



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO Em
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS
MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ÁGUA SUBMETIDA A CAMPO MAGNÉTICO**

**CRISTIANO CAVALCANTI BARROS
RIBEIRO**

Foz do Iguaçu
2023



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO Em
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS MATERIAIS
CIMENTÍCIOS COM ÁGUA SUBMETIDA A CAMPO MAGNÉTICO**

CRISTIANO CAVALCANTI BARROS RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos

Coorientadora: Prof^a. Dra. Kelly Daiane Sossmeier

Foz do Iguaçu
2023

CRISTIANO CAVALCANTI BARROS RIBEIRO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS MATERIAIS
CIMENTÍCIOS COM ÁGUA SUBMETIDA A CAMPO MAGNÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Coorientadora Prof^a. Dra. Kelly Daiane Sossmeier
UNILA

Prof^a. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari
UEL

Prof. Dr. Cesar Winter de Mello
UNILA

Foz do Iguaçu, 31 de agosto de 2023.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

R484c

Ribeiro, Cristiano Cavalcanti Barros.

Contribuição ao estudo das propriedades reológicas dos materiais cimentícios com água submetida a campo magnético / Cristiano Cavalcanti Barros Ribeiro. - Foz do Iguaçu, 2023.

99 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPG ECI).

Orientador: Ana Carolina Parapinski dos Santos.

Coorientador: Kelly Daiane Sossmeier.

1. Cimento. 2. Água - Purificação. 3. Campos magnéticos. 4. Reologia. I. Santos, Ana Carolina Parapinski dos. II. Sossmeier, Kelly Daiane. III. Título.

À minha Tia-avó Auxiliadora Cavalcanti (in memoriam), pela coragem e simplicidade que contribuíram para a minha formação, crescimento e aprendizagem.

AGRADECIMENTOS

Peço a todos que permitam, antes de agradecer, recordar brevemente a caminhada até aqui. Em um local distante, de outra realidade, graduei-me em engenharia civil na Universidade Federal do Vale do São Francisco e, para chegar ao fim do mestrado em engenharia civil na Universidade Federal da Integração Latino Americana uma longa e intensa preparação foi empreendida, milhares de páginas foram lidas, várias horas de aulas foram assistidas, muitos ensaios executados e noites de sono foram perdidas.

Relembrando todo o caminho que trilhei, é verdade que sem muita dificuldade poderia aqui me perder, ao tentar relatar o que foi a vida de candidato ao título de mestre, mas a longa descrição seria por demais cansativa e já não encontra propósito.

Tendemos a achar que chegamos aqui pelos méritos, não. Chegamos aqui pelas oportunidades. O sistema de mérito, defendido por Max Weber e tantos outros, realmente é válido, mas, talvez possamos repensá-lo, porque ao lado do sistema de mérito nós temos que criar um sistema de oportunidades. Estou aqui hoje porque ao longo do tempo tive oportunidades, não apenas a oportunidade de ser monitor do prof. Dr. Severino Cirino (in memoriam) ou do Prof. (Titular) Dr. Getúlio que me honrou a confiança de ser orientado na graduação ou prof. Dra. Ana na pós-graduação, mas, a oportunidade de um ensino de qualidade, de um apoio dos meus familiares, amigos e colegas.

Ser competente não basta, ser técnico não basta, ser preciso não basta, estou aqui pra relatar que é necessário muita dedicação e um sonho. Em momentos como este, onde o escritor tem diante de si, um espectador atento, uma página e algum tempo. É tentador falar muito de si mesmo, falar de nossas histórias, mas há coisas melhores a serem escritas e outras que devem ser sentidas.

Agradeço ao Pai, em primeiro lugar, porque ele sempre me ouve e responde. Agradeço à São Jorge, meu santo protetor, que nunca dormiu e jamais deixou nem mesmo em pensamento mal algum me atingir.

Agradeço a prof. Dra. Ana Carolina, que orientou especificamente esse trabalho, ela nos precede na universidade e nos inspira a fazer o nosso trabalho com excelência e, mostrou-me que, a responsabilidade da condução da pesquisa vai além de atender expectativas, metas, realizar ensaios e da impessoalidade dos artigos.

Agradeço à minha coorientadora, prof. Dra. Kelly Daiane Sossmeier pelos conselhos, críticas, sugestões racionais e objetivas, indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, a prof^a. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari e o prof. Dr. Cesar Winter de Mello pelo interesse e disponibilidade.

Mantenho a tradição, assim como nos agradecimentos do TCC, não deixar aqui registrado, os nomes dos colegas que compartilharam, participaram ou cooperaram conosco a jornada. Não seria possível escrever palavras para expressar o que sinto por vocês, mas, a convivência no laboratório mostrou que todos são diferentes tanto quanto eu.

Também não incluo os poucos amigos que fiz, durante esses anos. Seria possível relatar, em palavras, que sejam capazes de levar o que há no meu coração para o de vocês? Creio que não, mas, mesmo assim, não deixarei de tentar. Muito obrigado, eu amo todos vocês, vocês que continuaram e também aqueles que já partiram, mas, que agora vivem em nossas memórias e corações, tenho certeza que permanecerão amigos para o resto de minha vida.

Aos demais integrantes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNILA (PPG-ECI), sejam eles docentes, técnicos, servidores da biblioteca, discentes ou pessoal de apoio e limpeza, agradeço pelo fato de ter sido muito bem recebido e já sinto a saudade da partida.

A execução deste trabalho foi financiada pelo Programa de Bolsa Institucional (PROBIU) da UNILA - Universidade Federal da Integração Latino Americana, durante os vinte e quatro meses. Agradeço pelo apoio financeiro, imprescindível para auxiliar na formação de recursos humanos para a pesquisa no Brasil.

“Deus é o nosso refúgio e fortaleza, socorro bem presente na angústia.
Por isso não temeremos, embora a terra trema e os montes afundem no coração do mar,
Ainda que as águas rujam e se perturbem, ainda que os montes se abalem pela sua braveza
Há um rio cujos canais alegam a cidade de Deus, o Santo Lugar onde habita o Altíssimo.
Deus está no meio dela; não se abalará. Deus a ajudará, já ao romper da manhã.
Nações se agitam, reinos se abalam; ele ergue a voz, e a terra se derrete.
O Senhor dos Exércitos está conosco; o Deus de Jacó é o nosso refúgio
Venham! Vejam as obras do Senhor, seus feitos estarrecedores na terra.
Ele faz cessar as guerras até ao fim da terra; quebra o arco e corta a lança; destrói os escudos com fogo.
Aquietai-vos, e sabeí que eu sou Deus.
Serei exaltado entre as nações, serei exaltado na terra.
O Senhor dos Exércitos está conosco; o Deus de Jacó é o nosso refúgio.”

Salmos 46:1-11 (Tradução adaptada: O Cântico de Santa Confiança)

“Não ameis o mundo, nem o que no mundo há. Se alguém ama o mundo, o amor do Pai não está nele.
Porque tudo o que há no mundo, a cobiça da carne, a cobiça dos olhos e a ostentação dos bens,
não provém do Pai, mas do mundo.
O mundo e a sua cobiça passam, mas aquele que faz a vontade de Deus permanece para sempre.”

1 João 2:15-17 (Tradução adaptada: Advogado junto ao Pai, Jesus Cristo, o Justo)

RESUMO

Nos últimos anos, diversos estudos têm indicado a influência do tratamento magnético da água de amassamento nas propriedades dos materiais à base de cimento Portland. Alguns estudos sugerem que a submissão da água de amassamento a um campo magnético pode melhorar as propriedades do concreto, como propriedades reológicas e resistência à compressão, além de acelerar a reação de hidratação. No entanto, alguns resultados são contraditórios na literatura. Neste trabalho, investiga-se a influência da aplicação de um campo magnético na água de amassamento sobre as propriedades reológicas das pastas de cimento Portland. Para a realização do estudo, um campo magnético de 1,25 T foi aplicado na água de mistura durante 4 horas, utilizando água deionizada, destilada e de abastecimento. O efeito físico-químico na água foi avaliado por medição de pH e condutividade antes e após o tratamento magnético. Três diferentes relações água/cimento (0,4; 0,5 e 0,6) foram analisadas para as pastas de cimento Portland. Os parâmetros reológicos foram avaliados por meio de reometria rotacional com modelagem matemática pelos modelos de Bingham e Herschel–Bulkley. O resultado do tratamento magnético da água foi um ligeiro aumento no pH e na condutividade. Como principal resultado, a tensão de cisalhamento das pastas de cimento foi aumentada pelo tratamento magnético da água. Como resultado do tratamento magnético, um aumento na área tixotrópica e na viscosidade foi observado, independentemente do tipo de água e da relação água/cimento. Os aumentos na tensão de cisalhamento, na viscosidade e na área tixotrópica em pastas de cimento Portland contrastam com os atuais resultados disponíveis na literatura para argamassas e concretos.

