarazo-Marriaga; Claisse; Ganjian, 2011; Puertas *et al.*, 2013; Sajedi; Razak, 2010).

Estudos com argamassas produzidas a partir de cimento Portland e escória de alto-forno, com quantidades de escória variando entre 40% e 50%, mostraram uma redução na resistência à compressão em comparação com a argamassa de cimento Portland. A adição de ativadores, como hidróxido de potássio, hidróxido de sódio e silicato de sódio, resultou em uma diminuição ainda maior na resistência à compressão dessas argamassas. Em particular, nas argamassas contendo silicato de sódio, a resistência à compressão diminuiu à medida que o teor de Na_2O na mistura aumentava. (Puertas *et al.*, 2013; Sajedi; Razak, 2010).

Ensaio de termogravimetria (TG) conduzidos em ligantes compostos por cimento Portland e escória permitiram quantificar o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente nas pastas com composições entre 30% e 50% de cimento Portland em diferentes estágios de maturação. Após 91 dias, observou-se uma redução nos níveis de hidróxido de cálcio nessas pastas em comparação com os resultados obtidos após 3 dias. Por outro lado, as pastas de cimento Portland evidenciaram quantidades mais significativas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com um aumento progressivo desses níveis ao longo do tempo. A diminuição dos teores de hidróxido de cálcio nos ligantes compostos por cimento Portland e escória pode estar associada à redução da proporção de cimento Portland na mistura, bem como às reações entre os materiais suplementares e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Elahi *et al.*, 2012).

2.4.2 Ligantes compostos por cimento Portland, escória de alto forno e ativador alcalino

Nesta seção, serão apresentadas pesquisas sobre ligantes compostos por cimento Portland, escória de alto-forno e ativadores alcalinos, abordando suas propriedades no estado fresco, endurecido e microestrutural, bem como o impacto ambiental associado a esses materiais.

2.4.2.1 Impacto ambiental

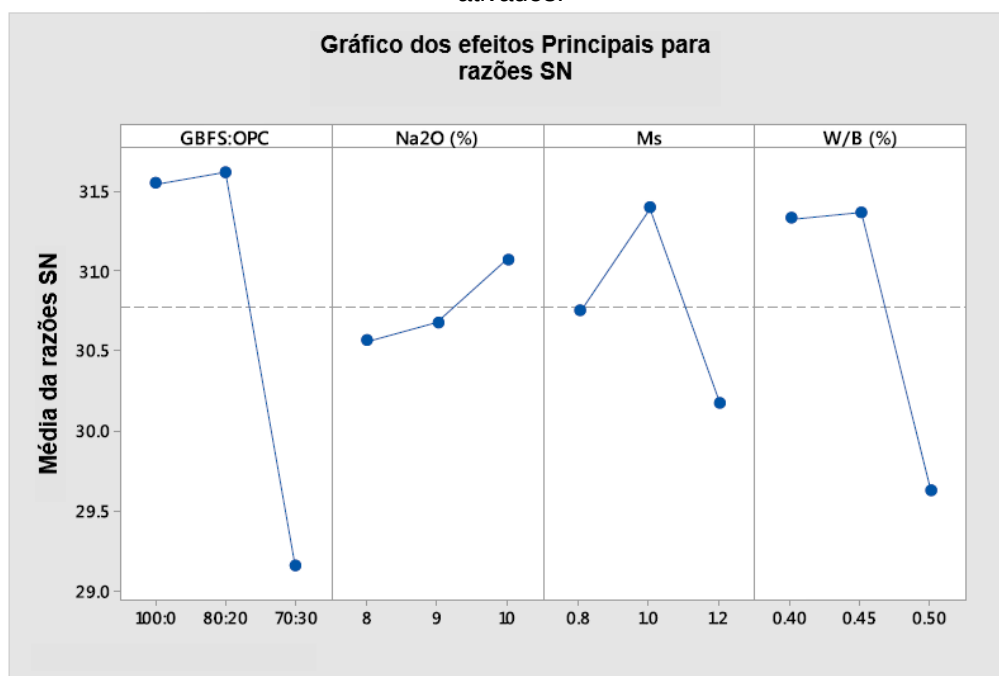
Os ligantes álcali-ativados apresentam um menor impacto ambiental em comparação ao cimento Portland. O cimento Portland é o componente de contribuição mais significativa nas emissões de dióxido de carbono dos concretos produzidos com cimento Portland. Enquanto em concretos álcali-ativados sem a presença de cimento Portland, o componente de maior contribuição no impacto ambiental são os ativadores alcalinos (Batuecas *et al.*, 2021; Robayo-Salazar *et al.*, 2018; Turner e Collins, 2013). Turner e Collins (2013) compararam um concreto produzido com cimento Portland e outro com cinzas volantes, como precursor, e silicato de sódio e hidróxido de sódio, como ativadores alcalinos e observou que os ativadores alcalinos apresentaram uma contribuição de 201 kg CO₂-e/m³ enquanto o cimento Portland exibiu 269 kg.

Batuecas *et al.* (2021) mostraram que a substituição parcial ou total do cimento Portland por materiais suplementares pode reduzir os impactos ambientais em mais de 100%. Em estudo comparativo, foram analisadas argamassas produzidas com aglomerante de cimento Portland, aglomerante de escória ativada com silicato de sódio e aglomerante composto por 80% de escória, 20% de cimento Portland e 5% de Na₂SO₄, os resultados mostraram que a argamassa de escória álcali-ativada apresentou a menor pegada de carbono com -406,02 kg CO₂ eq/m³, uma melhoria de 173% em relação ao cimento Portland. Além disso, o ligante composto por escória e cimento Portland também apresentou benefícios ambientais significativos, alcançando aproximadamente -253 kg CO₂ eq/m³, uma redução de 143% no impacto ambiental comparado ao cimento Portland. Esses resultados indicam que impactos ambientais negativos representam benefícios ambientais substanciais, destacando o potencial dos materiais alternativos na promoção de práticas de construção mais sustentáveis (Batuecas *et al.*, 2021).

2.4.2.2 Propriedades no estado endurecido

Em estudo sobre ligantes compostos por cimento Portland, escória de alto forno e silicato de sódio, Amer *et al.* (2021) identificam que a composição do ligante, a relação água/ligante (w/b), o módulo de sílica e o teor de Na_2O são os principais fatores que afetam a resistência à compressão, respectivamente. No entanto, o nível de importância de cada uma dessas variáveis pode modificar dependendo das condições específicas de cada pesquisa. É essencial compreender como cada componente interfere no comportamento dos cimentos.

Figura 1 – A importância dos principais fatores na resistência à compressão dos ligantes álcali-ativados.



Fonte: (Amer *et al.*, 2021).

Apesar de ter um pequeno grau de importância no trabalho de Amer *et al.* (2021), o aumento do teor de Na_2O elevou os resultados de resistência à compressão, como ilustrado na Figura 1. Acevedo-Martinez *et al.* (2012) produziu argamassas com diferentes proporções de cimento Portland e escória adicionando silicato de sódio nos teores de Na_2O entre 0% e 10% e observou que a elevação teor de Na_2O aumentou significativamente os valores de resistência à compressão. Os resultados de Amer *et al.* (2021) mostram que a interferência na resistência à compressão é mais acentuada em ligantes compostos com 30% de cimento Portland. Os cimentos com proporção de escória entre 100% e 80% apresentaram resultados de fator de importância semelhantes, mas a adição de 30% de cimento

Portland reduziu a resistência à compressão, aumentando o grau de importância dessa variável.

Amer *et al.*, (2021) e Zhang *et al.*, (2020) observaram que as misturas de cimento Portland, escória e silicato de sódio, composto com até 30% de cimento Portland apresentaram resistência mecânica superior ao cimento Portland e ao cimento de escória álcali-ativada. No entanto, no trabalho de Zhang *et al.*, (2020) não foi apresentada as condições de cura nem o módulo de sílica utilizado. Já na pesquisa de Amer *et al.*, (2021) o módulo de sílica e do teor de Na_2O do ativador alcalino utilizado não proporcionou ao cimento de escória álcali-ativada resistências à compressão elevadas com 1 dia de hidratação. Nas primeiras 24 horas, a resistência à compressão do cimento de escória álcali-ativada alcançou apenas 6,4 Mpa, enquanto outros estudos indicam que a resistência à compressão da escória álcali-ativada pode ultrapassar 20 MPa (John, 1995; Lopes, 2023; Melo Neto, 2002, 2008; Queiroz, 2023).

Um estudo realizado com silicato de sódio ($M_s = 1,5$) mostrou que as argamassas com diferentes proporções de cimento Portland e escória apresentaram resistência à compressão mais elevadas à medida que a quantidade de escória e o teor de Na_2O aumentaram. Ligantes compostos com 80% de escória e 20% de cimento Portland ativados com teores de Na_2O de 6% e 10% apresentaram resistência mecânica superior ao do cimento Portland (Acevedo-Martinez *et al.* (2012). Puertas *et al.* (2011) concluíram que a resistência à compressão das argamassas compostas por cimento Portland e escória depende diretamente da quantidade de escória presente na mistura. O ligante composto por 70% de escória, 30% de cimento Portland e teor de Na_2O de 5% apresentou resistência superior ao cimento Portland. Por outro lado, proporções de cimento Portland maiores do que 50% reduziram os valores de resistência à compressão (Acevedo-Martinez *et al.* 2012; Puertas *et al.*, 2011). Ligantes álcali-ativados compostos com teores de cimento Portland acima de 50% apresentaram valores de resistência à compressão inferiores às argamassas com mesma relação cimento Portland/Escória e sem ativador alcalino e às argamassas de cimento Portland. Os ligantes álcali-ativados compostos com 70% de cimento Portland mostraram valores de resistência à compressão semelhantes, independente do teor de álcalis da mistura, e exibiram resistência à compressão nas primeiras 24 horas inferior a 5 MPa (Acevedo-Martinez *et al.* 2012; Puertas *et al.*, 2011).

Em um estudo realizado com ligantes contendo uma proporção de 25/75 de Cimento Portland/escória e diferentes teores de Na_2O (3%, 4% e 5%), foi observado que a resistência à compressão das misturas aumentou à medida que se elevou a quantidade de ativador alcalino. No entanto, esses resultados foram inferiores aos das pastas de cimento Portland após 7 e 28 dias. Por outro lado, com 1 dia, as pastas com 4% e 5% de Na_2O apresentaram valores de resistência mecânica similares ou superiores aos do cimento Portland (Xue; Zhang; Wang, 2021). A maioria dos estudos sobre ligantes álcali-ativados contendo cimento Portland e escória emprega composições que varia de 10% e 30% de cimentos Portland e de 70% e 90% de escória de alto forno. Pesquisadores identificaram que a proporção de 20% de cimento Portland e 80% de escória é considerada ideal, uma vez que resulta nos maiores valores de resistência à compressão (Acevedo-Martinez; Gomez-Zamorano; Escalante-Garcia, 2012; Amer *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020).

2.4.2.3 Propriedades no estado fresco

No estudo de Amer *et al.* (2021) sobre ligante álcali-ativado contendo até 30% de cimento Portland, foi observado que o teor de cimento Portland foi principal fator para a diminuição da fluidez das misturas. Constatou-se que uma menor quantidade de cimento resultava em concretos com maior trabalhabilidade. Outro fator importante na trabalhabilidade foi a relação água/cimento, a alta relação a/c aumentou o tempo de pega e o espalhamento do material. Por outro lado, o módulo de sílica e o teor de Na_2O apresentaram uma correlação fraca com a trabalhabilidade do material. Zhang *et al.* (2020) também investigaram ligantes álcali-ativados com adições de até 30% de cimento Portland. Os resultados indicaram que o tempo de início de pega desses ligantes era menor em comparação com as pastas de cimento Portland e as pastas de cimento de escória álcali-ativada, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempos de pega dos diferentes tipos de cimentos do trabalho de Zhang (2020).

Tempo de pega	100% Cimento Portland	100% Escória	70% escória 30% cimento	80% escória 20% cimento	90% escória 10% cimento
Inicial	3h 10 min	1h 20 min	30 min	35 min	55 min
Final	3h 50 min	1h 40 min	40 min	60 min	1h 10 min

Fonte: adaptado de Zhang (2020).

Contrariando as conclusões de Amer *et al.* (2021), Xue *et al.* (2021) mostraram que o aumento do teor de Na_2O tem um efeito significativo na redução dos tempos de início e fim de pega de misturas contendo cimento Portland e escória. A razão para esta redução é que o aumento do teor de álcalis eleva a quantidade de silicato de sódio e NaOH na mistura. O aumento do silicato de sódio resulta em uma maior concentração de $[\text{SiO}_4]^{4-}$, o que acelera a reação, enquanto a maior concentração de NaOH promove a dissolução do Ca^{2+} presente na escória, promovendo uma reação mais rápida.

2.4.2.4 Microestrutura

Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em ligantes álcali-ativados com teores de cimento Portland entre 20% e 70%, revelaram que nas pastas com 20% de cimento Portland raramente foram encontrados grãos anidros de cimento Portland, indicando que foram totalmente hidratados. Por outro lado, nos ligantes com 70% de cimento Portland, foram observados grãos de cimento Portland parcialmente hidratados, sugerindo uma inibição ou retardo no desenvolvimento da hidratação (Acevedo-Martinez; Gomez-Zamorano; Escalante-Garcia, 2012).

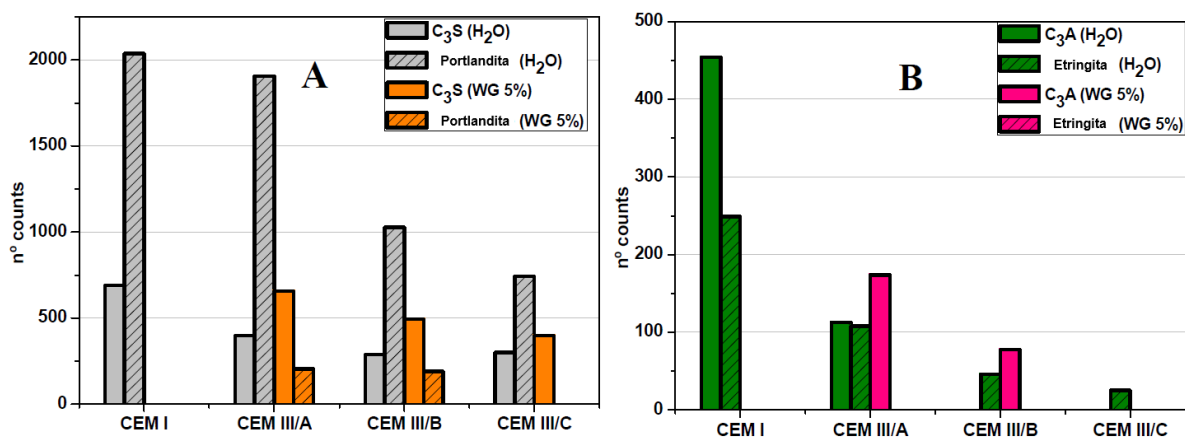
Além disso, os ligantes com cimento Portland e escória álcali-ativados apresentam produtos de hidratação menos homogêneos em comparação com os cimentos de escória ativada por álcalis. A maior quantidade de cimento Portland na mistura aumentou significativamente o nível de fissuração das pastas e o maior teor de escória diminuiu a porosidade desses ligantes (Amer *et al.*, 2021; Puertas *et al.*, 2013). Os resultados de calorimetria mostraram que a pasta álcali-ativada composta por 50% de cimento Portland apresentou baixo calor de hidratação, enquanto as pastas com teores de cimento Portland de 10% e 30% apresentaram maiores calores de hidratação, respectivamente (Puertas *et al.*, 2013).

As pastas ativadas por silicato de sódio formam um gel C-A-S-H como consequência da ativação da escória, cuja composição e estrutura o distinguem dos géis C-S-H formados nas pastas de cimento Portland. Os géis C-A-S-H das pastas de escória são caracterizados por baixa relação Ca/Si e comprimentos de cadeia mais longos. Nas misturas de cimento Portland e escória a composição do gel pode variar dependendo da proporção de cada material na mistura e do tipo de ativador alcalino. A relação Ca/Si do gel diminui com a presença de silicato de sódio e elevadas quantidades de escória na mistura (Puertas *et al.*, 2013).

Resultados de difração de raios-x mostraram que a presença de silicato de sódio nos ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória retardou ou inibiu as reações de hidratação do cimento Portland. Puertas et al (2011), analisaram os picos da alita, portlandita, aluminato tricálcico e etringita presentes no cimento Portland (CEM I), no ligante com 50% de cimento Portland e 50% de escória (CEM III/A), no ligante com 30% de cimento Portland e 70% de escória (CEM III/B) e no ligante com 10% de cimento Portland e 90% de escória (CEM III/C), com e sem a presença de silicato de sódio, conforme ilustrado na Figura 2 (Puertas et al., 2013).

Nos ligantes de mesma composição, observou-se que os picos da fase alita nas misturas com água [$C_3S (H_2O)$] foram menores do que as amostras com silicato de sódio (WG 5%). Além disso, a quantidade de portlandita diminuiu com a adição do ativador alcalino à mistura. A etringita foi identificada apenas nas pastas misturadas com água, enquanto nas pastas preparadas com silicato de sódio não foi detectada sua presença (Puertas et al., 2013; Xue; Zhang; Wang, 2021).

Figura 2 – Picos de alita e portlandita (A) e C_3A e etringita (B) em pastas com 7 dias.



Fonte: Puertas et al., 2013.

2.5 REAÇÕES ENTRE O SILICATO DE SÓDIO E HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

A adição de silicato de sódio interfere significativamente nos produtos anidros e hidratados do cimento Portland, como visto na seção anterior. O entendimento dessas reações pode ajudar a entender os comportamentos apresentados pelos ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória de alto forno.

Entretanto, os mecanismos exatos das reações que ocorrem entre os silicatos, o cimento Portland e a escória de alto forno ainda não foram totalmente esclarecidos pela literatura. Nesta seção, serão apresentados diversos trabalhos que

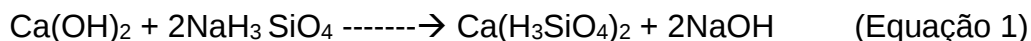
discorrem sobre as reações do silicato de sódio com o cimento Portland (seção 2.5.1) e com a escória de alto forno na presença de outros ativadores (seção 2.5.2).

2.5.1 Silicato de sódio com o cimento Portland

Os mecanismos que envolvem as reações entre o metassilicato de sódio e o cimento Portland durante os períodos de hidratação, cura e endurecimento ainda não são totalmente compreendidos. Diversos estudos sobre o microencapsulamento de silicato de sódio para a autocura de fissuras em concretos mencionam que o silicato de sódio reage com a portlandita, formada pelas reações de hidratação do cimento, gerando um produto de hidratação semelhante ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Fonseca, 2021; Giannaros; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016; Kanellopoulos; Qureshi; Al-Tabbaa, 2015; Pelletier *et al.*, 2011).

Difratogramas de raios-x realizados em pastas de cimento com e sem microcápsula de silicato de sódio mostraram que, após 7 dias da quebra das cápsulas, os picos de hidróxido de cálcio diminuíram em comparação com as pastas sem microcápsulas, Figura 3 (Giannaros; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016). Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Fonseca (2021), onde a adição de silicato de sódio reduziu os picos do hidróxido de sódio da pasta de cimento Portland. O pico de C-S-H apresentou maiores intensidades nas adições de 2,5%, 5% e 7,5%, respectivamente.

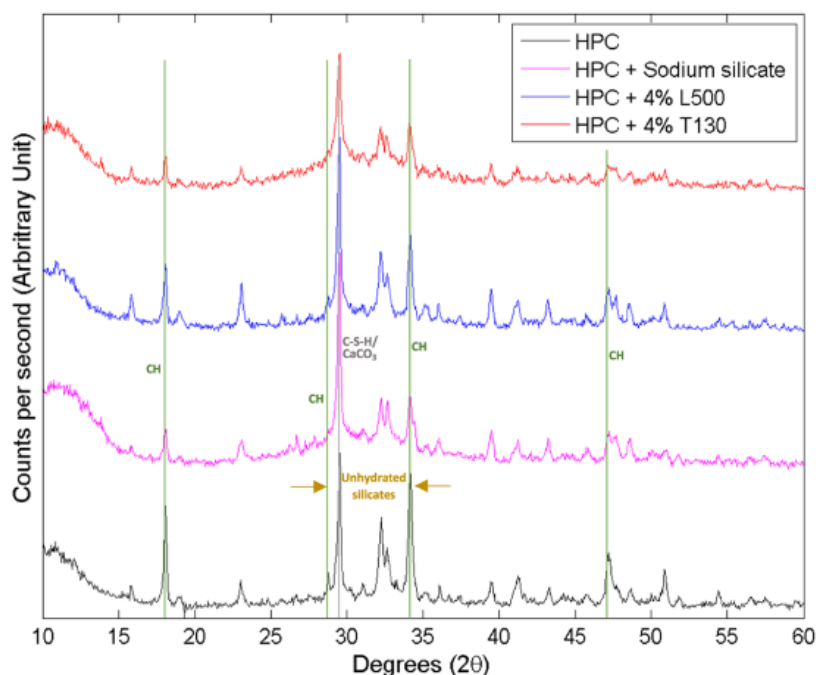
O produto de hidratação formado das reações entre o ativador alcalino e o hidróxido de cálcio ainda não muito bem esclarecido na literatura. Supõe-se que o produto dessa reação é similar ou igual ao C-S-H do cimento Portland. Este produto teria um papel importante na resistência inicial da pasta, entretanto, não apresentaria grande força de atração entre suas moléculas (força de van der Waals) e seria, eventualmente, instável (Giannaros; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016; Pelletier *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2019).



Brykov *et al.* (2002) e Thompson *et al.* (1997) afirmam que a interação entre o metassilicato de sódio e a portlandita resulta na formação de géis de silicatos de cálcio pouco solúveis e hidróxido de sódio, conforme representado pela Equação 1. A formação de NaOH contribui para a elevação dos valores de pH em comparação

com as pastas de cimento Portland não ativadas com metassilicato de sódio, estabelecendo um ambiente altamente alcalino de forma rápida.

Figura 3 - DRX das pastas de cimento (HPC), HPC com adição de silicato de sódio (linha rosa), HPC com adição de 4% de microcápsulas L500 (linha azul) e HPC com adição de 4% de microcápsulas T130.



Fonte: Giannaros; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016.

2.5.2 Reações entre ativadores alcalinos

John (1995) abordou que a combinação de água de amassamento com ativadores de silicato de sódio e hidróxido de cálcio é uma prática convencional para a produção do gel C-S-H para fins de pesquisa. A composição desse gel está correlacionada com as concentrações de Ca(OH)_2 , Na_2O e SiO_2 presentes na mistura. O aumento na concentração de Na_2O resulta em uma redução na proporção de Cálcio / Sílica (C/S) do gel (Kalousek, 1944).

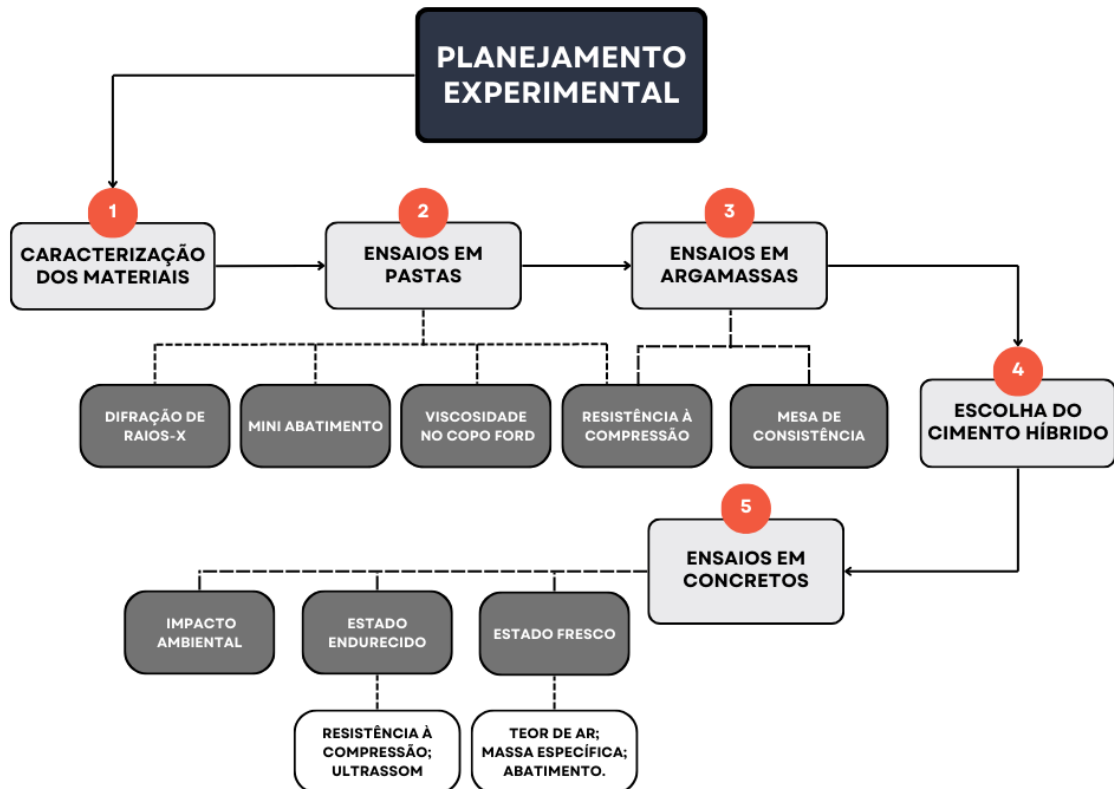
Nos cimentos de escória ativados por álcalis, o fator determinante da perda de trabalhabilidade é o equilíbrio entre dissolução e precipitação, sendo que a precipitação de compostos hidratados é responsável por essa perda. A presença de SiO_2 é o principal influenciador desse equilíbrio. Em situações onde não há presença de Ca(OH)_2 , uma mistura com pH elevado e alta concentração de SiO_2 apresenta uma rápida perda de trabalhabilidade. Em contrapartida, em pastas com pH baixo, mesmo com teor elevado de SiO_2 , os grãos se dissolvem lentamente, o que contribui para a estabilidade do sistema e na manutenção da trabalhabilidade (John, 1995).

A adição de cal hidratada ao cimento de escória ativado desencadeia uma reação de hidratação entre o Ca(OH)_2 e o SiO_2 , resultando na formação do gel N-C-S-H, que reduz a consistência inicial das argamassas. Esse gel se deposita sobre os grãos anidros de escória, formando uma barreira que impede a dissolução da escória. O hidróxido de cálcio pode influenciar na perda de trabalhabilidade de outras duas maneiras. Primeiramente, a presença de Na_2O reduz a solubilidade do Ca(OH)_2 , e para que ocorra a dissolução do Ca^{++} da escória, é necessário que a cal adicionada seja consumida pela reação com o SiO_2 . Em misturas com elevadas concentrações de Ca(OH)_2 e SiO_2 observa-se um encurtamento no tempo que o gel leva para incorporar todo o sistema água-sólidos, reduzindo a trabalhabilidade dramaticamente (John, 1995).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi elaborado de acordo com o objetivo geral e específico definidos para esta pesquisa. A Figura 4 exibe o resumo do planejamento experimental em forma de fluxograma, apresentando cada etapa do desenvolvimento da pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: O Autor (2024)

O planejamento experimental dividiu-se em 5 etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais como o cimento Portland, a escória de alto forno, o metassilicato de sódio e os agregados graúdo e miúdo, bem como estudos preliminares para a definição do teor de aditivo. Na segunda etapa foram realizados estudos em pastas, com o intuito de analisar o comportamento dos ligantes no estado fresco, através dos ensaios de viscosidade do Copo Ford, mini cone e no estado endurecido, com a realização do ensaio de resistência à compressão. Também foram analisadas as características microestruturais dos materiais, com o ensaio de difração de raios-X. Os resultados desta etapa estão expostos no Capítulo 4.1.

Em seguida, foi realizado o estudo em argamassas, nas quais foram elaboradas misturas com as mesmas proporções estabelecidas para as pastas, com a adição de areia a mistura. Os ensaios realizados abrangeram o estado fresco, avaliado por meio da mesa de consistência (Flow Table), e o estado endurecido, no qual optou-se por realizar o ensaio de resistência à compressão, expostos na seção 4.2. Na quarta etapa, foi escolhido o ligante álcali-ativado composto com cimento Portland e escória que apresentou os melhores resultados para a confecção do concreto comparando os resultados dos ensaios realizados em pastas e argamassas, além de analisar os impactos ambientais causados pela produção de cada cimento.

Por fim, foram produzidos concretos de Cimento Portland, de cimento de escória álcali-ativada e do ligante formado com cimento Portland e escória. Os resultados foram comparados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, foram realizados ensaios para determinar a massa específica, o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico e a consistência pelo abatimento do tronco de cone. No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão e de velocidade de pulso ultrassônico. Além dessas análises, foram investigados os impactos ambientais causados pela produção dos concretos, estabelecendo uma relação entre as emissões de CO₂ e a resistência mecânica dos concretos.

3.1 MATERIAIS

Nesta seção será apresentada uma descrição detalhada da caracterização dos materiais utilizados nesta dissertação, incluindo o cimento Portland, a escória de alto forno, o metassilicato de sódio e os agregados miúdo e gráudo.

3.1.1 Caracterização dos materiais

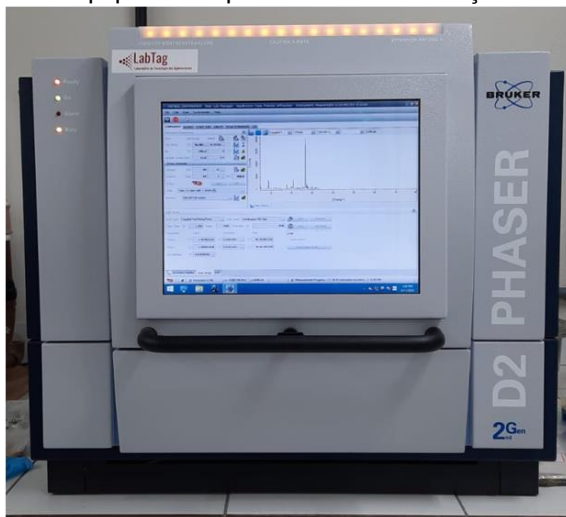
Neste programa experimental, as amostras anidras foram caracterizadas por meio dos ensaios de difração de raios-X, massa específica e método Blaine.

3.1.1.1 Difração de raios-X

Neste estudo, foi utilizado a análise de difração de raio-X para a caracterização qualitativa dos compostos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) e no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) localizados na UFPE, utilizando um difratômetro da Bruker modelo D2 Phaser.

Os parâmetros do ensaio foram: intervalo de varredura (2θ) de 5 a 80° ; passo angular = $0,05^\circ$; tempo por passo de 0,575 segundos; intensidade da corrente de 10 mA; tensão do equipamento de 30 kV. O tubo do feixe era de cobre, emitindo um comprimento de onda de $1,54 \text{ \AA}$.

Figura 5 - Equipamento para análise da difração de raios-X.



Fonte: O Autor (2024)

Para algumas técnicas, como DRX, a interrupção da hidratação não é estritamente necessária, mas é comumente realizada. Esse procedimento permite o armazenamento da amostra e diminui a umidade relativa, minimizando a carbonatação. O principal objetivo da interrupção da hidratação é remover a água presente nos poros sem alterar os produtos de hidratação e a microestrutura da amostra (Scrivener; Snellings; Lothenbach, 2016).

O procedimento adotado para a interrupção da hidratação nesta pesquisa foi a liofilização. Primeiramente, a amostra foi imersa diretamente em nitrogênio líquido e, em seguida, levada ao liofilizador, onde permaneceu por 24 horas. Após esses processos, as amostras foram peneiradas na malha nº 200 ($75 \mu\text{m}$) e o material passante foi colocado no porta amostras, para posteriormente ser inserido no difratômetro.

3.1.1.2 Massa específica

Os ensaios de determinação da massa específica dos aglomerantes anidros foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 16605 (2017).

3.1.1.3 Método de Blaine

Os ensaios para a determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar, método de Blaine, foram realizados de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 16372 (2015).

3.1.1.4 Caracterização dos agregados

O ensaio para a determinação da composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdo e graúdo foi realizado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 17054 (2022).

3.1.2 Escória de alto forno

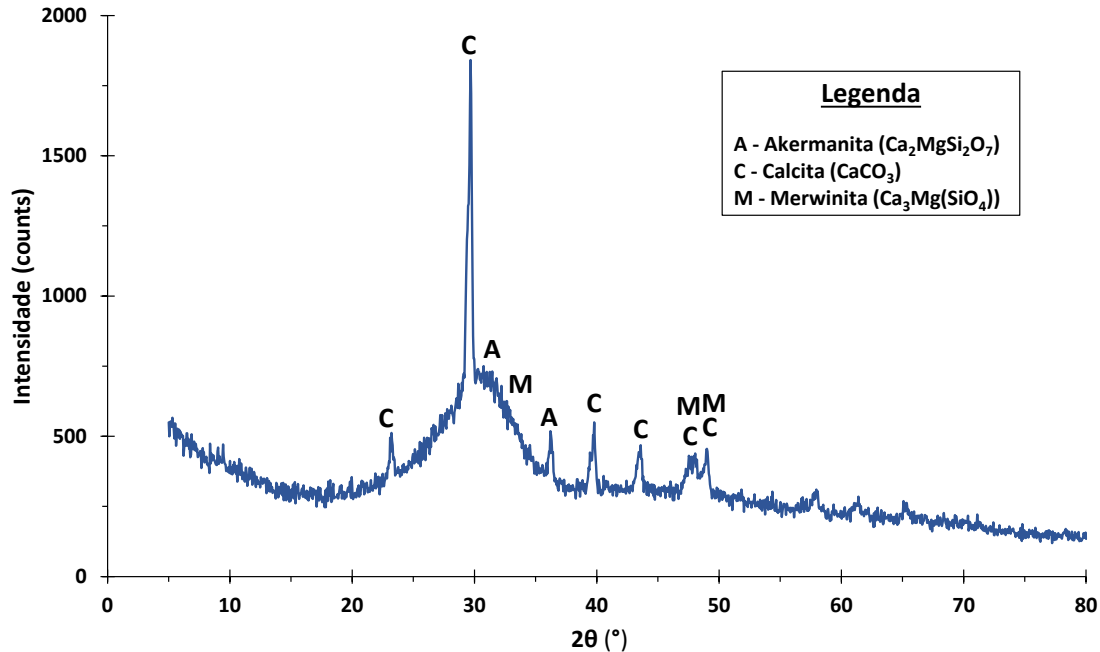
A escória de alto forno moída foi fornecida pela empresa Cimento Mizu S/A. Este mesmo lote de escória foi utilizado em outros trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, portanto as características físicas e químicas do material, exibida na Tabela 2, já foram expostas nos trabalhos de Lima *et al.* (2022). Foi realizado neste trabalho a caracterização mineralógica da escória de alto forno, exibida na Figura 6. A escória utilizada é considerada básica, exibindo uma relação $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ igual à 1,27, visto que relações $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ com valores > 1 as escórias são consideradas básicas (Pacheco-Torgal, 2015). Por meio do método de cálculo de áreas, utilizando o software Origin v 8.0, a quantidade de material amorfo calculado foi 70,2%, enquanto a fase cristalina foi 29,8% (Lima *et al.*, 2022).

