



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Bernardo Alves de Souza

**DESEMPENHO PLASTIFICANTE DE UM ADITIVO DUAL RESIDUAL
EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND**

Ouro Preto

2022

Desempenho plastificante de um aditivo dual residual em pastas de cimento Portland

Bernardo Alves de Souza

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Materiais e Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Orientador: Eng.º M. Sc. Victor Rezende Carvalho – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729d Souza, Bernardo Alves de.
Desempenho plastificante de um aditivo dual residual em pastas de Cimento Portland. [manuscrito] / Bernardo Alves de Souza. - 2022. 29 f.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.
Coorientador: Me. Victor Rezende Carvalho.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Aditivos - Aditivos à base de lignina. 2. Concreto - Adições minerais residuais. 3. Lignina - Lignina Organosolv. 4. Escória (Metalurgia) - Escória de aciaria. 5. Engenharia sustentável - Materiais sustentáveis. I. Carvalho, Victor Rezende. II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bernardo Alves de Souza

Desempenho plastificante de um aditivo dual residual em pastas de cimento Portland

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 26 de outubro de 2022

Membros da banca

D.Sc. - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - UFOP
M.Sc. - Victor Rezende Carvalho - Orientador - UFOP
M.Sc. - Marcela Aguiar Nogueira - UFOP
M.Sc. - Douglas Mol Resende - UFOP

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/11/2022, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0421628** e o código CRC **1D19596C**.

RESUMO

O bagaço de cana-de-açúcar é a biomassa mais abundante no país. O resíduo é gerado na indústria sucroalcooleira e dele pode se extrair a lignina, polímero que promove plasticidade em argamassas e concretos. A escória de aciaria é um resíduo gerado na indústria siderúrgica e quando utilizada como adição é capaz de conferir benefícios físicos e mecânicos em matrizes de cimento Portland. Assim, este trabalho buscou produzir e avaliar um aditivo dual residual (ADr), composto por um licor à base de lignina e escória de aciaria. O desempenho do ADr foi comparado com o de um aditivo dual comercial (ADc), composto por um aditivo à base de lignosulfonato e sílica ativa. A escória de aciaria LD foi beneficiada para a produção de um *powder* LD. O licor à base de lignina foi extraído do bagaço de cana através do pré-tratamento Organosolv. Por meio de uma estratégia de dosagem, foram definidas as proporções do ADr (45% em massa de *powder* LD e 55% de aditivo) e do ADc (30% em massa de sílica ativa e 70% de lignosulfonato). Com isso, o desempenho dos aditivos duais foi avaliado pelos ensaios de ponto de saturação e *mini-slump*. Como resultado, o ponto de saturação do ADr (22%) foi maior que do ADc (16%). Para a dosagem do ponto de saturação, o ADr teve um tempo de escoamento (21,40 s) inferior ao do ADc (22,93 s). No ensaio de *mini-slump*, ao contrário do ADc, o aumento das dosagens do ADr não influenciou no aumento do espalhamento das pastas, efeito possivelmente causado pela maior densidade do *powder* LD em relação à sílica ativa. Comparando o desempenho do ADr com o do licor à base de lignina residual avaliado de forma isolada, observou-se que presença do *powder* LD dificultou o efeito plastificante do licor residual, o que justificou o maior ponto de saturação e maior tempo de escoamento do ADr. Este trabalho apresenta novas possibilidades para o aproveitamento de resíduos e para o desenvolvimento de novos aditivos sustentáveis para a construção civil.

Palavras-chave: Aditivos à base de lignina; Adições minerais residuais; Lignina Organosolv; Escória de aciaria; Materiais sustentáveis.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is the most abundant biomass in Brazil. This residue is generated in sugar-alcohol industries and lignin can be extracted from it. Lignin is a polymer that promotes plasticity when added to mortars and concretes. On the other hand, steel slag is a waste generated in the steel industry. When incorporated as mineral admixture, steel slag confers physical and mechanical benefits to Portland cement matrices. Thus, this work sought to produce and evaluate a residual dual admixture (ADr), composed of a lignin-based residual liquor and steel slag. The performance of ADr was compared with that of a commercial dual admixture (ADc), composed of a lignosulfonate-based plasticizer and silica fume. A basic oxygen furnace slag was subjected to a grinding program to produce a steel slag powder. The lignin-based liquor was extracted from sugarcane bagasse through an Organosolv pretreatment. The proportions of the ADr (45% steel slag powder and 55% residual liquor) and the ADc (30% silica fume and 70% lignosulfonate) were defined through a dosing strategy. Thus, the performances of the dual admixtures were evaluated by saturation point and mini-slump tests. As a result, the saturation point of the ADr (22%) was higher than that of the ADc (16%). On the other hand, the ADr presented a lower minimum flow time (21.40 s) than the ADc (22.93 s). In the mini-slump test, unlike the ADc, increasing the dosages of ADr did not influence the spread of the cement pastes, an effect possibly caused by the higher density of the steel slag powder compared to the silica fume. Comparing the performance of the ADr with that of the residual lignin-based liquor, it was observed that the presence of steel slag powder impaired the plasticizing effect of the residual liquor, which justified the higher saturation point and flow time of the ADr. This work presents new possibilities for waste management and the development of new sustainable admixtures for civil construction.

Keywords: Lignin-based Admixtures; Residual mineral Admixtures; Organosolv Lignin; Steel slag; Sustainable Materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partículas de cimento aglomeradas antes da incorporação do aditivo e partículas dispersas após a incorporação do aditivo	8
Figura 2: Fluxograma das etapas do programa experimental proposto.	9
Figura 3: Escória LD utilizada no projeto.	10
Figura 4: Bagaço de cana-de-açúcar in natura.....	10
Figura 5: Moagem do bagaço de cana no moinho de facas.	11
Figura 6: (a) Reator e (b) banho termostático utilizados no pré-tratamento Organosolv.	12
Figura 7: Etapas de (a) despulpção; (b) lavagem; e (c) prensagem do bagaço pré-tratado.	12
Figura 8: (a) 1ª moagem, (b) 2ª moagem e (c) 3ª moagem no triturador de mandíbulas.	13
Figura 9: Escória resultante do (a) moinho de bolas e (b) moinho de alta eficiência.	14
Figura 10: (a) triturador de mandíbulas; (b) moinho de bolas; e (c) moinho de alta eficiência.....	14
Figura 11: granulometria dos sólidos obtidas por difração à laser.....	15
Figura 12: Homogeneização dos aditivos duais no agitador mecânico.	17
Figura 13: Ensaio de ponto de saturação no viscosímetro tipo copo Ford.	18
Figura 14: Mesa de abatimento, minicone e paquímetro.....	19
Figura 15: Desempenho do ADc nos ensaios de ponto de saturação e mini-slump.	20
Figura 16: Evolução do espalhamento da pasta de cimento com ADc.....	21
Figura 17: Princípio de exsudação na pasta aditivada com 16% de ADc.....	21
Figura 18: Desempenho do ADr nos ensaios de ponto de saturação e mini-slump.	22
Figura 19: Evolução do espalhamento da pasta de cimento com ADr.	22
Figura 20: Consistência da pasta aditivada com 22% de ADr.	23
Figura 21: Desempenhos do ADc, do ADr, do lignosulfonato (LS) e do aditivo à base de lignina (LO) no ensaio de ponto de saturação.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química média da escória de aciaria LD nas siderúrgicas brasileiras	5
Tabela 2: Caracterização física das adições minerais e do cimento.	15

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	REVISÃO DE LITERATURA	4
	3.1 Adições minerais	4
	3.2 Adições minerais de escória LD	4
	3.3 Aditivos químicos.....	6
	3.4 Aditivos à base de lignina.....	7
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	9
	4.1 Materiais	10
	4.2 Produção do aditivo à base de lignina residual	11
	4.3 Preparo da Adição de Escória de Aciaria	13
	4.4 Características dos sólidos.....	14
	4.5 Dosagem e preparo dos aditivos	15
	4.6 Mistura e Homogeneização dos aditivos	16
	4.7 Densidade dos aditivos	17
	4.8 Ensaio de ponto de saturação.....	17
	4.9 Ensaio de <i>mini-slump</i>	18
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
	5.1 Características dos aditivos duais	19
	5.2 Desempenho dos aditivos	20
6.	CONCLUSÃO	25
7.	REFERÊNCIAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira mundial é capaz de produzir cerca de 4 bilhões de toneladas de cimento todos os anos (CEMBUREAU, 2021). No entanto, cerca de 5 a 8% da emissão global de CO₂ na atmosfera é resultante do processo produtivo do cimento Portland (KAJASTE; HURME, 2016), o que diminui o desempenho ambiental desse material. O Brasil é atualmente o 8º maior produtor mundial de cimento Portland (SNIC, 2020), atingindo uma produção de 61 milhões de toneladas no ano de 2020 (SNIC, 2020). Diante disso, visando a elaboração de matrizes ecoeficientes, uma opção é a substituição de uma parte do cimento por materiais cimentícios suplementares.