Palavras-chave: Materiais cimentícios; água tratada com campo magnético; campo magnético; reologia.

ABSTRACT

In recent years, several studies have indicated the influence of magnetic treatment of mixing water on the properties of Portland cement-based materials. Some studies suggest that subjecting mixing water to a magnetic field can improve concrete properties, such as rheological properties and compressive strength, and may accelerate the hydration reaction. However, some results in the literature are contradictory. In this study, we investigate the influence of applying a magnetic field to mixing water on the rheological properties of Portland cement paste. To conduct the study, a magnetic field of 1.25 T was applied to the mixing water for 4 hours using deionized, distilled, and tap water. The physicochemical effect on the water was evaluated by measuring pH and conductivity before and after magnetic treatment. Three different water-to-cement ratios (0.4, 0.5, and 0.6) were analyzed for Portland cement pastes. Rheological parameters were assessed using rotational rheometry with mathematical modeling based on the Bingham and Herschel–Bulkley models. The result of magnetic treatment of water was a slight increase in pH and conductivity. The main result was an increase in the shear stress of the cement pastes due to magnetic treatment of the water. As a result of magnetic treatment, an increase in thixotropic area and viscosity was observed, regardless of the type of water and the water-to-cement ratio. These increases in shear stress, viscosity, and thixotropic area in Portland cement pastes contradict the current results available in the literature for mortars and concretes.

Keywords: Cement paste; magnetized water; magnetic field; rheological.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	A: Tratamento “in loco” do concreto; B: Eletroímã utilizado para tratamento da água C: Dispositivo de tratamento desenvolvido por Ahmed e Manar (2021) para tratamento da mistura com campo eletromagnético	15
Figura 2.1	Esquema de tratamento com campo magnético da água	19
Figura 2.2	Perspectiva história do desenvolvimento tecnológico e científico do tratamento magnético da água para materiais a base de cimento Portland	20
Figura 2.3	Modificação do número de ligações de hidrogênio na água (preto), coeficiente de auto-difusão (azul) em função da intensidade do campo magnético aplicado.	24
Figura 2.4	Modalidades de dispositivos para tratamento magnético da água: A: tratamento com ímãs permanentes, B: tratamento eletromagnético por corrente contínua ou alternada	27
Figura 2.5	Força de Lorentz em um íon carregado em movimento na direção de um campo magnético	29
Figura 2.6	Aplicações em diversas áreas do conhecimento. A e B: Tratamento de água, C, F, G e H: Crescimento de plantas D e E: Mudança no estado fresco do concreto	31
Figura 2.7	Efeito esquematizado do tratamento magnético nas moléculas da água	33
Figura 2.8	Modalidades da exposição ao campo magnético aplicado aos materiais cimentícios. A: exposição apenas da água de amassamento, B: exposição apenas da mistura e C: exposição da água de amassamento e da mistura	34
Figura 2.9	Acessibilidade dos grãos de cimento com água não tratada (esquerda) e tratada com campo magnético (direita)	36
Figura 2.10	Modelos pré-determinados de curvas de fluxo baseados Herschel-Bulkley, Bingham, Pseudoplástico, Newtoniano e Dilatante	39
Figura 2.11	Curva de histerese para fluidos tixotrópicos	42
Figura 3.1	Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa	46
Figura 3.2	Etapas de desenvolvimento do projeto piloto	47
Figura 3.3	Tratamento magnético sobre a mistura de concreto de cimento Portland	48
Figura 3.4	Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com e sem tratamento magnético na betoneira	49
Figura 3.5	Tratamento magnético sobre a mistura de argamassa de cimento Portland	50
Figura 3.6	Índice de consistência das argamassas produzidas com e sem campo magnético	51
Figura 3.7	Espalhamento das pastas de cimento Portland produzidas com e sem campo magnético	52
Figura 3.8	Suscetibilidade magnética dos agregados e do cimento Portland	53

Figura 3.9	Diagrama esquemático e aparato experimental do processo de tratamento magnético da água	54
Figura 3.10	A: Eletroímã; B: Fonte de alimentação (DC); C: Multímetro e D: Gausímetro (com sensor Hall)	55
Figura 3.11	A: Montagem experimental e calibração do eletroímã e B: Medição do campo magnético com sensor Hall tangencial	55
Figura 3.12	Tempo ótimo para o tratamento com campo eletromagnético fixo em 1,25T	56
Figura 3.13	Efeitos no mini-abatimento de vários campos magnéticos aplicado para o tratamento da água	57
Figura 3.14	A: Granulômetro à laser CILAS® 1190; B: Analisador de área superficial e poros QUANTACROMER® NOVA 3200e; C: Analisador térmico simultâneo PERKINELMER® STA 8000 e D: Difrátômetro multipropósito EMPYREAN da PANalytical	60
Figura 3.15	A: Diagrama esquemático da reometria rotacional B: Célula de materiais de construção (BMC 90) – Agitador (ST59-2V), copo (BMC90) e placa de revestimento (P-PTD200/80/l) C: Reômetro MCR 102 Anton Paar®	61
Figura 3.16	Protocolo para medição de reometria de fluxo em três passos	61
Figura A.1	Levantamento bibliográfico do tratamento magnético da água	85
Figura A.2	Levantamento bibliográfico do tratamento magnético da água aplicado aos materiais cimentícios	86
Figura A.3	Lista dos principais trabalhos do tratamento magnético da água aplicado aos materiais cimentícios	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Síntese das teorias sobre o mecanismo de ação da água tratada com campo magnético	23
Tabela 2.2	Síntese das mudanças nas propriedades físico-químico da água tratada com campo magnético	26
Tabela 2.3	Principais variáveis estudadas para o desenvolvimento de dispositivos magnéticos	29
Tabela 2.4	Efeito do tratamento magnético da água nos materiais cimentícios no estado fresco	36
Tabela 2.5	Principais parâmetros e conceitos reológicos dos fluidos	38
Tabela 2.6	Efeito do tratamento magnético da água nos materiais cimentícios no estado endurecido	44
Tabela 3.1	Traços de concreto de cimento Portland utilizados no piloto experimental	39
Tabela 3.2	Traço em massa da Argamassa de cimento Portland utilizados no piloto experimental	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ILAACH	Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História
ILACVN	Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza
ILAESP	Instituto Latino-Americano de Economia, Sociedade e Política
ILATT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
TCN	Teoria clássica da nucleação
pH	Potencial hidrogeniônico
B	Densidade de fluxo magnético
H	Intensidade de campo
T	Tesla
M	Permeabilidade magnética do meio
FE	Força elétrica
FB	Força magnética
XRD	Difratometria de raios-X
SEM	Microscopia eletrônica de varredura
TEM	Microscopia eletrônica de transmissão
EDS	Espectroscopia de raios-X por energia dispersiva
SM	Susceptibilidade magnética
C4AF	Aluminoferrite tetracálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CH	Portlandita
τ	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	16
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2 TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA APLICADO AOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	18
2.1 FUNDAMENTOS DO TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA	18
2.1.1 Perspectivas históricas	18
2.2 MECANISMOS DE AÇÃO DO TRATAMENTO	20
2.3 DISPOSITIVOS DE TRATAMENTO MAGNÉTICO	27
2.3.1 Grandezas físicas	28
2.3.2 Caracterização dos efeitos do tratamento da água por campos eletromagnéticos	30
2.3.3 Aplicações	31
2.4 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MAGNÉTICO NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	32
2.4.1 Suscetibilidade magnética dos materiais cimentícios	34
2.4.2 Efeitos nas idades iniciais dos materiais cimentícios	35
2.4.4 Efeitos nas idades avançadas dos materiais cimentícios	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 PILOTO EXPERIMENTAL – definição dos parâmetros do campo magnético	46
3.2 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL	57
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	58
3.4 PASTAS DE CIMENTO PORTLAND – Estado fresco	60
3.5 ARTIGO	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5 CONCLUSÕES	64
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS	66
Apêndice I	88

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem avançado em técnicas para aprimorar os materiais à base de cimento Portland (JIAO *et al.*, 2021b, 2021a). Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas explorando o efeito da aplicação de campos magnéticos nas propriedades das pastas, argamassas e concretos, observando mudanças na trabalhabilidade, na estabilidade e até na bombeabilidade (NAIR; FERRON, 2014; AHMED, H. I., 2017; JIAO *et al.*, 2020, 2021b, 2021a, 2021c; KHREEF; ABBAS, 2021; MALATHY; NARAYANAN; MAYAKRISHNAN, 2022).