Tabela 2 - Características físicas e químicas da escória de alto forno.

Óxidos	Média (%)	Massa específica
CaO	42,00	2,79 g/cm ³
SiO ₂	37,73	Finura Blaine
Al ₂ O ₃	10,91	(cm ² /g)
Fe ₂ O ₃	0,38	4.647
MgO	6,04	Índice de finura -
K ₂ O	0,46	#200
Na ₂ O	0,40	0,07 %*
TiO ₂	0,52	Resíduo na peneira
SO ₃	0,33	#325
		1,33 %*
		Perda ao fogo
		1,24

Fonte: Adaptado de (Lima *et al.*, 2022) e *Cimento Mizu (2018).

Figura 6 - Difratoograma de raios-X da escória de alto forno anidra.



Fonte: O autor (2024).

3.1.3 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI MAX, fornecido pela empresa Cimento Nacional. As características físicas e composição química do cimento Portland estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição química do cimento CP V-ARI obtida por FRX

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CuO	MnO	SO ₃	NiO	TiO ₂	PF*
CP V	15,58	4,74	2,67	60,14	0,67	1,62	1,32	0,19	0,01	N.D.	5,06	0,01	0,34	7,46

Fonte: O autor (2023)

*PF: Perda ao fogo

Tabela 4 - Características físicas e mecânicas do cimento CP IV-ARI MAX.

Ensaio		Resultados	Limites NBR
Finura Blaine (cm²/g)		4.422	N.A.
Massa específica (g/cm³)		3,10	N.A.
Perda ao fogo		2,77	N.A.
Início de pega (min)		165	≥ 60
Fim de pega (min)		225	≤ 600
Resíduo insolúvel		0,99	< 3,5
Expansibilidade a quente (mm)		0,2	≤ 5
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	29,6	≥ 14,0
	3 dias	41,7	≥ 24,0
	7 dias	47,3	≥ 34,0
	28 dias	54,3	N.A.

Fonte: Cimento Nacional (2021)

3.1.4 Metassilicato de Sódio

O ativador alcalino foi o Metassilicato de Sódio Pentahidratado ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) – EF fornecido pela empresa Pernambuco Química S/A em seu estado sólido, com módulo de sílica (relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) de 0,98. Optou-se por utilizar este ativador pelo fato de ter eficácia comprovada na literatura e pelo fato de ser sólido e poder fazer parte da composição do ligante no método “*One Part.*” As características técnicas fornecidas pela empresa estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características técnicas do metassilicato de sódio.

Referência	Valor
Estado Físico	Pó
Coloração	Branco
Na ₂ O (%)	29,88
SiO ₂ (%)	29,53
Sólidos totais (%)	59,42
Ms	0,98

Fonte: Pernambuco Química S/A (2023).

3.1.5 Aditivo superplastificante

O superplastificante utilizado foi o HYPERKEM 74 M da NOVAKEM, um aditivo superplastificante redutor de água tipo II, à base de policarboxilatos, desenvolvido para fabricação de concreto, isento de cloretos. Atende os requisitos da norma ABNT NBR 11768-1 (2019). As características técnicas do material estão exibidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados técnicos do aditivo superplastificante HYPERKEM 74M.

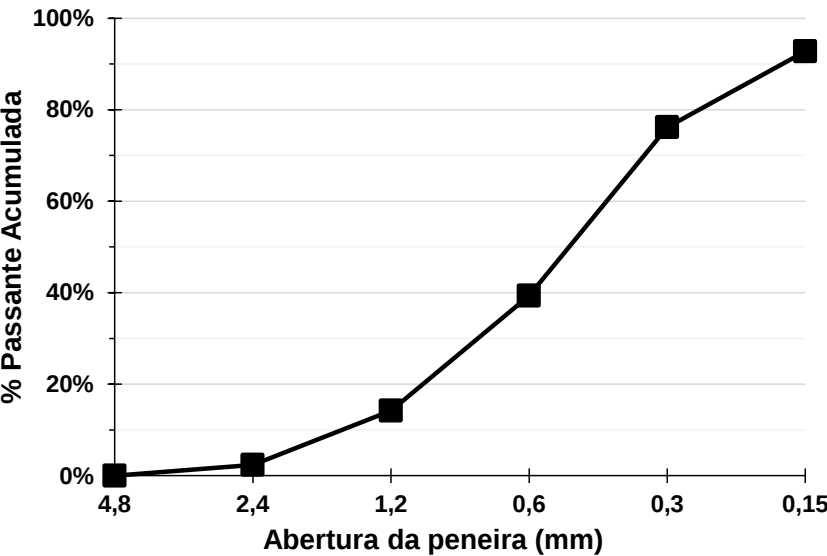
Propriedade	Resultado
Aspecto	Solução de Estável
Coloração	Amarelado
pH	4,0 ± 1,0
Massa específica	1,04 ± 0,02 kg/L
Teor de Cloretos	Não contém cloretos

Fonte: Novakem (2020).

3.1.6 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi uma areia de composição granulométrica apresentada na Figura 7. Possui o módulo de finura de 2,25, dimensão máxima característica 2,38 mm e massa específica de 2,47 g/cm³.

Figura 7 - Distribuição granulométrica acumulada do agregado miúdo.

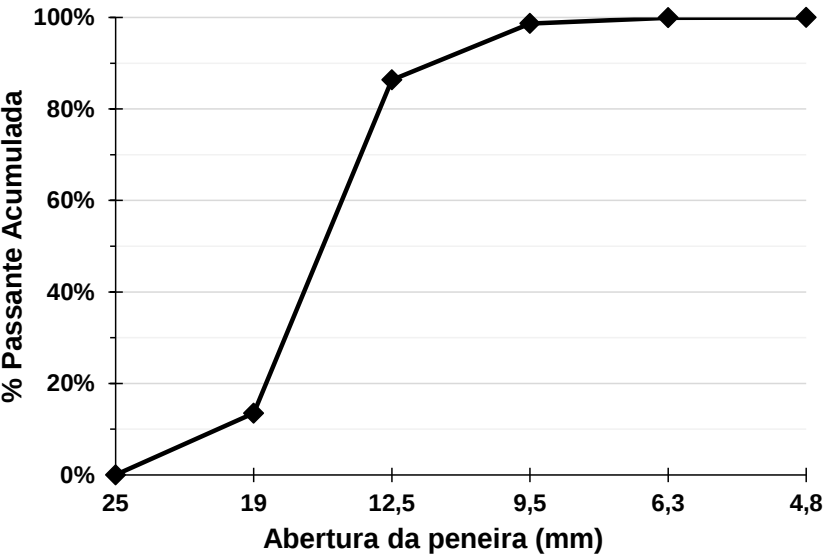


Fonte: O autor (2024)

3.1.7 Agregado Graúdo

O agregado graúdo foi proveniente de rocha granítica, classificada como brita 1, com distribuição granulométrica descrita na Figura 8. A massa específica do agregado foi 2,65 g/cm³, a dimensão máxima característica 19 mm e módulo de finura 7,12.

Figura 8 - Distribuição granulométrica acumulada do agregado graúdo.



Fonte: O autor (2024)

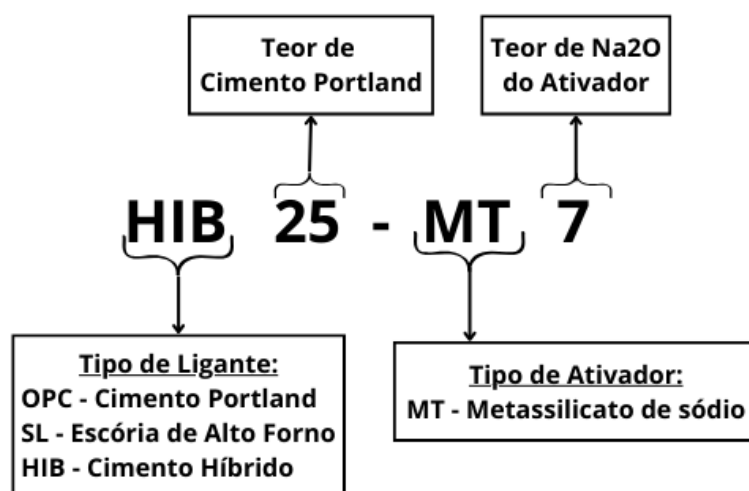
3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO

A seguir será descrito o processo para a definição das variáveis das misturas, além dos procedimentos realizados para a dosagem, preparo, moldagem e cura dos corpos de prova.

3.2.1 Definição das variáveis

A seguir será detalhado as escolhas das variáveis utilizadas nesta dissertação. A Figura 9 explica o significado das nomenclaturas das amostras, detalhando cada abreviação utilizada.

Figura 9 - Nomenclatura das amostras.



Fonte: O autor (2024)

3.2.1.1 Variação de ligantes

Devido às massas específicas semelhantes, às substituições foram feitas em massa de cimento Portland por massa de escória de alto-forno. O metassilicato de sódio foi considerado como parte da escória de alto-forno. Nesse contexto, a fração sólida do ativador foi considerada como parte integrante da escória, enquanto a quantidade de água presente na composição do ativador foi adicionada ao cálculo total da água na mistura. Conforme descrito na Tabela 5 da seção 3.1.4, o metassilicato de sódio utilizado na pesquisa apresenta 59,42% de sólidos. Para o estudo foram estabelecidas quatro combinações de ligantes álcali-ativados: 100% de escória, 75% de cimento Portland e 25% de escória de alto forno, 50% de cimento Portland e 50% de escória de alto forno e 25% de cimento Portland e 75% de escória de alto forno. Também foram realizados os ensaios com cimento Portland,

os quais foram utilizados como referências para o estudo dos ligantes álcali-ativados.

3.2.1.2 Teores de ativador

Baseando-se em trabalhos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Aglomerante (LabTag), como os de Lima *et al.* (2022), Melo Neto (2002, 2008) e Queiroz, (2023), e em ensaios exploratórios conduzidos no laboratório, foram estabelecidas três variações no teor de Na_2O do ativador em relação à quantidade de escória de alto forno adicionada à mistura. As porcentagens adotadas foram: 6% (MT6), 7% (MT7) e 8% (MT8).

3.2.1.3 Relação a/c

A relação água/ligante, idealizada para esta pesquisa, foi baseada na ABNT NBR 5752 a qual sugere a relação a/c padrão para ensaios de resistência à compressão de 0,48. Nos cimentos que incluíram metassilicato de sódio, a quantidade de água adicionada durante o processo de mistura foi reduzida. Essa escolha foi feita considerando a parte líquida do ativador como parte da água total da mistura, a fim de manter a relação água/ligante constante. O ativador de metassilicato de sódio utilizado possui 40,58% de água em sua composição.

3.2.1.4 Aditivo

Foram realizados testes para determinar o teor de aditivo a ser incorporado às misturas de interesse no presente estudo. O ensaio de viscosidade no Copo Ford foi tomado como base para determinar a necessidade e a quantidade de aditivo a ser utilizada, pelo fato de ser o ensaio desta pesquisa que precisa de maior fluidez das pastas cimentícias.

3.2.1.4.1 Ensaio sem aditivo

Inicialmente, foram preparadas misturas sem a incorporação do aditivo, com o objetivo de avaliar se a consistência das pastas seria adequada para a realização do ensaio de Viscosidade do Copo Ford. O ensaio foi realizado nos funis nº5 (5,2mm) e nº8 (7,5 mm) e a coleta de dados foi feita imediatamente após a mistura, 5 minutos, e com 15 minutos depois do contato do ligante com a água. Os cimentos testados foram o cimento Portland (OPC) e vários cimentos com 7% de Na_2O , que diferem na proporção de cimento Portland e escória. Estes incluem: 75% de cimento Portland e

25% de escória (HIB75-MT7), 50% de cimento Portland e 50% de escória (HIB50-MT7), 25% de cimento Portland e 75% de escória (HIB25-MT7), além de um cimento composto apenas por escória (SL-MT7). A Tabela 7, mostra a quantidade de material utilizada em cada mistura para a realização do ensaio. A relação água/ligante utilizada foi de 0,48, onde a parte de sólidos do ativador é incorporada como ligante e a parte líquida do ativador é contabilizada como água da mistura.

Tabela 7 - Traços das misturas sem aditivo.

Código da amostra	Cimento	Escória	Metassilicato de sódio	Água
OPC	251,9	---	---	120,91
SL-MT7	---	216,84	59,00	96,97
HIB25-MT7	62,98	162,63	44,25	102,96
HIB50-MT7	125,95	108,42	29,50	108,94
HIB75-MT7	188,93	54,21	14,75	114,93

Fonte: Autor (2024).

Os resultados dos ensaios de consistência pelo copo Ford das pastas, estão apresentados na Tabela 8. Observou-se que as pastas SL-MT7, HIB25-MT7 e HIB50-MT7 demonstraram uma consistência adequada para permitir o fluxo do material através dos funis, indicando sua viabilidade para a condução do ensaio proposto.

Tabela 8 - Avaliação da consistência das pastas sem aditivo.

Código da amostra	Funil Nº5		Funil Nº8	
	5 min	15 min	5 min	15 min
OPC	Totalmente retido	Totalmente retido	Totalmente retido	Totalmente retido
SL-MT7	✓	✓	✓	✓
HIB25-MT7	✓	✓	✓	✓
HIB50-MT7	✓	✓	✓	✓
HIB75-MT7	Totalmente retido	Totalmente retido	Totalmente retido	Totalmente retido

Fonte: Autor (2024).

As pastas OPC e HIB75-MT7 apresentaram viscosidades elevadas para a realização do ensaio, sendo observados retenções totais ou parciais do material no copo Ford. A análise dos resultados do ensaio realizado com o Copo Ford

evidenciou a necessidade de incorporação de aditivos nas misturas, pois algumas pastas não apresentaram a fluidez requerida para a condução do referido ensaio.

3.2.1.4.2 Ensaio com aditivo

As pastas que não passaram no teste de viscosidade sem o uso do aditivo, OPC e HIB75-MT7, foram as escolhidas para a realização de novos ensaios de viscosidade para a definição da porcentagem de aditivo a ser utilizado nesta pesquisa. Os traços foram os mesmos do ensaio anterior (seção 3.2.1.4.1), com a adição do percentual de aditivo. O ensaio foi realizado com dois teores diferentes de aditivo em relação à massa total do ligante: 0,60% e 0,85% (o teor máximo indicado pelo fabricante), para estas porcentagens foram adicionados 1,51g e 2,14g, respectivamente.

Tabela 9 - Resultados das misturas com aditivo.

Código da amostra	Funil Nº5		Funil Nº8	
	5 min	15 min	5 min	15 min
OPC - 0,60%	13,59	11,78	8,56	7,51
OPC - 0,85%	13,50	11,67	8,91	7,26
HIB75-MT7 - 0,60%	Totalmente Retido	30,52	Pouco Retido	14,09
HIB75-MT7 - 0,85%	28,82	19,47	12,68	9,64

Fonte: O autor (2024)

A Tabela 9 apresenta os resultados das viscosidades das pastas com aditivo. Ao adicionar os dois teores de aditivo na pasta de cimento Portland a fluidez aumentou, tornando-as adequadas para realização do ensaio de viscosidade. Por outro lado, o HIB75-MT7 apresentou comportamentos distintos na utilização dos aditivos. Ao adicionar 0,60% de aditivo à mistura, inicialmente, a pasta não fluiu completamente pelo funil. No entanto, após 15 minutos, o material consegue passar integralmente pelo Copo Ford. Já com 0,85% de aditivo, a pasta apresentou viscosidade adequada para passar completamente pelo Copo Ford em todos os tempos de medição.

Para a escolha do funil a ser utilizado no copo Ford e a determinação do teor de aditivo a ser adicionado à mistura, foram seguidas as diretrizes da norma ABNT NBR 5849 (2015), que recomenda um tempo de escoamento entre 20 e 100 segundos, e da norma ASTM D1200-10 (2018), que especifica os tamanhos dos orifícios dos funis variando do Nº1 (1,90 mm) ao Nº5 (5,2 mm). Para interferir

minimamente no comportamento dos cimentos, investigar mais a fundo o comportamento anômalo do HIB75-MT7 e evitar complicações na moldagem dos materiais devido à grande fluidez, decidiu-se utilizar o funil N°5 no ensaio de viscosidade do copo Ford e adicionar 0,60% de aditivo, em relação à massa de ligante, nas composições dos cimentos produzidos por esta pesquisa.

3.2.2 Dosagem

3.2.2.1 Dosagem em pastas e argamassas

Para os ensaios conduzidos em pastas e argamassas, a relação água/ligante definida foi 0,48, conforme a seção 3.2.1.3. O teor de aditivo foi fixado em 0,60 em relação a quantidade de ligante, conforme detalhado na seção 3.2.1.4.2. Foram desenvolvidos 13 diferentes tipos de ligantes que fomentaram esta pesquisa. A Tabela 10 resume as proporções utilizadas nas misturas e fornece as siglas correspondentes a cada composição. Na tabela, a porcentagem de escória (coluna 4) representa a soma da quantidade de escória de alto-forno e da fração sólida de metassilicato de sódio presente na mistura.

Na produção das argamassas, as proporções utilizadas nas pastas foram mantidas, adicionando o agregado miúdo com uma relação ligante/areia de 1:3.

Tabela 10 - Proporções de material e nomenclatura das misturas.

Mistura	Código da amostra	Cimento (%)	Escória (%)	Teor de Na ₂ O (%)	Relação água/ligante	Aditivo (%)
1	OPC	100	---	---	0,48	0,60
2	SL-MT6	---	100	6		
3	HIB25-MT6	25	75	6		
4	HIB50-MT6	50	50	6		
5	HIB75-MT6	75	25	6		
6	SL-MT7	---	100	7		
7	HIB25-MT7	25	75	7		
8	HIB50-MT7	50	50	7		
9	HIB75-MT7	75	25	7		
10	SL-MT8	---	100	8		
11	HIB25-MT8	25	75	8		
12	HIB50-MT8	50	50	8		
13	HIB75-MT8	75	25	8		

Fonte: O autor (2024)

3.2.2.2 Dosagem dos Concretos

O cálculo das dosagens dos concretos foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 12655 (2022) e com o método de dosagem da ABCP (Rodrigues, 1983).

- **Resistência à compressão do concreto prevista aos 28 dias:**

Foi admitido o valor previsto para a resistência média do concreto à compressão (f_{cmj}) de 35 MPa. Sd é o desvio padrão da dosagem.

$$F_{cmj} = F_{ck} + 1,65 \times S_d \rightarrow \mathbf{F_{cmj} = 35 \text{ MPa}}$$

- **Relação água/cimento:**

A relação água/cimento foi encontrada utilizando o Ábaco de Abrams. O valor teórico foi de 0,46 e o consumo de água de 205 l/m³. Entretanto, durante a concretagem ocorreu a necessidade de adição extra de água para melhor trabalhabilidade do concreto. Obtendo o novo valor da relação a/c de 0,51.

- **Consumo de agregado miúdo e agregado graúdo:**

O volume de agregado graúdo é determinado utilizando a tabela da Figura 10. Nessa tabela, insere-se o módulo de finura da areia e a dimensão máxima dos agregados graúdos para encontrar o valor correspondente.

Figura 10 - Volume de agregado graúdo por m³ de concreto.

MF	$D_{m\acute{a}x} \text{ (mm)}$				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: (Rodrigues, 1983).

O traço gerado pelo método ABCP foi 1 : 1,51 : 2,40 (ligante : areia : brita) e a relação água/ligante foi de 0,51. O consumo de ligante foi de 443 Kg/m³. Este traço foi utilizado para a produção dos três tipos de concretos.

3.2.3 Produção

A confecção dos materiais produzidos nesta pesquisa ocorreu no Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME) e no Laboratório de Tecnologia dos aglomerantes (LABTAG), localizados no galpão de Estruturas e Construção Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. A relação água/ligante foi mantida constante. As diferentes quantidades de água adicionadas ocorreram porque a água presente no ativador alcalino também contribuiu para a água total da mistura. As pastas, argamassas e concretos foram produzidos de maneiras diferentes, como descrito a seguir.

3.2.3.1 Produção das Pastas

Todas as pastas deste estudo foram preparadas da mesma maneira, variando apenas o tipo de aglomerante. As misturas foram feitas com um agitador de hélice IKA RW 20 digital, usando um béquer como recipiente para conter os materiais a serem misturados. A velocidade de mistura foi constante, com rotação de 1.600 rpm. O método de mistura foi adaptado da norma ABNT NBR 7215 (2019).

O passo a passo para a mistura de cada pasta se deu da seguinte forma: Inicialmente, o ligante foi homogeneizado manualmente por dois minutos em um saco plástico. Em um béquer vazio, verteu-se toda a água e todo o aditivo e em seguida colocou todo ligante no béquer e foi realizada uma mistura manual por 60 segundos com o auxílio de uma espátula. Posteriormente, colocou a pasta no agitador mecânico e misturou por dois minutos. Em seguida desligou-se o agitador por 90 segundos, sendo os primeiros 30 segundos foi utilizado para a retirada de material aderido nas paredes e no fundo do recipiente, com o auxílio da espátula, durante o tempo restante a pasta ficou em repouso. Por fim, misturou-se a pasta, no agitador mecânico, por mais 60 segundos.

Os testes com as pastas foram divididos em dois momentos. Inicialmente, realizaram-se os ensaios em estado fresco, incluindo a medição da viscosidade do Copo Ford e do Mini Cone. Antes de cada medição, o material foi agitado no misturador por 15 segundos. Após cada medição, o béquer foi imediatamente coberto para evitar a evaporação de água para o ambiente. Os ensaios no estado fresco foram conduzidos simultaneamente e a quantidade de material utilizada está descrita na Tabela 11.

Tabela 11 - Quantidade de material, em massa (g), utilizada nos ensaios do estado fresco das pastas.

Mistura	Código da amostra	Cimento Portland	Escória de Alto Forno	Metassilicato de sódio	Água	Aditivo
1	OPC	300,6	---	---	144,2	1,80
2	SL-MT6	---	264,7	60,3	119,8	
3	HIB25-MT6	75,1	198,5	45,2	125,9	
4	HIB50-MT6	150,3	132,3	30,1	132,0	
5	HIB75-MT6	225,4	66,1	15,0	138,1	
6	SL-MT7	---	258,7	70,4	115,7	
7	HIB25-MT7	75,1	194,0	52,8	122,8	
8	HIB50-MT7	150,3	129,3	35,2	130,0	
9	HIB75-MT7	225,4	64,6	17,6	137,1	
10	SL-MT8	---	252,7	80,4	111,6	
11	HIB25-MT8	75,1	189,5	60,3	119,8	
12	HIB50-MT8	150,3	126,3	40,2	127,9	
13	HIB75-MT8	225,4	63,2	20,1	136,1	

Fonte: O autor (2024)

O segundo grupo de ensaios foi formado pela resistência à compressão, onde após a mistura a pasta foi imediatamente colocada em formas com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm. Foram produzidos 6 corpos de prova para cada dia de ensaio, totalizando 24 amostras para cada mistura. A Tabela 12, mostra o traço de cada mistura.

Tabela 12 - Quantidade de material, em massa (g), utilizada na resistência à compressão das pastas.

Mistura	Código da amostra	Cimento Portland	Escória de Alto Forno	Metassilicato de sódio	Água	Aditivo
1	OPC	2.099,1	---	---	1.007,6	12,60
2	SL-MT6	---	1.848,7	421,4	836,5	
3	HIB25-MT6	524,7	1.386,5	316,0	879,3	
4	HIB50-MT6	1.049,5	924,3	210,7	922,0	
5	HIB75-MT6	1.574,3	462,1	105,3	964,8	
6	SL-MT7	---	1.807,0	491,6	808,0	
7	HIB25-MT7	524,7	1.335,2	368,7	857,9	
8	HIB50-MT7	1.049,5	903,5	245,8	907,8	
9	HIB75-MT7	1.574,3	451,7	122,9	957,7	
10	SL-MT8	---	1.765,2	561,9	779,5	
11	HIB25-MT8	524,7	1.323,9	421,4	836,5	
12	HIB50-MT8	1.049,5	882,6	280,9	893,5	
13	HIB75-MT8	1.574,3	441,3	140,4	950,6	

Fonte: O autor (2024)

3.2.3.2 Produção das argamassas

A seguir, será detalhado o procedimento de mistura utilizado nos ensaios realizados nas argamassas. O método de mistura foi ajustado de acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR 7215 (2019). As velocidades de mistura

mencionadas a seguir referem-se a 140 rpm para baixa velocidade e 285 rpm para alta velocidade.

O passo a passo foi o seguinte: Inicialmente os ligantes foram pesados e separados em sacos plásticos para a realização da homogeneização manual durante 2 minutos. Na realização da mistura, primeiramente colocou-se toda a água e todo o aditivo e depois foi adicionado todo o ligante na cuba. A argamassadeira foi ligada, em velocidade baixa, durante 60 segundos e em seguida, sem parar a operação, foi adicionada toda a areia durante 30 segundos. A argamassadeira continuou a misturar por mais 30 segundos em velocidade baixa e em seguida foi modificada para velocidade alta, por mais 1 minuto. Em seguida desligou-se a argamassadeira por 90 segundos, sendo os primeiros 30 segundos foi utilizado para a retirada de material aderido nas paredes e no fundo do recipiente, com o auxílio da espátula, durante o tempo restante a pasta ficou em repouso. Por fim, misturou-se a argamassa, em velocidade alta, por mais 60 segundos.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão em argamassas, foram utilizadas formas com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm e moldados 6 corpos de prova para cada idade, totalizando 18 amostras por mistura. A quantidade de material utilizado está descrita na Tabela 13.

Tabela 13 - Quantidade de material, em massa (g), para a resistência à compressão das argamassas

Mistura	Código da amostra	Cimento Portland	Escória de Alto Forno	Metassilicato de sódio	Água	Areia	Aditivo
1	OPC	677,3	---	---	325,1	2.032,02	4,06
2	SL-MT6	---	596,5	135,9	269,9		
3	HIB25-MT6	169,3	447,4	101,9	283,7		
4	HIB50-MT6	338,6	298,2	67,9	297,5		
5	HIB75-MT6	508,0	149,1	34,0	311,3		
6	SL-MT7	---	583,0	158,6	260,7		
7	HIB25-MT7	169,3	437,3	118,9	276,8		
8	HIB50-MT7	338,6	291,5	79,3	292,9		
9	HIB75-MT7	508,0	145,7	39,6	309,0		
10	SL-MT8	---	569,6	181,3	251,5		
11	HIB25-MT8	169,3	427,2	135,9	269,9		
12	HIB50-MT8	338,6	284,8	90,6	288,3		
13	HIB75-MT8	508,0	142,4	45,3	306,7		

Fonte: O autor (2024)

3.2.3.3 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira de capacidade de 400 litros, conforme ilustrado na Figura 11. Inicialmente, a betoneira foi imprimada com o aglomerante utilizado no concreto, seguindo as recomendações de Helene e

Terzian (1993). Primeiramente foi vertido na betoneira 80% da água, 100% do agregado graúdo e 100% do ligante e misturado. Em seguida foi adicionado todo o agregado miúdo e o restante da água e a mistura continuou. A betoneira foi parada por 1 minuto para a limpeza das pás, em seguida foi ligada por mais alguns minutos até a realização dos ensaios.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão foram utilizadas formas de 10 x 20 cm e moldados 18 corpos de prova de concreto para cada mistura e foram utilizadas 6 amostras para cada dia de ensaio. A quantidade de material utilizada na produção dos concretos está descrita na Tabela 14.

Tabela 14 - Quantidade de material, em massa (Kg), para produção dos concretos

Mistura	Código da amostra	Cimento Portland	Escória de Alto Forno	Metassilicato de sódio	Água	Areia	Brita
1	OPC	14,38	---	---	7,32	21,72	34,52
2	SL-MT7	---	12,38	3,37	6,35		
3	HIB25-MT8	3,6	9,07	2,89	6,15		

Fonte: O autor (2024)

Figura 11 - Produção dos concretos



Fonte: O Autor (2024)

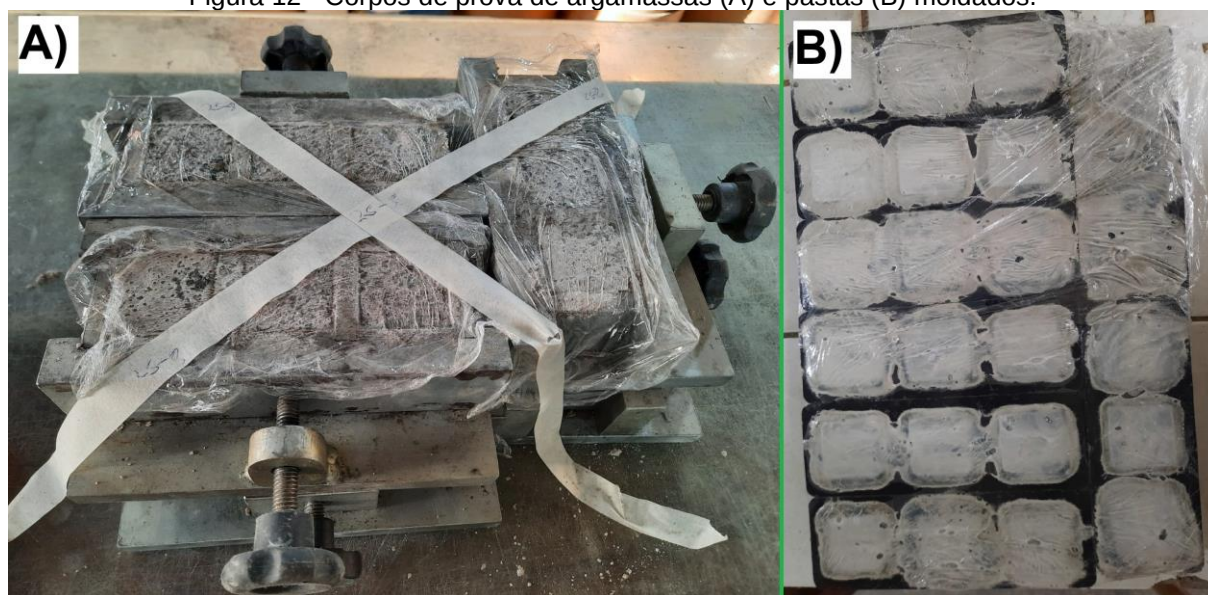
3.2.4 Moldagem

A moldagem dos corpos de prova ocorreu imediatamente após o término da produção das misturas e cada produto teve um procedimento de moldagem específico, como descrito a seguir.

3.2.4.1 Pastas e Argamassas

As amostras de pastas e argamassas foram moldadas em corpos de prova prismáticos, de 40 x 40 x 40 mm. Para assegurar a estanqueidade das fôrmas, as pastas foram moldadas em formas de polipropileno e as argamassas em fôrmas de aço. Antes de serem utilizadas, as formas foram limpas, e receberam desmoldante na superfície interna. Foram moldados 24 corpos de provas para cada mistura de pasta, sendo fabricadas 312 amostras de pastas. Para as argamassas foram gerados 234 corpos de prova, onde foram produzidas 18 amostras para cada mistura. Os corpos de prova depois de moldados das pastas e argamassas estão exibidos na Figura 12.

Figura 12 - Corpos de prova de argamassas (A) e pastas (B) moldados.



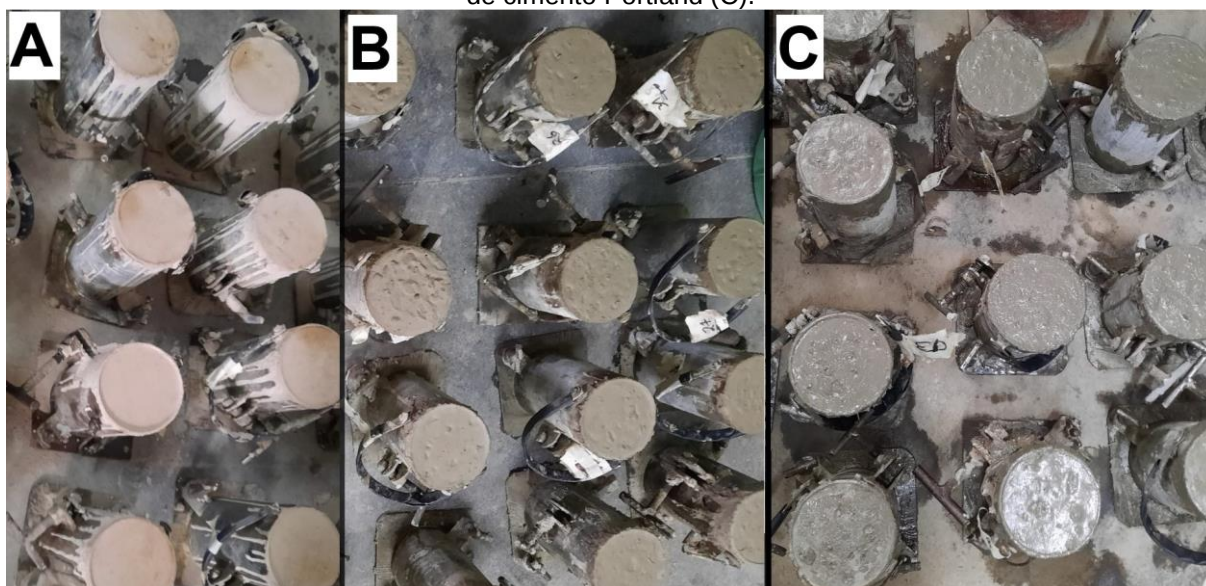
Fonte: O Autor (2024)

Devido à grande fluidez, o preenchimento dos moldes das pastas foi realizado em camada única, recebendo 20 batidas na lateral da fôrma. Nas argamassas, a moldagem foi realizada em duas camadas, com 30 golpes em cada camada. Depois de moldados, foram colocados plástico filme na superfície superior para evitar a retração por secagem.