Os materiais cimentícios suplementares têm a capacidade de aprimorar as propriedades físicas das matrizes cimentícias, além de auxiliar na redução do lançamento de CO₂ na atmosfera e possibilitar a utilização de resíduos industriais, como a escória de aciaria (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2016). Atualmente, o Brasil é considerado o 9º maior produtor mundial de aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022) e, como consequência, possui uma grande geração de escórias de aciaria. Em 2017, foram geradas 20,9 milhões de resíduos da indústria siderúrgica, sendo a escória de aciaria responsável por 27% dos resíduos gerados (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

Basicamente, existem dois tipos de escórias de aciaria: a escória LD e a escória de arco elétrico. A primeira é gerada em usinas siderúrgicas integradas, onde a rota de refino se dá pelas aciarias de conversor a oxigênio, processo conhecido como Linz-Donawitz (LD). Já a segunda é gerada em usinas siderúrgicas semi-integradas, nas quais o refino do aço se dá pelas aciarias de arco elétrico (COSTA, 2019). Ao serem adicionadas às matrizes de cimento Portland, as escórias de aciaria otimizam suas propriedades mecânicas e de durabilidade (CARVALHO et al., 2019; ROSLAN et al., 2016; COSTA, 2019; WANG et al., 2013), bem como melhoram seu desempenho sustentável. Além disso, as adições minerais de escória de aciaria apresentam uma boa afinidade com aditivos plastificantes comerciais (CARVALHO et al., 2020a).

Para além dos resíduos da siderurgia, a indústria sucroalcooleira nacional também ocasiona uma extensa produção de resíduos agrícolas. Dentre os resíduos gerados, é importante destacar a biomassa mais abundante no país: o bagaço da cana-de-açúcar (HOFSETZ; SILVA, 2012). Avalia-se que a indústria sucroalcooleira irá colher 572,87 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no período 2022/2023, e conseqüentemente, gerará algo em torno de 160 milhões de toneladas de bagaço (CONAB, 2022). Nas biorrefinarias lignocelulósicas, o pré-tratamento do bagaço de cana para a produção de biocombustíveis gera como subproduto a lignina (SIVAGURUNATHAN et al., 2021). As ligninas possuem em sua composição vários grupos funcionais, com alternativas de alteração de sua estrutura. Como consequência, as ligninas podem ser usadas como matéria prima para diferentes produtos industriais (COLLINS et al., 2019).

Os processos Sulfito, Kraft, Soda e Organosolv são os principais métodos de extração da lignina aplicados nas biorrefinarias e nas indústrias de papel e celulose. As ligninas resultantes dos processos mencionados anteriormente são denominadas ligninas técnicas (VISHTAL; KRASLAWSKI, 2011). Os lignosulfonatos são as ligninas técnicas obtidas no processo sulfito e são amplamente comercializados como aditivos químicos para matrizes cimentícias (BAJWA et al., 2019). Apesar das suas propriedades plastificantes, os lignosulfonatos possuem variabilidade de composição, pureza e desempenho, motivando pesquisadores a desenvolverem novos aditivos à base de lignina.

A elaboração de novos aditivos à base de lignina residual pode ocorrer através do uso das ligninas técnicas (KONDURI; FATEHI, 2015; OUYANG et al., 2009) ou da modificação de lignosulfonatos comerciais (PANG et al., 2008; YU et al., 2013). As ligninas Organosolv são produto do processo Organosolv, que abrange o uso de solventes orgânicos e pode ser aplicado no bagaço de cana-de-açúcar (VISHTAL; KRASLAWSKI, 2011; MEIGHAN et al., 2017). As ligninas Organosolv são pouco estudadas devido à baixa oferta no mercado (COLLINS et al., 2019), ao passo que as mais estudadas para a produção de aditivos são as ligninas Kraft (COLLINS et al., 2019).

Nesse contexto, este trabalho busca investigar o potencial plastificante de um aditivo dual produzido com materiais residuais (licor à base de lignina e adição mineral

de escória de aciaria). Para tanto, a adição mineral de escória de aciaria foi obtida pelo refinamento de uma escória LD. Já a lignina residual foi obtida através do pré-tratamento Organosolv do bagaço de cana-de-açúcar, baseado na metodologia proposta por Meighan et al. (2017). Ainda, é pertinente ressaltar a inovação apresentada no desenvolvimento do trabalho proposto, na medida em que este foi desenvolvido a partir da utilização de dois resíduos de grande geração. Assim, o trabalho apresenta alternativas para o aproveitamento de resíduos industriais de diferentes origens e contribui para a produção de matrizes cimentícias mais sustentáveis.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho plastificante de um aditivo dual residual (Adição mineral de escória de aciaria LD + Aditivo plastificante à base de lignina residual) em matrizes de cimento Portland. Os Objetivos específicos deste trabalho são:

- Investigar o ponto de saturação do aditivo dual residual composto pelo *powder* LD e pelo aditivo à base de lignina em um viscosímetro tipo copo Ford;
- Avaliar o desempenho plastificante de pastas de cimento contendo o aditivo dual residual pelo ensaio de *mini-slump*;
- Comparar o desempenho da adição de escória de aciaria e do aditivo à base de lignina residual no aditivo dual residual com o desempenho da sílica ativa e do aditivo à base de lignosulfonato em um aditivo dual comercial.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Adições minerais

As adições minerais são materiais finos, comumente adicionados às matrizes cimentícias, oferecendo vantagens econômicas, ambientais e físicas (CARVALHO, 2022). Além disso, as adições minerais podem atuar como materiais cimentícios suplementares, capazes de substituir o cimento em concretos e argamassas e até mesmo o clínquer na produção do cimento (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; LOHTIA; JOSHI, 1996).

Essas adições podem atuar como fíler, além de apresentar características pozolânicas ou cimentantes (METHA, 2021). O fíler pode ser um material de origem natural ou obtido pelo processamento de minerais inorgânicos. Ele é capaz de promover alguns benefícios em algumas características do concreto, como melhoria na trabalhabilidade (NEVILLE, 2016). Por ser um material quimicamente inerte, a sua ação nas matrizes de cimento é predominantemente física, fazendo com que a matriz com tenha maior grau de empacotamento, menos poros, maior trabalhabilidade no estado fresco e conseqüentemente um melhor desempenho mecânico no estado endurecido. (NEVILLE, 2016). O calcário e os pós de quartzo são os exemplos de fílers mais encontrados (MELO, 2005).

Por outro lado, as pozolanas são materiais reativos capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio na presença de água (METHA, 2014). Essa reação acaba formando compostos cimentícios benéficos para as matrizes de cimento. São de origem natural ou artificial (NEVILLE, 2016), e embora sejam utilizadas em várias partes do mundo, devido a aspectos econômicos e ambientais, subprodutos industriais vêm se tornando a principal fonte dessas adições minerais (METHA, 2014). Os principais materiais pozolânicos são as cinzas volantes e a sílica ativa (NEVILLE, 2016).

3.2 Adições minerais de escória LD

Em 2021, o Brasil produziu cerca de 36,2 milhões de toneladas de aço e, conseqüentemente, uma grande quantidade de resíduos e coprodutos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). Apesar da produção de 1,95 bilhões de toneladas de aço e do

crescimento de 3,7% da siderurgia global em 2021 (MACHADO, 2022), existe um número restrito de processos de fabricação do aço, sendo um deles o processo *Linz-Donawitz* (LD).