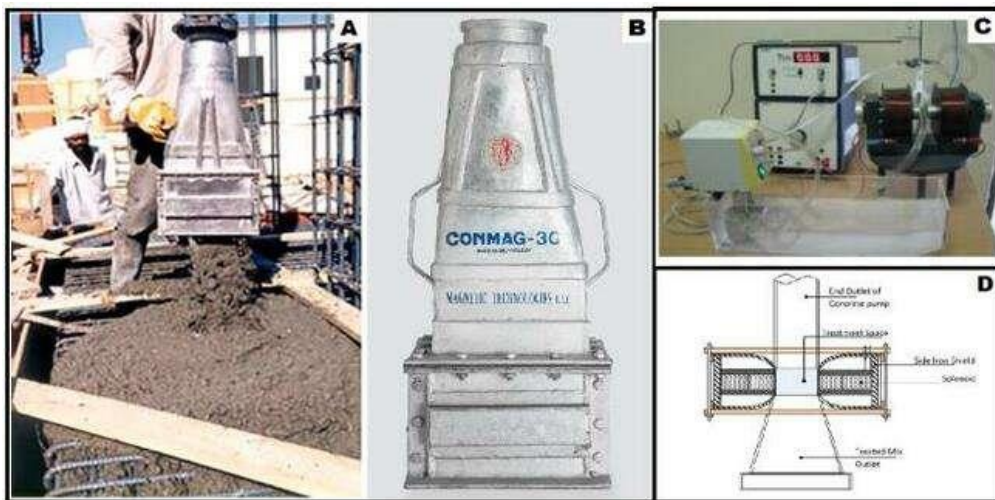
Um dos métodos usados para análise de efeitos magnéticos em materiais cimentícios é a submissão da água de amassamento a um campo magnético externo, cujo efeito observado é a obtenção de maior fluidez nas medidas de trabalhabilidade das misturas. O assunto gera algumas controvérsias, uma vez que a água não é considerada um material ferromagnético. No entanto, a explicação que tem sido aceita para este efeito é que ele ocorre devido ao enfraquecimento das ligações de hidrogênio entre grupos de moléculas. O campo magnético aplicado provoca uma ruptura dos grandes aglomerados e forma grupos menores com ligações de hidrogênio intra-cluster mais fortes. Como resultado obtém-se a maior fluidez no estado fresco e a formação de compostos com maior grau de hidratação (AHMED, S. M.; MANAR, 2021; CHIBULU *et al.*, 2021; HU; DENG, 2021; KHREEF; ABBAS, 2021; TARBOZAGH; REZAIFAR; GHOLHAKI, 2021; ZHANG *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021; MALATHY; NARAYANAN; MAYAKRISHNAN, 2022;.

Outros trabalhos já demonstraram que o tratamento magnético da água melhora a fluidez (AHMED, H. I., 2017), reduz a fissuração por retração (WEI; WANG; LUO, 2017), acelera a reação de hidratação do cimento (SU; WU, 2003), melhora a bombeabilidade (CHOI *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2021), aumenta a resistência à compressão (SU; WU; MAR, 2000; EBRAHIMI JOUZDANI; REISI, 2020; HU; VENKATESH; JAGANNATHAN; PRASATH KUMAR, 2020; YOUSRY *et al.*, 2020; DENG, 2021), aumenta a estabilidade (HU; DENG, 2021; HU; DENG; CHEN, 2022), reduz a taxa de corrosão das armaduras em concretos armados (BIKUL; RUCHINSKENE; DENINIS, 2003), reduz porosidade (AHMED, H. I., 2017) e pode reduzir a necessidade de uso de aditivos químicos (ESMAEILNEZHAD *et al.*, 2017; EBRAHIMI JOUZDANI; REISI, 2020). Também há estudos que relatam a possibilidade de produzir misturas de concreto com redução de 5% da quantidade de cimento, mantendo-se as propriedades dos materiais em função dos efeitos

do tratamento da água (SU; WU, 2003; AFSHIN; GHOLIZADEH; KHORSHIDI, 2010).

O principal desafio do tratamento e processamento dos materiais de construção sob ação de campos magnéticos é a escala de aplicabilidade. É preciso que os sistemas de tratamento magnético sejam compatíveis com as técnicas de mistura e transporte dos materiais a base de cimento Portland para construção civil. A título de exemplo desta dificuldade, na Figura 1.1 (A) apresenta-se um dispositivo para tratamento magnético “in loco”, constituído de ímãs permanentes e na Figura 1.1 (B) apresenta-se o dispositivo para uso na construção civil CONMAG-30. Nas Figuras 1.1 (C) e (D) apresenta-se o tratamento eletromagnético da água em escala laboratorial e um protótipo que adequa o tratamento eletromagnético para escala comercial, respectivamente.

Figura 1.1 – A e B: Tratamento “in loco” do concreto; C: Eletroímã utilizado para tratamento da água; D: Projeto de dispositivo desenvolvido por Ahmed e Manar (2021) para tratamento da mistura com campo eletromagnético



Fontes: A e B: Concretagem “in loco” com dispositivo da Magnetic Technologies L.L.C. C: Karimipour; Edalati; De Brito, (2021) D: Ahmed e Manar (2021)

O desenvolvimento de soluções tecnológicas, conforme na Figura 1.1 (B), para aplicação de campos magnéticos na construção civil com o propósito de aumentar a resistência do concreto, aumentar a vida útil das construções e economizar cimento impulsionou o processo e avanço da tecnologia.

Dessa maneira, considerando os benefícios nas propriedades dos materiais cimentícios que podem impactar em menor custo e também resultar em benefícios no contexto de prevenção ambiental, justifica-se a investigação da influência da

submissão da água de amassamento a diferentes campos magnéticos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho integra a linha 1 de pesquisa desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unila – Materiais e ecoeficiência. O objetivo principal é avaliar as alterações nas propriedades reológicas dos materiais a base de cimento Portland promovidas pela submissão da água de amassamento a ação de campos magnéticos.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

A definição do escopo do trabalho foi realizada após projeto piloto inicial, de acordo com as matérias-primas e o tempo disponíveis. O estudo foi efetuado utilizando água deionizada, destilada e água de torneira como água de amassamento. A água tratada com campo magnético foi preparada fluindo a uma velocidade de 180L/h através de um campo eletromagnético de 1,25 T de intensidade, durante 4 horas. Foram analisadas uma pasta de referência e pastas de cimento com água tratada com campo magnético, com diferentes relações água/cimento (0,4, 0,5 e 0,6).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em quatro capítulos, sendo o primeiro capítulo introdutório, abordando as características gerais do efeito da ação de campos magnéticos aplicados à água de amassamento nos materiais de base cimentícia.

O capítulo 2 apresenta a revisão das técnicas relativas à aplicação de campos magnéticos externos, bem como dos estudos já realizados, os últimos avanços para entender a melhor forma de aplicação do campo magnético externo, e os efeitos nas propriedades dos materiais de base cimentícia.

O capítulo 3 descreve o projeto experimental, os materiais e métodos adotados, os ensaios realizados, os equipamentos utilizados, os resultados obtidos e suas devidas discussões. Este capítulo é apresentado em forma de artigo.

No capítulo 4 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para futuras pesquisas. No apêndice é apresentado o roteiro do levantamento bibliográfica e em seguida são apresentados o anexo e as referências consultadas e citadas na dissertação.

2 TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA APLICADO AOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A revisão bibliográfica é apresentada neste capítulo, estruturado nas seguintes seções: fundamentos do tratamento magnético da água; mecanismos físico-químicos da ação do tratamento; dispositivos de tratamento magnético e por último, efeitos nas propriedades dos materiais cimentícios. Cientes da controvérsia a respeito dos termos “tratamento magnético da água” e “água magnetizada”, neste trabalho eles serão utilizados, respectivamente, para designar o processo no qual submete-se a água a presença de um campo magnético e à água submetida a um campo magnético.