3.2.4.2 Concreto

Os corpos de prova de concreto foram moldados em fôrmas cilíndricas, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Também foi assegurado a estanqueidade das fôrmas, que foram devidamente limpas, e receberam desmoldante na superfície interna. O concreto foi adensado de acordo com a norma ABNT NBR 9833 (2008), por adensamento mecânico em duas camadas iguais. Foram utilizadas 54 fôrmas para a fabricação dos concretos, onde para cada mistura foram produzidas 18 amostras. Os corpos de prova dos concretos após a moldagem estão exibidos na Figura 13.

Figura 13 - Corpos de prova moldados de concreto SL-MT7 (A), concreto HIB25-MT8 (B) e concreto de cimento Portland (C).



Fonte: O Autor (2024)

3.2.5 Cura

Os corpos de prova foram removidos dos moldes após 24 horas e imersos em recipientes contendo apenas água até a idade dos respectivos ensaios.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Os ensaios realizados nesta pesquisa serão brevemente descritos nos itens a seguir.

3.3.1 Ensaios de consistência

Foram realizados três ensaios de consistência neste trabalho, que serão descritos a seguir.

3.3.1.1 Ensaio de mini abatimento

O procedimento utilizado para o ensaio de mini cone ou mini abatimento baseou-se na metodologia descrita por Kantro (1980), sendo realizado alguns ajustes. O mini cone de Kantro é utilizado na determinação do abatimento de pastas e consiste em um pequeno tronco cônico com dimensões proporcionais ao molde utilizado na ABNT NBR 16889 (2020) para determinação do abatimento de concretos.

Um papel milimetrado foi disposto sobre uma superfície nivelada, e sobre a bancada foi colocada uma placa de vidro. O mini cone foi centralizado no papel milimetrado e preenchido com a pasta, devido a fluidez das pastas, não foi preciso realizar o adensamento. A primeira medição foi realizada imediatamente após a conclusão da mistura. O diâmetro do espalhamento da pasta foi registrado em duas direções perpendiculares e a média desses valores foi calculada. Após a medição, o béquer foi coberto para evitar a evaporação de água da mistura. Os equipamentos e a placa de vidro foram limpos com água e secados para a medição seguinte. Antes de cada medição foi realizada uma mistura mecânica por 15 segundos para homogeneizar a pasta.

Nos ensaios exploratórios de consistência das pastas produzidas nesta pesquisa, observou-se que cada conjunto de pastas apresentava diferentes tempos de enrijecimento. Com base nas normas ABNT NBR 16607 (2018) e ABNT NBR 9997 (2015), que recomendam ensaios a cada 10 minutos para cimentos de pega rápida e a cada 30 minutos para cimentos de pega lenta, optou-se por tempos de coleta de dados mais curtos para cimentos de enrijecimento rápido e tempos mais espaçados para cimentos com maior tempo de pega. Os tempos de coleta de dados para cada tipo de pasta estão registrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Tempos de medição do ensaio de mini abatimento

Misturas	Siglas	Tempos
Cimento 100% e Escória 100%	OPC e SL	5 min, 15 min, 30 min, 60 min, 80 min, 100 min, 110 min, 120 min.
Cimento Portland 25% - Escória 75%	H25	5 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 70 min, 80 min, 100 min, 120 min.
Cimento Portland 50% - Escória 50%	H50	5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 35 min, 40 min.
Cimento Portland 75% - Escória 25%	H75	5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 min, 80 min, 100 min e 120 min.

Fonte: O Autor (2024).

3.3.1.2 Mesa de consistência

O índice de consistência das argamassas foi realizado no Flow Table, seguindo a norma ABNT NBR 13276 (2016). Logo depois da preparação da argamassa o material foi levado a mesa nivelada e o molde troncônico foi preenchido em três camadas e aplicado em cada uma delas quinze, dez e cinco golpes, respectivamente.

3.3.1.3 Abatimento do tronco de cone

A fluidez do concreto foi analisada através da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 16889 (2020). O adensamento foi realizado em três camadas e foi aplicado 25 golpes em cada camada, com o auxílio de uma haste.

3.3.2 Viscosidade no Copo Ford

A viscosidade das pastas foi medida do equipamento Copo Ford. Este equipamento só possui normas destinadas à realização de ensaios em fluidos newtonianos. Portanto, a metodologia adotada para o ensaio foi adaptada das normas ABNT NBR 5849 (2015) e ASTM D1200-10 (2018). Os fluidos estudados nesta pesquisa não são newtonianos. Portanto, decidiu-se interromper o cronômetro quando a pasta deixasse de fluir pelo funil.

Primeiramente, foi selecionado do orifício nº 5, com diâmetro interno de 5,20 mm, o equipamento foi nivelado pelo nível de bolha presente no Copo Ford. A temperatura ambiente na realização do ensaio foi de 23 ± 1 °C. A realização do ensaio foi feita da seguinte forma: Inicialmente, o orifício do funil no copo Ford foi tampado manualmente e, em seguida, a pasta foi despejada até que o copo Ford estivesse completamente preenchido. O topo do copo foi nivelado utilizando uma placa de vidro para remover qualquer excesso de material durante o experimento. O béquer foi posicionado na saída do funil, para recolher e reutilizar o material. O cronômetro foi acionado ao mesmo momento em que a pasta começou a fluir pelo funil do copo Ford. O tempo de ensaio foi finalizado quando o fluido não mais escoou pelo funil, e o tempo decorrido foi registrado. Após a medição, o béquer foi coberto com uma placa de Neoprene ou vidro para evitar a evaporação de água da mistura. Os equipamentos foram limpos com água e secados para a medição seguinte. A primeira medição foi realizada imediatamente após a conclusão da

mistura. Nas medições subsequentes, a pasta foi misturada no agitador mecânico por 15 segundos antes dos dados serem coletados.

Os momentos de coleta de dados foram os mesmos da Tabela 15, pelo fato dos ensaios de viscosidade terem sido feitos ao mesmo tempo dos ensaios de mini abatimento das pastas. Os ensaios de viscosidade tiveram tempos de duração menores do que os ensaios de consistência, devido a limitação do equipamento copo Ford para realização de ensaios em pastas mais viscosas.

3.3.3 Difração de raios-X

A caracterização qualitativa dos compostos hidratados foi realizada por meio da difração de raios-x (DRX), descrito na seção 3.1.1.1.

3.3.4 Ensaio de ultrassom

Os ensaios de ultrassom foram realizados seguindo as recomendações da ABNT NBR 8802 (2019), utilizando o equipamento Proceq Pundit Lab. A transmissão do pulso ultrassônico ocorreu na frequência de 150 kHz e o comprimento de 9,3 μ s. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm e os transdutores foram posicionados em faces opostas do corpo de prova, sendo utilizada a transmissão direta. Foi empregado o gel condutor para melhorar a condutividade elétrica entre os transdutores e a amostra.

3.3.5 Resistência à compressão

Os Ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas – LABME/CTG/UFPE. A resistência à compressão de pastas e argamassas foram realizados utilizando a máquina servo controlada Shimadzu modelo AGS_X de 300 kN (Figura 14), a uma velocidade de deformação axial de 0,25 MPa/s. Já para os ensaios em concretos foi utilizado o equipamento da marca WPM (alemã) com capacidade de 300 tf.

Figura 14 - Máquina Shimadzu.



Fonte: O Autor (2024)

3.3.6 Massa específica e teor de ar incorporado

A determinação da massa específica e do teor de ar incorporado do concreto no estado fresco foi realizada pelo método gravimétrico. Os procedimentos e cálculos, destes ensaios, foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 9833 (2008). Todos os moldes foram pesados e identificados. Após a moldagem dos corpos de prova, as superfícies externas das formas foram limpas e pesadas novamente. A massa real do concreto foi obtida subtraindo-se o peso do molde vazio do peso do molde com concreto. Em seguida, calculou-se a média das massas do concreto e dividiu-se pelo volume do molde de 10 cm x 20 cm para determinar a massa específica do concreto.

3.3.7 Análise estatística

Para verificar a similaridade estatística entre os resultados de resistência à compressão obtidos em pastas, argamassas e concretos das amostras, aplicou-se o teste de análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias (TUKEY) por meio do software Minitab 17.1.0. A ANOVA juntamente com o teste de Tukey é um método utilizado para comparar as médias de um conjunto de variáveis independentes. Analisando se existe ou não diferença entre os grupos e se essas diferenças são estatisticamente significativas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com o objetivo de descrever o comportamento dos ligantes e compreender de que forma a composição desses materiais pode estar contribuindo ou prejudicando o desenvolvimento das misturas.

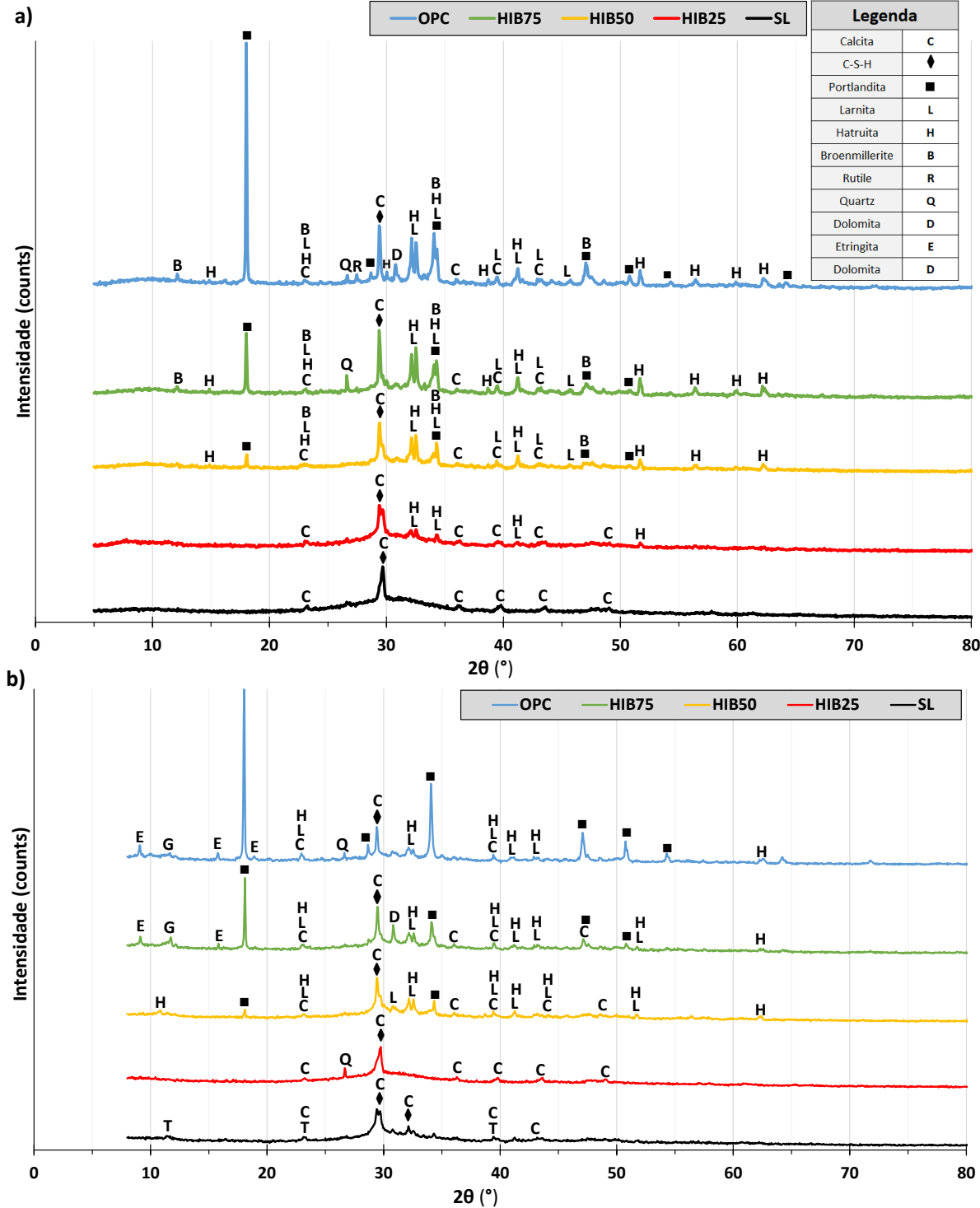
4.1 ANÁLISE EM PASTAS

A seguir, foram apresentados os resultados e as avaliações das características físicas, químicas e mineralógicas das amostras em pastas dos ligantes produzidos por esta pesquisa.

4.1.1 Difração de Raios X

Para compreender o comportamento microestrutural dos diferentes aglomerantes, foram realizadas análises difratométricas em pastas. Devido às limitações no número de ensaios que poderiam ser realizados, foram selecionados para análise os aglomerantes de cimento Portland (OPC) e os com ativação alcalina de 7% (HIB25 - 25% de cimento Portland e 75% de escória, HIB50 - 50% de cimento Portland e 50% de escória, HIB75 - 75% de cimento Portland e 75% de escória, SL - escória de alto forno). Todas as cinco pastas foram analisadas após 1 e 28 dias através do ensaio de difração de raios-X, com o intuito de identificar as fases cristalinas presentes no material, bem como compreender as reações que ocorrem entre o cimento Portland, a escória de alto forno e o metassilicato de sódio. A identificação dos compostos foi efetuada através da comparação dos difratogramas das amostras do banco de dados do International Centre of Diffraction Data (ICDD), utilizando o software X'Pert HighScore Plus. Na Figura 15, estão expostos os resultados dos difratogramas das pastas ensaiadas aos 1 e 28 dias.

Figura 15 - Difratoograma de raios-x das pastas com 1 dia (a) e 28 dias (b).



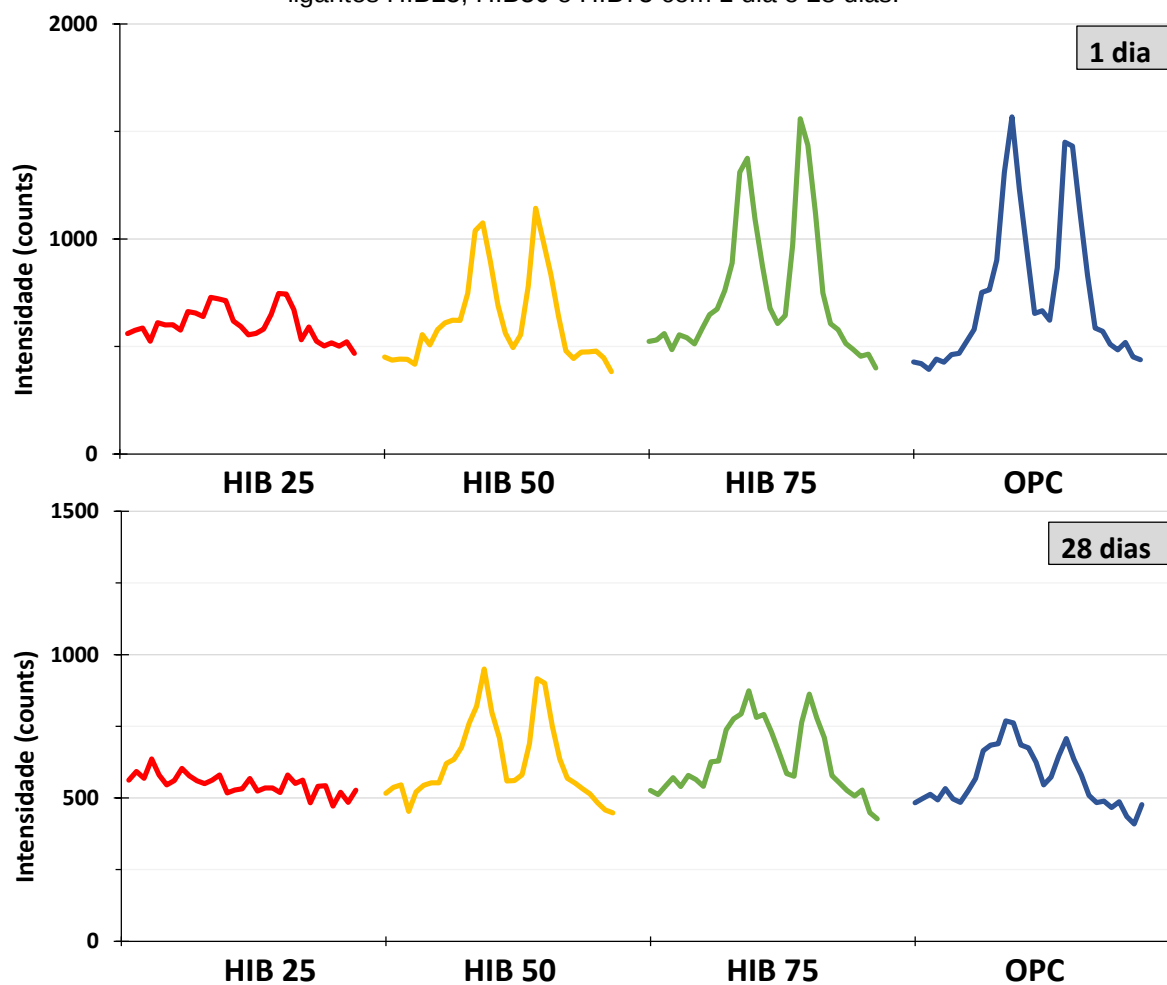
Fonte: O Autor (2024)

No que diz respeito ao comportamento dos materiais precursores, percebe-se que o cimento Portland possui uma estrutura cristalina com picos de intensidade bem definidos, enquanto a pasta de escória álcali-ativada que possui uma estrutura mais amorfa, conforme ilustrado na Figura 15. Nos ligantes álcali-ativados, a proporção desses precursores teve interferência direta nos resultados mostrados

nos difratogramas. O ligante HIB25, por possuir maior quantidade de escória em sua composição, apresentou o difratograma com menos picos, enquanto o HIB75, por apresentar maior quantidade de cimento Portland em sua composição, exibiu um difratograma com mais picos cristalinos, semelhante ao da pasta OPC. Observa-se que, aos 28 dias, os difratogramas das pastas apresentaram menor intensidade nos picos das fases anidras do cimento Portland em comparação com os resultados de 1 dia, devido ao processo de hidratação dos materiais cimentícios, Figura 15 (b). No entanto, notou-se que as fases hatruita e larnita, também conhecidas como alita e belita, mostraram comportamentos distintos durante a hidratação dos cimentos. A análise dos principais picos dessas fases não hidratadas do cimento Portland, localizadas entre as posições 2θ 31° e 33° , foi realizada em ambas as idades de ensaio e apresentadas na Figura 16.

Na Figura 16, é possível perceber que no primeiro dia a intensidade dos picos de alita e belita aumentaram com a elevação do teor de cimento Portland nas pastas. Este resultado era esperado, visto que o maior teor de cimento Portland gerou uma maior quantidade de partículas anidras de cimento Portland, resultando em picos mais intensos dos compostos. No entanto, as pastas OPC e HIB75 exibiram intensidades de picos de alita e belita semelhantes, apesar de terem diferentes quantidades de cimento Portland em suas composições. Os resultados aos 28 dias revelaram uma tendência oposta aos resultados obtidos com 1 dia. Observou-se que as pastas HIB50 e HIB75 apresentaram maiores intensidades de picos da alita e belita apesar de possuírem menores teores de cimento Portland na composição em comparação com a pasta OPC. Ao comparar as pastas HIB50, HIB75 e OPC, foi observado que a pasta HIB50 apresentou os menores picos nos difratogramas de 1 dia e as maiores intensidades de picos nos resultados com 28 dias. A pasta HIB25 apresentou pequena intensidade dos picos de alita e belita com 1 dia e aos 28 dias não foram encontradas fases cristalinas desses compostos.

Figura 16 –Principais Picos sobrepostos de alita e belita das pastas de cimento Portland e dos ligantes HIB25, HIB50 e HIB75 com 1 dia e 28 dias.

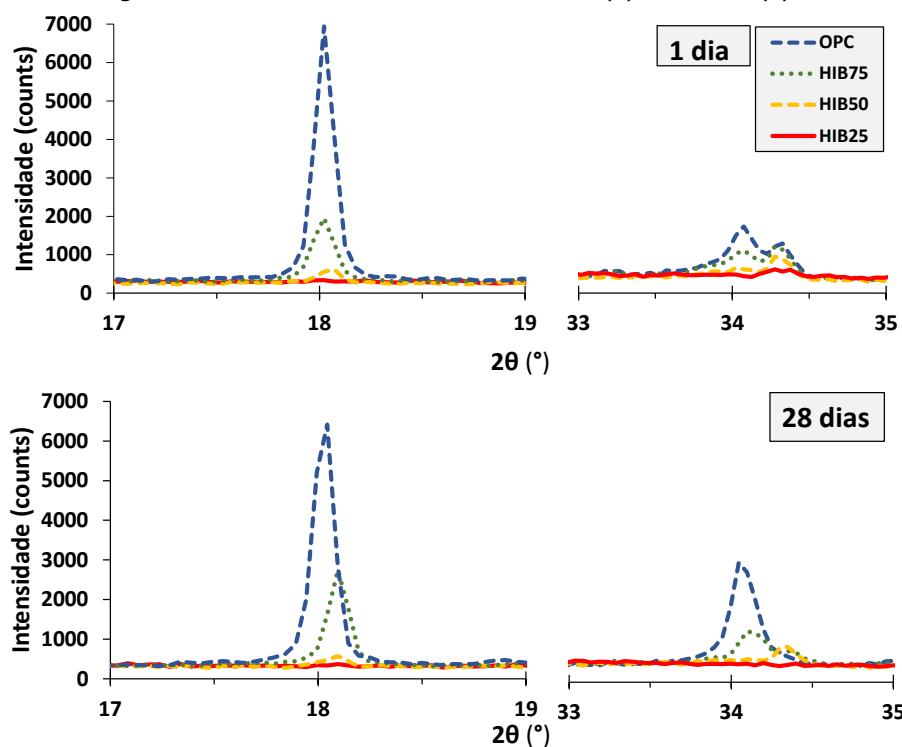


Fonte: O Autor (2024)

Analisando as fases hidratadas das pastas observou-se que o comportamento dos picos de portlandita foram distintos para cada tipo de cimento. A Figura 17 mostra a comparação entre picos de portlandita, posições $2\theta = 18^\circ$ e 34° , das cinco pastas ensaiadas. Observa-se que o comportamento dos picos de portlandita com 1 e 28 dias foram similares. A intensidade dos picos foram diminuindo à medida que o teor de cimento Portland foi reduzindo nas composições das pastas, proporcionando maiores intensidades de picos nas misturas OPC, HIB75, HIB50 e HIB25, respectivamente. A grande diferença entre as intensidades dos picos da pasta OPC e dos ligantes álcali-ativados pode estar relacionada a redução da quantidade de cimento Portland, a orientação preferencial da estrutura cristalina da portlandita e/ou o consumo da portlandita através das reações entre o hidróxido de cálcio e os outros materiais presentes na mistura. Nos difratogramas do ligante HIB25 não foi observado picos relacionados ao hidróxido de cálcio, este resultado é semelhante ao

obtido por Angulo-Ramírez; Mejía de Gutiérrez; Puertas (2017), onde não observaram a presença de portlandita em ligantes com 80% de escória.

Figura 17 - Comparação entre os picos 18° e 34° do portlandita das pastas de cimento Portland e dos ligantes HIB25, HIB50 e HIB75 com 1 dia (a) e 28 dias (b).



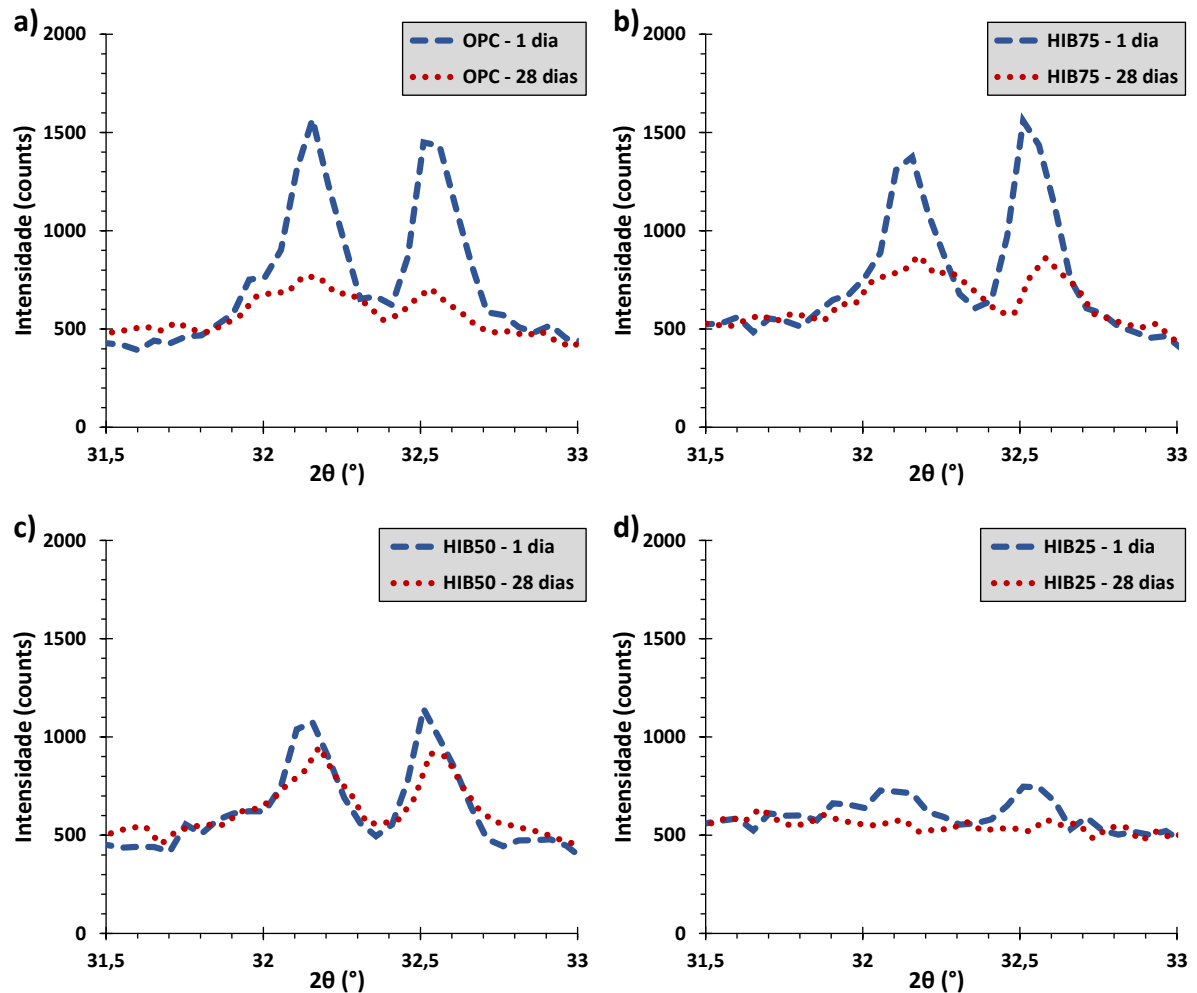
Fonte: O Autor (2024)

Para compreender melhor o desenvolvimento da hidratação, foram comparados os picos de alita, belita e portlandita aos 1 e 28 dias para cada tipo de cimento, conforme mostrado nas Figuras 18 e 19. Nota-se que a pasta OPC apresentou uma redução brusca nas intensidades dos picos de C_3S e C_2S . Esse comportamento era esperado, visto que aos 28 dias o cimento Portland atinge teores elevados de hidratação. Nos picos de portlandita, Figura 19 (a), a diferença do grau de hidratação não foi tão perceptível, o que pode ter sido ocasionado pela direção preferencial da portlandita com 1 dia de hidratação.

Nos ligantes compostos por cimento Portland e escória de alto forno, a pasta HIB25 apresentou baixa intensidade nos picos de alita e belita após 1 dia, e esses componentes foram totalmente consumidos após 28 dias, uma vez que os picos de portlandita dessa mistura não foram perceptíveis. Elahi *et al.* (2012) menciona que foi identificado através dos ensaios de DRX e de termogravimetria a presença de portlandita em ligantes sem ativação alcalina compostos por 30% de cimento Portland e 70% de escória. No entanto, o ligante HIB25, investigado nesta pesquisa,

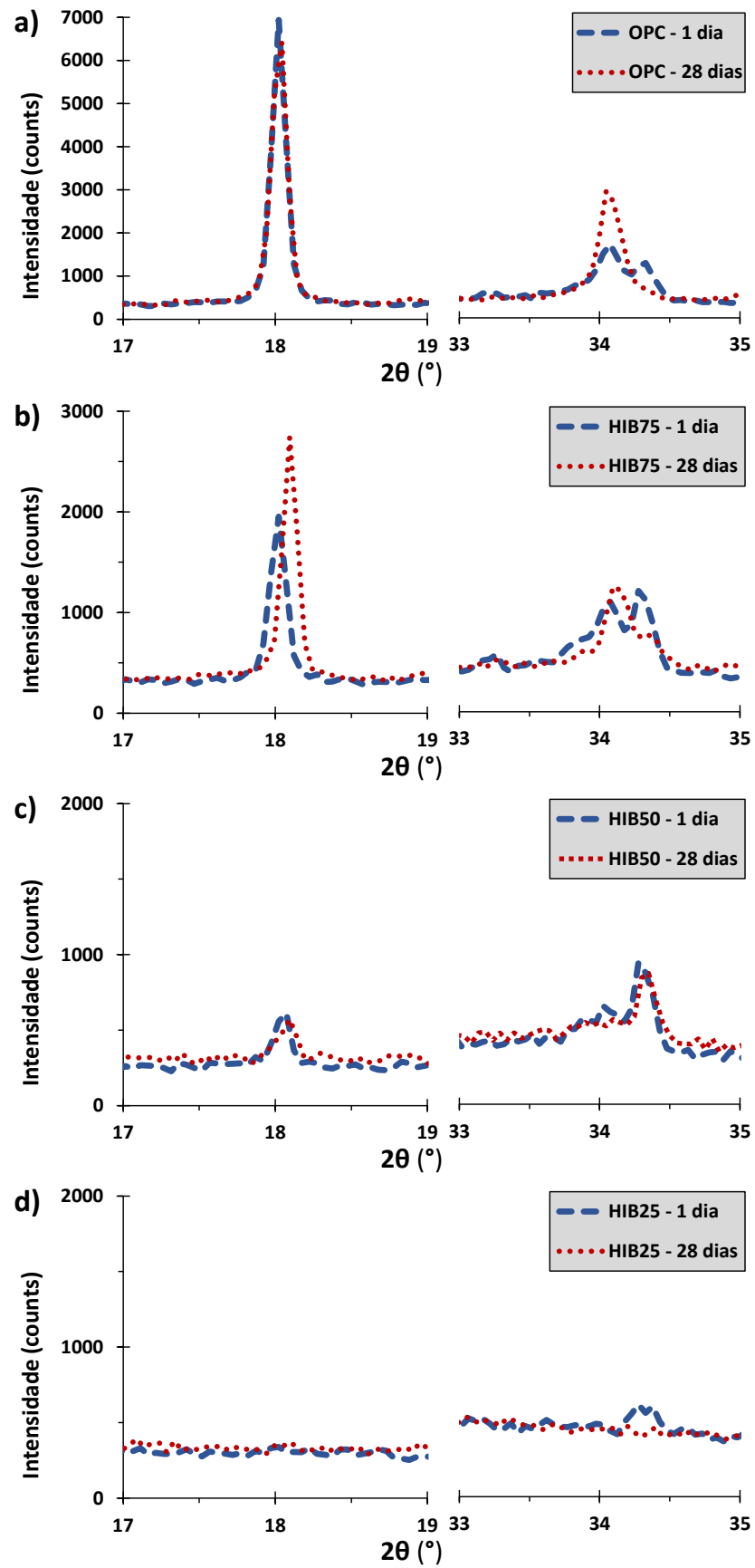
não apresentou picos relacionados à portlandita, sugerindo o consumo deste composto por meio de reações com o metassilicato de sódio (Fonseca, 2021; Giannaros; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016; Puertas *et al.*, 2011).

Figura 18 – Picos de alita e belita das pastas OPC(a), HIB75(b), HIB50(c), HIB25(d).



Fonte: O Autor (2024)

Figura 19 - Picos de portlandita das pastas OPC(a), HIB75(b), HIB50(c), HIB25(d).



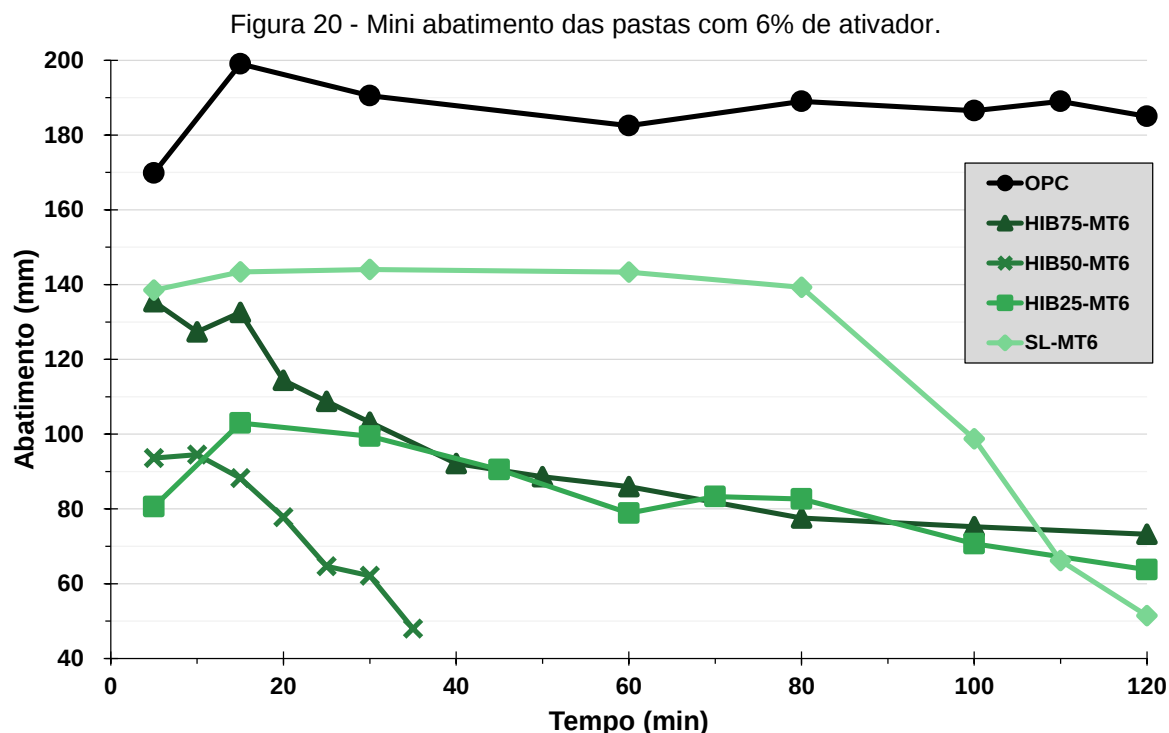
Fonte: O Autor (2024)

Na pasta HIB50, foi observado uma leve redução dos picos de alita e belita, Figura 18 (c), indicando que ocorreu pouca hidratação do cimento Portland entre 1 e 28 dias. Os picos de portlandita, conforme mostrado na Figura 19 (c), mantiveram intensidades praticamente constantes, indicando que a portlandita formada foi consumida. O ligante HIB50 apresenta quantidades semelhantes de metassilicato de sódio e cimento Portland em sua composição, o que pode resultar em uma maior intensidade nas reações entre esses dois materiais. Segundo John (1995), o produto formado através das reações entre a portlandita e o metassilicato de sódio é um gel que se deposita sobre os grãos anidros formando uma camada passivadora, o que, por consequência, inibe a hidratação dos grãos anidros.