No processo *Linz-Donawitz* (LD), empregado em siderurgias integradas, é utilizado um conversor de oxigênio na rota de refino e apenas o minério de ferro é adotado como matéria prima para a produção do aço (COSTA, 2019). As adições minerais de escórias de aciaria do tipo LD são denominadas *powders LD* (CARVALHO, 2022). A tabela a seguir demonstra a composição química dos *powders LD*.

Tabela 1: Composição química média da escória de aciaria LD nas siderúrgicas brasileiras (Fonte: adaptado de MARTINS *et al.*, 2021)

Componentes	Intervalo de ocorrência (%)	Valores médios (%)
CaO	33,97-57,44	42,17
Fe ₂ O ₃ / FeO / Fe	5,24-38,06	23,80
SiO ₂	7,74-36-33	14,77
Al ₂ O ₃	0,33-11,38	3,53
MgO	1,56-11,20	6,80
MnO	0,42-10,31	3,02
Na ₂ +K ₂ O	0,002-1,34	0,31
SO ₃	0,001-2,70	0,47
Cr ₂ O ₃	0,11-3,14	0,63
V ₂ O ₅	0,003-6,51	0,90
TiO ₂	0,16-1,78	0,78
P ₂ O ₅	0,33-7,14	1,76
Outros	0,01-14,84	2,95

De acordo com COSTA (2019), o uso de escórias de aciarias como agregado e adição mineral foi capaz de produzir matrizes com performance mecânica igual ou melhor que os concretos convencionais. Se tratando do uso como adição mineral, as matrizes contendo *powder LD* demonstraram propriedades mecânicas semelhantes às dos concretos com adição comercial, como o metacaulim. Ademais, por ser

considerado um material não inerte, a escória colabora com a performance e a estrutura do concreto (COSTA, 2019).

Alguns estudos verificaram bons resultados no desempenho mecânico relacionados ao uso do poder LD em matrizes cimentícias. Carvalho et al. (2019) adicionaram 20% de *powder* LD em substituição ao volume de cimento e observaram que houve um aumento de 16,4% na resistência à compressão aos 28 dias em comparação à concretos sem adições. Os autores também observaram que, aumentando a dosagem de 20% para 40% de *powder* LD, houve um aumento de 9,9% na resistência à compressão aos 28 dias em comparação aos concretos sem adições.

Carvalho (2022) realizou estudos utilizando a escória de aciaria LD como adição mineral, onde foram avaliados 3 tipos de *powders* LD, cada um obtido em uma etapa de separação magnética e processamento de agregados de escória LD. A partir disso, foram produzidos corpos de provas cilíndricos utilizando 25% de substituição do cimento pelos *powders* LD e amostras de referência sem qualquer adição mineral. Ao final do experimento, notou-se que 2 dos 3 traços que continham *powder* LD em sua composição atingiram um índice de desempenho superior a 90%, mínimo recomendado para materiais reativos segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014). Ainda, percebeu-se que os *powders* LD contribuíram para o refinamento dos poros nas matrizes de cimento.

3.3 Aditivos químicos

Os aditivos químicos são produtos geralmente adicionados em pequenas dosagens e são capazes de trazer melhorias na performance, benefícios econômicos e modificar as propriedades normais das matrizes cimentícias, permitindo ainda o acréscimo de mais componentes na matriz cimentícia (NEVILLE, 2016). Neste contexto, é importante mencionar que existem inúmeras finalidades para os aditivos, tais como: aumentar a plasticidade do concreto, retardar ou acelerar o tempo de pega, aumentar a resistência inicial, aumentar resistência do concreto em determinadas condições de exposição, propriedades de retração, dentre outros (METHA, 2014).

Em decorrência das vantagens provenientes dos aditivos químicos anteriormente mencionadas, a indústria do ramo em questão cresceu exponencialmente, na intenção de satisfazer as necessidades das soluções de engenharia civil (METHA, 2014).

Atualmente existem diversos tipos de aditivos no mercado, sendo os principais deles os incorporadores de ar, os modificadores de pega e os redutores de água (plastificantes e superplastificantes) de 1ª, 2ª e 3ª geração.

Desenvolvidos na década de 1970, os aditivos plastificantes de 1ª geração são compostos por lignosulfonatos e são capazes de reduzir o fator água/cimento e melhorar a trabalhabilidade da matriz. Essa redução proporciona um aumento nas propriedades mecânicas da matriz (resistência à flexão e compressão) (METHA, 2014). Uma outra característica é a capacidade de incorporar ar ao concreto, que por sua vez pode resultar em uma redução indesejada na resistência mecânica da matriz (BAUER, 2019). Com o passar do tempo, novos aditivos foram sendo desenvolvidos, como os superplastificantes de 2ª geração, compostos por poli-melamina-sulfonato (PMS) e por poli-naftaleno-sulfonato (PNS) (METHA, 2014). Esses compostos promovem maior redução no consumo de água, além de não incorporarem ar e não afetarem significativamente o tempo de pega do concreto (TUTIKIAN e MOLIN, 2008).

Por fim, os aditivos de 3ª geração, mais conhecidos como superplastificantes, são compostos por poliacrilatos, policarboxilatos e copolímeros à base de polietileno. Estes proporcionam grande redução no consumo de água se comparados aos aditivos de 1ª e 2ª geração (METHA, 2014), além de aumento na durabilidade do concreto e alta resistência após o endurecimento (BAUER, 2019).

3.4 Aditivos à base de lignina

Os aditivos à base de lignosulfonatos são responsáveis por cerca de 85% da comercialização mundial de ligninas técnicas e estima-se que sua produção esteja em torno de 1 milhão de toneladas por ano (SIVAGURUNATHAN et al., 2021). Esses aditivos são classificados no mercado como plastificantes de 1ª geração e são constituídos a partir do licor residual do processo sulfito, empregado na produção de papel e celulose. Os lignosulfonatos são aditivos surfactantes que são adsorvidos nas partículas do cimento, promovendo a repulsão entre elas (MEHTA, 2014). A Figura 1 mostra o efeito dos lignosulfonatos quando adicionados em matrizes cimentícias.

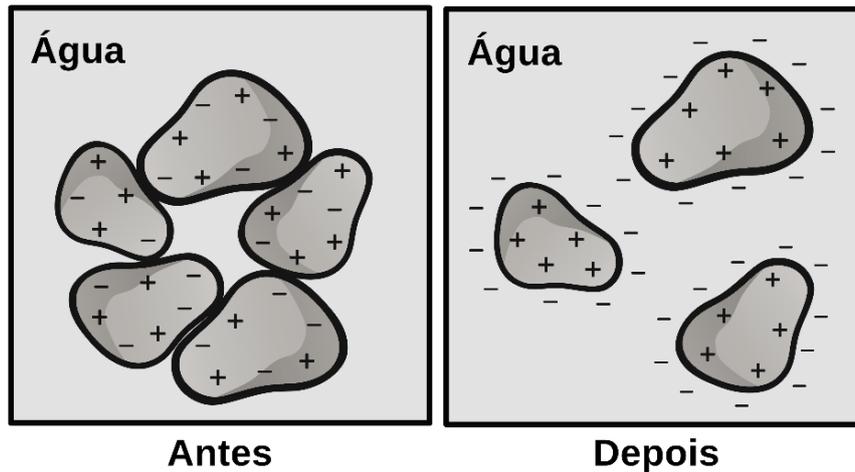


Figura 1 - Partículas de cimento aglomeradas antes da incorporação do aditivo e partículas dispersas após a incorporação do aditivo (adaptado de MEHTA, 2014).

Os aditivos à base de lignosulfonatos são compostos por uma complexa mistura de produtos e podem acabar influenciando em diferentes propriedades nas matrizes cimentícias, como retardo no tempo de pega e incorporação de ar (AÏTCIN, 1998; AREL, 2017; AREL; AYDIN, 2017). Essas características dos lignosulfonatos podem ser indesejadas, motivando o desenvolvimento de novos aditivos à base de lignina.

Os novos aditivos à base de lignina decorrem de modificações dos lignosulfonatos (PANG et al., 2008) ou podem ser elaborados a partir das demais ligninas técnicas (OUYANG et al., 2009). Trabalhos recentes revelaram que é possível utilizar os licores residuais e as ligninas técnicas, ambos não alterados, como aditivos em matrizes cimentícias. Tal aplicação pode diminuir os custos e viabilizar a produção do aditivo em maior escala (CARVALHO, 2022).