2.1 FUNDAMENTOS DO TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA

Uma alternativa para obter modificações nas propriedades dos materiais cimentícios é o tratamento químico da água. No entanto, em grande escala, este tipo de tratamento é caro e pode causar danos à saúde e implicações ecológicas não desejáveis. Por isso, numerosos sistemas que utilizam combinações de meios elétricos, magnéticos e físicos foram desenvolvidos para evitar, substituir ou minimizar os aditivos químicos do tratamento da água.

Os termos “sistema de tratamento não químico da água”, “tratamento físico da água”, “tratamento eletrônico da água” ou “dispositivo de condicionamento da água” são gerais e englobam diferentes tecnologias para tratamento, incluindo o tratamento magnético e eletromagnético. Este capítulo revisa apenas os dispositivos que são compostos por ímãs permanentes ou eletroímãs, não estando incluídos os dispositivos que envolvem produtos químicos no próprio local tratado ou que possuem mecanismo de ação já conhecido, tal qual, separadores magnéticos¹.

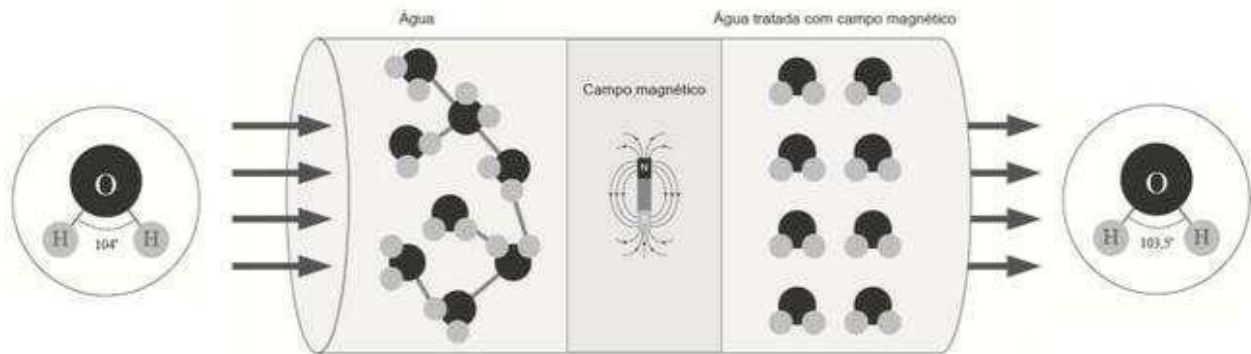
2.1.1 Perspectivas históricas

Para a aplicação de campos magnéticos no tratamento da água de amassamento, basta a utilização de um ímã (permanente ou induzido por corrente elétrica) colocado dentro ou ao redor de um tubo não magnetizável (Figura 2.1). A água, ao adentrar e percorrer a tubulação, é submetida ao campo magnético e flui através da canalização,

¹ Processo de separação ou descontaminação de partículas ferrosas através de campo magnético.

podendo apresentar então novas propriedades físico-químicas.

Figura 2.1 – Esquema de tratamento com campo magnético da água.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

Na figura 2.1 pode-se observar o fluxo de água atravessando o tubo simultaneamente à aplicação de um campo magnético. O detalhe no centro da figura mostra a orientação do campo magnético aplicado. A primeira patente² registrada sobre este tipo de dispositivo é de origem Americana, desenvolvida por Faunce e Cabell em 1890 para diminuir a incrustação em caldeiras a vapor, através da passagem da água por campos eletromagnéticos. A partir de então, diversos dispositivos que permitem submeter a água a campos magnéticos externos vêm sendo desenvolvidos com objetivo de aplicação em diversas áreas.

O principal marco temporal para o tratamento magnético da água aplicado na construção civil data de outubro de 1993, quando o governo da Rússia criou um programa de políticas públicas recomendando a utilização da água tratada com campo magnético não só pra indústria da construção, mas considerando também benefícios potenciais nas áreas da saúde, sustentabilidade, energia, aplicações agrícolas, entre outros (Comité Estatal de Construção da Rússia, 1993; TKATCHENKO, 2004).

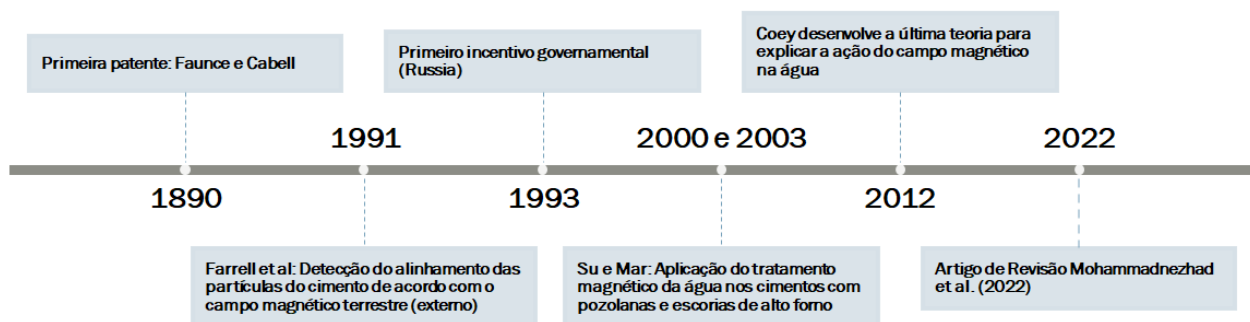
Amparadas pela recomendação governamental, as primeiras investigações na Rússia foram conduzidas para explorar o uso potencial da água tratada com campo

²Faunce and Cabell: Electric means for preventing boiler incrustation - US438579A (United States). Fonte: <https://patents.google.com/patent/US438579A/en> (FAUNCE; CABELL, 1890)

magnético nos materiais cimentícios, melhorando o desempenho, aumentando a vida útil das construções e poupando cimento com vistas à redução dos custos.

Os principais marcos dos avanços científicos na engenharia civil foram as publicações da detecção da magnetização remanente natural do concreto de cimento Portland³ em 1991, a publicação do efeito da água magnética nas propriedades de engenharia do concreto contendo escória granulada de alto forno⁴ em 2000, o efeito da água tratada com campo magnético em argamassas e concretos contendo cinzas volantes⁵ em 2003 e o artigo de revisão compreendendo o processo de magnetização da água e seus efeitos nos materiais cimentícios⁶ em 2022. Os avanços no desenvolvimento tecnológico e científico no tratamento magnético aplicado aos materiais à base de cimento Portland dispostos como linha temporal estão apresentados na figura 2.2 .

Figura 2.2 - Perspectiva história do desenvolvimento tecnológico e científico do tratamento magnético da água para materiais a base de cimento Portland



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

2.2 MECANISMOS DE AÇÃO DO TRATAMENTO

A compreensão dos efeitos do campo magnético durante e após sua ação

³ Charles W. Farrell, Kenneth C. Hover, Peter W. Plumley, Natural remanent magnetization of Portland cement concrete, Cement and Concrete Research em [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90098-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90098-3).

⁴ Nan Su, Yeong-Hwa Wu, Chung-Yo Mar, Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag, Cement and Concrete Research em [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00215-5).

⁵ Nan Su, Chea-Fang Wu, Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash, Cement and Concrete Composites em [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00098-7).

⁶ Ahmad Mohammadnezhad, Shahab Azizi, Hossein Sousanabadi Farahani, Jawdat Tashan, Asghar Habibnejad Korayem, Understanding the magnetizing process of water and its effects on cementitious materials: A critical review, Construction and Building Materials em <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129076>.

sobre a água e sobre as soluções aquosas ainda é uma questão em aberto (CASS, 2000; KOZIC *et al.*, 2000; GABRIELLI, 2001; OTSUKA OZEKI, 2006; CHAPLIN, M., 2009; COEY; ; RODGERS, 2009; LIPUS; AČKO; HAMLER, 2011; MOSIN; IGNATOV, 2014; ADETUNJI ALABI, A MATTEO CHIESA, 2015). Vários estudos onde o objetivo era a prevenção das incrustações em tubos metálicos justificaram as mudanças na estrutura da água pelas alterações de ligação de hidrogênio (COLIC; MORSE, 1998; CHANG; WENG, 2006, 2008; TOLEDO; RAMALHO; MAGRIOTIS, 2008; CAI *et al.*, 2009; CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ, A. *et al.*, 2011; JHA *et al.*, 2017; SZCZEŚ, 2019; SHCHERBAKOV *et al.*, 2020; SZCZEŚ, Aleksandra; CHIBOWSKI; RZEŹNIK, 2020). Uma das explicações mais avançadas foi proposta por Coey (2012) com uma teoria não-clássica sobre o mecanismo de nucleação para explicar a ação do campo magnético (COEY, 2012).