Na pasta HIB75, esse fenômeno é observado de maneira mais sensível. Os picos de C_3S e C_2S foram reduzidos entre 1 e 28 dias, Figura 18 (b). No entanto, a intensidade desses picos foi igual ou superior à da pasta OPC, apesar da pasta HIB75 apresentar uma menor quantidade de cimento em sua composição. A pasta HIB75 provavelmente apresentou uma inibição menos intensa da hidratação devido à sua composição, que foi composta por uma pequena quantidade de metassilicato de sódio e uma alta proporção de cimento Portland. Ao longo dos 28 dias, a quantidade de metassilicato de sódio reduziu, diminuindo as reações de inibição da hidratação. Isso resultou em uma produção de portlandita maior do que seu consumo. Como pode ser observado na Figura 19 (b), os picos de portlandita na pasta HIB75 aos 28 dias mostraram intensidades maiores do que na amostra de 1 dia. As reações entre o hidróxido de cálcio e a escória de alto-forno podem ter contribuído, em menor grau, para a redução dos picos de portlandita, já que o hidróxido de cálcio atua como um ativador alcalino.

4.1.2 Ensaio de mini abatimento

Os resultados de mini abatimento foram obtidos através do ensaio do mini cone de Kantro. Primeiramente, esses resultados serão apresentados agrupados por pastas que foram produzidas com o mesmo teor de ativação. A Figura 20 mostra o gráfico dos resultados do ensaio de mini abatimento das pastas com 6% de ativação e da pasta de cimento Portland.



Fonte: O Autor (2024)

A pasta de cimento Portland (OPC) apresentou a maior fluidez dentre os traços analisados, mantendo o abatimento entre 169,85 e 190,53 milímetros durante todo o ensaio. Nos ligantes álcali-ativados com 6% de metassilicato de sódio, a pasta de escória registrou a menor viscosidade. Observou-se que a pasta SL-MT6 manteve valores de abatimento constantes nos primeiros 80 minutos de ensaio. No entanto, após este período, a pasta exibiu uma redução mais acentuada do abatimento. Assim como nos resultados de Amer *et al.* (2021), os ligantes compostos por escória e cimento Portland exibiram espalhamentos inferiores às pastas de escória. Notavelmente, a pasta contendo 50% de cimento Portland foi a mais afetada pela perda de abatimento. Após 35 minutos, a pasta perdeu totalmente a fluidez, o que impossibilitou a continuidade do ensaio, como mostrado na Figura 21. A pasta composta por 25% de cimento Portland e 75% de escória apresentou um aumento no abatimento até os 15 minutos do ensaio, seguido por uma diminuição gradual na viscosidade até o encerramento do ensaio. Por outro lado, na pasta HIB75-MT6, foi observada uma redução do abatimento de forma mais acelerada nos primeiros 40 minutos. Após esse período, a pasta continuou perdendo trabalhabilidade, mas de maneira mais gradual. Diferente do cimento Portland e da escória álcali-ativada, os ligantes produzidos com cimento Portland e escória não

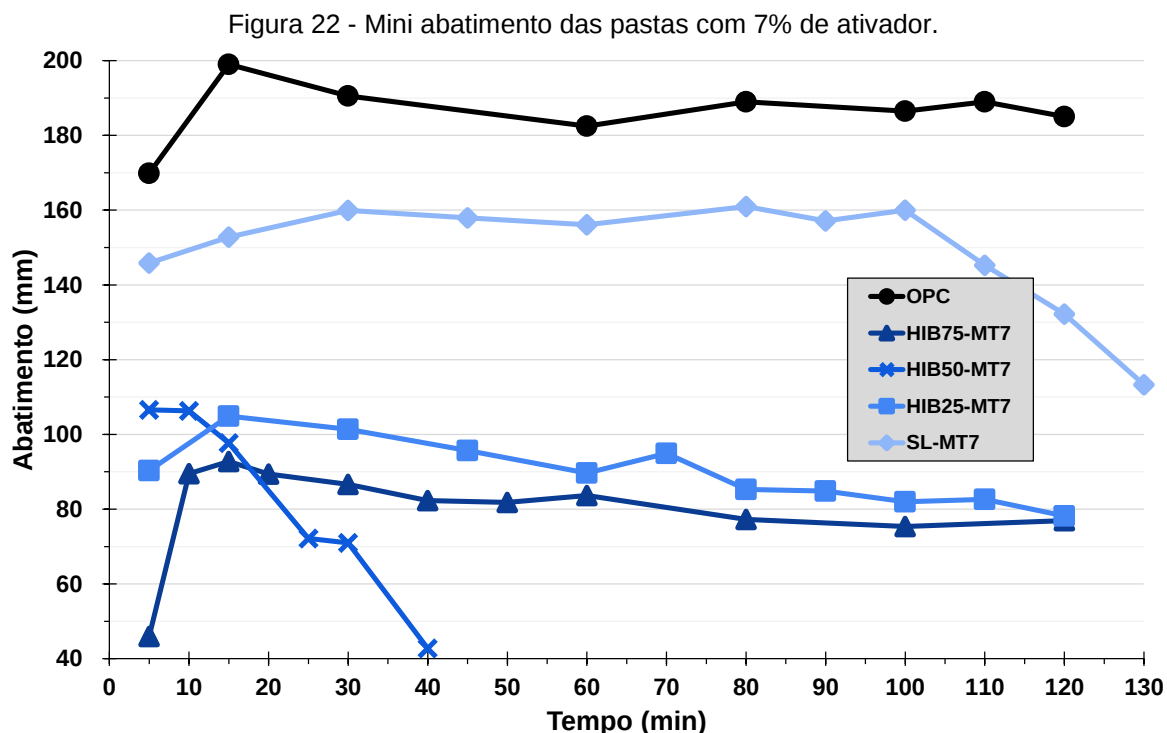
apresentaram estabilidade nos valores de abatimento, variando a fluidez durante todo o ensaio.

Figura 21 - Pasta HIB50-MT6 com 35 minutos de ensaio.



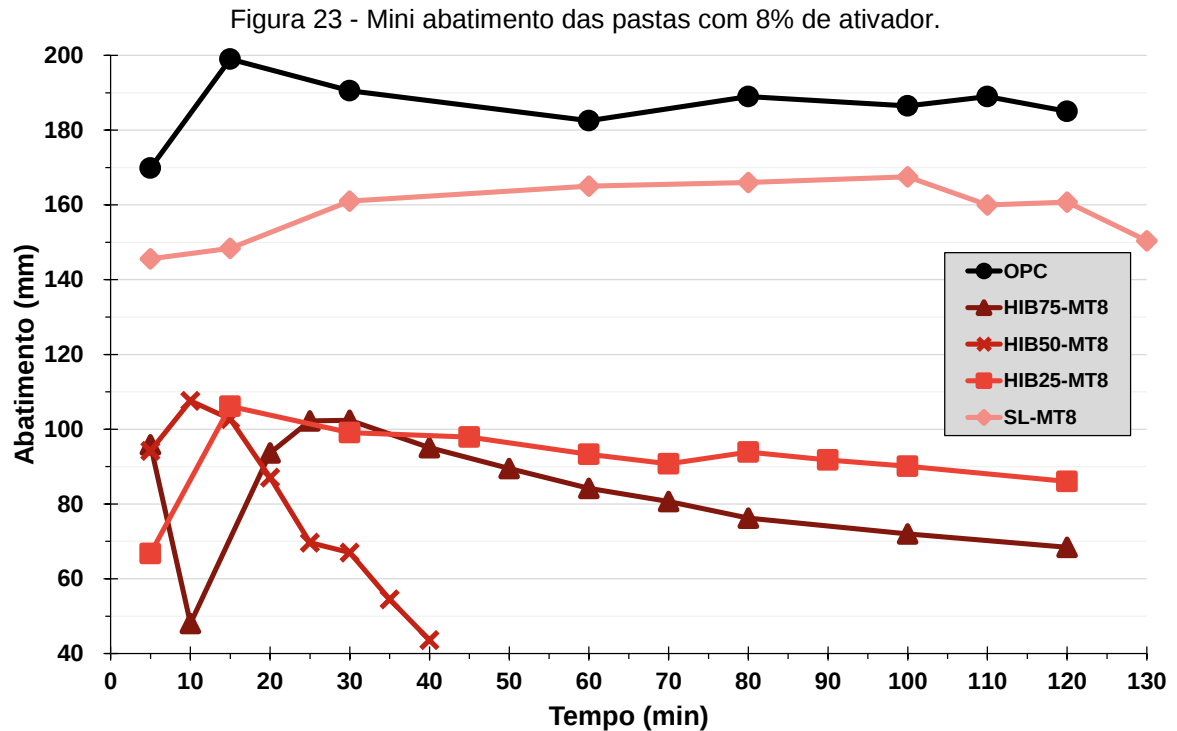
Fonte: O Autor (2024)

Os resultados do ensaio de mini cone nos ligantes com teor de Na_2O de 7% estão expostos na Figura 22. O ensaio da pasta de escória álcali-ativada foi estendido até 130 minutos com o intuito de tornar mais evidente a redução do abatimento. Nos primeiros 30 minutos, a pasta SL-MT7 apresentou uma leve elevação do abatimento. Após este período, a mistura manteve os valores de espalhamento praticamente constantes, começando a apresentar uma perda de abatimento mais acelerada após o minuto 100. Os ligantes compostos por escória e cimento Portland ativados com teor de sódio de 7% mostraram resultados de abatimento inferiores as pastas OPC e SL-MT7. Entre esses ligantes, a mistura com 25% de cimento Portland e 75% de escória registrou os maiores valores de abatimento. A pasta HIB75-MT7 mostrou uma baixa fluidez aos 5 minutos, com um espalhamento de 45,9 mm. No entanto, esse valor dobrou aos 10 minutos, chegando a 89,4 mm. Posteriormente, a fluidez da pasta começou a diminuir gradualmente, com o espalhamento variando entre 92,7 mm e 75,3 mm até o final do ensaio. A pasta HIB50-MT7 seguiu a mesma tendência observada na pasta HIB-MT6, onde a perda total de fluidez ocorreu após 40 minutos da mistura, tornando impossível continuar o ensaio após esse período.



Fonte: O Autor (2024)

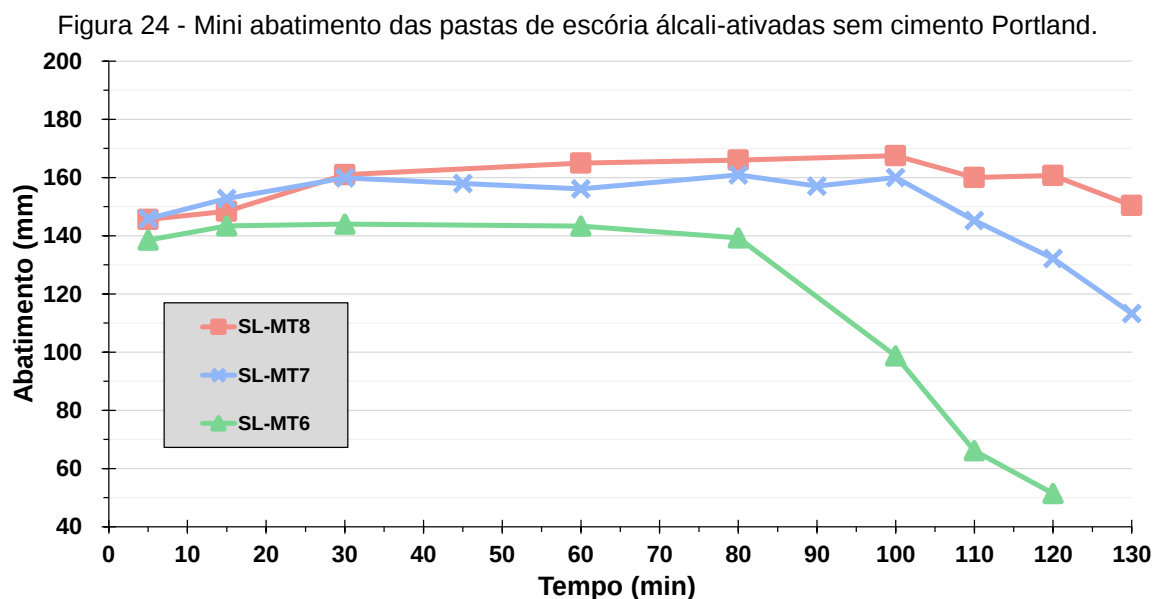
Os resultados do ensaio do mini cone das pastas com 8% de ativador alcalino, conforme descrito na Figura 23, mostram uma tendência semelhante aos resultados obtidos nos ligantes ativados com teor de Na_2O do metassilicato de sódio de 7%. O tempo de ensaio da pasta SL-MT8 também foi estendido até os 130 minutos na tentativa de observar o início da perda de abatimento do material. A pasta de escória álcali-ativada apresentou um aumento gradual do espalhamento até atingir o pico aos 100 minutos. Após esse período, a pasta SL-MT8 mostrou uma tendência de perda de trabalhabilidade mais acelerada. Nos ligantes compostos por escória e cimento Portland, a pasta HIB25-MT8 apresentou os maiores valores de fluidez. Assim como nas pastas HIB50-MT7, o ensaio de mini cone da pasta HIB50-MT8 foi interrompido aos 40 minutos devido ao enrijecimento da amostra. A pasta com 75% de cimento Portland apresentou uma redução abrupta da fluidez nos primeiros minutos de ensaio. Aos 5 minutos, a pasta HIB75-MT8 exibiu espalhamento de 95 mm, que foi reduzido pela metade aos 10 minutos, voltando a atingir 93 mm aos 20 minutos. Após o maior valor de espalhamento, que ocorreu aos 30 minutos, o material apresentou uma perda gradativa do abatimento.



Fonte: O Autor (2024)

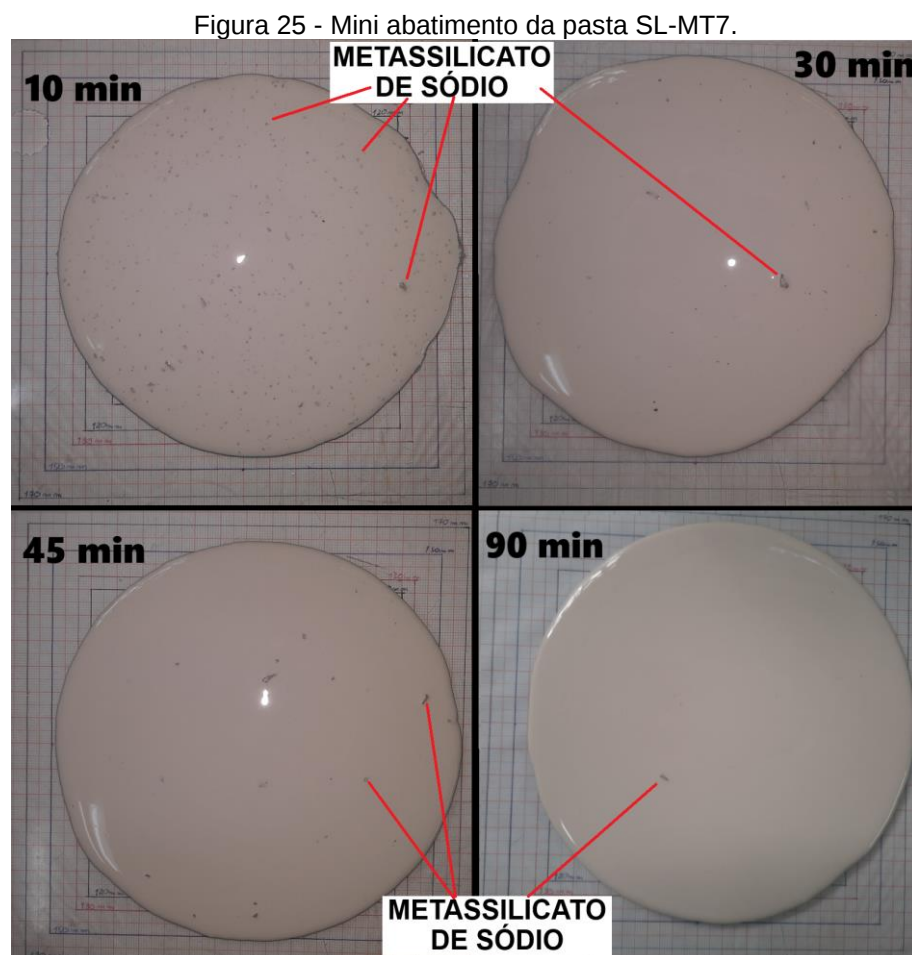
4.1.2.1 Influência do ativador no mini abatimento

A Figura 24 apresenta os resultados do ensaio do mini cone das pastas de escória álcali-ativadas. O teor de Na_2O do ativador teve uma influência significativa nos resultados de abatimento das pastas de escória. O aumento da quantidade de metassilicato de sódio aumentou o espalhamento da pasta. Aos 60 minutos, a pasta SL-MT6 registrou um abatimento de 143 mm, enquanto as pastas SL-MT7 e SL-MT8 alcançaram abatimentos de 156 mm e 165 mm, respectivamente.



Fonte: O Autor (2024)

Também foi observado que uma maior quantidade de metassilicato de sódio prolongou o tempo de trabalhabilidade das pastas. A pasta SL-MT6 começou a reduzir o abatimento de forma mais significativa após 80 minutos, enquanto na pasta SL-MT8 foi notada uma tendência de perda de abatimento após 120 minutos. A pasta SL-MT7 apresentou uma perda de trabalhabilidade após 100 minutos, momento em que o metassilicato de sódio provavelmente se dissolveu na mistura. Isso pode ser observado na Figura 25, onde os pontos referentes ao metassilicato de sódio desaparecem com o passar do tempo. A completa dissolução do ativador alcalino pode ter elevado o pH da solução, acelerando o desenvolvimento das reações da escória.

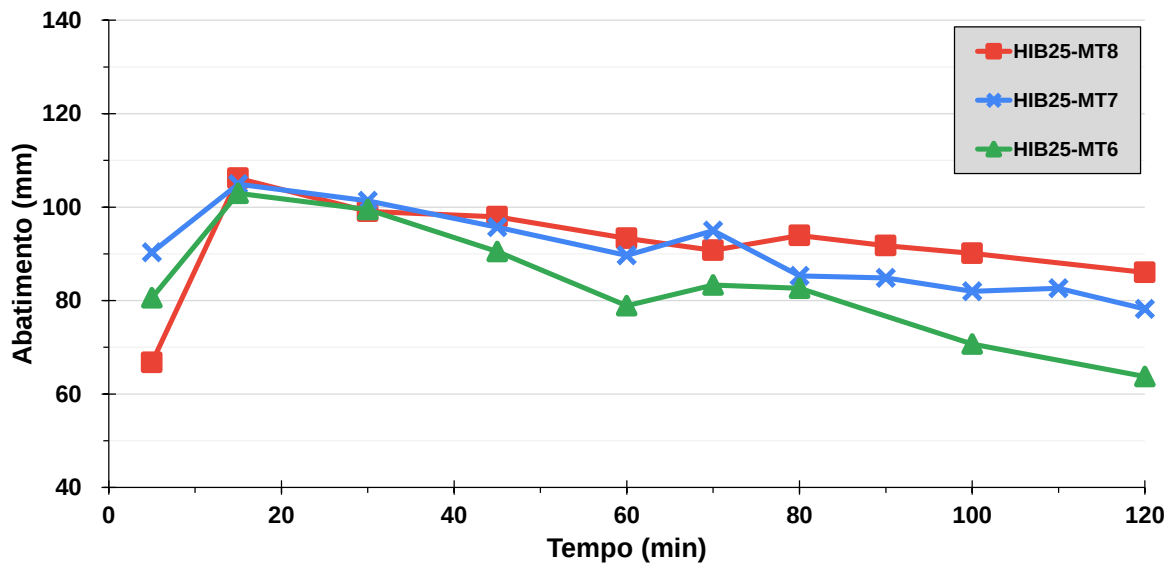


Fonte: O Autor (2024)

A Figura 26 expõe os resultados do ensaio de mini cone das pastas com composição de 25% de cimento Portland e 75% de escória de alto forno. Essas pastas apresentaram comportamentos semelhantes. Foi observado uma elevação acelerada do abatimento aos 15 minutos, após este tempo as pastas apresentaram uma diminuição gradativa do espalhamento. O teor de Na_2O do ativador mostrou a

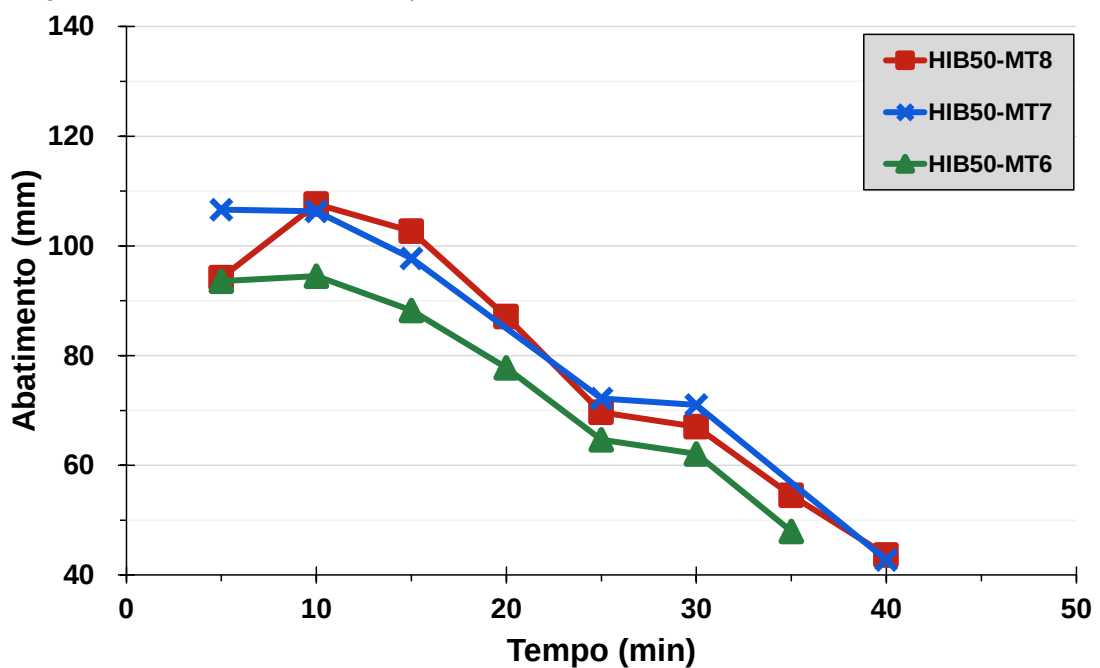
mesma tendência das pastas de escória ativada, onde as pastas que incorporaram uma maior quantidade de metassilicato de sódio apresentaram menores abatimentos. Nas pastas contendo 50% de cimento Portland e 50% de escória, a mistura HIB50-MT6 apresentou menores resultados de espalhamento ao longo do ensaio, enquanto as pastas HIB50-MT7 e HIB50-MT8 tiveram resultados semelhantes, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 26 - Mini abatimento das pastas com 25% de cimento Portland e 75% de escória.



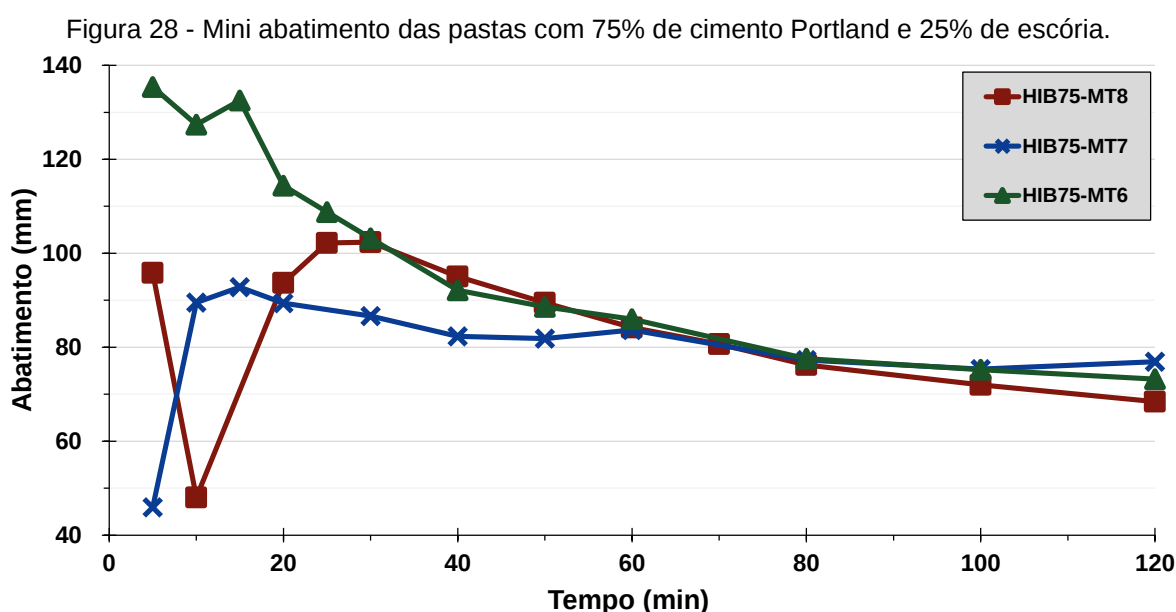
Fonte: O Autor (2024)

Figura 27 – Mini abatimento das pastas com 50% de cimento Portland e 50% de escória.



Fonte: O Autor (2024)

Nas pastas contendo 75% de cimento Portland, foram observados comportamentos diferentes nos primeiros 30 minutos de ensaio, Figura 28. Durante esse período, a pasta HIB75-MT6 apresentou significativa perda de trabalhabilidade, enquanto as pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT8 mostraram uma oscilação entre perda e recuperação de abatimento em um curto período. Entre os 30 e 60 minutos, as pastas HIB75-MT6 e HIB75-MT8 exibiram comportamentos e valores de abatimentos semelhantes, enquanto a pasta HIB75-MT7 apresentou valores menores de abatimento. Após os 60 minutos, todas as três pastas mostraram resultados de abatimento similares.



Fonte: O Autor (2024)

4.1.3 Viscosidade no Copo Ford

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes aos ensaios de viscosidade realizados no copo Ford. Os valores estão representados na unidade de tempo, segundos. Os gráficos foram organizados de acordo com o teor de Na_2O do ativador de cada pasta. As pastas produzidas com ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória puderam ser ensaiadas até os 120 minutos. Durante o teste, essas pastas não apresentaram fluidez adequada para a continuação do experimento. Isso significa que houve um acúmulo de material no copo Ford, impedindo a coleta de dados e, por consequência, levando à interrupção do ensaio.

A pasta de cimento (OPC), apresentou a menor viscosidade dentre todos os traços produzidos, mantendo os resultados entre 17,3 e 10,2 segundos ao longo de

tudo o ensaio. No gráfico de viscosidade das pastas ativadas com 6% de metassilicato de sódio, exposto na Figura 29, observa-se que a pasta de escória álcali-ativada manteve a viscosidade com valores estáveis até os 80 minutos. Após este período, a pasta SL-MT6 apresentou um aumento mais acelerado da viscosidade, sendo o ensaio interrompido aos 110 minutos.

Figura 29 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 6%.

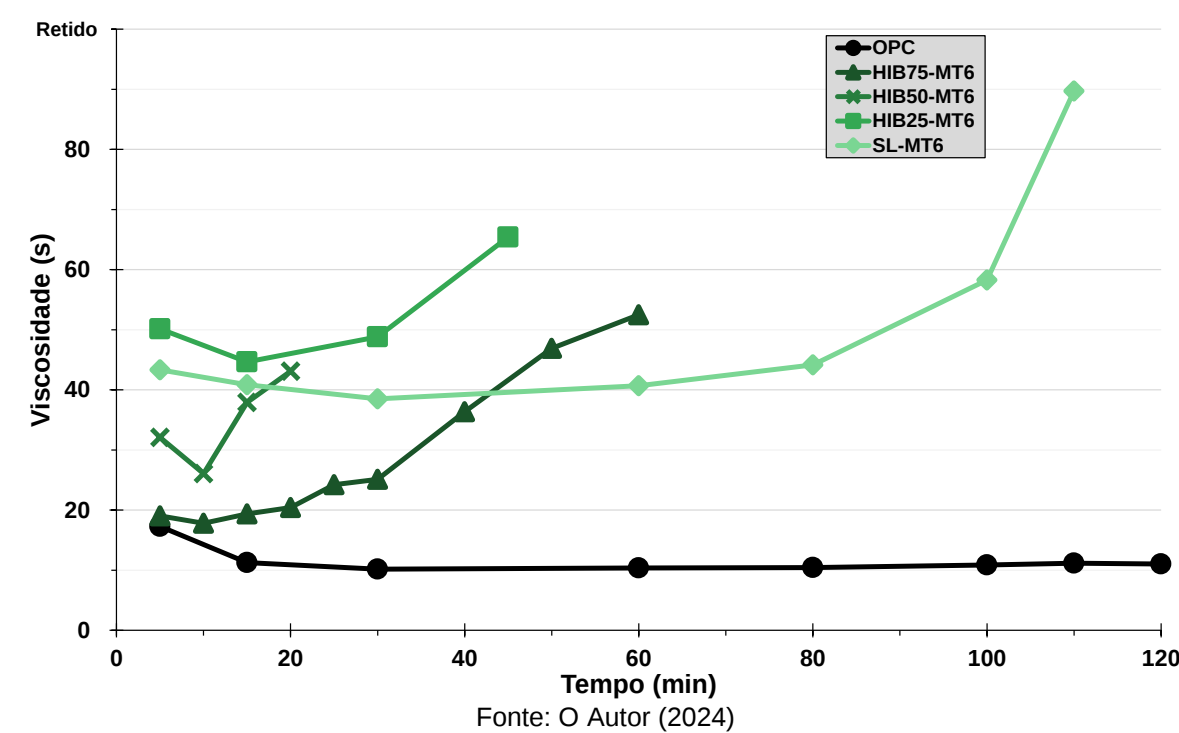
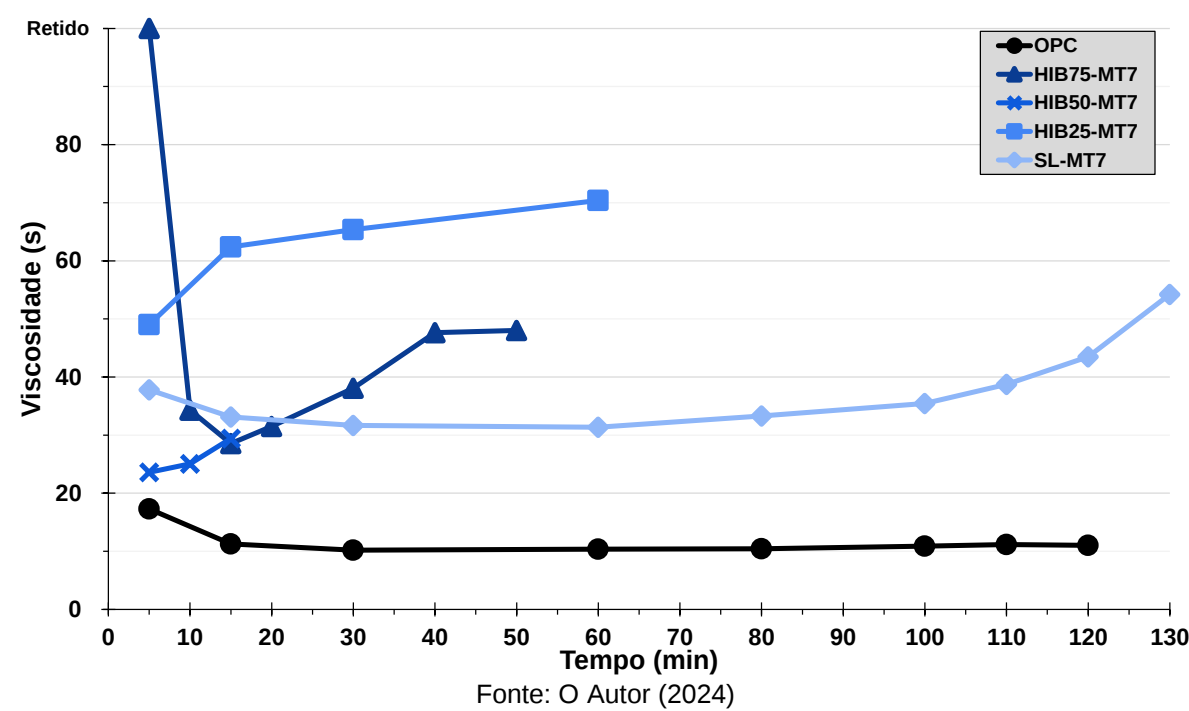


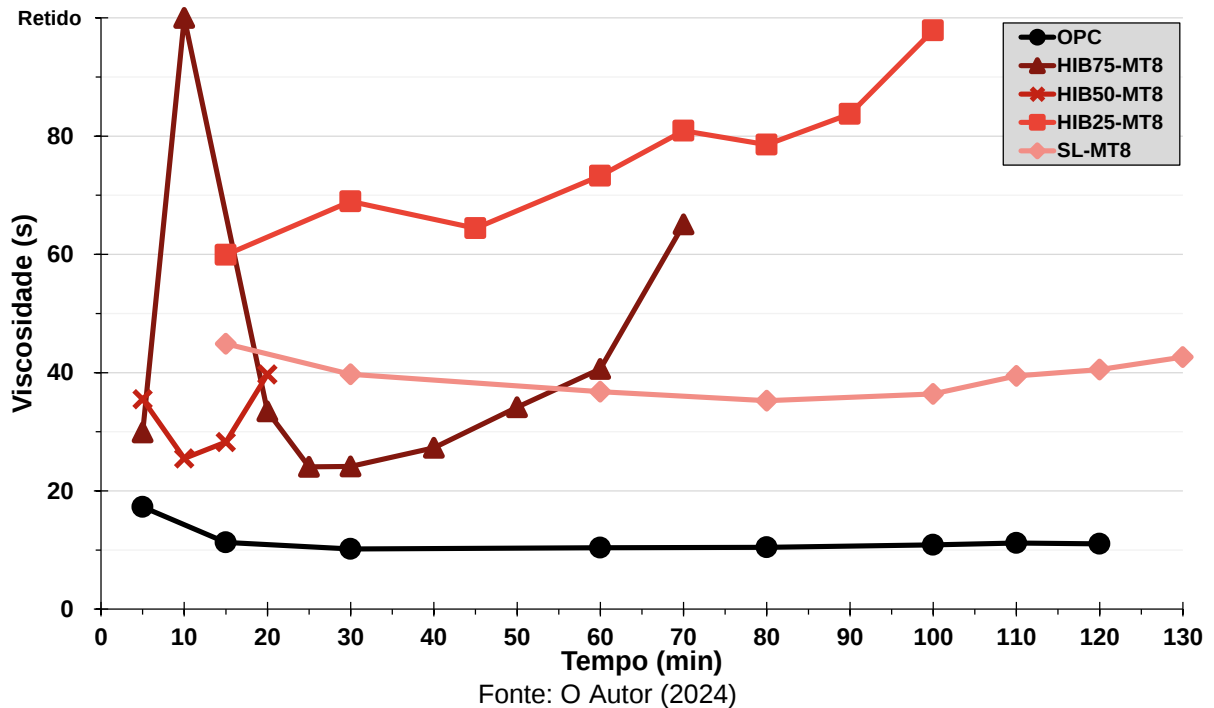
Figura 30 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 7%.