Com o intuito de valorizar a lignina residual oriunda das biorrefinarias, Akond e Lynan (2020) analisaram a lignina residual proveniente do bagaço de cana-de-açúcar usando solventes eutéticos profundos. A partir desses estudos, quando comparadas matrizes com e sem a adição da lignina, numa dosagem do aditivo de 0,3% em relação a massa de cimento, houve um aumento no espalhamento *mini-slump* em 50% e um aumento de 27% na resistência a compressão da pasta de cimento.

Além de auxiliar na redução do consumo de cimento, os aditivos à base de lignina em conjunto com adições minerais são capazes de aprimorar as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias (CARVALHO, 2022). Aditivos híbridos compostos de lignina Kraft e sílica/alumina foram confeccionados por pesquisadores. Ao

adicionar 1,0% do aditivo contendo uma parte de alumina para cinco partes de lignina Kraft, observou-se um aumento de 21% no espalhamento da pasta de cimento (KLAPISZEWSKA et al., 2019). Observou-se também um aumento de 7% no espalhamento da pasta de cimento ao adicionar o aditivo híbrido contendo lignina kraft e sílica nas mesmas dosagens (SLOSARCZYK et al., 2020). Os trabalhos mostraram que a lignina foi responsável pela melhoria da trabalhabilidade e as adições contribuíram para o aumento da resistência mecânica das matrizes cimentícias.

Carvalho (2022) utilizou uma lignina Organosolv e um *powder LD* para a produção de um aditivo dual. A partir dos ensaios realizados em argamassas nos estados fresco e endurecido, notou-se que o aditivo dual trouxe resultados benéficos para a matriz quando comparados a matrizes não aditivadas e matrizes contendo uma sílica ativa em suspensão comercial. Observou-se um aumento na trabalhabilidade e na resistência mecânica, além de uma diminuição da porosidade no estado endurecido.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho, o aditivo à base de lignina residual foi produzido no laboratório de química tecnológica e ambiental (LQTA) e as demais atividades foram desenvolvidas no laboratório de materiais de construção civil (LMC²), ambos situados no *campus* Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto. A figura 2 mostra o fluxograma das etapas do programa experimental realizado.

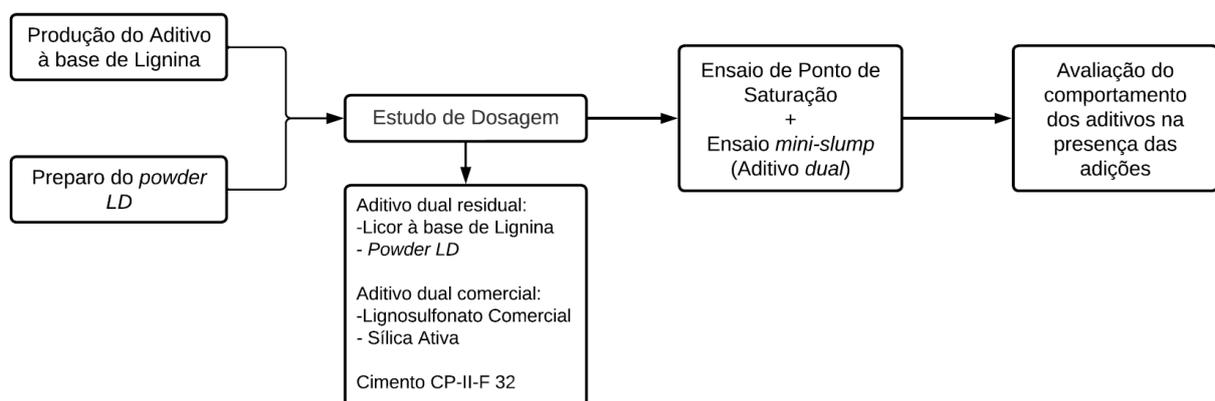


Figura 2: Fluxograma das etapas do programa experimental proposto.

4.1 Materiais

A escória utilizada foi obtida de uma usina siderúrgica integrada, com o processo Linz-Donawitz, localizada na cidade de João Monlevade (MG) (Figura 3). Esse resíduo precisou ser beneficiado para produzir a adição mineral a ser utilizada nos ensaios, o *powder* LD.



Figura 3: Escória LD utilizada no projeto.

O bagaço de cana-de-açúcar foi a biomassa lignocelulósica utilizada (Figura 4). O material foi seco naturalmente e armazenado em um recipiente fechado em um local seco. Também foram usados: água destilada, óxido de cálcio (95%) (Êxodo Científica) e glicerina (99,5%) (Synth) para o pré-tratamento do bagaço de cana e, posteriormente, na extração do licor Organosolv.



Figura 4: Bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.

O cimento utilizado nas pastas foi o CP-II-F 32, constituído por 75-89% de clínquer e sulfato de cálcio e 11-25% de material carbonático (ABNT, 2018). A opção por um cimento composto por fíler inerte garante uma melhor avaliação do desempenho dos aditivos nas matrizes de cimento.

Para analisar o desempenho plastificante do aditivo dual residual (ADr), composto pelo aditivo à base de lignina residual e pelo *powder* LD, foram utilizados uma sílica ativa (Tecnosil) e um aditivo comercial de 1ª geração à base de lignosulfonato (MC-Bauchemie Muraplast FK93) para produção de um aditivo dual comercial (ADc).

4.2 Produção do aditivo à base de lignina residual

Para o início do preparo do aditivo, o bagaço da cana-de-açúcar *in natura* foi moído em um moinho de facas (Marconi MA048), usando uma tela com abertura de 0,85 mm (Figura 5).



Figura 5: Moagem do bagaço de cana no moinho de facas.

Feita a moagem, iniciou-se o pré-tratamento Organosolv. Este processo foi realizado em um reator de inoxidável com capacidade de 195 ml e dimensões de 190 mm x 58 mm x 76 mm (altura x diâmetro interno x diâmetro externo) (Figura 6a). No primeiro momento, reator foi preenchido com o bagaço de cana moído, água destilada e glicerol. No segundo momento, o reator foi submetido a um banho termostático (Marconi Q214M) e aquecido por 40 minutos a uma temperatura de 210°C (Figura 6b). No final do tempo de reação, o reator foi resfriado rapidamente em um balde de gelo.



(a)

(b)

Figura 6: (a) Reator e (b) banho termostático utilizados no pré-tratamento Organosolv (adaptado de CARVALHO, 2022).

Já resfriado, a parte sólida parcialmente deslignificada foi processada em desfibrador (liquidificador industrial Cemaf com hélices adaptadas) acrescido de uma solução aquosa de óxido de cálcio ($\text{pH} = 12,8 \pm 0,2$) (Figura 7a). Este procedimento foi realizado em um período de 30 segundos a 2800rpm e repetido 3 vezes. Posteriormente, a fração sólida foi lavada com 100ml de água destilada em um funil de Büchner (Figura 7b). Nesse processo é possível retirar a lignina impregnada na superfície das fibras. No final, com uma prensa hidráulica (Solab SL-10) foi obtido todo o restante do licor Organosolv (Figura 7c).



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Etapas de (a) despolpação; (b) lavagem; e (c) prensagem do bagaço pré-tratado (adaptado de CARVALHO, 2022).

4.3 Preparo da Adição de Escória de Aciaria

Para a produção do *powder LD*, inicialmente a escória LD foi coletada no depósito de armazenamento e foi submetida a três moagens em um triturador de mandíbulas (Retsch BB 200) até que se tornasse passante na peneira de 2,38 mm. Posteriormente, a fração passante foi submetida a uma nova moagem, desta vez no moinho de bolas (Marconi MA500) por três períodos de 1 hora, com intervalos de 20 minutos a 200 RPM. Por fim, foi obtido o *powder LD* após uma nova moagem em um moinho planetário (Retsch PM100), com jarro e esferas de zircônio, por 15 minutos a 400 RPM.

A Figura 8 mostra a escória de aciaria após as moagens no triturador de mandíbulas. A Figura 9 exhibe as escórias resultantes do moinho de bolas e do moinho de alta eficiência. Por fim, a Figura 10 exhibe os equipamentos utilizados ao longo do beneficiamento realizado.