Outra teoria que ganha força é a que considera o mecanismo iônico para explicar a precipitação de sais iônicos, principalmente do carbonato de cálcio (CaCO_3), dissolvido na água. A teoria afirma que o campo magnético atua primeiro nos íons dissolvidos (Ca^{+2} ou HCO_3) e nas moléculas da água (HIGASHITANI *et al.*, 1993b, 1993a; CHIBOWSKI, Emil; KOBÉ, S. *et al.*, 2002; HOŁYSZ; SZCZEŚ, 2003; H; KNEY; PARSONS, 2006; SAKSONO *et al.*, 2008, 2008, 2010; TIJING *et al.*, 2011; SALMAN; SAFAR; NIKMANESH, 2013; NUWAIBIT, 2015; SUTOMO *et al.*, 2019). Diversos autores relataram a precipitação mais rápida, ou seja, uma taxa de cristalização mais rápida, e cristais menores de carbonato de cálcio na presença de um campo magnético de até 8T. O tamanho reduzido do cristal significa que mais núcleos se formam como resultado da transferência mais rápida de íons de bicarbonato de cálcio para água, causada pela influência do campo magnético no spin do próton. Fathi *et al.* (2006) descobriram que o tratamento com campo magnético aumenta a quantidade de carbonato de cálcio precipitado (CaCO_3), e sua eficiência depende do pH da solução, taxa de fluxo (velocidade de circulação) e tempo de tratamento magnético. As mudanças acima descritas refletem na menor formação de incrustações porque a forma cristalina da aragonita predomina em relação à calcita.

Os efeitos dos campos magnéticos também foram explicados em termos de alterações induzidas magneticamente na hidratação de íons ou superfícies sólidas. De acordo com Lungader Madsen (1995, 2004), o campo magnético induz mais rapidamente transferência de prótons de carbonato de hidrogênio para a água devido à inversão do spin de prótons de sais diamagnéticos. A crescente formação de íons explicaria o efeito benéfico de campos magnéticos sobre a quantidade de precipitado. Outra explicação proposta por

Higashitani et al. (1993) está relacionada com a influência específica do campo magnético na hidratação de íons que poderiam modificar diretamente o equilíbrio da fase polimórfica durante a precipitação.

Outra teoria aceita para a explicação da precipitação de sais, à exemplo do carbonato de cálcio (CaCO_3), que ocorre na água tratada com campo magnético, é que este campo influencia as cargas na superfície das partículas e que podem influenciar a taxa de nucleação, ou seja, a precipitação (CHIBOWSKI, Emil; HOTYSZ, 1995; CHIBOWSKI, Emil; COLIC; MORSE, 1998; CHIBOWSKI, E.; HOTYSZ; SZCZEŚ, 2003; CHIBOWSKI, Emil *et al.*, 2003; AMIRI; DADKHAH, 2006; SILVA; QUEIROZ NETO; PETRI, 2015; ZIELIŃSKI *et al.*, 2017; SZCZEŚ; HOŁYSZ, 2018; DERKANI *et al.*, 2019; SZCZEŚ, ALEKSANDRA; CHIBOWSKI; RZEŻNIK, 2020). A estabilidade coloidal é influenciada pelo campo magnético através da alteração da estrutura das moléculas de água e íons ou adsorvidos na superfície da partícula, ou no meio. As evidências são demonstradas por mudanças na condutividade (ABDELHADY *et al.*, 2011; YIN *et al.*, 2011; SZCZEŚ *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2020; MGHAIUINI *et al.*, 2021; SRONSRI; U-YEN; SITTIPOL, 2021), resposta dielétrica (MGHAIUINI *et al.*, 2020) e fotomicrografia⁷ (CHIBOWSKI; HOŁYSZ; SZCZEŚ, 2003).

Os mecanismos iônicos e os mecanismos de superfície podem ocorrer concomitantemente (CHAPLIN, M., 2009) entretanto, diversas investigações foram conduzidas para saber qual dos dois mecanismos é mais preferível⁸. Saksono et al. (2008) relatam que o mecanismo predominante depende da composição da solução, enquanto os estudos conduzidos por Kney and Parsons (2006) concluíram que o "mecanismo de superfície" é o mais provável, responsável pelos efeitos observados (ALIMI *et al.*, 2009; CEFALAS *et al.*, 2008; CHAPLIN, M., 2009).

Saksono et al. (2008) explicam que a ação do campo eletromagnético influenciou os dois mecanismos: o mecanismo de dissociação iônica causou a precipitação de uma quantidade menor de partículas de CaCO_3 com diâmetro médio maior, enquanto o mecanismo de superfície causou um maior número de partículas precipitadas de CaCO_3 com diâmetro médio menor. A partir da análise da imagem, a conclusão final dos autores foi que ambos os mecanismos, assim como a força de Lorentz, são responsáveis pelos

⁷ Processo de reprodução fotográfica ampliada de objetos microscópicos através do uso de um microscópio encaixado na câmera (fotomicroscopia)

⁸ Para a investigação do mecanismo iônico, primeiro trata-se a água e posteriormente mistura-se com os sais. Para a investigação do mecanismo de superfície, mistura-se sob a ação do campo eletromagnético e posteriormente analisa-se

efeitos do campo magnético.

O mecanismo iônico, o mecanismo de cargas superficiais das partículas e os efeitos de força de Lorentz são os parâmetros principais associados aos efeitos observados quando se realiza a exposição da água a campos magnéticos. Esta é a teoria mais aceita com relação a ação do tratamento do campo magnético sobre as soluções em que a precipitação ocorre, e não se trata apenas de carbonato de cálcio (CaCO_3) mas pode ser aplicado a outros precipitados.

Coey (2012) desenvolveu uma nova teoria da ação do campo magnético nas precipitações de soluções, que além disso, permite explicar o efeito de memória. Os últimos trabalhos mostram uma alternativa à teoria clássica da nucleação⁹, avançando na ideia de aglomerados de pré-nucleação semelhantes a líquidos de forma indeterminada que são termodinamicamente estáveis, por exemplo, em soluções de carbonato de cálcio, sendo o entendimento do comportamento dos aglomerados em escala nanométrica a possível explicação para os efeitos observados (KOBÉ, S. *et al.*, 2003; CEFALAS *et al.*, 2008, 2010; POUGET *et al.*, 2009; GEBAUER; CÖLFEN, 2011; COEY, 2012; ANIS, HASHAIKEH, HILAL, 2019).

Chibowski *et al.* (2018) apresenta um trabalho de revisão sobre as explicações para os efeitos observados com o tratamento magnético da água, que estão na tabela 2.1¹⁰.

Tabela 2.1 - Síntese das teorias sobre o mecanismo de ação na água tratada com campo magnético

Teorias	Mecanismos	Consequências	Referências
Teoria clássica	Ação nos íons dissolvidos "mecanismo de íons"	Maior número de núcleos formados, partículas menores, dispersões mais estáveis, aumenta a mobilidade de íons.	Kobe <i>et al.</i> (2000, 2002, 2003), Chibowski <i>et al.</i> (2003b), Alimi <i>et al.</i> (2009), Chang & Tai (2010), Cefalas <i>et al.</i> (2008, 2010), Silva <i>et al.</i> (2015), Wang <i>et al.</i> (2012) Lungader Madsen (1995) Silva <i>et al.</i> (2015)
	Ação nas cargas das superfícies das partículas "mecanismo"	Velocidade de nucleação e precipitação, influência na estrutura cristalina	Barett and Parsons (1998), Higashitani and Oshitani, (1996), Kney and Parsons (2006).

⁹ A Teoria Clássica da Nucleação (TCN) calcula o tamanho do núcleo crítico maximizando a diferença na energia livre de Gibbs entre as fases atual e nova, separadas por uma superfície de tensão bem definida.