Nos ligantes compostos de cimento Portland e escória, a mistura contendo 50% de cimento Portland e 50% de escória foi a primeira a atingir uma elevada viscosidade, o que impossibilitou a continuação do ensaio. A pasta HIB25-MT6 apresentou os maiores valores de viscosidade. Também foi observado que a pasta HIB75-MT6 obteve o maior ganho de viscosidade, com maior inclinação da reta após 35 minutos. As pastas com 7% de teor de Na_2O apresentaram tendência semelhante às pastas com 8% de ativação alcalina, como pode ser visto na Figura 30. O cimento SL-MT7 apresentou o maior tempo de ensaio, com duração de 130 minutos. A pasta HIB25-MT7 obteve a maior viscosidade entre as pastas com 7% de ativador

A pasta HIB50-MT7 apresentou os valores de fluidez mais próximo ao resultado da pasta OPC, aos 5 minutos. No entanto, mostrou um ganho de viscosidade acelerado, o que impossibilitou a continuação do ensaio após os 15 minutos. Já a pasta HIB75-MT7 apresentou uma elevada viscosidade aos 5 minutos, tendo o material ficado totalmente retido no copo Ford. Entretanto, aos 15 minutos a pasta apresentou sua menor viscosidade e voltou a aumentar a viscosidade de maneira gradativa após este período. A pasta HIB75-MT8 também demonstrou alta viscosidade no início do ensaio, como ilustrado na Figura 31. Aos 10 minutos, a pasta ficou retida no copo Ford, impossibilitando a coleta de dados do ensaio. Aos 25 minutos a pasta atingiu sua maior fluidez e após este tempo passou a aumentar gradualmente a viscosidade. O ligante HIB50-MT8 apresentou o ganho de viscosidade mais rápido entre as pastas com 8% de ativação alcalina, sendo interrompido o ensaio aos 20 minutos. Já a pasta HIB25-MT8 apresentou a maior viscosidade e o maior tempo de ensaios entre todos os ligantes compostos de cimento Portland e escória. A pasta SL-MT8 manteve uma viscosidade estável ao longo dos 130 minutos de ensaio, não demonstrando perda de fluidez.

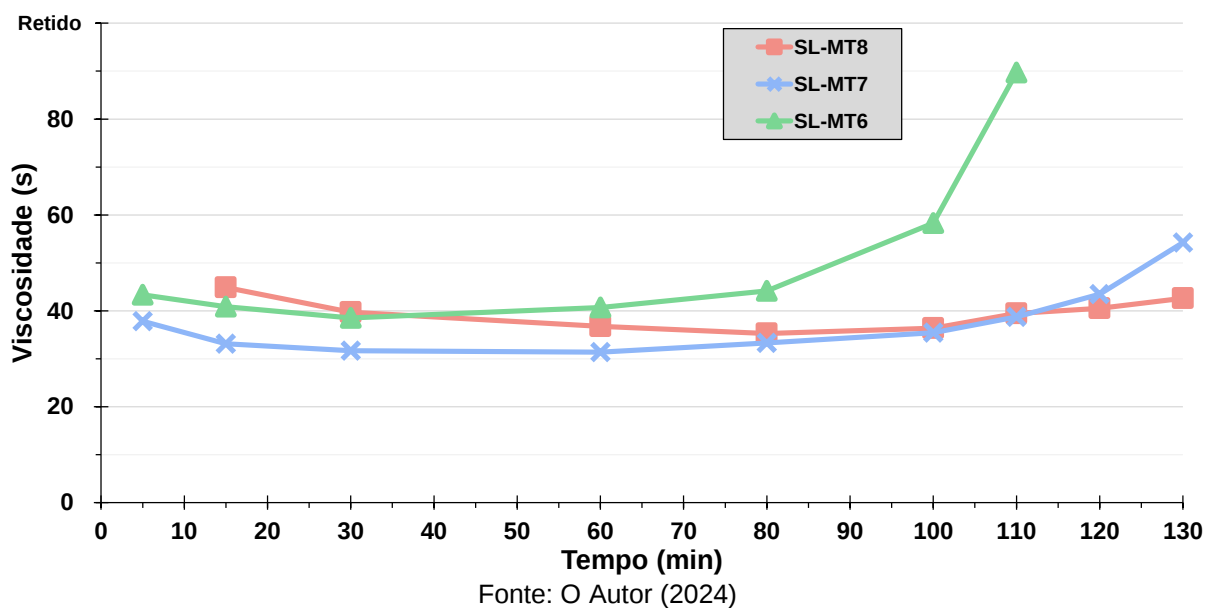
Figura 31 - Viscosidade das pastas com teor de ativação de 8%.



4.1.3.1 Influência do ativador na viscosidade

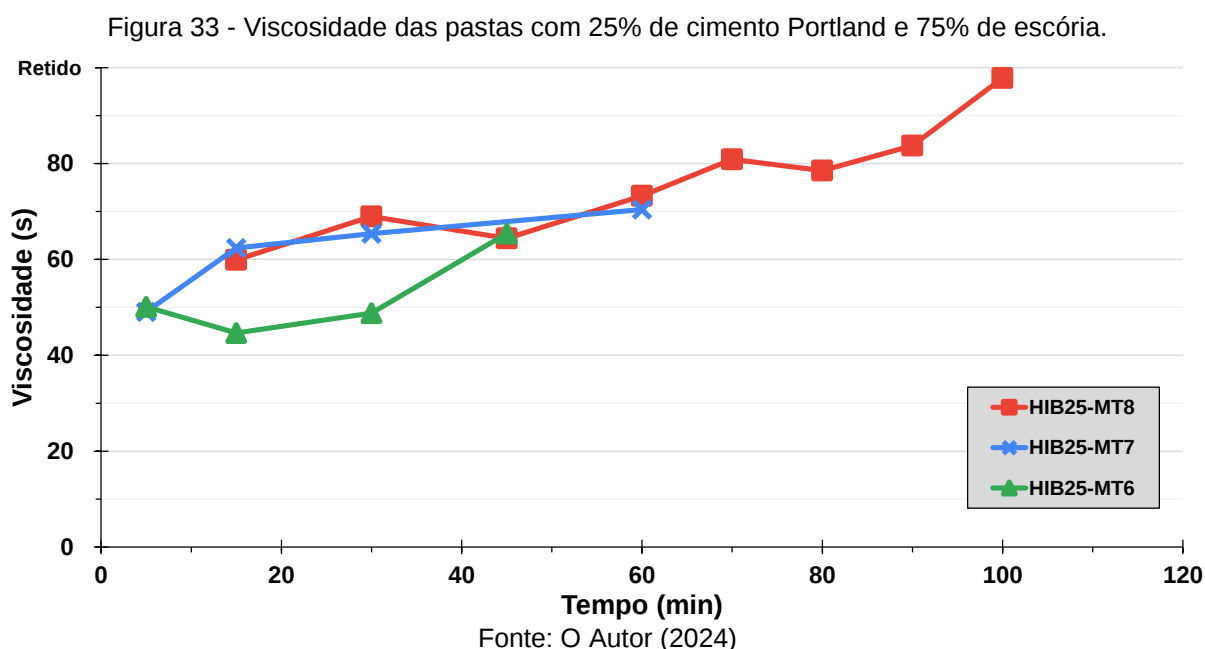
Nesta seção, foram agrupados os resultados de pastas com a mesma proporção de cimento Portland e escória de alto forno, com o intuito de analisar a influência do teor de Na_2O do ativador nas misturas. Os gráficos das pastas de escória álcali-ativada estão expostos na Figura 32.

Figura 32 - Viscosidade das pastas de escórias álcali-ativada.



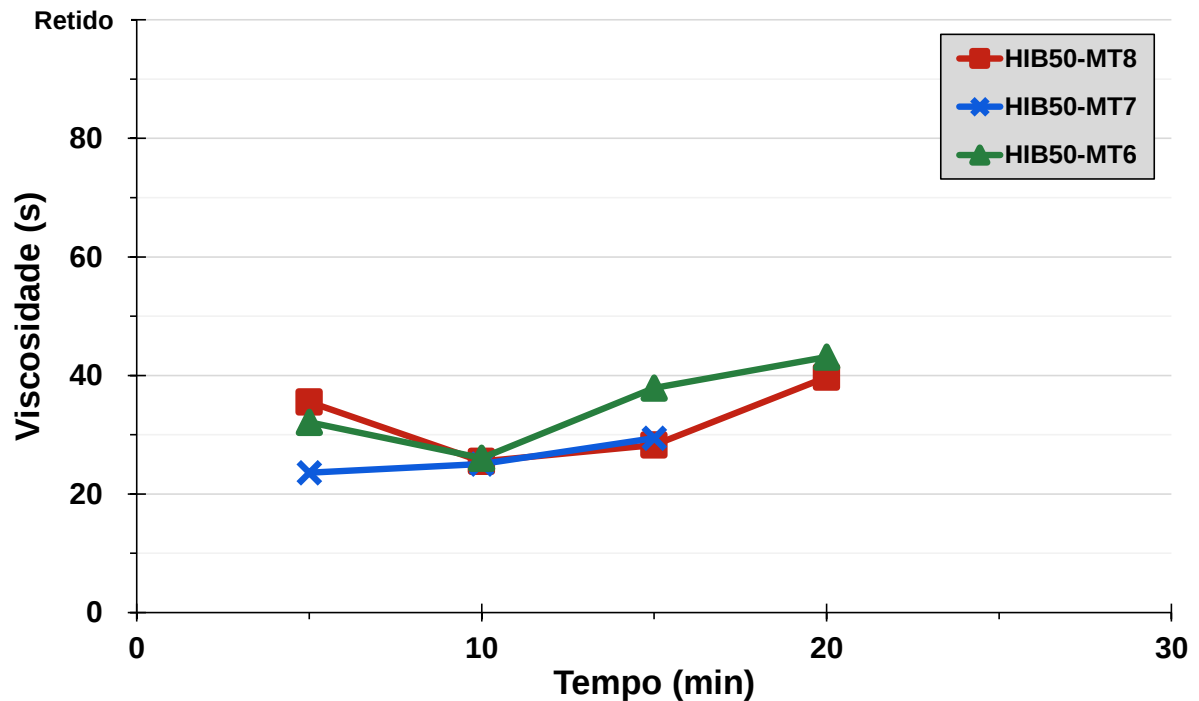
A maior quantidade de metassilicato de sódio nas escórias álcali-ativadas, prolongou o período de estabilidade da viscosidade das pastas. Tendo em vista que

a pasta SL-MT6 começou a apresentar um aumento de viscosidade após 80 minutos, enquanto a pasta SL-MT7 apresentou esta tendência após 100 minutos e na pasta SL-MT8 não foi observado o aumento de viscosidade durante o período analisado. Nas pastas compostas por 25% de cimento Portland e 75% de escória, foi observado que a maior quantidade de metassilicato de sódio aumentou o tempo de ensaio das pastas, conforme evidenciado na Figura 33. As pastas HIB25-MT7 e HIB25-MT8 exibiram valores de viscosidade semelhantes, no entanto a pasta HIB25-MT8 apresentou maior tempo de ensaio, indicando que a pasta se manteve fluida por mais tempo. Por outro lado, a pasta HIB25-MT6 apresentou o menor tempo de ensaio e a menor viscosidade entre essas pastas.



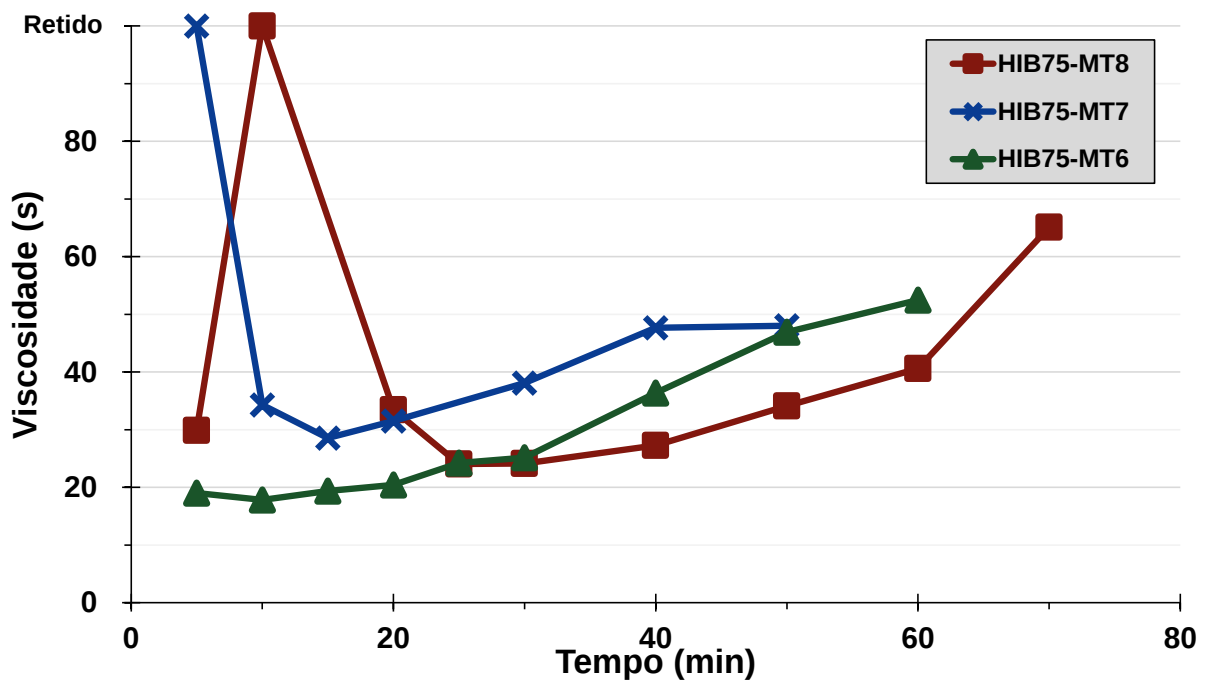
As misturas com 50% de substituição foram as que perderam fluidez de forma mais acelerada. Não foi possível continuar o ensaio após os 20 minutos, conforme mostrado na Figura 34. Devido à pouca quantidade de dados e aos valores de viscosidade semelhantes, não foi identificado diferenças significativas no comportamento das pastas apenas analisando o ensaio de viscosidade do copo Ford.

Figura 34 - Viscosidade das pastas com 50% de cimento Portland e 50% de escória.



Fonte: O Autor (2024)

Figura 35 - Viscosidade das pastas com 75% de cimento Portland e 25% de escória.



Fonte: O Autor (2024)

As pastas com 75% de cimento Portland e 25% de escória apresentaram comportamentos iniciais distintos, como pode ser visto nos gráficos da Figura 35. A pasta HIB75-MT6 exibiu um aumento contínuo da viscosidade ao longo do tempo. Por outro lado, as pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT8 apresentaram um aumento brusco da viscosidade aos 5 e 10 minutos, respectivamente. Após este período, as

pastas voltaram a apresentar fluidez. Foi observado que a menor quantidade de metassilicato de sódio retardou o momento de fluidez máxima das pastas. A pasta HIB75-MT6 alcançou a menor viscosidade aos 10 minutos, enquanto das pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT8 exibiram menores viscosidades aos 15 e 25 minutos, respectivamente.

4.1.4 Comparação entre os ensaios de viscosidade e de mini abatimento

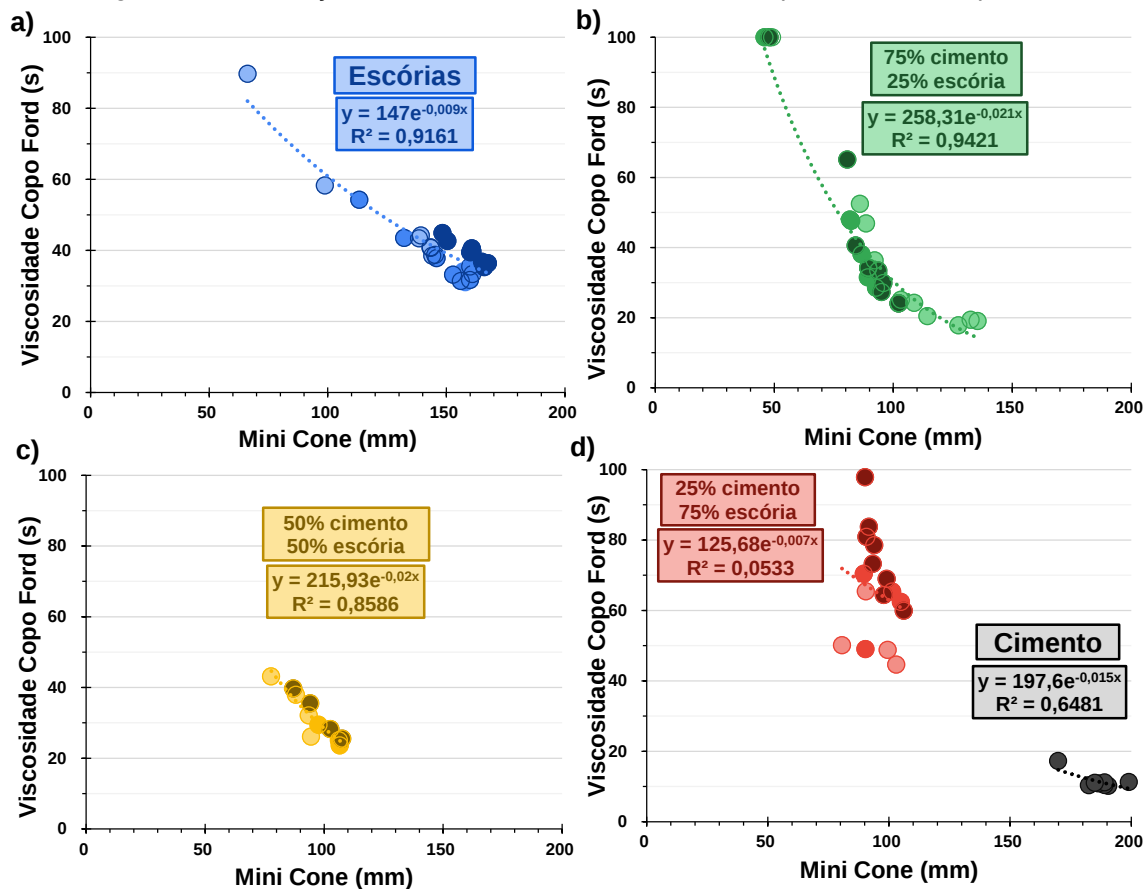
Neste item, foram feitas comparações entre os resultados dos ensaios de viscosidade no copo Ford e do mini cone de Kantro, com o objetivo de identificar correlações entre os resultados obtidos. Para analisar os resultados, as pastas foram agrupadas em cinco conjuntos com base na composição de cimento Portland e escória de cada ligante. Em cada conjunto, foram incluídos os resultados das pastas com diferentes níveis de ativador: 6%, 7% e 8%. A análise considerou apenas os tempos de coleta de dados em que ambos os ensaios apresentaram resultados disponíveis. O coeficiente de determinação, representado como r-quadrado ou R^2 , é uma medida estatística utilizada para avaliar a relação entre duas variáveis. Sua escala varia de 0 a 1, onde o valor zero indica que o modelo de regressão não consegue explicar a variabilidade dos dados em torno da média da variável dependente, enquanto o valor 1 indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados. Os valores de r-quadrado referentes à relação entre os ensaios de viscosidade no copo Ford e mini abatimento estão expostos na Tabela 16. Na Figura 36 são exibidos os gráficos de cada conjunto, acompanhados das linhas de tendência e equações correspondentes.

Tabela 16 - Resultados de R^2 da correlação entre viscosidade e espalhamento das pastas.

Misturas	R^2
Cimento	0,6481
Escória 100% (SL's)	0,9365
Cimento 25% - Escória 75% (H25's)	0,0533
Cimento 50% - Escória 50% (H50's)	0,8603
Cimento 75% - Escória 25% (H75's)	0,9421

Fonte: O Autor (2024).

Figura 36 - Correlação dos resultados de viscosidade e espalhamento das pastas.



Fonte: O Autor (2024)

As mudanças de viscosidade nas pastas de escória ativada foram exibidas nos mesmos tempos de coleta de dados nos ensaios do copo Ford e do mini abatimento, mostrando a boa correlação entre os ensaios. Nos dois ensaios a pasta SL-MT6 mostrou um aumento de viscosidade a partir dos 80 minutos, enquanto a pasta SL-MT7 este aumento foi observado aos 100 minutos e na pasta SL-MT8 a tendência de aumento de viscosidade foi mostrada aos 120 minutos. As pastas 75% de cimento Portland e 25% de escória nos dois ensaios foi registrado o aumento repentino de viscosidade das pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT8. Também exibiram o aumento de viscosidade da pasta HIB75-MT6 após os 35 minutos, ilustrando a boa correlação entre os ensaios do copo Ford e do mini cone, com r-quadrados de 0,94.

As pastas com 50% de cimento Portland e 50% de escória, também apresentaram boa correlação entre os dados, com valor de R^2 de 0,86. Os ensaios mostraram que os cimentos HIB50's apresentaram fluidez por um período curto de tempo, em comparação com os outros cimentos. A pasta de cimento e as pastas com 25% de cimento e 75% de escória, apresentaram correlações inferiores aos outros três conjuntos. Nas pastas H25's foi observado o valor de R^2 próximo a zero,

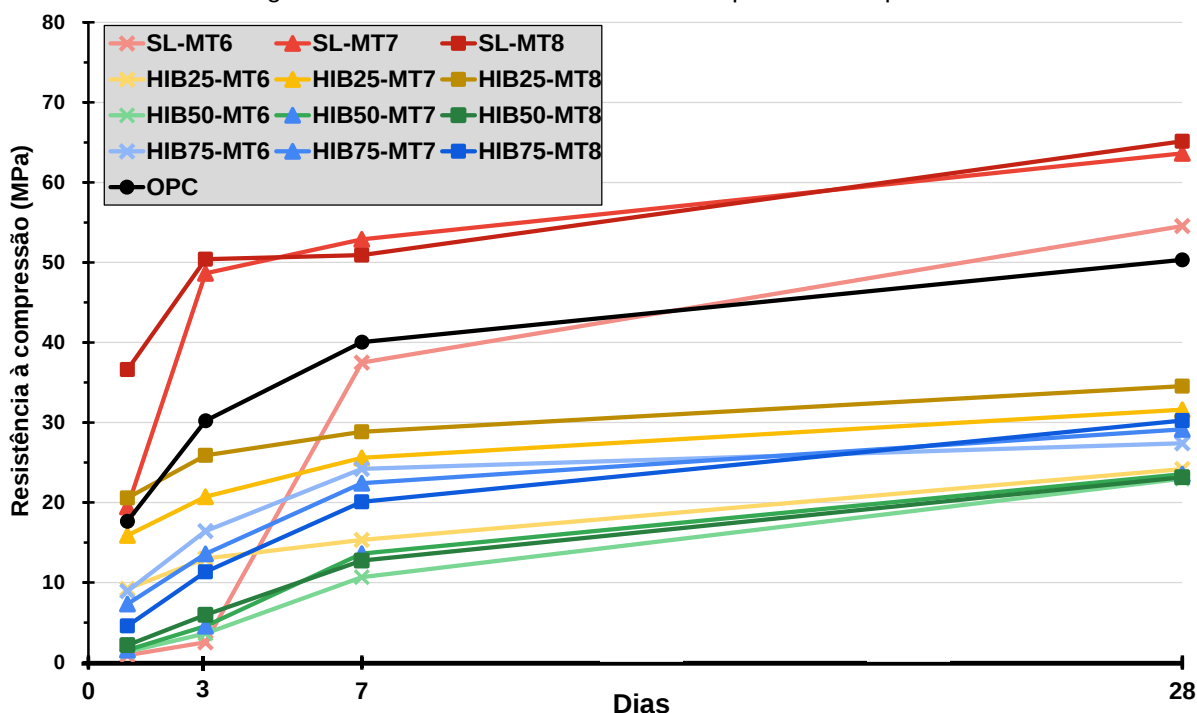
portanto, mostra que não existe relação entre os resultados dos ensaios. Com esses resultados podemos perceber que os parâmetros do ensaio do copo Ford não foi o ideal para a viscosidade destas pastas. Na pasta de cimento a relação entre os ensaios foi de 64,8%, indicando que um menor funil do ensaio de viscosidade poderia detalhar melhor as variações de viscosidade.

A norma ABNT NBR 5849, recomenda tempos de escoamento, para a realização do ensaio de viscosidade, entre 20 e 100 segundos. Foi observado que os menores valores de r-quadrado ocorreram nos conjuntos que apresentaram a maior e a menor viscosidade. A pasta de cimento apresentou valores de viscosidade inferiores a 20s, portanto não foi possível detalhar a variação da viscosidade de modo mais preciso quando comparado com o ensaio de mini cone. Enquanto, o conjunto H25's, apesar de apresentar valores dentro do limite de tempo recomendado pela ABNT NBR 5849, o tempo de passagem da pasta pelo funil foi muito maior do que os outros cimentos. Devido à grande variação na composição das misturas, era esperado que os parâmetros definidos para o ensaio de viscosidade no copo Ford não fossem o ideal para todos os conjuntos de pastas. Os conjuntos SL's, H50's e H75's apresentaram boa correlação entre o ensaio de viscosidade no copo Ford e o ensaio de mini abatimento para os tempos de passagem pelo funil do copo Ford entre 20 e 60 segundos.

4.1.5 Resistência à compressão das Pastas

Neste trabalho os corpos de prova produzidos em pastas foram ensaiados aos 1, 3, 7 e 28 dias para resistência à compressão. Os resultados individuais de cada amostra estão expostos no APÊNDICE A e a análise estatística desses dados estão apresentadas nos APÊNDICES C, D, E e F. A Figura 37, exibe o desenvolvimento das resistências à compressão dos 13 traços produzidos.

Figura 37 - Resumo da resistência à compressão das pastas.



Fonte: O Autor (2024)

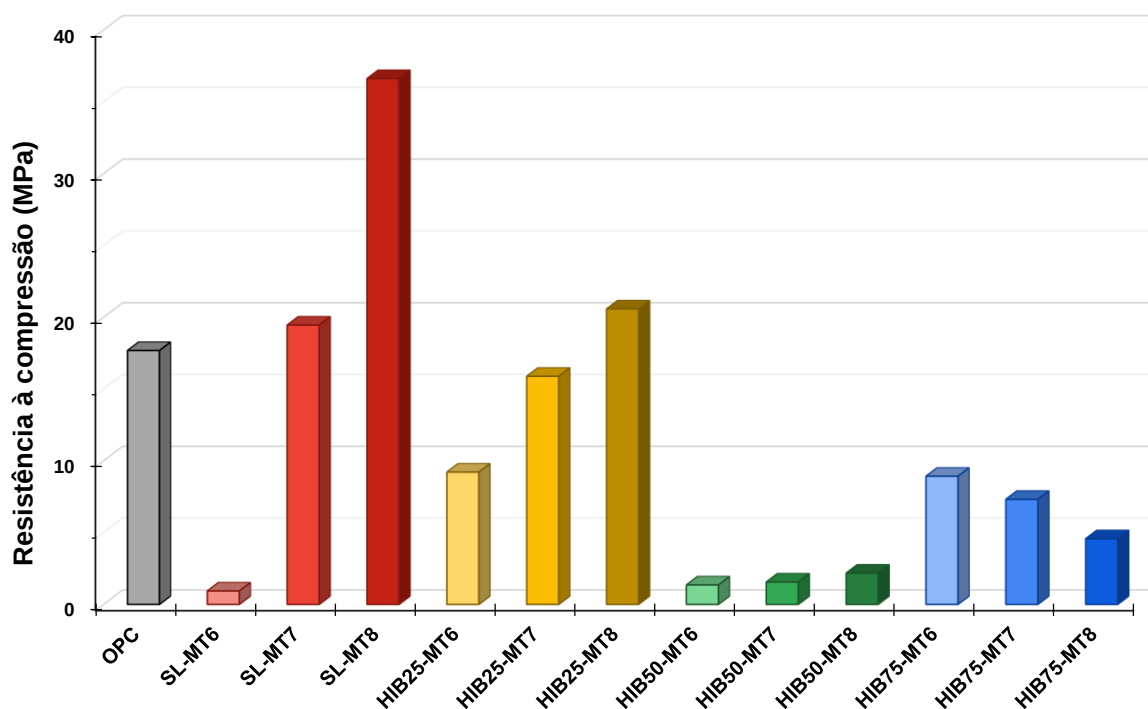
A pasta de escória SL-MT8 apresentou as maiores resistências à compressão em todas as idades. A pasta de cimento (OPC) apresentou uma taxa uniforme de crescimento, com valores de resistência à compressão de 17,6 MPa, 30,2 MPa, 40,0 MPa e 50,3 MPa nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Os ligantes compostos por cimento Portland e escória apresentaram resultados de resistência à compressão inferiores em comparação com as pastas de escória álcali-ativada e de cimento Portland em praticamente todas as idades.

Durante o primeiro dia de hidratação, foi observado um aumento nos valores de resistência à compressão das pastas de escória conforme o teor de Na_2O do ativador alcalino aumentou, conforme ilustrado na Figura 38. A pasta SL-MT8 exibiu a maior resistência inicial, atingindo o dobro da resistência mecânica da pasta de cimento Portland. A adição de 7% de metassilicato de sódio, fez com que a pasta SL-MT7 alcançasse uma resistência à compressão estatisticamente equivalente à pasta OPC. Por outro lado, a mistura SL-MT6 apresentou uma resistência à compressão praticamente nula no primeiro dia. O aumento nos teores de álcalis elevou o pH da pasta, o que acelerou a dissolução da escória e resultou em um ganho rápido de resistência mecânica (Lima *et al.*, 2022).

O comportamento dos ligantes com 25% de cimento Portland, foram semelhantes ao apresentado pelas pastas de cimento de escória. A elevação do teor

de ativação proporcionou maiores valores de resistência mecânica, entretanto apresentaram menor variação entre os resultados. A diferença dos valores de resistência à compressão das pastas SL-MT6 e SL-MT8 foi de 39 vezes, enquanto nas pastas HIB25-MT6 e HIB25-MT8 a diferença foi de 2,2 vezes.

Figura 38 - Resistência à compressão das pastas com 1 dia.



Fonte: O Autor (2024)

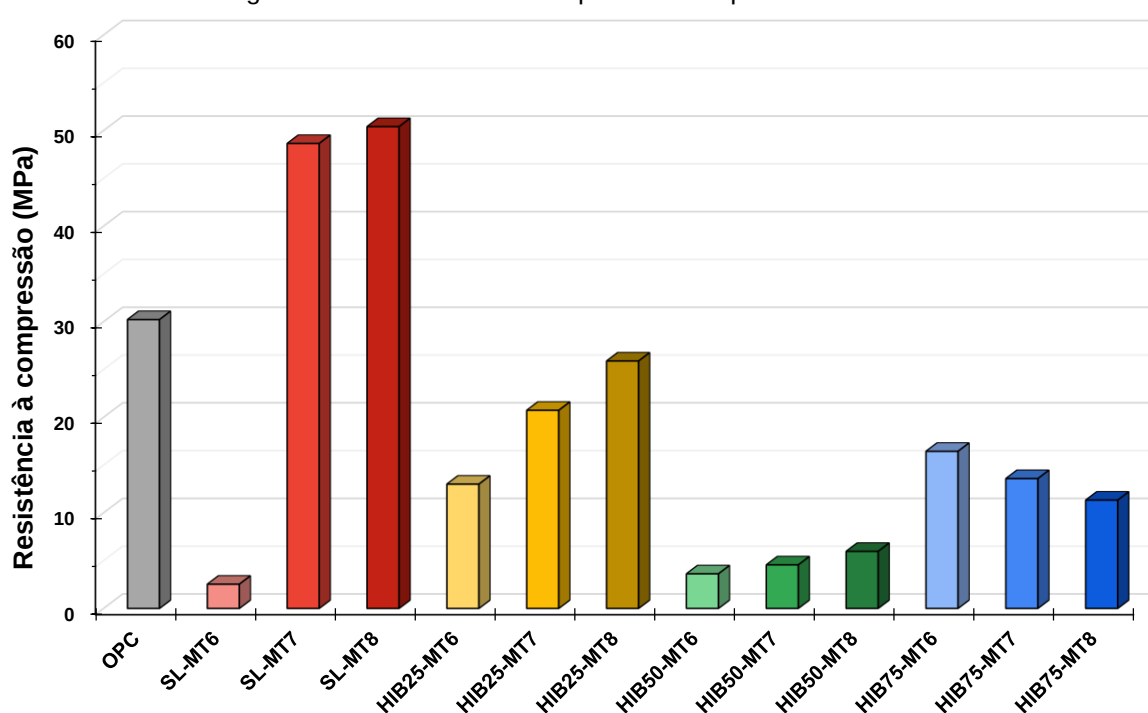
Nas pastas com 75% de cimento Portland, observou-se um efeito negativo do ativador alcalino nos resultados de resistência mecânica. O aumento do teor de Na_2O reduziu a resistência à compressão das pastas. Por exemplo, a pasta HIB75-MT6 apresentou resistência de 8,9 MPa, enquanto a pasta HIB75-MT8 registrou 4,6 MPa, representando uma redução de 51% nos valores de resistência mecânica. Essa tendência também foi observada por Acevedo-Martinez; Gomez-Zamorano; Escalante-Garcia (2012), onde uma maior quantidade de ativador alcalino teve um impacto negativo nos valores de resistência à compressão de ligantes compostos por 30% de escória. As pastas contendo 50% de cimento Portland apresentaram valores de resistência inicial inferiores a 3 MPa. Esta baixa resistência mecânica está relacionada ao retardamento ou à inibição das reações de hidratação do cimento Portland induzidas pela solução alcalina (Puertas *et al.*, 2013).