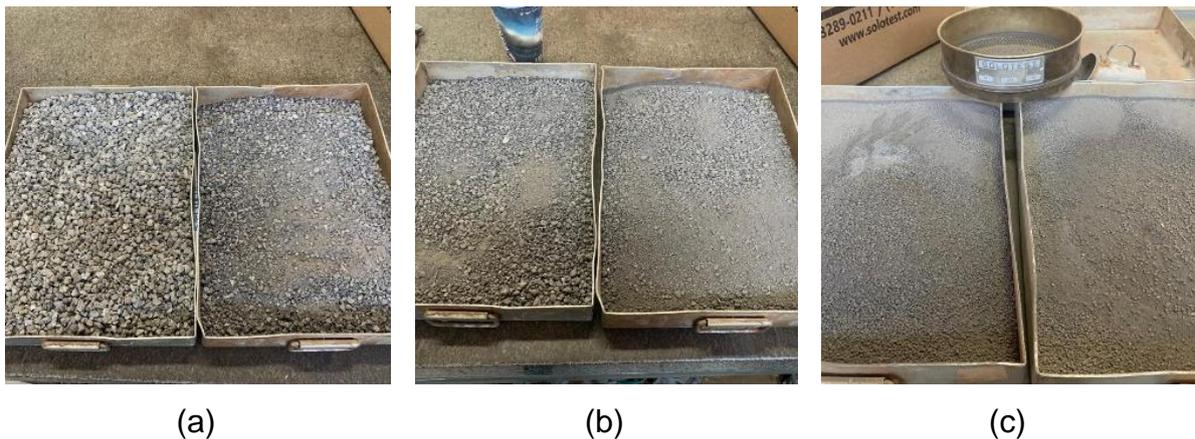


Figura 8: (a) 1ª moagem, (b) 2ª moagem e (c) 3ª moagem no triturador de mandíbulas.



Figura 9: Escória resultante do (a) moinho de bolas e (b) moinho de alta eficiência.

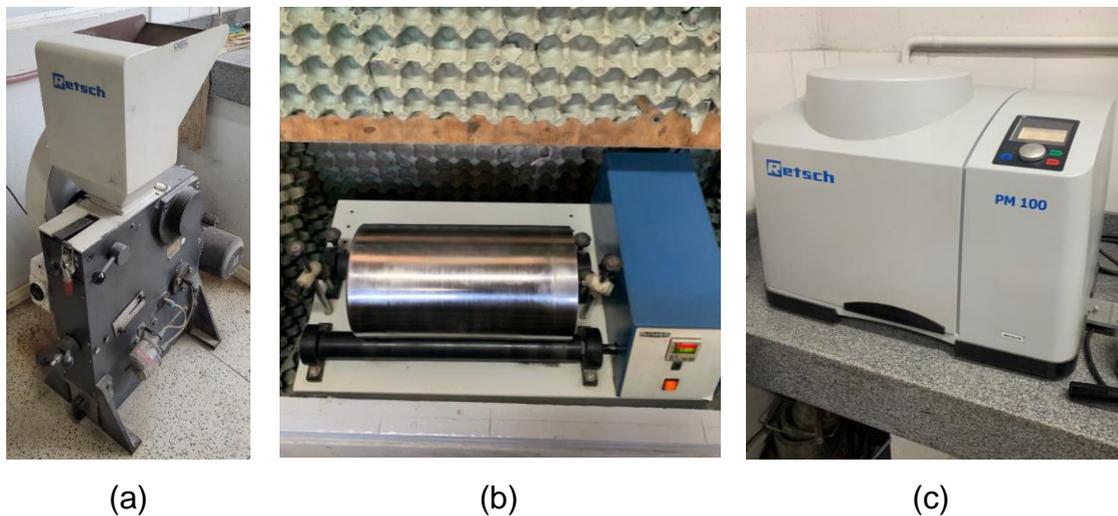


Figura 10: (a) triturador de mandíbulas; (b) moinho de bolas; e (c) moinho de alta eficiência.

4.4 Características dos sólidos

As adições minerais (sílica ativa e *powder* LD) e o cimento CP II-F foram caracterizados em trabalhos anteriores (COSTA, 2019; CARVALHO, 2022) e aproveitados neste trabalho. Os valores de massa específica e massa unitária estão apresentados na Tabela 2 e as distribuições granulométricas dos materiais estão apresentadas na figura 11.

Tabela 2: Caracterização física das adições minerais e do cimento (COSTA, 2019; CARVALHO, 2022).

Parâmetros	<i>Powder</i> LD	Sílica Ativa	CP II-F
Massa unitária (g/cm ³)	1,29	0,58	1,14
Massa específica (g/cm ³)	3,74	2,22	3,17

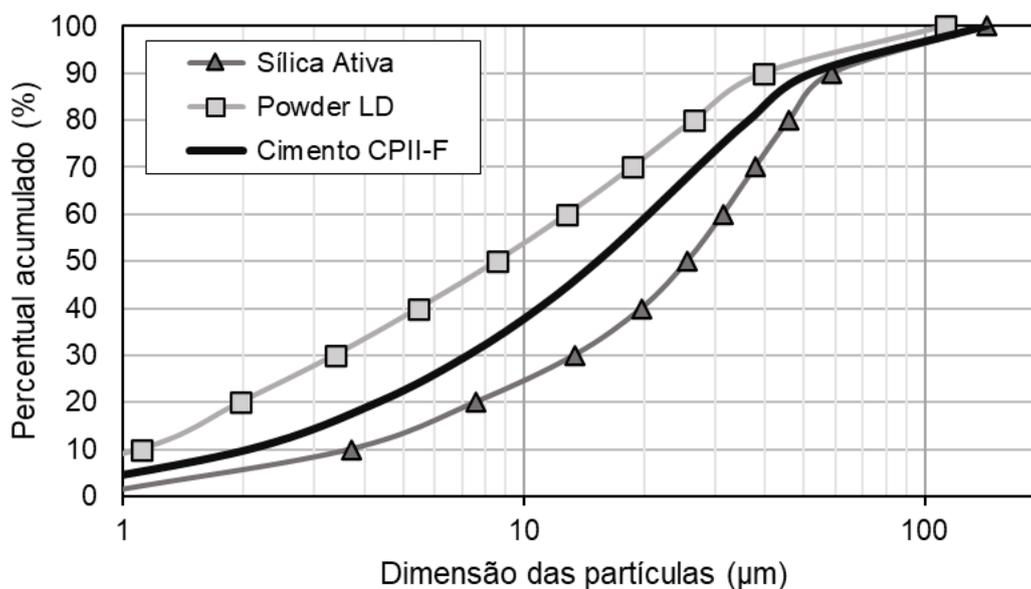


Figura 11: granulometria dos sólidos obtidas por difração à laser.

A partir das curvas granulométricas apresentadas, temos os seguintes valores para os diâmetros característicos (D90): sílica ativa (58,74µm), *powder* LD (39,59µm) e cimento CP II-F (52,44µm). Através destes dados é possível observar que o *powder* LD é o material mais fino, o cimento possui uma granulometria intermediária e a sílica ativa é o material com maior dimensão de partículas.

4.5 Dosagem e preparo dos aditivos

Na estratégia de dosagem foram adotados os pontos de saturação de 10% para o lignosulfonato comercial e de 12% para o aditivo à base de lignina, ambos foram encontrados por Carvalho (2022). Também foi considerado o teor de 8% de *powder* LD em relação ao volume de cimento, teor que indica o valor ótimo encontrado na literatura para o uso do material como adição mineral (COSTA, 2019). Para a sílica ativa foi considerada a mesma dosagem ótima.

Através da equação 1, a dosagem ótima de 8% de *powder* LD em relação ao volume de cimento foi convertida para uma dosagem ótima de finos em relação à massa do cimento (D_f). Nessa conversão foram consideradas as massas unitárias do cimento CP II-F ($m_{u\ cp}$) e das adições minerais (m_u).

$$\text{Equação 1: } D_f = 8\% \times \left(\frac{m_u}{m_{u\ cp}} \right)$$

Conhecendo o ponto de saturação dos aditivos (PS) e a dosagem ótima das adições em relação à massa de cimento (D_f), a relação entre os finos (F_{ad}) e os aditivos plastificantes (A_{ad}) no aditivo dual foi obtida através da equação 2.

$$\text{Equação 2: } \frac{F_{ad}}{A_{ad}} = \frac{D_f}{(PS + D_f)}$$

Para o aditivo dual comercial (ADc), na equação 1 foi utilizada a massa unitária (m_u) da sílica ativa. Já na segunda equação, foram adotados o ponto de saturação (PS) do lignosulfonato comercial e a dosagem ótima da sílica ativa em massa encontrada na primeira equação.