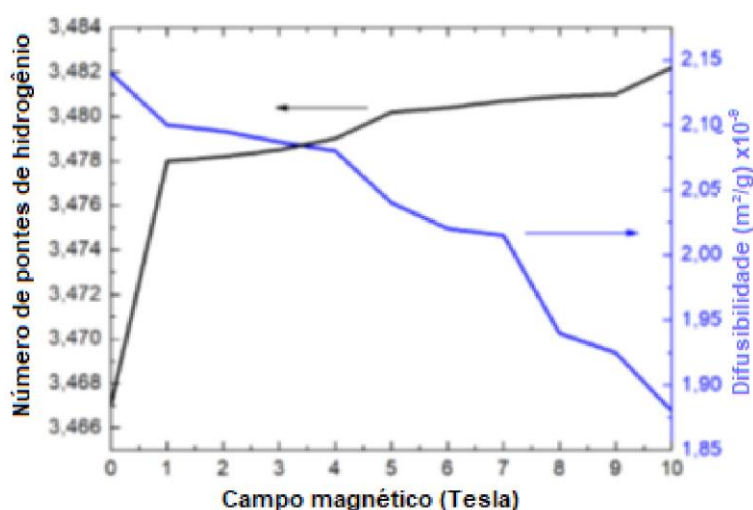
¹⁰ O artigo de revisão que condensa as teorias e mecanismos físico-químicos do tratamento magnético da água: Chibowski, Emil, and Aleksandra Szcześ. "Magnetic water treatment—A review of the latest approaches." *Chemosphere* 203 (2018): 54-67. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.160.

	de superfície”	precipitada.	
	Ação nos íons dissolvidos e na superfície das partículas “mecanismos associados”	Teoria preponderante, o tratamento magnético pode ser utilizado em qualquer precipitado.	Kney and Parsons (2006) Saksono et al. (2008) Chaplin, M. (2009).
Teoria não clássica	Aglomerados pré-nucleação	Estudo do comportamento dos aglomerados em escala nanométrica	Raiteri and Gale (2010) Demichelis (2011) e Coey (2012),

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

É consenso na literatura justificar as mudanças nas propriedades físico-químicas da água pela alteração da estrutura de ligação de hidrogênio (COLIC; UENO, 1998; MORSE, 1998; CHAPLIN, M. F., 2001; HOŁYSZ; CHIBOWSKI; SZCZEŚ, 2003; CHANG; WENG, 2006, 2008; RAMALHO; MAGRIOTIS, 2008; CAI *et al.*, 2009; IWASAKA; MOSIN; IGNATOV, 2014; SZCZEŚ, Aleksandra; TOLEDO; USANOV *et al.*, 2016; WANG, Yubin *et al.*, 2020; CHIBOWSKI; RZEŹNIK, 2020). Ghauri e Ansari (2006) observaram o aumento da viscosidade após um tratamento da água com campo magnético, que foi explicado devido às alterações da ligação de hidrogênio. Da mesma forma, Cai et al. (2009) observaram uma redução da tensão superficial e um aumento da viscosidade da água após o tratamento magnético, também explicando os efeitos devido a estas alterações (GHAURI; ANSARI, 2006; TOLEDO; RAMALHO; MAGRIOTIS, 2008; CAI *et al.*, 2009; SILVA; QUEIROZ NETO; PETRI, 2015; LA LUMIA *et al.*, 2019; MARDONOV, 2020;). A figura 2.3 apresenta as modificações do número de ligações de hidrogênio na água (preto) e o coeficiente de auto-difusão (azul) em função da intensidade do campo magnético aplicado.

Figura 2.3 - Modificação do número de ligações de hidrogênio na água (preto), coeficiente de auto-difusão (azul) em função da intensidade do campo magnético aplicado.



Fonte: Traduzido de Chang and Weng (2006)

Toledo et al. (2008), com base nas medições de viscosidade, entalpias de vaporização e tensão superficial, propriedades estas que apresentaram valores aumentados após tratamento da água, e utilizando a simulação de Monte Carlo (SMC), sugerem que o campo magnético permanente (45-65 mT) rompe as ligações de hidrogênio intra-cluster e reforça as ligações inter-cluster. Guo et al. (2011) aplicaram as simulações moleculares dinâmicas e concluíram que a transformação do cluster ocorre, enquanto que Wang et al. (2012) também relatam que os efeitos observados poderiam ser explicados pelo mecanismo de transformação do cluster.

Cefalas et al. (2008, 2010) consideraram o efeito do campo magnético através da sua influência sobre os eixos de rotações moleculares da água. Mesmo um campo magnético externo de baixa intensidade causa um estado antissimétrico macroscópico coerente, originado pela estrutura molecular da água com dois níveis de rotação. O campo magnético externo causa uma rotação coerente de cada molécula de água (HIGASHITANI *et al.*, 1993a, 1993b; ZHOU *et al.*, 2000; LIPUS; AČKO; HAMLER, 2011; AIHUA; HUIMIN; WENJIN, 2012; DENG; HUANG; JI, 2012; SILVA; QUEIROZ NETO; PETRI, 2015; SRONSRI; U-YEN; SITTIPOLO, 2021).

A influência do campo magnético na taxa de evaporação das soluções aquosas também é relatada na literatura. Foram publicados vários artigos sobre a alteração do mecanismo de evaporação (NAKAGAWA et al., 1999; KITAZAWA et al., 2001; HOLYSZ et al., 2007, SZCZEŚ et al., 2011; GUO et al., 2012; RASHID et al., 2013; SEYFIA et al. 2017, AMOR et al., 2017) e mais recentemente, publicações sobre mudanças na convecção

de fluidos sob ação de campos magnéticos (BRAITHWAITE; BEAUGNON; TOURNIER, 1991; AKAMATSU *et al.*, 2004; NAKAMURA *et al.*, 2005; FORMALIK *et al.*, 2006; BEDNARZ *et al.*, 2009; KRASZEWSKA; PYRDA *et al.*, 2012; PYRDA; DONIZAK, 2018; KANEDA *et al.*, 2020; KENJEREŠ *et al.*, 2020; SHI *et al.*, 2021).

Esmailnezhad *et al.* (2017)¹¹ sintetizaram as principais mudanças nas propriedades físico-químicas da água tratada com campo magnético, que apresenta-se resumidamente na tabela abaixo.

Tabela 2.2 - Síntese das mudanças nas propriedades físico-químico da água tratada com campo magnético

Mecanismos	Efeitos	Referências
Grupos de moléculas de água	Ocorre a diminuição do intercluster e do intracluster	Nakagawa <i>et al.</i> (1999), Murad (2006), Toledo <i>et al.</i> (2008), Guo <i>et al.</i> (2011), Wang <i>et al.</i> (2012). Krems (2004)
Pontes de hidrogênio	Enfraquece as ligações intercluster de água e fortalece as ligações intraclusters. Ligeiro aumento na quantidade de ligações. Mudança no ângulo de ligação das moléculas de água reduziu de 105° e 104° para 103°.	Nakagawa <i>et al.</i> (1999), Ghauri & Ansari (2006), Chang & Weng (2006), Toledo <i>et al.</i> (2008), Guo <i>et al.</i> (2012), Cai <i>et al.</i> (2009), Q. Zhou (2017), B. S. K. Reddy (2014), S. Hassan (2016).
Tensão superficial	Modificação da tensão superficial	Ghauri & Ansari (2006), Fujimura & Masaaki (2008), Cai <i>et al.</i> (2009), Toledo <i>et al.</i> (2008), Amor <i>et al.</i> (2017), F. Moosavi (2014).
Viscosidade	Modificação da viscosidade. (Aumento na ordem de 10%).	Viswat <i>et al.</i> (1982), Ghauri & Ansari (2006), Cai <i>et al.</i> (2009). Toledo <i>et al.</i> (2008).
Taxa de evaporação	Aumenta a taxa de evaporação (aprox. 20%). Diminui a temperatura de evaporação (aprox. 2°C).	Nakagawa <i>et al.</i> , (1999); Kitazawa <i>et al.</i> (2001); Holysz <i>et al.</i> (2007), Szcześ <i>et al.</i> , (2011); Guo <i>et al.</i> , 2012; Rashid <i>et al.</i> (2013); Seyfia <i>et al.</i> (2017), Amor <i>et al.</i> (2017), Y. Wang (2018).
pH	Modificação do pH (No geral, aumento da ordem de 5%)	H. Al-Qahtani (1996), A. Fathi, <i>et al.</i> (2006), M.M.K. Alkhazan, A.A.N. Saddiq (2010) B.U. Ngene, O.M. Olofinnade, C.E. Agomo (2019).