O comportamento da resistência à compressão dos ligantes álcali-ativados compostos de cimento Portland e escória apresentaram semelhanças nas idades de

1 e 3 dias, conforme exibido na Figura 39. As pastas HIB25-MT8, HIB25-MT7 e HIB25-MT6 registraram os maiores valores de resistência à compressão, respectivamente. Observou-se, no entanto, que o percentual de aumento de resistência entre 1 e 3 dias dessas pastas foi maior à medida que a quantidade de metassilicato de sódio diminuiu. Nas pastas contendo 75% de cimento Portland, os valores de resistência à compressão diminuíram conforme aumentou a quantidade de ativador alcalino. Essa tendência também foi observada no estudo de Sajedi e Razak (2010), onde o aumento da quantidade de silicato de sódio reduziu a resistência mecânica dos ligantes com 60% de cimento Portland em sua composição.

As misturas contendo 50% de cimento Portland apresentaram um aumento superior a 160% em comparação aos resultados de 1 dia; contudo, continuaram exibindo baixa resistência mecânica. Nos cimentos de escória, a ativação com 7% de metassilicato de sódio atingiu um valor de resistência à compressão estatisticamente equivalente à pasta SL-MT8, enquanto a pasta SL-MT6 continuou a apresentar valores de resistência à compressão quase nulos.

Figura 39 - Resistência à compressão das pastas com 3 dias.



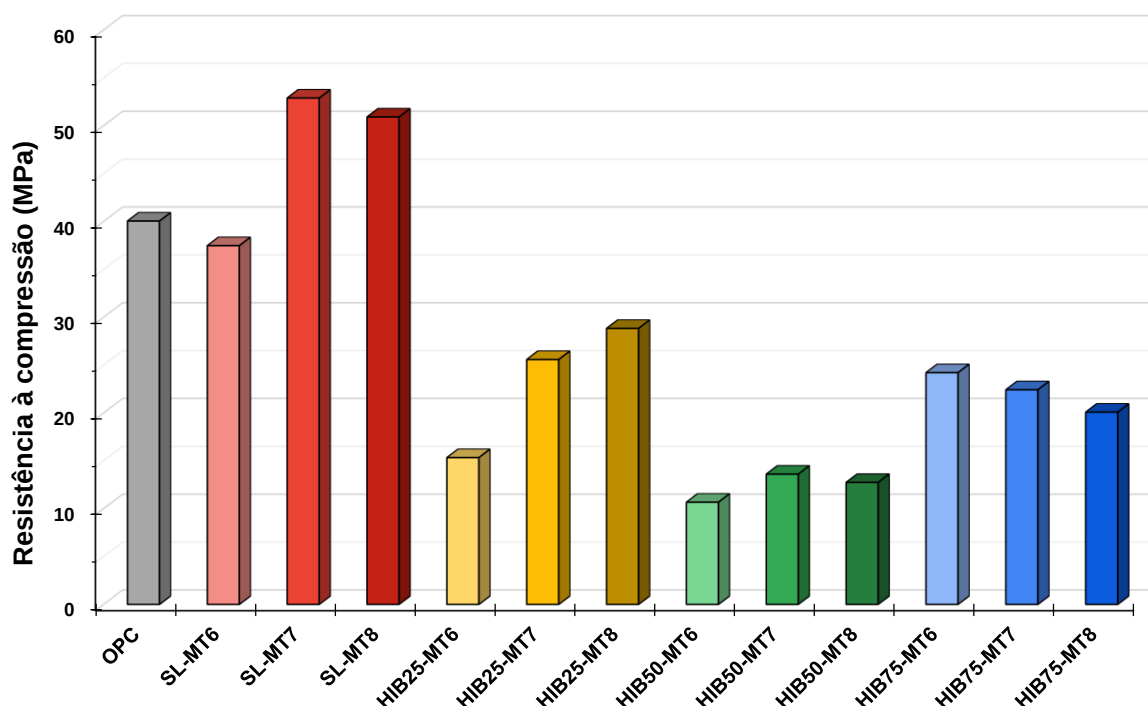
Fonte: O Autor (2024)

Aos 7 dias, a pasta SL-MT6 apresentou um ganho de resistência à compressão, alcançando um valor estatisticamente equivalente ao cimento Portland.

No entanto, os valores foram inferiores aos das pastas SL-MT7 e SL-MT8, como exposto na Figura 40. As pastas HIB50-MT6, HIB50-MT7 e HIB50-MT8 apresentaram ganhos significativos de resistência à compressão entre os 3 e 7 dias, com aumentos de 194%, 198% e 113%, respectivamente. Entretanto, mesmo com esses aumentos, continuaram apresentando os menores valores de resistência mecânica entre as misturas avaliadas.

Assim como os resultados com 1 e 3 dias, aos 7 dias as pastas contendo 25% de cimento Portland continuaram a exibir maiores valores de resistência mecânica em misturas com maiores teores de álcalis, enquanto as pastas contendo 75% de cimento Portland continuaram a apresentar menores valores de resistência à compressão nas misturas com maior teor de Na_2O . Entretanto, a diferença nos valores de resistência mecânica entre a pasta HIB75-MT6 e HIB75-MT8 aos 7 dias foi reduzida para 20%, enquanto nos dias 1 e 3 dias a diferença entre as pastas era de 95% e 45%.

Figura 40 - Resistência à compressão das pastas com 7 dias.



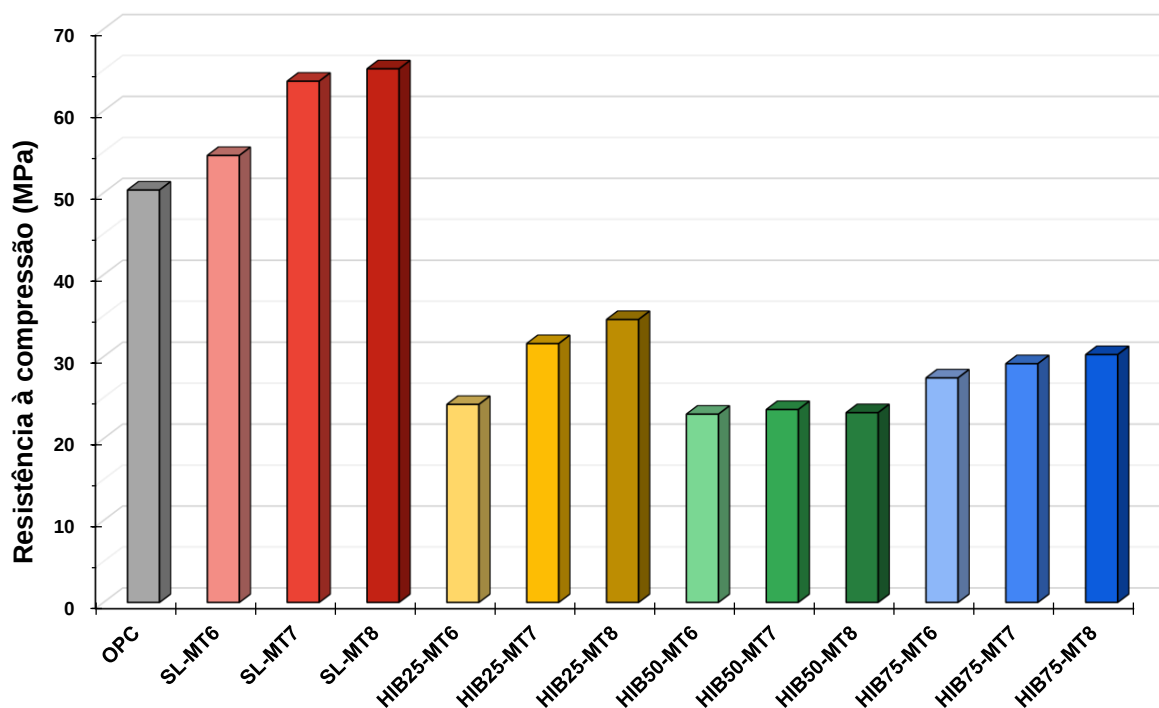
Fonte: O Autor (2024)

Aos 28 dias, verificou-se que as pastas SL-MT7 e SL-MT8 exibiram os maiores valores de resistência à compressão, como ilustrado na Figura 41. A pasta SL-MT6 exibiu resultados estatisticamente equivalente à pasta OPC. As pastas com 75% de cimento Portland apresentaram resultados estatisticamente iguais, no

entanto nota-se que, em valores absolutos, a pasta HIB75-MT8 apresentou maior resistência à compressão seguida das pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT6, respectivamente, o oposto do que vinham ocorrendo nas outras idades.

As pastas compostas por 50% de cimento Portland duplicaram os resultados de resistência à compressão entre 7 e 28 dias. Entre os ligantes compostos de cimento Portland e escória, a pasta HIB25-MT8 exibiu o maior valor absoluto de resistência à compressão, entretanto exibiu semelhança estatística com as pastas HIB25-MT7, HIB75-MT78, HIB75-MT7 e HIB75-MT6.

Figura 41 - Resistência à compressão das pastas aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2024)

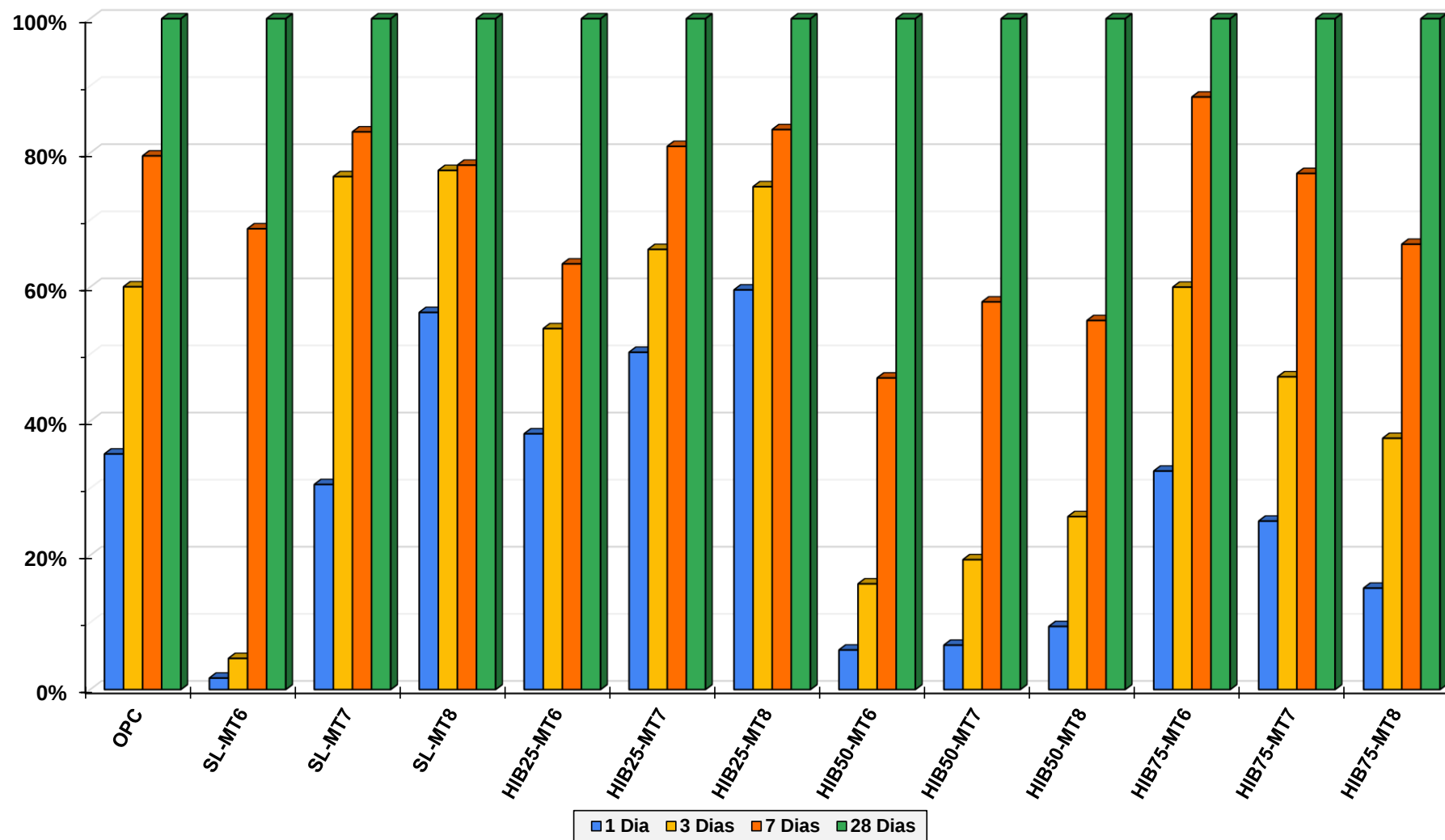
A Figura 42 apresenta a evolução percentual da resistência à compressão das pastas nos períodos de 1, 3, 7 e 28 dias. Observa-se que a pasta de cimento Portland mostrou uma evolução proporcional da resistência à compressão, com um aumento de aproximadamente 20% em cada idade. Este comportamento foi diferente nos cimentos álcali-ativados. Nos cimentos de escória e nos cimentos contendo 25% de cimento Portland, o teor de ativador teve uma influência positiva nos resultados de resistência à compressão inicial. O aumento dos teores de Na_2O fez com que as pastas ganhassem resistência mecânica mais rapidamente. Esse ganho de resistência foi mais perceptível nas pastas de escória. A pasta SL-MT8, por exemplo, apresentou 56% da resistência à compressão aos 28 dias já no

primeiro dia, enquanto as pastas SL-MT7 e SL-MT6 alcançaram apenas 31% e 2% da resistência aos 28 dias, respectivamente. As pastas HIB25-MT8, HIB25-MT7 e HIB25-MT6 alcançaram, nas primeiras 24 horas, 60%, 50% e 38% da resistência mecânica atingida aos 28 dias, respectivamente.

Nas pastas compostas por 75% de cimento Portland, observou-se um efeito negativo com o aumento da quantidade de álcalis. As misturas com maiores teores de Na_2O apresentaram maior retardo da hidratação. Conforme ilustrado na Figura 42, o resultado de resistência à compressão com 1 dia da pasta HIB75-MT8 alcançou 15% da resistência aos 28 dias, enquanto a pasta HIB75-MT6 atingiu 33%. Aos 7 dias, a pasta HIB75-MT6 atingiu 88% da sua resistência mecânica final, no entanto, a pasta HIB75-MT8 só tinha alcançado 66%. Aos 28 dias, as duas pastas apresentaram valores de resistência à compressão estatisticamente semelhantes, corroborando com a análise dos resultados dos difratogramas de raios-X (seção 4.1.1) que mostraram que a quantidade de metassilicato de sódio presente na mistura retarda a hidratação dos grãos anidros, resultando em menores valores de resistência à compressão (Fonseca, 2021; Puertas *et al.*, 2013; Witzleben, 2020).

Os efeitos das reações entre o metassilicato de sódio e o cimento Portland são mais evidentes nas pastas com 50% de substituição. Nessas pastas, a proporção equilibrada de cimento Portland e metassilicato de sódio favorece uma maior quantidade de reações entre os materiais, produzindo um maior volume de géis sobre os grãos anidros. Isso é claramente observado na evolução da resistência mecânica, conforme ilustrado na Figura 42. As pastas HIB50-MT6, HIB50-MT7 e HIB50-MT8 apresentaram, com 1 dia, apenas 6%, 7% e 9% da resistência à compressão alcançada aos 28 dias, respectivamente. Aos 7 dias, essas mesmas pastas ainda não tinham atingido 60% da resistência mecânica final, apresentando a menor evolução entre todos os cimentos estudados nesta pesquisa.

Figura 42 - Evolução percentual da resistência à compressão das pastas em função da idade.



Fonte: O Autor (2024)

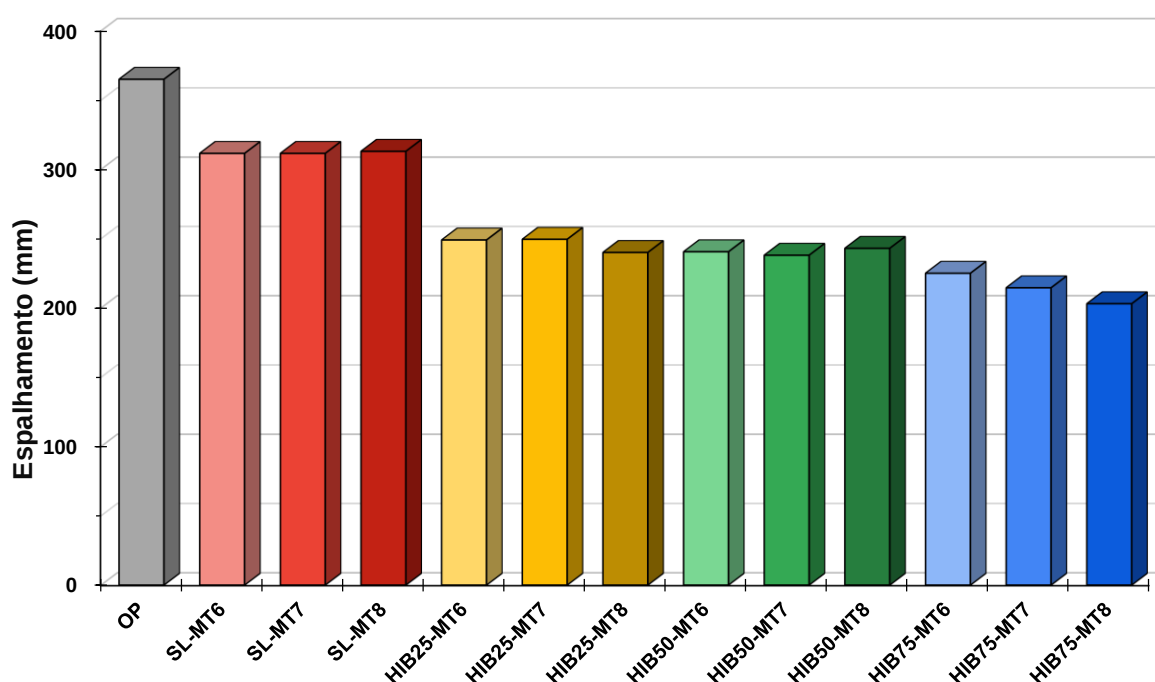
4.2 ANÁLISE EM ARGAMASSA

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em argamassas.

4.2.1 Mesa de consistência

O ensaio de mesa de consistência, também conhecido como Flow Table, foi realizado imediatamente após a homogeneização da mistura na argamassadeira. Os resultados, medidos em milímetros, estão apresentados na Figura 43.

Figura 43 - Resumo do espalhamento das argamassas.



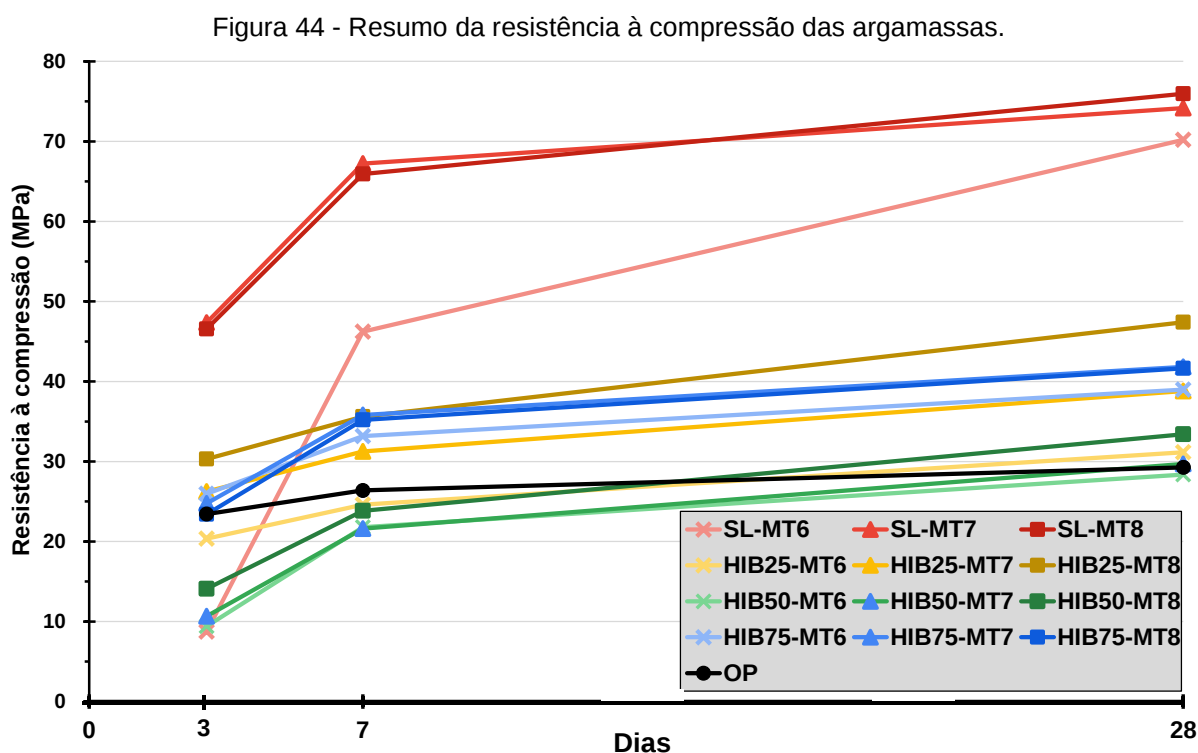
Fonte: O Autor (2024)

A argamassa de cimento apresentou a maior fluidez entre todas as misturas, assim como nos ensaios no estado fresco das pastas. As argamassas de escória ativada mostraram resultados de espalhamento inferiores à argamassa OPC. Os ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória apresentaram os menores valores no ensaio de mesa consistência. Nesses cimentos, o aumento do teor de cimento Portland teve um efeito negativo nos resultados de abatimento. A elevada quantidade de cimento Portland fez com que as argamassas HIB75's exibissem nos menores valores de abatimento, foi observado que nesses cimentos o aumento do teor de metassilicato de sódio reduziu os valores de espalhamento das argamassas.

As argamassas HIB25's e HIB50's obtiveram resultados similares, porém com as argamassas com 25% de cimento Portland apresentando um desempenho ligeiramente superior. Esses resultados são semelhantes aos resultados do ensaio de mini abatimento realizado em pastas. Considerando que o tempo do início da mistura até a coleta de dados do ensaio de mesa de consistência foi de, aproximadamente, 10 minutos. Neste tempo, as pastas HIB75-MT7 e HIB75-MT8 demonstraram alta viscosidade e as pastas HIB25's e HIB50's apresentaram resultados próximos de mini abatimento.

4.2.2 Resistência à compressão

Os corpos de prova de argamassa foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão. Os resultados médios das resistências à compressão estão apresentados na Figura 44.



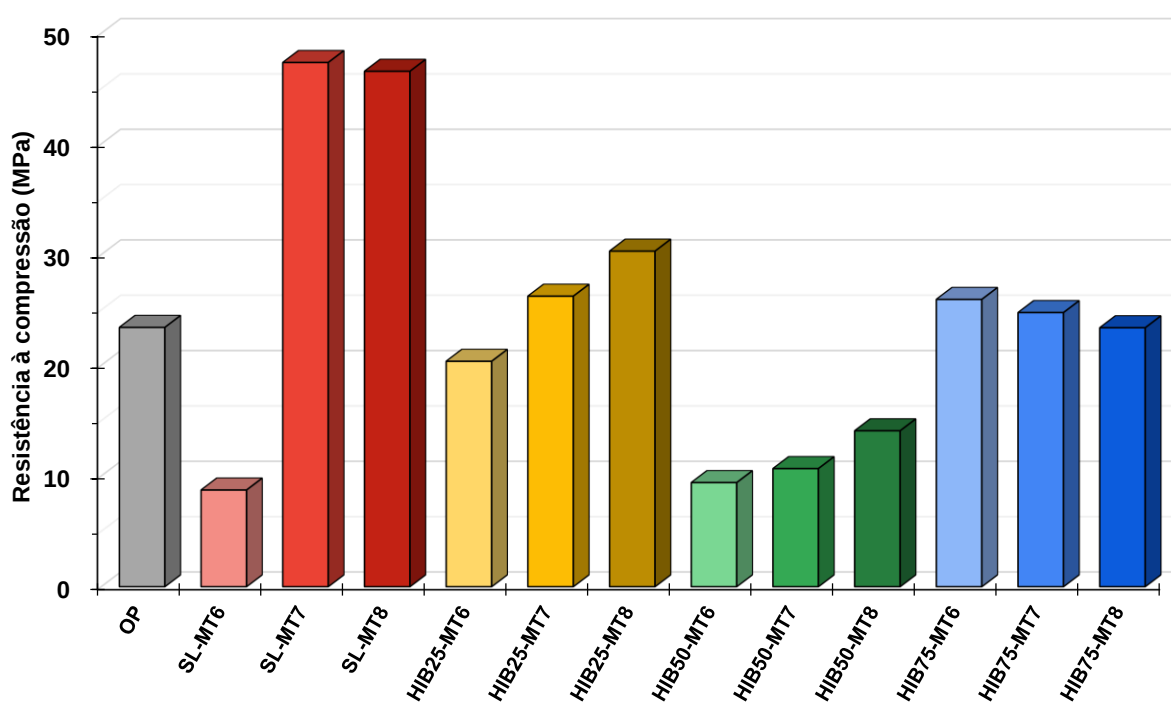
Fonte: O Autor (2024)

De modo geral, o comportamento da resistência à compressão das argamassas foi semelhante aos resultados obtidos em pastas (conforme detalhado na seção 4.1.5), com exceção da argamassa de cimento Portland, que apresentou um desenvolvimento a resistência inferior aos resultados obtidos em pastas. As argamassas de escória ativada SL-MT7 e SL-MT8 exibiram os maiores valores de resistência à compressão entre todas as misturas e em todas as idades ensaiadas,

conforme apresentado na Figura 44. Entre os ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória, foi observado que a argamassa HIB25-MT8 apresentou os maiores valores de resistência à compressão. Em contraste, as argamassas compostas por 50% de cimento Portland exibiram os menores resultados de resistência mecânica.

A Figura 45 apresenta as médias das resistências à compressão das argamassas aos 3 dias de idade. Observa-se que a argamassa de escória ativada SL-MT6 registrou o menor valor de resistência à compressão, enquanto as demais argamassas de escória mostraram as maiores resistências mecânicas. Aos 3 dias, a adição de 6% de metassilicato de sódio não foi suficiente para intensificar as reações de hidratação da escória.

Figura 45 - Resistência à compressão das argamassas aos 3 dias.



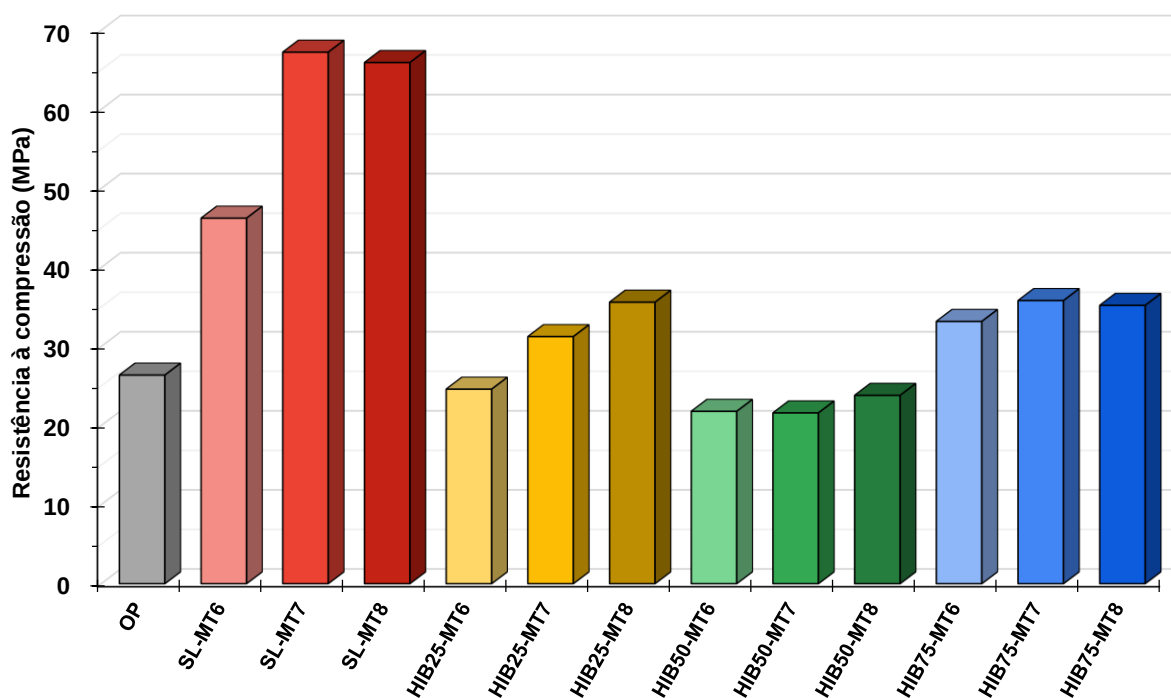
Fonte: O Autor (2024)

Nas argamassas com 25% de cimento Portland, elevação do teor de Na_2O do ativador alcalino teve um efeito positivo. A maior quantidade de metassilicato de sódio resultou em valores mais altos de resistência à compressão. A argamassa HIB25-MT8 atingiu 30 MPa aos 3 dias, enquanto as argamassas HIB25-MT7 e HIB25-MT6 alcançaram 26 MPa e 20 MPa, respectivamente. Por outro lado, nas argamassas com 75% de cimento Portland, a adição do ativador alcalino teve um efeito negativo. O aumento da quantidade de metassilicato de sódio resultou em

valores mais baixos de resistência mecânica, embora a diferença entre os resultados foi de apenas 11%. Nas argamassas contendo 50% de cimento Portland, a elevação do teor de Na_2O aumentou os valores de resistência mecânica, com a argamassa HIB50-MT8 exibindo os melhores resultados. No entanto, essas argamassas apresentaram os menores valores de resistência à compressão entre os ligantes álcali-ativados.

Os valores de resistência à compressão das argamassas aos 7 dias são apresentados na Figura 46. Observou-se que a argamassa SL-MT6 teve um crescimento significativo na resistência à compressão, aumentando de 8,7 MPa aos 3 dias para 46,2 MPa aos 7 dias. Um aumento significativo da resistência mecânica também foi observado nas argamassas compostas por 50% de cimento Portland, com incrementos de 131%, 102% e 69% nas argamassas HIB50-MT6, HIB50-MT7 e HIB50-MT8, respectivamente.

Figura 46 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias.



Fonte: O Autor (2024)

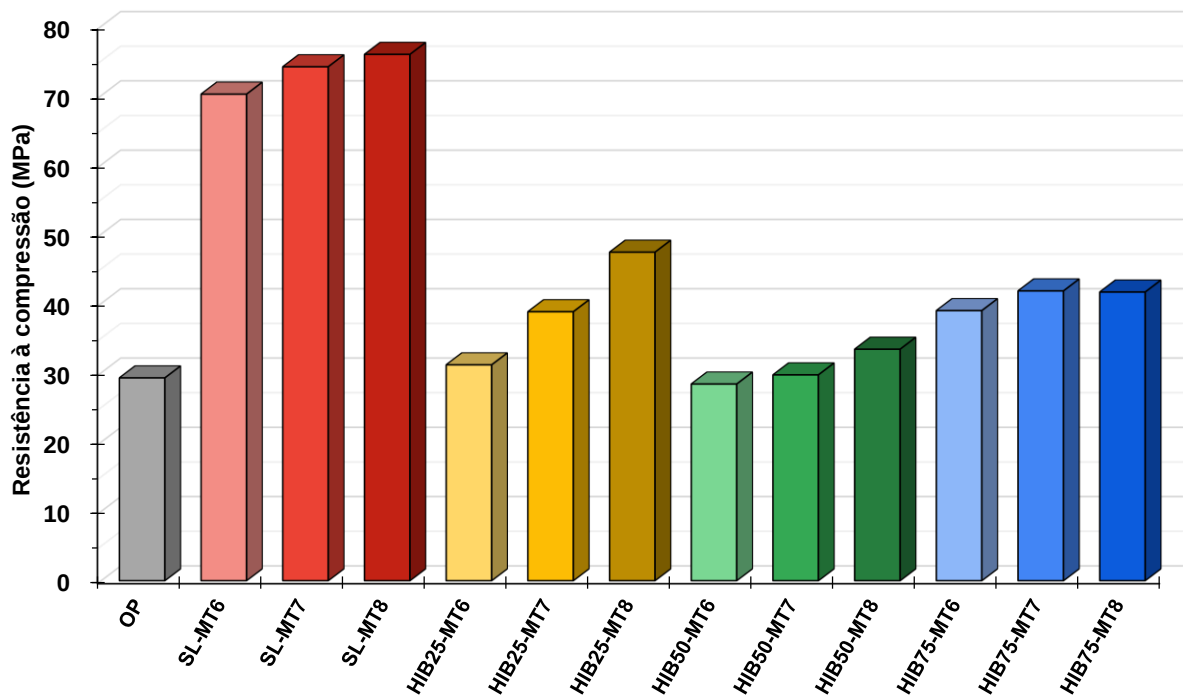
Aos 7 dias, as argamassas contendo 75% de cimento Portland que utilizaram maiores quantidades de metassilicato de sódio apresentaram um maior desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo. As argamassas HIB75-MT7 e HIB75-MT8 exibiram valores de resistência mecânica estatisticamente

equivalentes, ambas superiores aos da argamassa HIB75-MT6, que contrasta com os resultados obtidos aos 3 dias.