Com relação ao aditivo dual residual (ADr), foi utilizada a massa unitária (m_u) do *powder* LD na primeira equação. Na equação 2, foram adotados o ponto de saturação (PS) do aditivo à base de lignina juntamente com a dosagem ótima do *powder* LD encontrada na primeira equação.

4.6 Mistura e Homogeneização dos aditivos

Foram produzidos dois aditivos: o primeiro foi o aditivo dual residual (ADr), composto pelo aditivo à base de lignina residual e pelo *powder* LD; o segundo foi o aditivo dual comercial (ADc), composto pelo Lignosulfonato comercial e pela sílica ativa.

Apesar das diferentes composições e dosagens, ambos os aditivos duais foram preparados de forma semelhante. Inicialmente, os materiais foram pesados de acordo com as dosagens definidas no Item 4.5. Após a pesagem, a mistura foi

homogeneizada com o auxílio de um agitador mecânico (LGI Scientific LGI-OS-20) por cerca de 60 segundos, a uma velocidade de 285 ± 10 rpm (Figura 11).



Figura 12: Homogeneização dos aditivos duais no agitador mecânico.

4.7 Densidade dos aditivos

Devido a diferença entre as massas unitária e específica das adições minerais, fez-se necessária a determinação das densidades dos aditivos para fins de comparação dos resultados. As densidades foram determinadas com o auxílio de uma proveta de 10ml e uma balança.

4.8 Ensaio de ponto de saturação

A metodologia utilizada neste trabalho foi adaptada do procedimento de Aitcin (1998) por Carvalho et al. (2019). O ensaio de ponto de saturação é um ensaio que possui apenas uma taxa de cisalhamento, monoponto, e permite a análise qualitativa da viscosidade do material estudado. O intuito é definir um ponto de saturação para os aditivos duais através de curvas do teor de aditivo *versus* tempo de escoamento. O procedimento foi realizado em todas as pastas de cimento.

Com um béquer e um misturador elétrico (Philips Walita R17632), foram misturados 200g de cimento, 70g de água (fator água/cimento de 0,35) e diferentes teores de aditivos para a produção das pastas aditivadas. Os teores de aditivo foram considerados em relação à massa do cimento. O processo de mistura foi realizado em 3 ciclos de 20 segundos, com intervalo de 10 segundos entre cada ciclo.

Preparada a pasta, foi preenchido um viscosímetro tipo copo Ford (ϕ 4mm) (Figura 12) com a mistura até a superfície, que foi rasada com uma espátula para retirada do excesso e padronização da quantidade de pasta. Feito isso, a abertura inferior, inicialmente obstruída, foi liberada e o tempo de escoamento das pastas foi medido com o auxílio de um cronômetro. O processo foi repetido para várias dosagens dos aditivos até que fosse encontrado o ponto de saturação, que é aquele onde dosagens superiores do aditivo já não influenciam no tempo de escoamento das pastas.



Figura 13: Ensaio de ponto de saturação no viscosímetro tipo copo Ford.

4.9 Ensaio de *mini-slump*

A metodologia utilizada neste trabalho foi adaptada da metodologia de Kantro (1980). O ensaio de *mini-slump* é utilizado com o objetivo de conferir as variações de consistência, fluidez e plasticidade das pastas de cimento (SOARES, CALIXTO e LADEIRA, 2019). Neste ensaio, avaliou-se o espalhamento das pastas em função do teor de aditivo incorporado. O procedimento foi realizado em todas as pastas de cimento avaliadas no ensaio de ponto de saturação.

Sobre uma mesa de consistência, o minicone foi preenchido até a superfície com a pasta de cimento e rasado com uma espátula para retirada do excesso e padronização da quantidade de material. Em seguida, o minicone foi erguido, permitindo assim, o espalhamento da mistura. Os diâmetros do espalhamento foram então medidos em duas diferentes direções, e o espalhamento foi representado por uma média aritmética entre os mesmos. Os equipamentos utilizados no *mini-slump* estão apresentados na Figura 14.



Figura 14: Mesa de abatimento, minicone e paquímetro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características dos aditivos duais

Para a produção do aditivo dual residual (ADr), a dosagem ótima de substituição em volume de 8% do cimento pelo *powder LD* foi convertida para uma dosagem ótima de 9,05% em massa conforme equação 1. Sabendo o ponto de saturação do aditivo à base de lignina (12%), a relação entre o *powder LD* e o aditivo dual (F_{AD}/A_{AD}) obtida pela equação 2 foi de 0,43. O valor foi aproximado para 0,45 (45%) para facilitar a execução dos ensaios.

Para a produção do aditivo dual comercial (ADc), a dosagem ótima de substituição em volume de 8% do cimento pela sílica ativa foi convertida para uma dosagem ótima de 4,07% em massa conforme equação 1. Sabendo o ponto de saturação do aditivo à base de lignosulfonato (10%), a relação entre a sílica ativa e o aditivo dual (F_{AD}/A_{AD}) obtida pela equação 2 foi de 0,29. O valor foi aproximado para 0,30(30%) para facilitar a execução dos ensaios.

A densidade encontrada para o ADr foi 1,57 g/cm³ e para o ADc foi 1,23 g/cm³. A diferença nas densidades está relacionada principalmente com a diferença entre as massas específicas da sílica ativa e do *powder LD* (Tabela 2), visto que o lignosulfonato e o aditivo à base de lignina residual possuem densidades semelhantes (1,08 g/cm³) (CARVALHO, 2022).

5.2 Desempenho dos aditivos

O gráfico a seguir apresenta os resultados coletados para as diferentes dosagens do aditivo dual comercial (ADc) nos ensaios de ponto de saturação e *mini slump*.

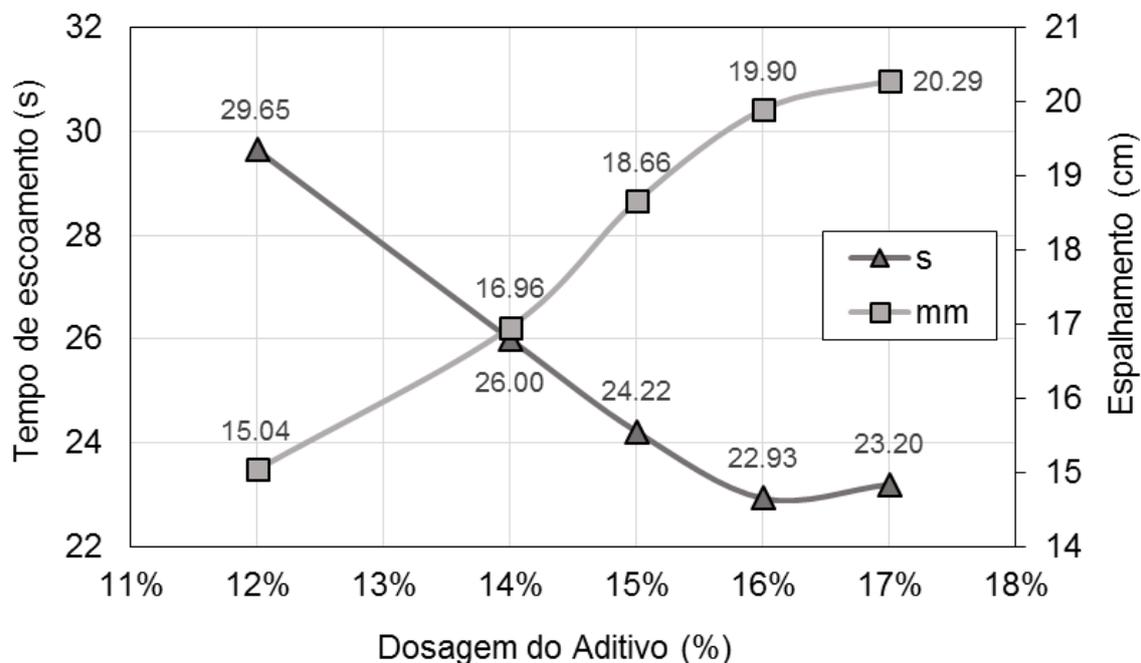


Figura 15: Desempenho do ADc nos ensaios de ponto de saturação e *mini-slump*.