¹¹ O artigo de revisão condensa as alterações nas propriedades da água: Esmailnezhad, Ehsan, *et al.* "Characteristics and applications of magnetized water as a green technology." *Journal of Cleaner Production* 161 (2017): 908-921. DOI:j.clepro.2017.05.166

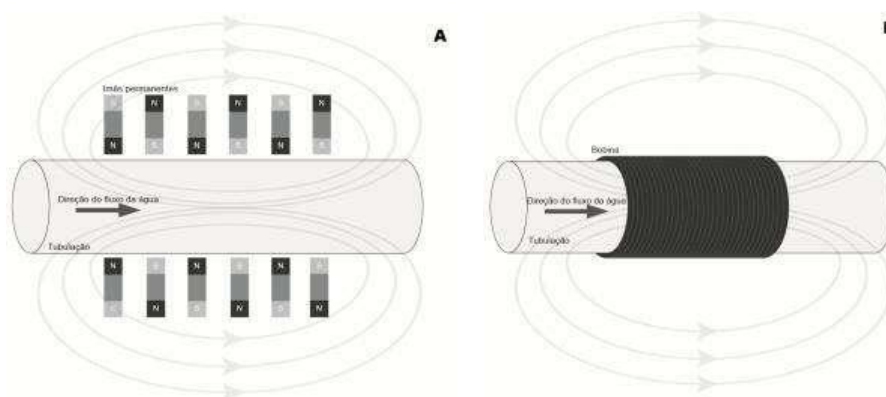
Condutividade	Modificação da condutividade (No geral, aumento da ordem de 5%)	H. Al-Qahtani (1996), A. Szcześ, <i>et al.</i> (2011), X.- F. Pang, B. Deng, B. Tang (2012), H. Wei, Y. Wang (2017), M.O. Karkush, M.D. Ahmed, S.M. Al-Ani (2019), R. Mghaiouini, <i>et al.</i> (2020).
---------------	---	--

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

2.3 DISPOSITIVOS DE TRATAMENTO MAGNÉTICO

Existem duas formas básicas de geração de um campo magnético: o campo de um ímã permanente e o campo criado por uma carga elétrica em movimento, ou seja, o campo criado por uma corrente elétrica. Os dispositivos para tratamento magnético da água podem ser desenvolvidos utilizando-se ímãs ou sistemas eletromagnéticos alimentados por corrente contínua ou por corrente alternada (Figura 2.4). Neste trabalho usaremos dispositivos magnéticos e eletromagnéticos que nos permitem aplicar campos magnéticos de magnitude variável entre 200 mT e 1,85T para provocar as alterações nas propriedades físico-químicas da água e posteriormente analisarmos os efeitos causados nas propriedades reológicas dos materiais cimentícios.

Figura 2.4 – Modalidades de dispositivos para tratamento magnético da água: A: tratamento com ímãs permanentes, B: tratamento eletromagnético por corrente contínua ou alternada



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

Dispositivos com ímãs permanentes (Figura 2.4 A) são preparados a partir de ímãs de materiais ferromagnéticos que podem ser à base de ferro, de neodímio, de níquel, de cobalto ou de outros elementos compostos de terras raras. Os campos

magnéticos gerados por esse tipo de dispositivo dependem do arranjo geométrico, da disposição dos polos (alternados ou não) e do número de ímãs utilizados (ACKO; HAMLER, 2012; LIN *et al.*, 2020, 2020; LIPUS).

Os campos eletromagnéticos gerados por eletroímãs (bobinas ou solenoides, como na figura 2.4 B) podem ser de corrente contínua ou alternada, com o campo ortogonal ou paralelo ao fluxo do fluido. Estes fatores são determinantes para a eficiência do tratamento. As propriedades dos campos eletromagnéticos alternados: intensidade de corrente (campo magnético), forma de onda e frequência, que também são fatores que podem alterar a eficiência do tratamento magnético da água. O campo magnético induzido por corrente é mais interessante para os tratamentos pretendidos neste trabalho do que um campo magnético permanente em função da possibilidade de aumentarmos a intensidade do fluxo magnético alterando a configuração da bobina, por exemplo, aumentando-se o número de espiras.

2.3.1 Grandezas físicas

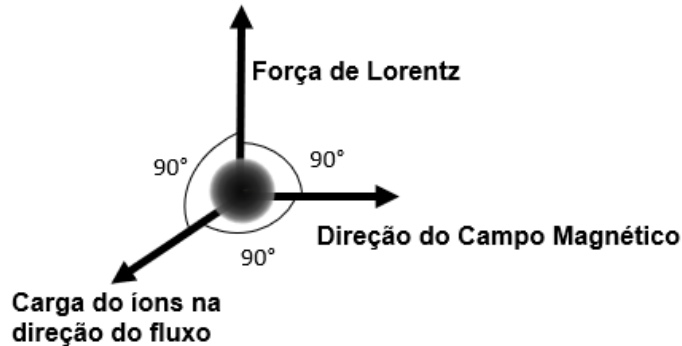
Quando se descreve um campo magnético é comum referir-se a duas grandezas: densidade de fluxo magnético (**B**) e Intensidade de campo (**H**), ambas medidas em Tesla (T). No caso do nosso dispositivo para tratamento da água, a densidade de fluxo magnético refere-se ao número de linhas de indução que passam através da água e a intensidade de campo é a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução (ZAIDI *et al.*, 2014b; CHIBOWSKI; SZCZEŚ, 2018; GABRIELLI, 2001; LIN *et al.*, 2020).

Tais grandezas são vetoriais e, portanto, possuem módulo, direção e sentido e estão relacionadas pela equação: $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, onde μ é a permeabilidade magnética do meio. Nas situações onde B e H diferem somente pelo fator de proporcionalidade, μ , indistintamente podemos chamá-los de campo magnético (ZAIDI *et al.*, 2014b; CHIBOWSKI; SZCZEŚ, 2018).

Independente da fonte de criação do campo magnético (eletroímã ou imã permanente), dado um campo magnético, **B**, este campo exerce uma força sobre uma carga em movimento. Em geral, como temos também um campo elétrico presente, **E**, a força sobre uma carga em movimento é dada pela somatória da força elétrica (**FE**) e força magnética (**FB**): $\mathbf{F} = \mathbf{FE} + \mathbf{FB}$ (ZAIDI *et al.*, 2014b; CHIBOWSKI; SZCZEŚ, 2018, 2019).

Esta força é conhecida como força de Lorentz, conforme o esquema na figura 2.5.

Figura 2.5 – Força de Lorentz em um íon carregado em movimento na direção de um campo magnético



Fonte: Adaptado de Chibowski e Szcześ (2019); Chibowski, Szcześ e Hołysz, (2018); Gabrielli (2001)

Há também relatos, na literatura, de efeito de memória magnética observados na água submetida a tratamento magnético (SREBRENİK; NADIV; LIN, 1993; COLIC; MORSE, 1998, 1999; OSHITANI *et al.*, 1999; COEY; CASS, 2000; LUBOMSKA; CHIBOWSKI, 2001; CHIBOWSKI, E.; HOTYSZ; SZCZEŚ, 2003; PANG; DENG, 2008; SILVA; CEFALAS *et al.*, 2010; COEY, 2012; QUEIROZ NETO; PETRI, 2015; CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ; HOŁYSZ, 2018; SZCZEŚ, Aleksandra; CHIBOWSKI; RZEŹNIK, 2020; MGHAIOUINI *et al.*, 2021). A memória magnética pode ser definida como um período de magnetização remanescente após as partículas terem sido expostas a um campo magnético de certa intensidade. O efeito de memória magnética foi registrado ao longo de períodos que vão de 10 minutos a aproximadamente uma semana. Tais consequências podem ser explicadas em termos de suscetibilidade magnética, das mudanças ocorridas na estrutura molecular, na alteração do momentum das moléculas dipolares e na mudança da energia cinética, segundo Zaidi *et al.* (2014).

Os principais fatores físicos estudados na literatura que determinam a eficácia do tratamento magnético, foram consolidados na tabela a seguir:

Tabela 2.3 - Principais variáveis estudadas para o desenvolvimento de dispositivos magnéticos

Variáveis ou efeitos	Referências
A intensidade do campo magnético e o tempo de exposição	AL-QAHTANI, 1996; BEN AMOR <i>et al.</i> , 2020; CHANG; WENG, 2008; H; NIKMANESH, 2013; LIU, Y.-Q. <i>et al.</i> , 2016; PANG; DENG, 2008; TOMBACZ <i>et al.</i> , 1991; WANG <i>et al.</i> , 2022; XIAO FENG PANG, 2014; YIN <i>et al.</i> , 2011; ZAIDI <i>et al.</i> , 2020.