No caso das argamassas compostas por 25% de cimento Portland, observou-se que, aos 7 e 28 dias, os valores de resistência à compressão aumentaram à medida que os teores de Na_2O do ativador alcalino foram aumentando. Aos 28 dias, a argamassa HIB25-MT8 atingiu 47,4 MPa de resistência à compressão, enquanto as argamassas HIB25-MT7 e HIB25-MT6 alcançaram 38,8 MPa e 31,1 MPa, respectivamente. Por outro lado, as argamassas compostas por 75% de cimento Portland apresentaram resultados estatisticamente equivalentes, como mostrado na Figura 47.

Nos cimentos HIB75's foi observado um comportamento similar nos resultados de resistência à compressão, tanto em pastas quanto em argamassas. Isso sugere que, assim como nas pastas, o metassilicato de sódio interfere na hidratação dos grãos, fazendo com que as misturas com maiores teores de Na_2O exibissem resultados inferiores nas idades iniciais. No entanto, ao longo do tempo, os resultados se nivelam, indicando uma menor influência do gel, produto da reação entre o ativador e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nos grãos. Nas argamassas de escória, os resultados aos 28 dias foram estatisticamente equivalentes. No entanto, foi observado que a evolução da hidratação da escória está relacionada com a elevação da alcalinidade na mistura, o aumento do teor de Na_2O fez com que as reações de hidratação ocorressem mais rapidamente, aumentando a quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nas primeiras idades (Melo Neto, 2002).

Figura 47 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2024)

4.3 ESCOLHA DO LIGANTE PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO

A escolha da composição do ligante álcali-ativado composto por cimento Portland e escória de alto forno para a produção do concreto, foi realizada analisando e comparando os resultados dos ensaios produzidos em pastas e argamassas.

4.3.1 Ensaios no estado fresco

Inicialmente, foram analisados os resultados dos ligantes álcali-ativados no estado fresco, tanto em pastas, por meio dos ensaios de mini abatimento e viscosidade, quanto em argamassas, utilizando o ensaio de mesa de consistência. Os cimentos compostos por 50% de cimento Portland mostraram os piores resultados em termos de trabalhabilidade nos ensaios realizados. Notou-se um aumento rápido da viscosidade, em comparação com as outras composições, tornando o uso desses cimentos impraticável após 40 minutos da adição de água.

Nos ensaios de mini abatimento e mesa de consistência, os cimentos HIB25's e HIB75's mostraram resultados semelhantes. No entanto, os cimentos HIB75-MT7 e HIB75-MT8 exibiram comportamentos de viscosidade anômalos nos estágios iniciais da hidratação, os quais necessitam de uma investigação mais aprofundada. Portanto, esses cimentos também foram descartados. Por outro lado, os cimentos

HIB25-MT7 e HIB25-MT8 apresentaram valores ligeiramente superiores de espalhamento e mantiveram resultados de viscosidade mais estáveis durante os ensaios.

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido, foram analisados os resultados de resistência à compressão produzidos em pastas e argamassas expostos nas seções 4.1.5 e 4.2.2. Os ligantes compostos com 50% de cimento Portland apresentaram os menores resultados tanto em pastas quanto em argamassas, para todas as idades testadas. Portanto, a escolha desses cimentos foi descartada.

Por outro lado, os ligantes compostos por 75% de cimento Portland demonstraram, aos 28 dias, valores de resistência à compressão das pastas estatisticamente equivalentes aos ligantes HIB25-MT7 e HIB25-MT8, e ligeiramente inferiores ao ligante HIB25-MT8. No entanto, os ligantes HIB75's apresentam valores de resistência à compressão inicial consideravelmente inferiores aos HIB25-MT7 e HIB25-MT8. Nas primeiras 24 horas, as pastas contendo 75% de cimento Portland exibiram valores de resistência à compressão inferior à 10 MPa, enquanto a pasta HIB25-MT8 alcançou 20 MPa. Destaca-se que o ligante álcali-ativado HIB25-MT8 apresentou os maiores resultados de resistência mecânica em todas as idades, inclusive superando o desempenho do cimento Portland em argamassas.

O ligante HIB25-MT8 foi selecionado para a produção do concreto de baixo impacto ambiental por apresentar resultados satisfatórios nos ensaios do estado fresco e exibir os maiores valores de resistência à compressão nos ensaios realizados em pastas e argamassas. A mistura SL-MT7 foi selecionada para a produção do concreto de escória ativada devido às suas propriedades similares ao cimento SL-MT8 e à menor quantidade de metassilicato de sódio em sua composição, o que resulta em menores emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

4.4 ANÁLISE EM CONCRETO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos nos concretos produzidos com os aglomerantes SL-MT7, HIB25-MT8 e cimento Portland.

4.4.1 Características do concreto no estado fresco

Na Tabela 17, encontram-se os resultados obtidos para os ensaios de abatimento do tronco de cone, teor de ar incorporado e massa específica aparente dos concretos.

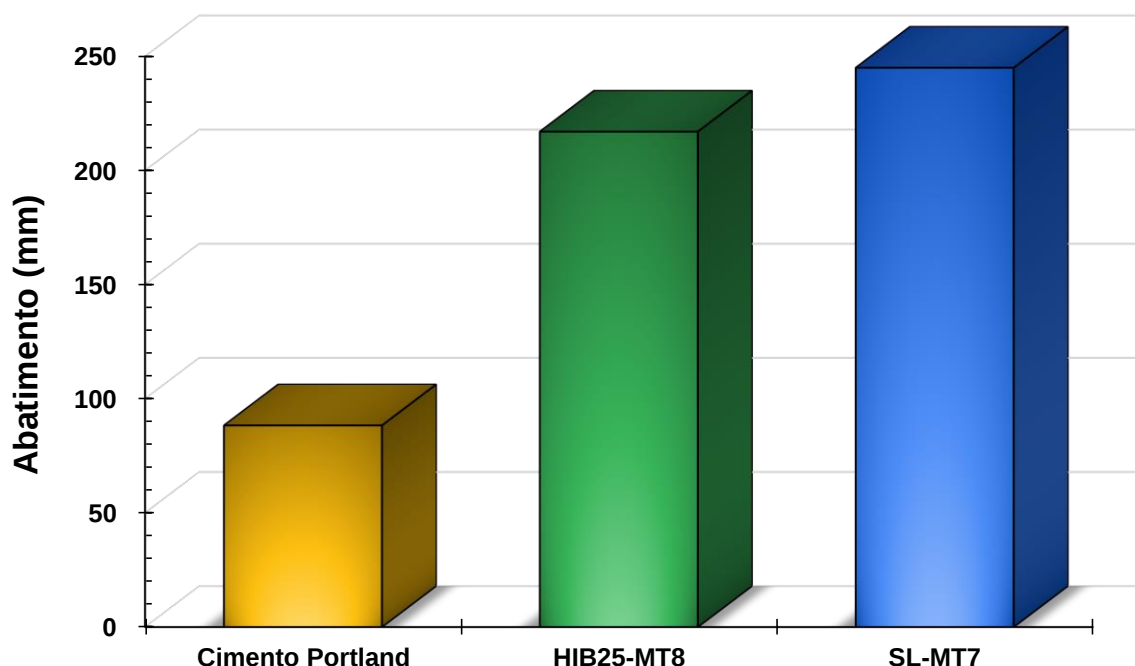
Tabela 17 - Características dos concretos no estado fresco

Componentes	Concreto de:		
	Cimento Portland	HIB25-MT8	SL-MT7
Ar aprisionado (%)	0,67	0,74	1,08
Abatimento (mm)	88	217	245
Massa específica (kg/m ³)	2383,2	2394,0	2381,1

Fonte: O Autor (2024)

Nos ensaios de abatimento do tronco de cone, ilustrado na Figura 48, o concreto SL-MT7 apresentou o maior abatimento, medindo 245 milímetros, indicando ser o menos viscoso e o mais fluido. Por outro lado, o concreto de cimento Portland mostrou o menor abatimento, com 88 milímetros, evidenciando ser o mais viscoso. O concreto com o ligante HIB25-MT8 exibiu um abatimento 2,5 vezes maior do que o concreto de cimento Portland, resultando em 217 milímetros. Esses resultados de abatimento foram consistentes com os resultados de viscosidade das pastas sem aditivos descritos na seção 3.2.1.4.1, onde o cimento Portland se mostrou ser mais viscoso do que o cimento de escória álali-ativado e o ligante HIB25.

Figura 48 – Abatimento dos concretos.



Fonte: O Autor (2024)

Os resultados de massa específica dos concretos foram similares, com o ligante HIB25-MT8 apresentando uma massa específica levemente superior aos outros concretos. O maior teor de ar aprisionado foi apresentado pelo concreto SL-MT7, seguido pelo concreto HIB25-MT8 e, por último, pelo concreto de cimento Portland. Dado o desafio em realizar o ensaio de massa específica do metassilicato de sódio, e considerando que nem mesmo o fornecedor consegue fornecer valores precisos, os resultados de ar aprisionado podem não ser completamente confiáveis.

4.4.2 Resistência à compressão

Nesta pesquisa as amostras de concreto produzidas foram ensaiadas aos 3,7 e 28 dias para a resistência à compressão. Os resultados individuais (f_{ci}) de cada corpo de prova, bem como a resistência média (f_{cm}), o desvio padrão amostral (S) e o coeficiente de variação (CV) correspondentes estão expostos na Tabela 18.

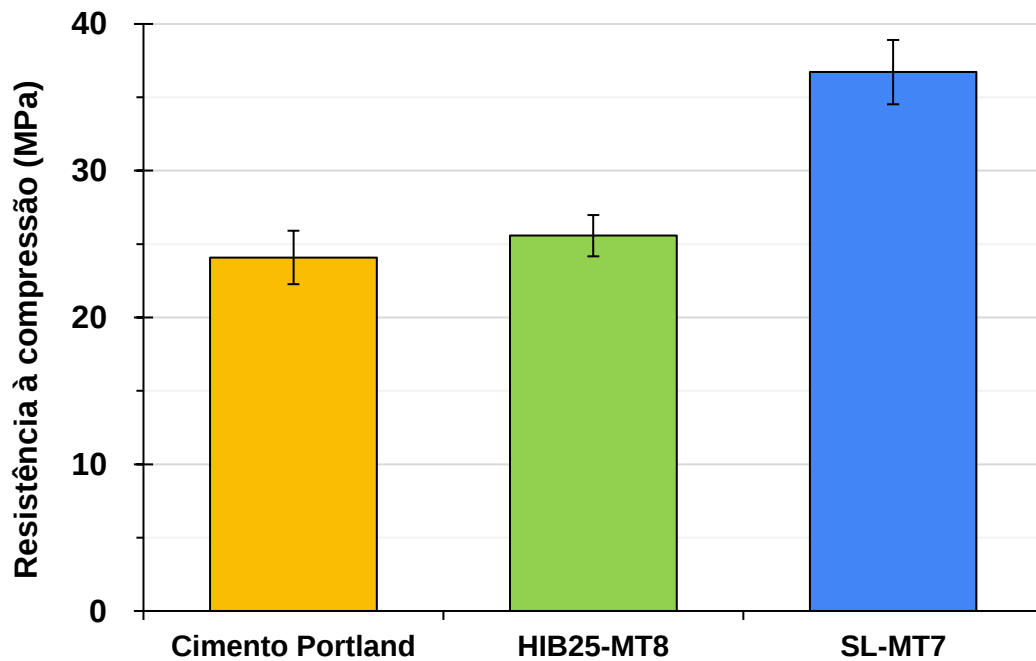
Tabela 18 - Resistência à compressão dos concretos

Idade	Concreto de Cimento				Concreto HIB25-MT8				Concreto SL-MT7			
	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)
3	26,74				27,37				40,11			
	25,46				27,37				38,20			
	24,19	24,09	1,82	7,55	24,83	25,57	1,42	5,54	36,29	36,71	2,19	5,98
	23,55				24,83				36,29			
	22,92				24,83				35,65			
	21,65				24,19				33,74			
7	28,01				30,56				47,75			
	27,37				29,92				43,93			
	26,74	26,23	1,65	6,28	28,01	27,06	3,66	13,5	42,02	41,17	4,24	10,2
	24,83				27,37				38,83			
	24,19				26,10				38,20			
					20,37				36,29			
28	37,56				39,47				57,93			
	37,56				38,20				56,66			
	35,01	34,59	2,87	8,29	38,20	37,88	1,12	2,96	56,06	52,52	5,80	11,0
	33,74				38,20				52,84			
	33,74				36,92				49,02			
	29,92				36,29				42,65			

Fonte: O Autor (2024)

O concreto de escória álcali-ativada exibiu os maiores valores de resistência à compressão em todas as idades ensaiadas. Aos 3 dias, a resistência mecânica do concreto SL-MT7 foi 43% maior que a do concreto HIB25-MT8 e 52% maior que a do concreto de cimento Portland, conforme ilustrado na Figura 49. O concreto HIB25-MT8 e o concreto de cimento Portland apresentaram resultados de resistência à compressão estatisticamente equivalentes.

Figura 49 - Resistência à compressão dos concretos aos 3 dias.

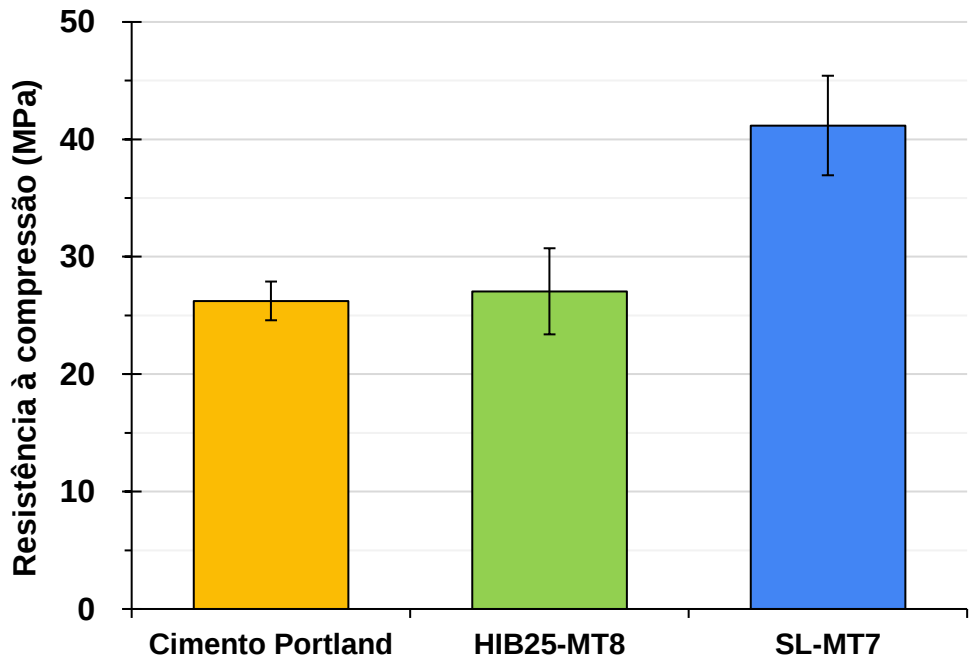


Fonte: O Autor (2024)

Aos 7 dias, os resultados de resistência à compressão mantiveram o mesmo padrão observado aos 3 dias: o concreto SL-MT7 apresentou os maiores valores, enquanto o concreto de cimento Portland e o concreto HIB25-MT8 exibiram resultados estatisticamente equivalentes. Como mostrado na Figura 50, a resistência mecânica do concreto de escória álcali-ativada foi, em média, 52% maior que a do concreto HIB25-MT8 e 57% maior que a do concreto de cimento Portland.

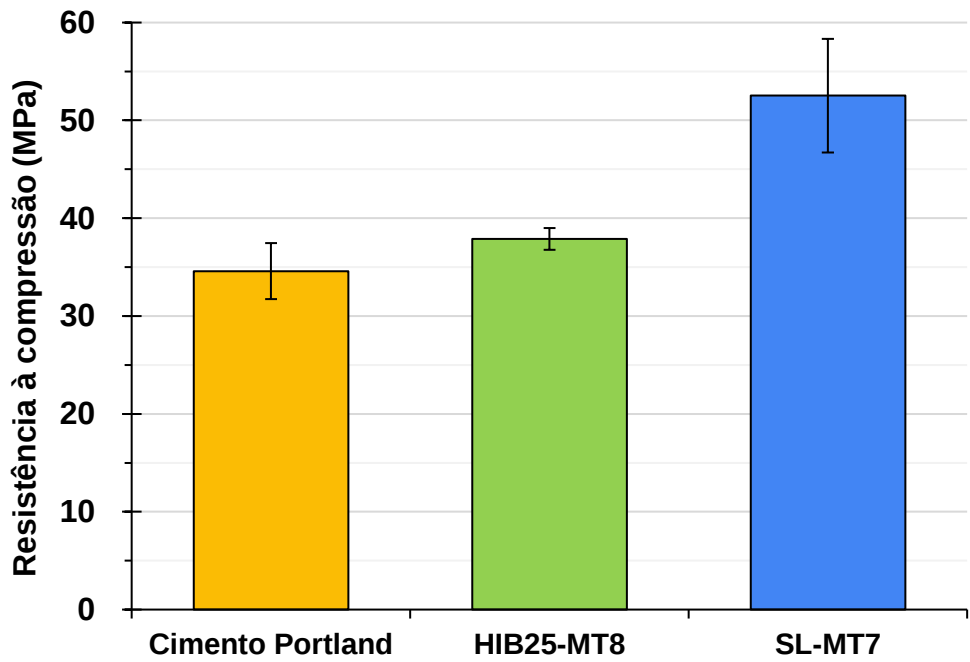
Aos 28 dias, a resistência à compressão do concreto SL-MT7 foi de 52,5 MPa, representando uma diferença de 38% em relação ao concreto HIB25-MT8 e 51% em comparação com o concreto de cimento, conforme ilustrado na Figura 51. O comportamento dos concretos manteve-se consistente em todas as idades dos ensaios: o concreto de escória álcali-ativada apresentou as maiores resistências mecânicas, enquanto os concretos HIB25-MT8 e de cimento Portland não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre si. No entanto, foi observado que os valores absolutos de resistência à compressão do concreto HIB25-MT8 foram superiores aos do concreto de cimento Portland em todas as idades.

Figura 50 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.



Fonte: O Autor (2024)

Figura 51 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um concreto de baixo impacto ambiental utilizando escória de alto forno, cimento Portland e metassilicato de sódio. Para isso, foram selecionadas nove composições de ligantes álcali-ativados, variando as proporções de cimento Portland, escória de alto forno e do teor de Na_2O do ativador alcalino.

Estes ligantes foram inicialmente analisados em pastas, através dos ensaios de difratogramas de raios-X, viscosidade no copo Ford, mini abatimento e resistência à compressão. Em seguida, as análises foram realizadas em argamassas, utilizando os ensaios de mesa de consistência e resistência à compressão. Por fim, foi realizada uma análise dos impactos ambientais de cada composição.

Após essas avaliações, o ligante HIB25-MT8 foi selecionado para produzir o concreto de baixo impacto ambiental. As propriedades desse concreto foram então comparadas com as do concreto de cimento Portland e do concreto de escória álcali-ativada. A seguir, serão apresentadas as considerações finais com base na análise dos resultados obtidos e sugestões para futuras pesquisas relacionadas a este tema.

5.1.1 Conclusões

Nos ensaios em pastas no estado fresco, observou-se que os ligantes álcali-ativados compostos com cimento Portland e escória apresentaram menor fluidez em comparação com as pastas de escória álcali-ativada e de cimento Portland. Os ligantes compostos por 50% de cimento Portland e 50% de escória perderam abatimento rapidamente, com tempos de trabalhabilidade inferiores a 40 minutos.

A correlação entre os ensaios de viscosidade e mini abatimento foi boa para as pastas que apresentaram tempo de viscosidade entre 20 e 60 segundos. No entanto, apenas a realização do ensaio de viscosidade no copo Ford não foi suficiente para entender completamente o comportamento dos cimentos. É necessário realizar ensaios reológicos para obter uma compreensão mais completa da viscosidade dos materiais, com um modelo adequado ao comportamento de cada material.

Nos resultados de resistência à compressão, foi observado que os ligantes de escória álcali-ativada exibiram os maiores valores de resistência mecânica. Os ligantes compostos com cimento Portland e escória, apresentaram resistência à

compressão aos 28 dias, inferior as pastas de cimento Portland. Os ligantes compostos por 25% de cimento Portland e 75% de escória exibiram um efeito positivo do aumento do teor de Na_2O do ativador. À medida que aumentou a quantidade de metassilicato de sódio a resistência à compressão aumentou. Por outro lado, nos ligantes compostos por percentual de cimento Portland acima de 50%, o aumento da dosagem de metassilicato de sódio exibiu um efeito negativo.

A elevada quantidade de metassilicato de sódio foi prejudicial para os cimentos com 50% de substituição. Conforme indicado pelos resultados de difração de raios-X, quantidades equilibradas de cimento Portland e de metassilicato de sódio nos ligantes com 50% de substituição prolongaram a inibição do processo de hidratação dos ligantes, resultando em baixas resistências à compressão em todas as idades.

Os resultados de difração de raios-X indicaram que as reações entre o cimento Portland, a escória de alto forno e o metassilicato de sódio inibiu a hidratação dos grãos anidros. Aos 28 dias, os ligantes HIB50 e HIB75 exibiram picos mais intensos de alita e belita em comparação com a pasta OPC, apesar de terem menor quantidade de cimento Portland em sua composição.

Nos ensaios de mesa de consistência das argamassas, observou-se que, assim como nas pastas, os ligantes compostos por cimento Portland e escória tiveram espalhamentos menores em comparação com as argamassas de escória e de cimento Portland.

Os resultados dos ensaios em pastas e argamassas mostraram que o ligante HIB25-MT8 (composto por 25% de cimento Portland, 75% de escória de alto forno e ativação alcalina de 8%) apresentou as melhores propriedades entre os ligantes álcali-ativados compostos por cimento Portland e escória, exibindo aos 28 dias 34,5 MPa e 47,4 MPa em pastas e argamassas respectivamente.

Os resultados dos ensaios em concretos mostraram que o concreto de escória álcali-ativada apresentou os maiores valores de abatimento e de resistência à compressão em todas as idades. O concreto produzido com o ligante HIB25-MT8 exibiu um abatimento 2,5 vezes maior do que o concreto de cimento Portland. Em termos de resistência à compressão, o concreto HIB25-MT8 e o concreto de cimento Portland apresentaram resultados estatisticamente semelhantes, embora os valores do concreto HIB25-MT8 tenham sido levemente superiores aos do cimento Portland.

Ao final pode-se concluir que a produção de ligantes formados pela combinação de cimento Portland, escória de alto forno e metassilicato de sódio, é

adequada para uso na construção civil em termos de trabalhabilidade e de resistência mecânica quando utilizado porcentagens de cimento Portland igual à 25%. No entanto, quando utilizado proporções de cimento Portland acima de 25%, o ligante tende a perder fluidez e resistência mecânica, tornando-se menos eficiente.

5.1.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas questões relevantes para continuidade do tema são descritas a seguir como propostas para trabalhos futuros:

- Caracterização do gel formado pelas reações entre o metassilicato de sódio e a portlandita;
- Como ocorre o desenvolvimento e a ordem das reações entre o cimento Portland, escória de alto forno e metassilicato de sódio;
- Estudo com silicato de sódio com diferentes módulos de sílica com o objetivo de encontrar um ativador que potencialize as melhores propriedades do cimento Portland e da escória de alto forno;
- Desenvolvimento de estudo com o uso de reômetro para avaliar o comportamento reológico dos ligantes, o que não foi possível esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 11768-1. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2019.
- ABNT, NBR 11172. Aglomerantes de origem mineral. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**: 1990.
- ABNT, NBR 17054. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2022.
- ABNT, NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2016.
- ABNT, NBR 9997. **Cimento aluminoso - Determinação da consistência normal e dos tempos de pega** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2015.
- ABNT, NBR 7215. **CIMENTO PORTLAND - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS**. Associação Brasileira de Normas Técnicas: 2019.
- ABNT, NBR 16607. **Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2018.
- ABNT, NBR 16372. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2015.
- ABNT, NBR 16605. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2017.
- ABNT, NBR 16889. **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2020.
- ABNT, NBR 12655. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2022.
- ABNT, NBR 8802. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de**

propagação de onda ultrassônica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**: p. 13, 2019.

ABNT, NBR 9833. **Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2008.

ABNT, NBR 5849. **Tintas - Determinação de viscosidade pelo copo Ford** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S. l.: s. n.], 2015.

ACEVEDO-MARTINEZ, E.; GOMEZ-ZAMORANO, L. Y.; ESCALANTE-GARCIA, J. I. Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: - Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 37, p. 462–469, 2012.

AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil. **Instituto Aço Brasil**, [s. l.], 2017.

AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil. **Instituto Aço Brasil**, [s. l.], 2020.

AMER, Ismail *et al.* Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 135–144, 2021.

ANGULO-RAMÍREZ, Daniela Eugenia; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; PUERTAS, Francisca. Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 140, p. 119–128, 2017.

ARAÚJO JÚNIOR, Nilvan Teixeira. **Concreto de alta resistência produzido com escória álcali-ativada**. 2019. 105 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2019.

ASTM D1200-10. **ASTM Book of Standards: Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/d1200-94r05.html>. Acesso em: 5 jun. 2024.

BATUECAS, E. *et al.* Carbon footprint and water use of alkali-activated and hybrid cement mortars. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 319, p. 128653, 2021.

BRYKOV, A. S. *et al.* Effect of hydrated sodium silicates on cement paste hardening.

Russian Journal of Applied Chemistry, [s. l.], v. 75, n. 10, p. 1577–1579, 2002.

BRYKOV, A. S.; DANILOV, B. V.; LARICHKOV, A. V. Specific features of portland cement hydration in the presence of sodium hydrosilicates. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 79, n. 4, p. 521–524, 2006.

CHANG, J. J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 1005–1011, 2003.

ELAHI, A. *et al.* Hydration Characteristics of Cement Paste Containing Supplementary Cementitious Materials. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 535–544, 2012.

FONSECA, Juliana Maria McCartney da. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO EM COMPONENTES CIMENTÍCIOS**. 2021. 121 f. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Curitiba, [s. l.], 2021.

GIANNAROS, P.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 084005, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084005>. Acesso em: 2 jun. 2024.

GUO, Shenglai *et al.* Delaying the hydration of Portland cement by sodium silicate: Setting time and retarding mechanism. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 543–548, 2019.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pimi, 1993.

JIA, Ruiquan; WANG, Qiang; LUO, Ting. Deterioration and mitigation of efflorescence of alkali-activated phosphorus slag. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 407, p. 133500, 2023.

JOHN, Vanderley Moacir. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1995.

KALOUSEK, G.L. Studies of portions of the quaternary system soda-lime-silica-water at 25 degrees C. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 285, 1944.

KANELLOPOULOS, A.; QURESHI, T. S.; AL-TABBAA, A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 98, p. 780–791, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281493658_Glass_encapsulated_minerals_for_self-healing_in_cement_based_composites. Acesso em: 2 jun. 2024.

KANTRO, DL. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 95–102, 1980. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1520/CCA10190J>. Acesso em: 20 jun. 2024.

KAZEMIAN, Sina *et al.* Effect of cement, sodium silicate, kaolinite and water on the viscosity of the grout. **Scientific Research and Essays**, [s. l.], v. 5, n. 22, p. 3434–3442, 2010. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/SRE>.

LIANZHEN, Zhang *et al.* Rheological characteristics of cement-sodium silicate grout in its fluid–solid phase transition process. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 362, n. 22, p. 3434–3442, 2023.

LIMA, Victor M.E. *et al.* Optimizing the concentration of Na₂O in alkaline activators to improve mechanical properties and reduce costs and CO₂ emissions in alkali-activated mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 344, p. 128185, 2022.

LIZARAZO-MARRIAGA, Juan; CLAISSE, Peter; GANJIAN, Eshmaiel. Effect of Steel Slag and Portland Cement in the Rate of Hydration and Strength of Blast Furnace Slag Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 153–160, 2011.

LOPES, Sofia Ximenes. **Avaliação de argamassas álcali-ativadas com incorporação de vermiculita expandida**. 2023. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2023.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM PROTEÇÃO SUPERFICIAL FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETOS**. 2008. - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MELO NETO, Antonio Acácio de. **Estudo da retração em argamassa com cimento**

de escória ativada. 2002. - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05022003-114904/>.

MELO NETO, Antônio Acacio de. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** 2008. - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2008.

MOHAPATRA, Arup Kumar; PRADHAN, Bulu. **Hybrid alkali activated cements (HAACs) system: A state-of-the-art review on fresh, mechanical, and durability behaviour.** [S. l.]: Elsevier, 2022.

PACHECO-TORGAL, F. Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. *In*: FERNANDO PACHECO-TORGAL *et al.* (org.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes.** [S. l.]: Woodhead Publishing, 2015. p. 1–16.

PELLETIER, Michelle M *et al.* Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent. [s. l.], 2011.

PUERTAS, Francisca *et al.* Alkali-Activation of Slag Cements: Activation Process, Microstructure and Mechanical Properties. *In*: , 2013. **Conference: 13th International Congress on the Chemistry of Cement.** [S. l.: s. n.], 2013. p. 1–7. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/235707703>. Acesso em: 2 jun. 2024.

QUEIROZ, Maria Eduarda Bezerra Leite de. **Retração autógena e por secagem em argamassas de alta resistência com escória ativada e microfibras de polipropileno.** 2023. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2023.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Princípios da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos.** Curitiba: [s. n.], 2021.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 176, p. 103–111, 2018.

RODRIGUES, Púbio Penna Firme. **Parâmetros da dosagem racional do concreto.** [S. l.: s. n.], 1983. Disponível em: <https://abcp.org.br/parametros-da-dosagem->

racional-do-concreto/.

SAEDI, Mohammad; BEHFARNIA, Kiachehr; SOLTANIAN, Hamid. The effect of the blaine fineness on the mechanical properties of the alkali-activated slag cement. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 26, p. 100897, 2019.

SAJEDI, Fathollah; RAZAK, Hashim Abdul. The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 10, p. 1944–1951, 2010.

SALUDUNG, Apriany *et al.* Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 315, p. 128210, 2021.

SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. [S. l.: s. n.], 2016.

SNIC. Relatório Anual. **SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO**, [s. l.], 2022. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>.

THOMPSON, J. La Rosa *et al.* Characterization of silicate sealers on concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 27, n. 10, p. 1561–1567, 1997.

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 43, p. 125–130, 2013.

WANG, Shimin *et al.* Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [s. l.], v. 92, p. 103015, 2019.

WITZLEBEN, Steffen Thomas. Acceleration of Portland cement with lithium, sodium and potassium silicates and hydroxides. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 243, p. 122608, 2020.

XUE, Lili *et al.* Drying shrinkage behavior of hybrid alkali activated cement (HAAC) mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 316, p. 126068, 2022.

XUE, Lili; ZHANG, Zuhua; WANG, Hao. Early hydration kinetics and microstructure development of hybrid alkali activated cements (HAACs) at room temperature.

Cement and Concrete Composites, [s. l.], v. 123, p. 104200, 2021.

ZHANG, Ge *et al.* Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 258, p. 120592, 2020.

APÊNDICE A – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS AOS 1, 3, 7 E 28 DIAS

Resistência 1 dia (MPa)

Sigla	OPC	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	19,76	0,92	20,46	39,25	8,43	14,97	19,83	1,33	1,53	2,17	8,18	8,70	4,81
2	21,73	0,96	17,47	37,71	9,96	16,67	20,35	1,24	1,59	2,11	8,38	6,91	4,68
3	17,48	1,06	19,57	37,08	10,39	15,48	21,68	1,43	1,44	2,22	8,52	6,60	4,33
4	17,02	0,87	19,80	32,57	8,38	16,44	20,69	1,32	1,50	2,49	10,65	7,32	4,44
5	14,46	0,71		34,11	9,24	16,24	20,88	1,39	1,59	2,15	9,83	7,49	4,64
6	15,64	1,09	19,96	38,98	8,90	15,53	20,03	1,43	1,71	1,94	8,01	6,90	4,53
Média	17,68	0,94	19,45	36,62	9,22	15,89	20,58	1,36	1,56	2,18	8,93	7,32	4,57
Desvio P. amostral	2,68	0,14	1,15	2,71	0,82	0,66	0,67	0,08	0,09	0,18	1,06	0,75	0,17

Resistência 3 dias (MPa)

Sigla	OPC	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	26,78	2,68	39,41	40,95	14,84	17,72	22,09	3,78	4,37	6,50	15,77	11,74	11,46
2	30,49	1,72	50,70	52,61	12,11	21,77	27,06	3,75	4,62	5,06	16,21	12,73	11,06
3	32,25	2,42	45,92	59,24	10,91	20,24	29,98	3,53	4,39	5,58	17,72	15,22	12,09
4	32,81	2,66	48,75	39,79	11,56	21,34	22,46	3,53	4,70	5,54	15,89	11,97	11,28
5	30,67	2,59	52,71	61,71	14,90	22,51	27,02	3,71	4,81	6,56	16,68	14,96	11,28
6	28,36	3,13	54,42	48,17	13,72	20,81	26,74	3,44	4,47	6,61	16,37	14,91	10,84
Média	30,23	2,54	48,65	50,41	13,01	20,73	25,89	3,62	4,56	5,97	16,44	13,59	11,33
Desvio P. amostral	2,30	0,46	5,42	9,14	1,72	1,67	3,04	0,14	0,18	0,66	0,71	1,61	0,43

Resistência 7 dias (MPa)

Sigla	OPC	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	39,69	35,89	42,37	55,01	15,65	27,76	22,20	11,41	12,57	12,19	24,23	19,82	21,16
2	38,91	38,14	57,94	48,05	14,96	20,97	25,38	9,30	12,41	12,48	23,93	21,78	17,67
3	41,66	38,06	49,64	43,67	15,96	24,34	31,39	10,76	13,64	13,97	24,98	23,82	20,23
4	38,20	33,95	59,19	47,53		27,16	35,23	10,77	14,62	12,86	25,02	22,85	20,78
5	38,02	39,74	48,29	69,97	14,56	26,74	25,56	10,32	13,65	12,63	25,01	22,48	19,73
6	43,81	39,07	59,93	41,28	15,54	26,53	33,23	11,49	14,76	12,34	22,07	23,78	20,93
Média	40,05	37,47	52,90	50,92	15,34	25,58	28,83	10,68	13,61	12,75	24,21	22,42	20,08
Desvio P. amostral	2,27	2,16	7,17	10,44	0,56	2,54	5,17	0,80	0,99	0,64	1,15	1,50	1,29

Resistência 28 dias (MPa)

Sigla	OPC	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	49,75	57,31	48,59	62,57	23,70	26,83	44,46	19,19	24,00	24,02	35,06	26,46	30,97
2	50,32	52,36	76,20	61,84	23,38	31,23	41,54	23,35	24,16	20,18	28,68	27,21	31,65
3	52,09	55,39	58,85	64,86	22,57	35,02	32,87	22,48	20,78	23,52	31,55	28,35	33,18
4	53,21	50,99	69,74		28,64	32,39	26,89	24,57	21,38	24,41	21,44	31,72	28,24
5	45,54	57,80	66,42	70,25	22,99	31,92	29,66	23,54	24,61	22,56	24,02	30,09	30,64
6	51,13	53,50	61,96	66,18	23,76	32,19	31,82	24,77	26,35	24,32	23,69	31,03	26,85
Média	50,34	54,56	63,63	65,14	24,17	31,60	34,54	22,98	23,55	23,17	27,41	29,14	30,25
Desvio P. amostral	2,66	2,74	9,54	3,34	2,23	2,67	6,93	2,04	2,10	1,61	5,26	2,13	2,31

Os valores em Vermelho foram excluídos pela análise estatística Outlier Test.