A dosagem inicial do ADc utilizada foi de 10%, que é o ponto de saturação do lignosulfonato comercial encontrado por Carvalho (2022). O tempo de escoamento da pasta foi de 72,05 segundos, por isso não foi apresentado no gráfico. O ponto de saturação encontrado para o ADc foi de 16%, com um tempo de escoamento de 22,93 segundos. Através do ensaio *mini-slump* podemos notar que o espalhamento da pasta aumentou de acordo com o aumento da dosagem do ADc e, assim como no ensaio de ponto de saturação, estabilizou-se a partir da dosagem de 16%. O espalhamento na primeira dosagem (12%) foi de 15,04 cm, enquanto na dosagem do ponto de saturação (16%) foi de 19,90 cm. A Figura 16 ilustra a evolução do espalhamento da pasta contendo ADc no ensaio de *mini-slump*.



Figura 16: Evolução do espalhamento da pasta de cimento com ADc nas dosagens de 12%, 14%, 15% e 16%, respectivamente.

No ensaio de *mini-slump* com o ADc foi observado um princípio de exsudação a partir da dosagem do ponto de saturação. A exsudação se explica pela falta de coesão entre os elementos da matriz de cimento, que por sua vez pode ser ocasionada ao incorporar o ADc em dosagens superiores a 15% (Figura 17).



Figura 17: Princípio de exsudação na pasta aditivada com 16% de ADc.

A figura 18 exhibe os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com o aditivo dual residual (ADr).

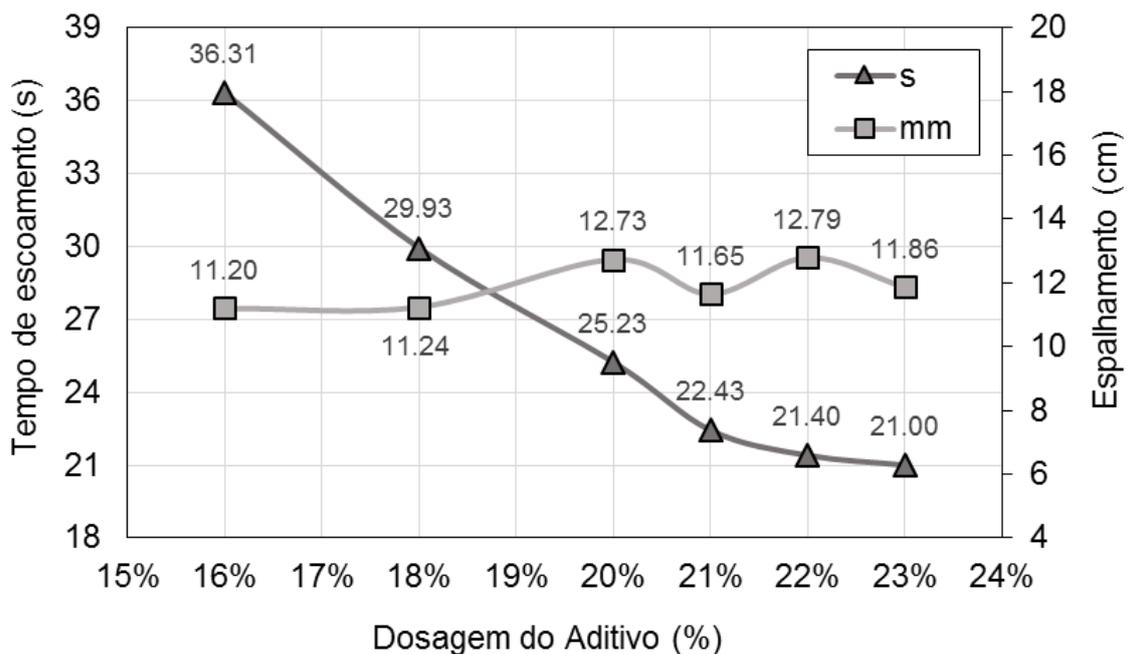


Figura 18: Desempenho do ADr nos ensaios de ponto de saturação e *mini-slump*.

A dosagem inicial utilizada para o ADr foi de 12%, dosagem do ponto de saturação do aditivo à base de lignina residual encontrada por Carvalho (2022). Para essa dosagem, no entanto, não houve escoamento da pasta. O ponto de saturação encontrado para o ADr foi de 22%, com tempo de escoamento de 21,40 segundos.

Com relação ao ensaio de *mini-slump*, foi constatado que o aditivo dual não interferiu de maneira significativa no espalhamento, visto que os resultados variaram de 11,20 a 12,79 cm. A Figura 19 exhibe a evolução do espalhamento das pastas contendo ADr no ensaio de *mini-slump*.



Figura 19: Evolução do espalhamento da pasta de cimento com ADr nas dosagens de 18%, 20%, 21% e 22%, respectivamente.

Observou-se que no ensaio de *mini-slump* com o ADr não houve princípio de exsudação em nenhuma dosagem avaliada (Figura 20). As pastas apresentaram boa

consistência até mesmo na dosagem superior ao ponto de saturação (23%), fato pode ser justificado pela maior densidade e menor granulometria do *powder LD*.



Figura 20: Consistência da pasta aditivada com 22% de ADr.

Comparando os aditivos duais produzidos, observou-se que o ADc atingiu um ponto de saturação (16%) inferior ao do ADr (22%). No entanto, o tempo de escoamento do ADc no ponto de saturação (22,93 s) foi superior ao do ADr (21,40 s). Se tratando de um ensaio onde a gravidade influencia diretamente nos resultados, a maior massa específica do *powder LD* pode ter contribuído para o menor tempo de escoamento do ADr em comparação ao ADc.

Quanto ao ensaio de *mini-slump*, o ADc proporcionou uma melhoria no espalhamento da pasta, enquanto o ADr não foi capaz de interferir nos resultados. Esses comportamentos distintos também podem ser consequência da diferença entre as densidades do *powder LD* e da sílica ativa, que afetam diretamente nas densidades dos aditivos duais. A maior densidade do *powder LD* possivelmente interferiu na mobilidade da pasta de cimento. Como a sílica é menos densa, suas partículas puderam ser transportadas com maior facilidade. Outra possibilidade é a influência da morfologia dos grãos das adições minerais avaliadas. A sílica ativa possui grãos mais arredondados, enquanto o *powder LD* possui grãos mais irregulares (COSTA, 2019). Esse fator também pode ter contribuído para a melhor mobilidade da sílica ativa no aditivo dual em comparação ao *powder LD*.

Por fim, observou-se que as pastas contendo ADc apresentaram princípios de exsudação em dosagens a partir do ponto de saturação, enquanto as pastas contendo ADr apresentaram boa consistência em todas as dosagens propostas. A diferença nos diâmetros característicos (D90) da sílica (58,74 μ m) e do *powder* LD (39,59 μ m) pode ter contribuído para esses resultados. A maior superfície específica do *powder* LD promove uma melhor interação das suas partículas com o aditivo plastificante, o que contribui positivamente na coesão da matriz de cimento.

A figura 21 mostra os desempenhos do Lignosulfonato comercial (LS) e do aditivo à base de lignina (LO) nos ensaios de ponto de saturação realizados por Carvalho (2022), além dos desempenhos do ADr e do ADc obtidos neste trabalho.