APÊNDICE B – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS AOS 3, 7 E 28 DIAS

Resistência 3 dias (MPa)													
Sigla	OP	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	21,21	8,91	43,75	44,15	18,90	26,12	31,12	8,86	11,49	14,36	27,97	27,06	19,38
2	24,05	8,70	46,91	54,43	20,13	26,55	29,18	10,56	10,56	13,95	20,74	26,94	23,08
3	22,29	10,30	47,75	42,40	20,75	24,81	28,77	9,26	10,53	14,25	26,39	24,49	25,69
4	27,30	7,91	45,50	49,22	20,34	26,46	29,84	9,19	11,17	14,07	27,36	22,86	26,21
5	23,28	7,13	48,99	43,17	21,03	25,98	31,53	8,97	10,12	13,73	26,30	22,31	22,16
6	22,43	9,45	51,26	46,03	21,03	27,54	31,45	9,58	10,13	14,15	26,96	24,94	23,83
Média	23,43	8,73	47,36	46,57	20,36	26,24	30,32	9,40	10,67	14,08	25,95	24,77	23,39
Desvio P. amostral	2,13	1,12	2,63	4,56	0,80	0,89	1,21	0,62	0,56	0,22	2,63	1,99	2,50

Resistência 7 dias (MPa)													
Sigla	OP	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	25,81	45,66	65,18	59,43	23,11	30,46	34,11	21,67	23,39	22,59	31,71	35,61	36,84
2	31,12	47,13		74,82	24,43	32,68	36,60	23,79	23,63	23,99	35,47	31,72	33,29
3	18,67	46,10	68,86	74,23	24,95	29,11	34,04	21,22	22,23	23,70	31,14	34,73	36,77
4	32,40	46,06	66,26	65,01	24,62	31,86	37,08	22,83	18,65	24,25	28,89	37,75	36,05
5	25,31	43,74	65,76	61,40	26,02	30,49	35,14	20,48	18,40	24,45	34,38	37,38	35,30
6	24,98	48,70	70,07	60,61	24,49	32,87	36,64	20,80	23,30	23,95	37,46	37,65	32,94
Média	26,38	46,23	67,23	65,92	24,60	31,25	35,60	21,80	21,60	23,82	33,17	35,81	35,20
Desvio P. amostral	4,93	1,64	2,12	6,92	0,94	1,47	1,35	1,28	2,43	0,66	3,15	2,35	1,71

Resistência 28 dias (MPa)

Sigla	OP	SL-MT6	SL-MT7	SL-MT8	HIB25-MT6	HIB25-MT7	HIB25-MT8	HIB50-MT6	HIB50-MT7	HIB50-MT8	HIB75-MT6	HIB75-MT7	HIB75-MT8
1	29,65	69,53	76,10	73,99	31,93	40,61	48,63	27,63	26,77	33,94		40,36	
2	35,38	75,14	80,68	79,98	29,40	39,25	47,21	32,23	29,11	32,15	35,52	39,77	39,73
3	27,86	64,47	70,99	73,26	31,40	42,48	45,77	31,21	31,26	33,45	40,42	42,58	42,67
4	29,42	74,46	69,22	74,26	32,25	35,84	47,73	25,85	28,13	33,85	41,21	40,07	40,87
5	25,81	69,33	70,91	79,45	31,13	36,80	49,41	26,98	30,41	34,26	39,89	45,15	42,44
6	27,45	68,31	77,06	74,74	30,75	37,86	45,67	26,35	32,50	32,77	37,80	42,96	42,55
Média	29,26	70,21	74,16	75,95	31,14	38,81	47,40	28,37	29,70	33,40	38,97	41,81	41,65
Desvio P. amostral	3,31	4,00	4,47	2,96	1,01	2,48	1,51	2,68	2,11	0,80	2,30	2,11	1,30

APÊNDICE C – ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 1 DIA

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT8	6	36,62	A
HIB25-MT8	6	20,579	B
SL-MT7	5	19,452	B C
OPC	6	17,68	C D
HIB25-MT7	6	15,886	D
HIB25-MT6	6	9,216	E
HIB75-MT6	6	8,926	E
HIB75-MT7	6	7,319	E
HIB75-MT8	6	4,5740	F
HIB50-MT8	6	2,1796	F G
HIB50-MT7	6	1,5595	G
HIB50-MT6	6	1,3564	G
SL-MT6	6	0,9358	G

Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OPC	-23,88	0
SL-MT7 - OPC	2,41	0,452
SL-MT8 - OPC	27,01	0
HIB25-MT6 - OPC	-12,07	0
HIB25-MT7 - OPC	-2,56	0,355
HIB25-MT8 - OPC	4,13	0,006
HIB50-MT6 - OPC	-23,28	0
HIB50-MT7 - OPC	-23	0
HIB50-MT8 - OPC	-22,11	0
HIB75-MT6 - OPC	-12,49	0
HIB75-MT7 - OPC	-14,78	0
HIB75-MT8 - OPC	-18,7	0
SL-MT7 - SL-MT6	25,18	0
SL-MT8 - SL-MT6	50,9	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	11,81	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	21,32	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	28,02	0
HIB50-MT6 - SL-MT6	0,6	1
HIB50-MT7 - SL-MT6	0,89	0,999
HIB50-MT8 - SL-MT6	1,77	0,855
HIB75-MT6 - SL-MT6	11,4	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	9,1	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	5,19	0
SL-MT8 - SL-MT7	23,35	0
HIB25-MT6 - SL-MT7	-13,92	0
HIB25-MT7 - SL-MT7	-4,85	0,001

Difference of Levels	T-Value	P-Value
HIB25-MT8 - SL-MT7	1,53	0,943
HIB50-MT6 - SL-MT7	-24,61	0
HIB50-MT7 - SL-MT7	-24,33	0
HIB50-MT8 - SL-MT7	-23,49	0
HIB75-MT6 - SL-MT7	-14,31	0
HIB75-MT7 - SL-MT7	-16,5	0
HIB75-MT8 - SL-MT7	-20,23	0
HIB25-MT6 - SL-MT8	-39,09	0
HIB25-MT7 - SL-MT8	-29,57	0
HIB25-MT8 - SL-MT8	-22,88	0
HIB50-MT6 - SL-MT8	-50,3	0
HIB50-MT7 - SL-MT8	-50,01	0
HIB50-MT8 - SL-MT8	-49,12	0
HIB75-MT6 - SL-MT8	-39,5	0
HIB75-MT7 - SL-MT8	-41,79	0
HIB75-MT8 - SL-MT8	-45,71	0
HIB25-MT7 - HIB25-MT6	9,51	0
HIB25-MT8 - HIB25-MT6	16,21	0
HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-11,21	0
HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-10,92	0
HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-10,04	0
HIB75-MT6 - HIB25-MT6	-0,41	1
HIB75-MT7 - HIB25-MT6	-2,71	0,274
HIB75-MT8 - HIB25-MT6	-6,62	0
HIB25-MT8 - HIB25-MT7	6,69	0
HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-20,72	0

Difference of Levels	T-Value	P-Value
HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-20,44	0
HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-19,55	0
HIB75-MT6 - HIB25-MT7	-9,93	0
HIB75-MT7 - HIB25-MT7	-12,22	0
HIB75-MT8 - HIB25-MT7	-16,14	0
HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-27,42	0
HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-27,13	0
HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-26,24	0
HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-16,62	0
HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-18,91	0
HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-22,83	0
HIB50-MT7 - HIB50-MT6	0,29	1
HIB50-MT8 - HIB50-MT6	1,17	0,993
HIB75-MT6 - HIB50-MT6	10,8	0
HIB75-MT7 - HIB50-MT6	8,51	0
HIB75-MT8 - HIB50-MT6	4,59	0,001
HIB50-MT8 - HIB50-MT7	0,88	1
HIB75-MT6 - HIB50-MT7	10,51	0
HIB75-MT7 - HIB50-MT7	8,22	0
HIB75-MT8 - HIB50-MT7	4,3	0,004
HIB75-MT6 - HIB50-MT8	9,62	0
HIB75-MT7 - HIB50-MT8	7,33	0
HIB75-MT8 - HIB50-MT8	3,42	0,054
HIB75-MT7 - HIB75-MT6	-2,29	0,531
HIB75-MT8 - HIB75-MT6	-6,21	0
HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-3,92	0,013

APÊNDICE D - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 3 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT8	6	50,41	A
SL-MT7	6	48,65	A
OPC	6	30,225	B
HIB25-MT8	6	25,89	C
HIB25-MT7	6	20,732	D
HIB75-MT6	6	16,440	E
HIB75-MT7	6	13,587	F
HIB25-MT6	6	13,006	G
HIB75-MT8	6	11,333	H
HIB50-MT8	6	5,974	I
HIB50-MT7	6	4,5599	J
HIB50-MT6	6	3,6228	K
SL-MT6	6	2,536	L

Difference of Levels	T-Value	P-Value	Difference of Levels	T-Value	T-Value	Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OPC	-14,76	0	HIB25-MT8 - SL-MT7	-12,13	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-8,62	0
SL-MT7 - OPC	9,82	0	HIB50-MT6 - SL-MT7	-24,01	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-7,87	0
SL-MT8 - OPC	10,76	0	HIB50-MT7 - SL-MT7	-23,51	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT7	-2,29	0,534
HIB25-MT6 - OPC	-9,18	0	HIB50-MT8 - SL-MT7	-22,75	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT7	-3,81	0,017
HIB25-MT7 - OPC	-5,06	0	HIB75-MT6 - SL-MT7	-17,17	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT7	-5,01	0
HIB25-MT8 - OPC	-2,31	0,518	HIB75-MT7 - SL-MT7	-18,69	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-11,87	0
HIB50-MT6 - OPC	-14,18	0	HIB75-MT8 - SL-MT7	-19,9	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-11,37	0
HIB50-MT7 - OPC	-13,68	0	HIB25-MT6 - SL-MT8	-19,94	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-10,62	0
HIB50-MT8 - OPC	-12,93	0	HIB25-MT7 - SL-MT8	-15,82	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-5,04	0
HIB75-MT6 - OPC	-7,35	0	HIB25-MT8 - SL-MT8	-13,07	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-6,56	0
HIB75-MT7 - OPC	-8,87	0	HIB50-MT6 - SL-MT8	-24,94	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-7,76	0
HIB75-MT8 - OPC	-10,07	0	HIB50-MT7 - SL-MT8	-24,44	0	HIB50-MT7 - HIB50-MT6	0,5	1
SL-MT7 - SL-MT6	24,59	0	HIB50-MT8 - SL-MT8	-23,69	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT6	1,25	0,988
SL-MT8 - SL-MT6	25,52	0	HIB75-MT6 - SL-MT8	-18,11	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT6	6,83	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	5,58	0	HIB75-MT7 - SL-MT8	-19,63	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT6	5,31	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	9,7	0	HIB75-MT8 - SL-MT8	-20,83	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT6	4,11	0,007
HIB25-MT8 - SL-MT6	12,45	0	HIB25-MT7 - HIB25-MT6	4,12	0,007	HIB50-MT8 - HIB50-MT7	0,75	1
HIB50-MT6 - SL-MT6	0,58	1	HIB25-MT8 - HIB25-MT6	6,87	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT7	6,33	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	1,08	0,997	HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-5	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT7	4,81	0,001
HIB50-MT8 - SL-MT6	1,83	0,826	HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-4,5	0,002	HIB75-MT8 - HIB50-MT7	3,61	0,031
HIB75-MT6 - SL-MT6	7,41	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-3,75	0,021	HIB75-MT6 - HIB50-MT8	5,58	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	5,89	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT6	1,83	0,827	HIB75-MT7 - HIB50-MT8	4,06	0,008
HIB75-MT8 - SL-MT6	4,69	0,001	HIB75-MT7 - HIB25-MT6	0,31	1	HIB75-MT8 - HIB50-MT8	2,86	0,202
SL-MT8 - SL-MT7	0,94	0,999	HIB75-MT8 - HIB25-MT6	-0,89	0,999	HIB75-MT7 - HIB75-MT6	-1,52	0,946
HIB25-MT6 - SL-MT7	-19	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT7	2,75	0,251	HIB75-MT8 - HIB75-MT6	-2,72	0,265
HIB25-MT7 - SL-MT7	-14,88	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-9,12	0	HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-1,2	0,992

APÊNDICE E - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 7 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT7	6	52,90	A
SL-MT8	6	50,92	A
OPC	6	40,047	B
SL-MT6	6	37,475	B
HIB25-MT8	6	28,83	C
HIB25-MT7	6	25,58	C
HIB75-MT6	6	24,208	C D
HIB75-MT7	6	22,421	D
HIB75-MT8	6	20,083	E
HIB25-MT6	5	15,337	F
HIB50-MT7	6	13,607	G
HIB50-MT8	6	12,745	G
HIB50-MT6	6	10,675	H

Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OPC	-1,1	0,996
SL-MT7 - OPC	5,48	0
SL-MT8 - OPC	4,64	0,001
HIB25-MT6 - OPC	-10,05	0
HIB25-MT7 - OPC	-6,17	0
HIB25-MT8 - OPC	-4,79	0,001
HIB50-MT6 - OPC	-12,53	0
HIB50-MT7 - OPC	-11,28	0
HIB50-MT8 - OPC	-11,65	0
HIB75-MT6 - OPC	-6,76	0
HIB75-MT7 - OPC	-7,52	0
HIB75-MT8 - OPC	-8,52	0
SL-MT7 - SL-MT6	6,58	0
SL-MT8 - SL-MT6	5,74	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	-9,01	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	-5,07	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	-3,69	0,025
HIB50-MT6 - SL-MT6	-11,44	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	-10,19	0
HIB50-MT8 - SL-MT6	-10,55	0
HIB75-MT6 - SL-MT6	-5,66	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	-6,42	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	-7,42	0
SL-MT8 - SL-MT7	-0,84	1
HIB25-MT6 - SL-MT7	-15,28	0
HIB25-MT7 - SL-MT7	-11,65	0

Difference of Levels	T-Value	P-Value
HIB25-MT8 - SL-MT7	-10,27	0
HIB50-MT6 - SL-MT7	-18,02	0
HIB50-MT7 - SL-MT7	-16,77	0
HIB50-MT8 - SL-MT7	-17,13	0
HIB75-MT6 - SL-MT7	-12,24	0
HIB75-MT7 - SL-MT7	-13	0
HIB75-MT8 - SL-MT7	-14	0
HIB25-MT6 - SL-MT8	-14,48	0
HIB25-MT7 - SL-MT8	-10,81	0
HIB25-MT8 - SL-MT8	-9,42	0
HIB50-MT6 - SL-MT8	-17,17	0
HIB50-MT7 - SL-MT8	-15,92	0
HIB50-MT8 - SL-MT8	-16,29	0
HIB75-MT6 - SL-MT8	-11,4	0
HIB75-MT7 - SL-MT8	-12,16	0
HIB75-MT8 - SL-MT8	-13,16	0
HIB25-MT7 - HIB25-MT6	4,17	0,006
HIB25-MT8 - HIB25-MT6	5,49	0
HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-1,9	0,791
HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-0,7	1
HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-1,05	0,997
HIB75-MT6 - HIB25-MT6	3,61	0,031
HIB75-MT7 - HIB25-MT6	2,88	0,192
HIB75-MT8 - HIB25-MT6	1,93	0,771
HIB25-MT8 - HIB25-MT7	1,39	0,973
HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-6,36	0

Difference of Levels	T-Value	P-Value
HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-5,11	0
HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-5,48	0
HIB75-MT6 - HIB25-MT7	-0,59	1
HIB75-MT7 - HIB25-MT7	-1,35	0,978
HIB75-MT8 - HIB25-MT7	-2,35	0,493
HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-7,75	0
HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-6,5	0
HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-6,87	0
HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-1,97	0,745
HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-2,74	0,258
HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-3,73	0,022
HIB50-MT7 - HIB50-MT6	1,25	0,988
HIB50-MT8 - HIB50-MT6	0,88	1
HIB75-MT6 - HIB50-MT6	5,77	0
HIB75-MT7 - HIB50-MT6	5,01	0
HIB75-MT8 - HIB50-MT6	4,01	0,009
HIB50-MT8 - HIB50-MT7	-0,37	1
HIB75-MT6 - HIB50-MT7	4,52	0,002
HIB75-MT7 - HIB50-MT7	3,76	0,02
HIB75-MT8 - HIB50-MT7	2,76	0,245
HIB75-MT6 - HIB50-MT8	4,89	0,001
HIB75-MT7 - HIB50-MT8	4,13	0,007
HIB75-MT8 - HIB50-MT8	3,13	0,11
HIB75-MT7 - HIB75-MT6	-0,76	1
HIB75-MT8 - HIB75-MT6	-1,76	0,861
HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-1	0,998

APÊNDICE F - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS COM 28 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT8	5	65,14	A
SL-MT7	6	63,63	A
SL-MT6	6	54,56	B
OPC	6	50,34	B
HIB25-MT8	6	34,54	C
HIB25-MT7	6	31,60	C
HIB75-MT8	6	30,253	C
HIB75-MT7	6	29,142	C
HIB75-MT6	6	27,41	C
HIB25-MT6	6	24,172	D
HIB50-MT7	6	23,546	D
HIB50-MT8	6	23,167	D
HIB50-MT6	6	22,982	D

Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OPC	1,75	0,867
SL-MT7 - OPC	5,51	0
SL-MT8 - OPC	5,85	0
HIB25-MT6 - OPC	-10,85	0
HIB25-MT7 - OPC	-7,77	0
HIB25-MT8 - OPC	-6,55	0
HIB50-MT6 - OPC	-11,35	0
HIB50-MT7 - OPC	-11,11	0
HIB50-MT8 - OPC	-11,27	0
HIB75-MT6 - OPC	-9,51	0
HIB75-MT7 - OPC	-8,79	0
HIB75-MT8 - OPC	-8,33	0
SL-MT7 - SL-MT6	3,76	0,02
SL-MT8 - SL-MT6	4,18	0,005
HIB25-MT6 - SL-MT6	-12,6	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	-9,52	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	-8,3	0
HIB50-MT6 - SL-MT6	-13,09	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	-12,86	0
HIB50-MT8 - SL-MT6	-13,02	0
HIB75-MT6 - SL-MT6	-11,26	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	-10,54	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	-10,08	0
SL-MT8 - SL-MT7	0,6	1
HIB25-MT6 - SL-MT7	-16,36	0
HIB25-MT7 - SL-MT7	-13,28	0

Difference of Levels	T-Value	T-Value
HIB25-MT8 - SL-MT7	-12,06	0
HIB50-MT6 - SL-MT7	-16,85	0
HIB50-MT7 - SL-MT7	-16,62	0
HIB50-MT8 - SL-MT7	-16,78	0
HIB75-MT6 - SL-MT7	-15,02	0
HIB75-MT7 - SL-MT7	-14,3	0
HIB75-MT8 - SL-MT7	-13,84	0
HIB25-MT6 - SL-MT8	-16,2	0
HIB25-MT7 - SL-MT8	-13,26	0
HIB25-MT8 - SL-MT8	-12,1	0
HIB50-MT6 - SL-MT8	-16,67	0
HIB50-MT7 - SL-MT8	-16,45	0
HIB50-MT8 - SL-MT8	-16,6	0
HIB75-MT6 - SL-MT8	-14,92	0
HIB75-MT7 - SL-MT8	-14,23	0
HIB75-MT8 - SL-MT8	-13,79	0
HIB25-MT7 - HIB25-MT6	3,08	0,124
HIB25-MT8 - HIB25-MT6	4,3	0,004
HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-0,49	1
HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-0,26	1
HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-0,42	1
HIB75-MT6 - HIB25-MT6	1,34	0,979
HIB75-MT7 - HIB25-MT6	2,06	0,689
HIB75-MT8 - HIB25-MT6	2,52	0,379
HIB25-MT8 - HIB25-MT7	1,22	0,99
HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-3,57	0,035

Difference of Levels	T-Value	P-Value
HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-3,34	0,066
HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-3,5	0,043
HIB75-MT6 - HIB25-MT7	-1,74	0,871
HIB75-MT7 - HIB25-MT7	-1,02	0,998
HIB75-MT8 - HIB25-MT7	-0,56	1
HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-4,79	0,001
HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-4,56	0,002
HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-4,72	0,001
HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-2,96	0,163
HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-2,24	0,568
HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-1,78	0,853
HIB50-MT7 - HIB50-MT6	0,23	1
HIB50-MT8 - HIB50-MT6	0,08	1
HIB75-MT6 - HIB50-MT6	1,83	0,825
HIB75-MT7 - HIB50-MT6	2,55	0,359
HIB75-MT8 - HIB50-MT6	3,02	0,144
HIB50-MT8 - HIB50-MT7	-0,16	1
HIB75-MT6 - HIB50-MT7	1,6	0,923
HIB75-MT7 - HIB50-MT7	2,32	0,511
HIB75-MT8 - HIB50-MT7	2,78	0,237
HIB75-MT6 - HIB50-MT8	1,76	0,862
HIB75-MT7 - HIB50-MT8	2,48	0,406
HIB75-MT8 - HIB50-MT8	2,94	0,171
HIB75-MT7 - HIB75-MT6	0,72	1
HIB75-MT8 - HIB75-MT6	1,18	0,993
HIB75-MT8 - HIB75-MT7	0,46	1

APÊNDICE G - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 3 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT7	6	47,36	A
SL-MT8	6	46,57	A
HIB25-MT8	6	30,315	B
HIB25-MT7	6	26,243	C
HIB75-MT6	6	25,95	C
HIB75-MT7	6	24,765	C
OP	6	23,426	D
HIB75-MT8	6	23,39	D
HIB25-MT6	6	20,362	E
HIB50-MT8	6	14,0846	F
HIB50-MT7	6	10,668	G
HIB50-MT6	6	9,402	H
SL-MT6	6	8,732	H

Difference of Levels	T-Value	P-Value	Difference of Levels	T-Value	T-Value	Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OP	-12,46	0	HIB25-MT8 - SL-MT7	-14,45	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-13,21	0
SL-MT7 - OP	20,3	0	HIB50-MT6 - SL-MT7	-32,19	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-10,31	0
SL-MT8 - OP	19,62	0	HIB50-MT7 - SL-MT7	-31,11	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT7	-0,24	1
HIB25-MT6 - OP -3,06	-2,6	0,332	HIB50-MT8 - SL-MT7	-28,22	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT7	-1,25	0,988
HIB25-MT7 - OP 2,82	2,39	0,465	HIB75-MT6 - SL-MT7	-18,15	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT7	-2,42	0,445
HIB25-MT8 - OP 6,89	5,84	0	HIB75-MT7 - SL-MT7	-19,16	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-17,73	0
HIB50-MT6 - OP -14,02	-11,89	0	HIB75-MT8 - SL-MT7	-20,32	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-16,66	0
HIB50-MT7 - OP -12,76	-10,82	0	HIB25-MT6 - SL-MT8	-22,22	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-13,76	0
HIB50-MT8 - OP -9,34	-7,92	0	HIB25-MT7 - SL-MT8	-17,23	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-3,7	0,024
HIB75-MT6 - OP 2,53	2,14	0,633	HIB25-MT8 - SL-MT8	-13,78	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-4,71	0,001
HIB75-MT7 - OP 1,34	1,14	0,995	HIB50-MT6 - SL-MT8	-31,51	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-5,87	0
HIB75-MT8 - OP -0,03	-0,03	1	HIB50-MT7 - SL-MT8	-30,44	0	HIB50-MT7 - HIB50-MT6	1,07	0,997
SL-MT7 - SL-MT6	32,76	0	HIB50-MT8 - SL-MT8	-27,54	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT6	3,97	0,011
SL-MT8 - SL-MT6	32,08	0	HIB75-MT6 - SL-MT8	-17,48	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT6	14,04	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	9,86	0	HIB75-MT7 - SL-MT8	-18,49	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT6	13,03	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	14,85	0	HIB75-MT8 - SL-MT8	-19,65	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT6	11,86	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	18,3	0	HIB25-MT7 - HIB25-MT6	4,99	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT7	2,9	0,186
HIB50-MT6 - SL-MT6	0,57	1	HIB25-MT8 - HIB25-MT6	8,44	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT7	12,96	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	1,64	0,91	HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-9,29	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT7	11,95	0
HIB50-MT8 - SL-MT6	4,54	0,002	HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-8,22	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT7	10,79	0
HIB75-MT6 - SL-MT6	14,6	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-5,32	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT8	10,07	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	13,6	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT6	4,74	0,001	HIB75-MT7 - HIB50-MT8	9,06	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	12,43	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT6	3,73	0,022	HIB75-MT8 - HIB50-MT8	7,89	0
SL-MT8 - SL-MT7	-0,67	1	HIB75-MT8 - HIB25-MT6	2,57	0,35	HIB75-MT7 - HIB75-MT6	-1,01	0,998
HIB25-MT6 - SL-MT7	-22,89	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT7	3,45	0,048	HIB75-MT8 - HIB75-MT6	-2,17	0,613
HIB25-MT7 - SL-MT7	-17,91	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-14,28	0	HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-1,16	0,994

APÊNDICE H - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 7 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT7	5	67,227	A
SL-MT8	6	65,92	A
SL-MT6	6	46,231	B
HIB75-MT7	6	35,808	C
HIB25-MT8	6	35,603	C
HIB75-MT8	6	35,200	C
HIB75-MT6	6	33,17	D
HIB25-MT7	6	31,247	D
OP	6	26,38	E
HIB25-MT6	6	24,602	E
HIB50-MT8	6	23,821	E
HIB50-MT6	6	21,798	F
HIB50-MT7	6	21,599	F

Difference of Levels	T-Value	P-Value	Difference of Levels	T-Value	T-Value	Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OP	11,74	0	HIB25-MT8 - SL-MT7	-17,83	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-5,71	0
SL-MT7 - OP	23,03	0	HIB50-MT6 - SL-MT7	-25,62	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-4,39	0,003
SL-MT8 - OP	23,38	0	HIB50-MT7 - SL-MT7	-25,73	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT7	1,14	0,995
HIB25-MT6 - OP	-1,05	0,997	HIB50-MT8 - SL-MT7	-24,47	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT7	2,7	0,278
HIB25-MT7 - OP	2,88	0,195	HIB75-MT6 - SL-MT7	-19,2	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT7	2,34	0,499
HIB25-MT8 - OP	5,45	0	HIB75-MT7 - SL-MT7	-17,72	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-8,16	0
HIB50-MT6 - OP	-2,71	0,271	HIB75-MT8 - SL-MT7	-18,06	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-8,28	0
HIB50-MT7 - OP	-2,83	0,215	HIB25-MT6 - SL-MT8	-24,43	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-6,97	0
HIB50-MT8 - OP	-1,51	0,947	HIB25-MT7 - SL-MT8	-20,5	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-1,44	0,964
HIB75-MT6 - OP	4,02	0,009	HIB25-MT8 - SL-MT8	-17,93	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT8	0,12	1
HIB75-MT7 - OP	5,57	0	HIB50-MT6 - SL-MT8	-26,09	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-0,24	1
HIB75-MT8 - OP	5,21	0	HIB50-MT7 - SL-MT8	-26,21	0	HIB50-MT7 - HIB50-MT6	-0,12	1
SL-MT7 - SL-MT6	11,84	0	HIB50-MT8 - SL-MT8	-24,89	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT6	1,2	0,992
SL-MT8 - SL-MT6	11,64	0	HIB75-MT6 - SL-MT8	-19,36	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT6	6,73	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	-12,79	0	HIB75-MT7 - SL-MT8	-17,81	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT6	8,29	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	-8,86	0	HIB75-MT8 - SL-MT8	-18,17	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT6	7,93	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	-6,29	0	HIB25-MT7 - HIB25-MT6	3,93	0,012	HIB50-MT8 - HIB50-MT7	1,31	0,982
HIB50-MT6 - SL-MT6	-14,45	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT6	6,51	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT7	6,85	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	-14,57	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-1,66	0,903	HIB75-MT7 - HIB50-MT7	8,4	0
HIB50-MT8 - SL-MT6	-13,25	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-1,78	0,854	HIB75-MT8 - HIB50-MT7	8,04	0
HIB75-MT6 - SL-MT6	-7,72	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT6	-0,46	1	HIB75-MT6 - HIB50-MT8	5,53	0
HIB75-MT7 - SL-MT6	-6,16	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT6	5,07	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT8	7,09	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	-6,52	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT6	6,63	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT8	6,73	0
SL-MT8 - SL-MT7	-0,74	1	HIB75-MT8 - HIB25-MT6	6,27	0	HIB75-MT7 - HIB75-MT6	1,56	0,936
HIB25-MT6 - SL-MT7	-24,03	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT7	2,58	0,346	HIB75-MT8 - HIB75-MT6	1,2	0,992
HIB25-MT7 - SL-MT7	-20,29	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-5,59	0	HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-0,36	1

APÊNDICE I - ANOVA COM TESTE TUKEY: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ARGAMASSAS COM 28 DIAS

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
SL-MT8	6	75,95	A
SL-MT7	6	74,16	A
SL-MT6	6	70,21	A
HIB25-MT8	6	47,403	B
HIB75-MT7	6	41,815	C
HIB75-MT8	5	41,651	C
HIB75-MT6	5	38,97	C
HIB25-MT7	6	38,81	C
HIB50-MT8	6	33,403	D
HIB25-MT6	6	31,143	E
HIB50-MT7	6	29,697	E
OP	6	29,26	E
HIB50-MT6	6	28,37	E

Difference of Levels	T-Value	P-Value	Difference of Levels	T-Value	T-Value	Difference of Levels	T-Value	P-Value
SL-MT6 - OP	26,92	0	HIB25-MT8 - SL-MT7	-17,59	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT7	-5,99	0
SL-MT7 - OP	29,52	0	HIB50-MT6 - SL-MT7	-30,1	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT7	-3,55	0,037
SL-MT8 - OP	30,7	0	HIB50-MT7 - SL-MT7	-29,24	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT7	0,1	1
HIB25-MT6 - OP	1,24	0,989	HIB50-MT8 - SL-MT7	-26,8	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT7	1,98	0,743
HIB25-MT7 - OP	6,28	0	HIB75-MT6 - SL-MT7	-22,06	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT7	1,78	0,851
HIB25-MT8 - OP	11,93	0	HIB75-MT7 - SL-MT7	-21,27	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT8	-12,51	0
HIB50-MT6 - OP	-0,58	1	HIB75-MT8 - SL-MT7	-20,38	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT8	-11,64	0
HIB50-MT7 - OP	0,29	1	HIB25-MT6 - SL-MT8	-29,46	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT8	-9,21	0
HIB50-MT8 - OP	2,72	0,265	HIB25-MT7 - SL-MT8	-24,42	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT8	-5,29	0
HIB75-MT6 - OP	6,09	0	HIB25-MT8 - SL-MT8	-18,77	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT8	-3,67	0,026
HIB75-MT7 - OP	8,25	0	HIB50-MT6 - SL-MT8	-31,28	0	HIB75-MT8 - HIB25-MT8	-3,61	0,032
HIB75-MT8 - OP	7,77	0	HIB50-MT7 - SL-MT8	-30,41	0	HIB50-MT7 - HIB50-MT6	0,87	1
SL-MT7 - SL-MT6	2,6	0,333	HIB50-MT8 - SL-MT8	-27,97	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT6	3,31	0,072
SL-MT8 - SL-MT6	3,77	0,02	HIB75-MT6 - SL-MT8	-23,18	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT6	6,64	0
HIB25-MT6 - SL-MT6	-25,69	0	HIB75-MT7 - SL-MT8	-22,44	0	HIB75-MT7 - HIB50-MT6	8,84	0
HIB25-MT7 - SL-MT6	-20,65	0	HIB75-MT8 - SL-MT8	-21,5	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT6	8,32	0
HIB25-MT8 - SL-MT6	-14,99	0	HIB25-MT7 - HIB25-MT6	5,04	0	HIB50-MT8 - HIB50-MT7	2,44	0,433
HIB50-MT6 - SL-MT6	-27,51	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT6	10,69	0	HIB75-MT6 - HIB50-MT7	5,81	0
HIB50-MT7 - SL-MT6	-26,64	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT6	-1,82	0,832	HIB75-MT7 - HIB50-MT7	7,97	0
HIB50-MT8 - SL-MT6	-24,2	0	HIB50-MT7 - HIB25-MT6	-0,95	0,999	HIB75-MT8 - HIB50-MT7	7,49	0
HIB75-MT6 - SL-MT6	-19,58	0	HIB50-MT8 - HIB25-MT6	1,49	0,954	HIB75-MT6 - HIB50-MT8	3,49	0,044
HIB75-MT7 - SL-MT6	-18,67	0	HIB75-MT6 - HIB25-MT6	4,91	0,001	HIB75-MT7 - HIB50-MT8	5,53	0
HIB75-MT8 - SL-MT6	-17,9	0	HIB75-MT7 - HIB25-MT6	7,02	0	HIB75-MT8 - HIB50-MT8	5,17	0
SL-MT8 - SL-MT7	1,18	0,993	HIB75-MT8 - HIB25-MT6	6,59	0	HIB75-MT7 - HIB75-MT6	1,78	0,85
HIB25-MT6 - SL-MT7	-28,28	0	HIB25-MT8 - HIB25-MT7	5,65	0	HIB75-MT8 - HIB75-MT6	1,61	0,92
HIB25-MT7 - SL-MT7	-23,24	0	HIB50-MT6 - HIB25-MT7	-6,86	0	HIB75-MT8 - HIB75-MT7	-0,1	1