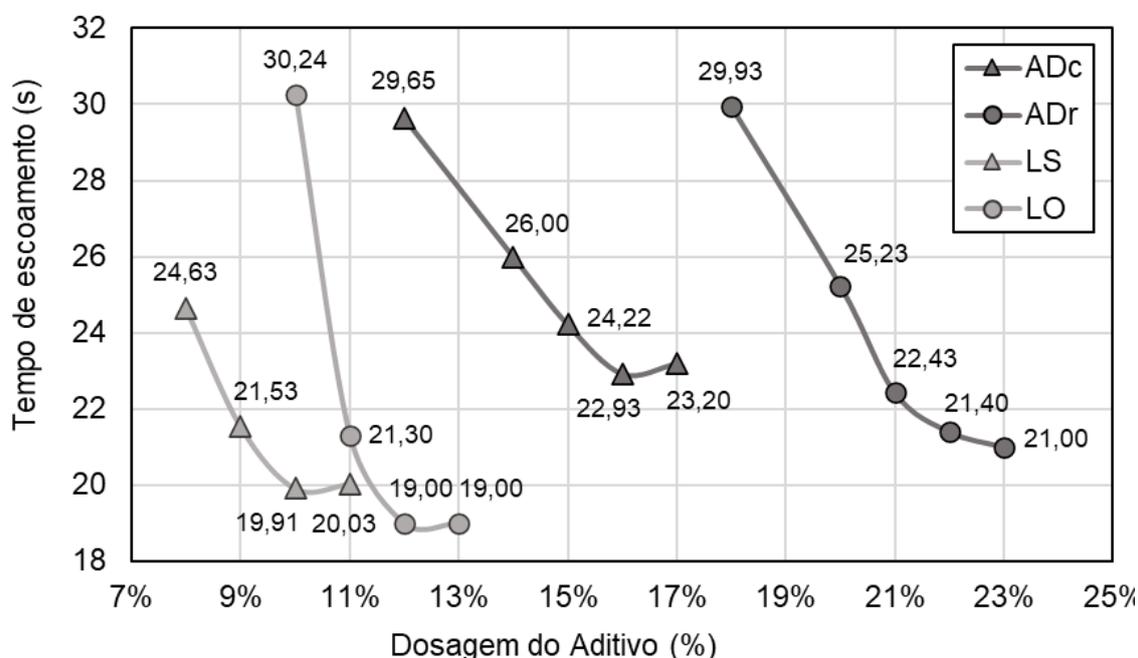


Figura 21: Desempenhos do ADc, do ADr, do lignosulfonato (LS) e do aditivo à base de lignina (LO) no ensaio de ponto de saturação.

O aditivo à base de lignina (LO) apresentou um ponto de saturação de 12% e um tempo de escoamento igual a 19,00 segundos. O ADr teve um maior ponto de saturação (22%), com um tempo de escoamento superior em 2 segundos. A discrepância entre os pontos de saturação e o tempo de escoamento do LO e do ADr pode ser explicada pela presença do *powder* LD, que faz com que o aditivo tenha que lubrificar mais partículas. Além disso, a adição mineral aumenta consideravelmente a densidade do aditivo dual. Carvalho (2022) calculou uma densidade de 1,09 g/cm³ para o LO, enquanto o ADr é 44% mais denso, com densidade de 1,57 g/cm³.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi produzido e avaliado um aditivo dual residual (ADr), composto por um aditivo à base de lignina e uma adição mineral de escória de aciaria LD. O estudo mostrou que:

- O aditivo dual residual (ADr) foi capaz de melhorar a plasticidade da pasta de cimento, atingindo um ponto de saturação igual a 22%. Destaca-se, no entanto, que esta não significa uma dosagem ideal para o uso, visto que as propriedades da matriz no estado endurecido devem ser consideradas;
- O *powder* LD contribuiu positivamente para que a pasta apresentasse uma boa consistência em todas as dosagens de ADr avaliadas;
- A aditivo dual comercial (ADc), composto por um aditivo à base de lignosulfonato e sílica ativa, apresentou um ponto de saturação de 16%. No entanto, o ADr apresentou melhor consistência que o ADc em todas as dosagens avaliadas.

Portanto, conclui-se que o aditivo dual residual promoveu melhoria na plasticidade e conservou a consistência das pastas de cimento Portland. Este trabalho colabora com o aproveitamento de resíduos na indústria, indicando novas estratégias para a produção de compósitos à base de cimento mais sustentáveis. Ainda, o trabalho contribuiu na formação científica dos membros envolvidos e na disseminação de novos conhecimentos para a comunidade acadêmica.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AITCIN, P., 1998. “High Performance Concrete”. E-book ed. Taylor & Francis, London.

AREL, H. Ş. The effect of lignosulfonates on concretes produced with cements of variable fineness and calcium aluminate content. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 347–360, 2017.

AREL, H. Ş.; AYDIN, E. Effects of Ca-, Mg-, K-, and Na-lignosulfonates on the behavior of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 1084–1091, 2017.

AKOND, A. U. R.; LYNAM, J. G. Deep eutectic solvent extracted lignin from waste biomass: effects as a plasticizer in cement paste. *Case Studies in Construction Materials*, v. 13, p. e00460, 2020.

BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2019.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, v. 206, p. 397–409, 2019a.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Low Environmental Impact Cement Produced Entirely from Industrial and Mining Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 2, p. 04018391, 2019b.

CARVALHO, J. M. F. *et al.* Influence of high-charge and low-charge PCE-based superplasticizers on Portland cement pastes containing particle-size designed recycled mineral admixtures. *Journal of Building Engineering*, v. 32, n. January, 2020a.

CARVALHO, V. R. *Aditivo Dual para matrizes de cimento Portland*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

CEMBUREAU - THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. Activity Report 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2022/23 - segundo levantamento, 2022.

COLLINS, M. N. *et al.* Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 131, p. 828–849, 2019.

COSTA, L. C. B. Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioenergy*, v. 46, p. 564–573, 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade, 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário estatístico, 2021.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 71–80, 2015.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4041–4052, 2016.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste—A miniature Slump Test. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95–108, 1980.

KLAPISZEWSKA, I. *et al.* Production of cement composites using alumina-lignin hybrid materials admixture. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 55, n. 6, p. 1401–1412, 2019.

KONDURI, M. K. R.; FATEHI, P. Production of water-soluble hardwood kraft lignin via sulfomethylation using formaldehyde and sodium sulfite. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 3, n. 6, p. 1172–1182, 2015.

LOHTIA, R. P.; JOSHI, R. C. Mineral Admixtures. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology. Concrete Admixtures Handbook: 2. ed. New Jersey: Notes Publications, 1996. p. 1184.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

MACHADO, A. P. Produção mundial de aço cresce 3,7% em 2021, para 1,95 bilhão de toneladas. Valor Econômico. São Paulo. 2022.

MARTINS, A. C. P. *et al.* Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. Construction and Building Materials, v. 291, p. 123265, 2021.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 2nd. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIGHAN, B. N. *et al.* Two-stage fractionation of sugarcane bagasse by autohydrolysis and glycerol organosolv delignification in a lignocellulosic biorefinery concept. Industrial Crops and Products, v. 108, n. July, p. 431–441, 2017.

MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler de calcário. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. Environmental Research Letters, v. 11, n. 7, 2016.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, F. U. Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escória de aciaria para uso em pavimentação. Vitória: Dissertação de Mestrado, 2006

OUYANG, X. *et al.* Sulfonation of Alkali Lignin and its potential use in dispersant for cement. Journal of Dispersion Science and Technology, v. 30, p. 1–6, 2009.

PANG, Y. *et al.* Influence of oxidation, hydroxymethylation and sulfomethylation on the physicochemical properties of calcium lignosulfonate. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 312, p. 154–159, 2008.

ROSLAN, N. H. *et al.* Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 16–24, 2016.

SIVAGURUNATHAN, P. *et al.* 2G waste lignin to fuel and high value-added chemicals: Approaches, challenges and future outlook for sustainable development. *Chemosphere*, v. 268, p. 129326, 2021.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual, 2020.

SOARES, D. A. P.; CALIXTO, J. M. F.; LADEIRA, L. O. Caracterização da reologia no estado fresco de pastas de cimento Portland fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer. UFMG. Belo Horizonte, p. 198. 2019.

SLOSARCZYK, A. *et al.* Biopolymer-Based Hybrids as Effective Admixtures for Cement Composites. *Polymers*, v. 12, p. 1180, 2020.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. Concreto Auto-adensável. 1ª. ed. São Paulo: PINI LTDA, 2008.

UPTON, B. M.; KASKO, A. M. Strategies for the conversion of lignin to high-value polymeric materials: Review and perspective. *Chemical Reviews*, v. 116, n. 4, p. 2275–2306, 2016.

VISHTAL, A.; KRASLAWSKI, A. Challenges in industrial applications of technical lignins. *BioResources*, v. 6, n. 3, p. 3547–3568, 2011.

WANG, Q. *et al.* Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1414–1420, 2013.

YU, G. *et al.* Preparation of concrete superplasticizer by oxidation- sulfomethylation of sodium lignosulfonate. *BioResources*, v. 8, n. 1, p. 1055–1063, 2013.