O gradiente magnético	CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ, 2019; GUO <i>et al.</i> , 2012; NAKAGAWA <i>et al.</i> , 1999; SAMMER <i>et al.</i> , 2016; UENO, S; IWASAKA, 1994.
A força de Lorentz	CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ, 2019; CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ; HOŁYSZ, 2018; GABRIELLI, 2001.
Magnetização remanescente (memória magnética)	CEFALAS <i>et al.</i> , 2010; CHIBOWSKI, E.; HOTYSZ; SZCZEŚ, 2003; CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ; HOŁYSZ, 2018; COEY; CASS, 2000; COEY, 2012; COLIC; MORSE, 1998, 1999; LUBOMSKA; CHIBOWSKI, 2001; MGHAIUINI <i>et al.</i> , 2021; OSHITANI <i>et al.</i> , 1999; PANG; DENG, 2008; SILVA; QUEIROZ NETO; PETRI, 2015; SREBRENİK; NADIV; LIN, 1993; SZCZEŚ, Aleksandra; CHIBOWSKI; RZEŹNIK, 2020.

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

2.3.2 Caracterização dos efeitos do tratamento da água por campos eletromagnéticos

A caracterização dos efeitos do tratamento magnético é, de maneira geral, realizada utilizando-se técnicas de análise química da água e de comparação entre os compostos formados ou precipitados na água tratada e não tratada com campo magnético. Na água, as técnicas de caracterização envolvem o controle do pH, condutividade elétrica, tensão superficial (tensiometria), viscosidade, potencial zeta¹² das partículas precipitadas ou dispersas, difusividade¹³, ebuliometria¹⁴, capacidade térmica específica por DSC¹⁵ e outras.

A caracterização dos compostos formados é comumente realizada avaliando as taxas de precipitação¹⁶, difratometria de raios X (XRD), microscopia eletrônica de varredura (SEM), microscopia eletrônica de transmissão (TEM), e espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS). As técnicas tem sido aplicadas para analisar a estrutura cristalina, morfologia e composição dos elementos da partícula precipitada.

¹² O potencial zeta é uma medida da magnitude da repulsão ou da atração eletrostática ou das cargas entre partículas, sendo um dos parâmetros fundamentais que, sabidamente, afetam a estabilidade. É medido por espalhamento de luz dinâmico ou eletroforético.

¹³ Obtém-se a difusividade dividindo a condutividade (λ) pelo calor específico volumétrico (μ)

¹⁴ O Ebuliômetro é um equipamento que é utilizado para medir o ponto de ebulição de um líquido

¹⁵ A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica de análise térmica usada para medir as alterações de entalpia que ocorrem devido a alterações nas propriedades físicas e químicas de um material em função da temperatura ou do tempo

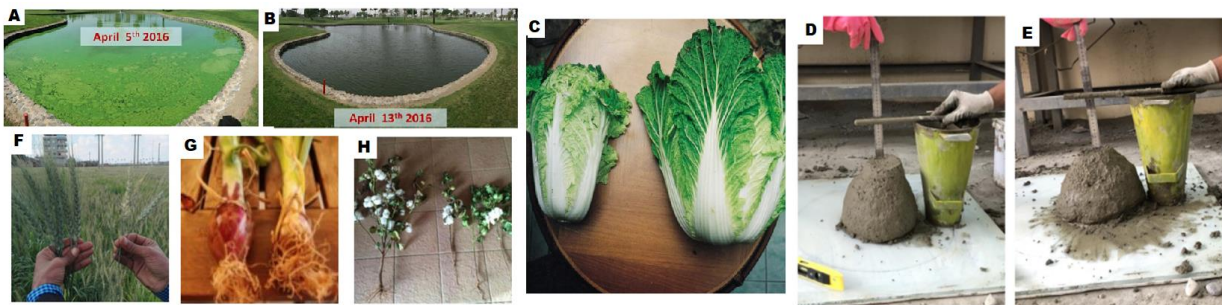
¹⁶ Peso dos precipitados recuperados por filtração ou aderidos na parede do reator.

Neste trabalho, não focaremos nossos esforços na análise da água e sim na investigação das propriedades reológicas dos materiais cimentícios tratados com água submetida à campo magnético.

2.3.3 Aplicações

Desde os primeiros registros de uso da técnica do tratamento magnético da água, os efeitos são observados e relatados tanto sobre as condições laboratoriais como sobre as aplicações práticas na indústria (PIYADAS et al., 2017; SOHAILIET al., 2016; ZAIDI et al., 2014) desenvolvendo-se rapidamente em muitas áreas, tais como: purificação de água (AMBASHTA e SILLANPAA, 2010), tratamento de águas residuais (ZAIDI et al., 2014), redução de incrustações (SIMONIC e URBANCL, 2017), agricultura (SURENDRAN et al., 2016; ZUNIGA 2016; ZIELIŃSKI et al., 2017), crescimento de plantas (Da SILVA e DOBRANSZKI, 2016), produtividade de plantas (HOZAYN et al., 2016), irrigação (Da SILVA e DOBRANSZKI, 2014), biologia (LIU, 2016; RADHAKRISHNAN, 2012; DUDA et al., 2011), ciência animal (GILANI et al., 2014) e medicina (SILVA et al., 2017; BUCHACHENKO, 2014, 2016; NEGGERS et al., 2015; COSTIN et al., 2014; UENO, 2012, HAFIZI et al., 2014).

Imagem 2.6 – Aplicações em diversas áreas do conhecimento. A e B: Tratamento de água, C, F, G e H: Crescimento de plantas e D e E: Mudança no estado fresco do concreto



Fonte: Figuras A;B;C;F;G e H adaptado pelo Autor (2023) de Magnetic Technologies L.L.C¹⁷; Figuras D e E adaptado de Ahmed e Manar (2021)

¹⁷ A aplicação do tratamento magnético da água na melhoria do crescimento das plantas está revisado nos artigos: Etimad Alattar, Eqbal Radwan, Khitam Elwasife. Improvement in growth of plants under the effect of magnetized water[J]. AIMS Biophysics, 2022, 9(4): 346-387. doi: 10.3934/biophy.2022029 e Sarraf M, Kataria S, Taimourya H, et al. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. Plants (Basel). 2020;9(9):1139. Published 2020 Sep 3. doi:10.3390/plants9091139.

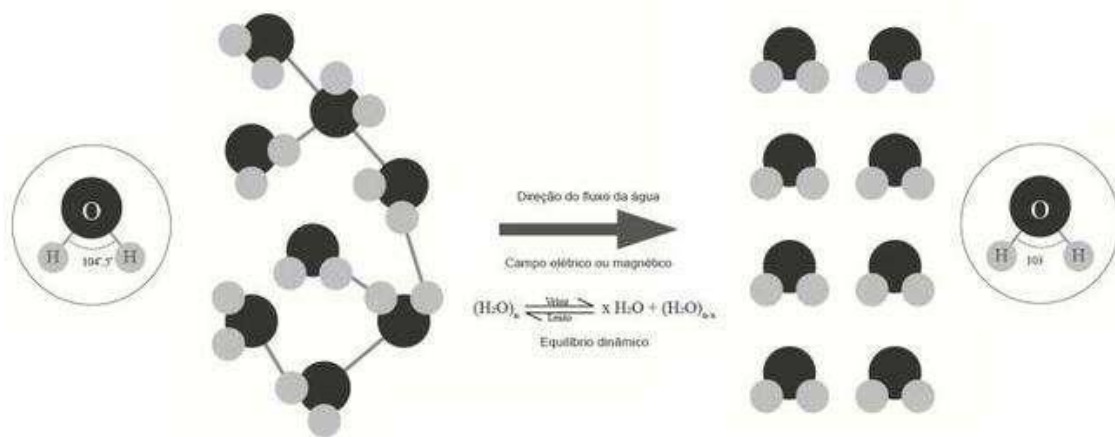
2.4 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MAGNÉTICO NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A água é um importante constituinte dos materiais cimentícios, uma vez que participa ativamente na reação química de hidratação com o cimento anidro até a cura (SHETTY, 2005; GOEL e KUMAR, 2014). O comportamento dos materiais a base de cimento Portland está associado a química da água (mineralogia, tipos de íons presentes, sólidos totalmente dissolvidos, pH, potabilidade da água, etc.) e suas interações com os componentes cimentícios. Resumidamente, no estado fresco a água reflete a trabalhabilidade, no endurecimento interfere no calor de hidratação e retração, e por último, no estado endurecido, interfere na porosidade, afetando a resistência e durabilidade do material final (HOVER, 2011; WEI et al., 2017).

A água tratada com campo magnético é obtida pela exposição da água de abastecimento, potável ou não, a um campo magnético. Quando isso acontece, ocorrem algumas mudanças nas suas propriedades moleculares, mecânicas, físicas, eletromagnéticas e termodinâmicas em comparação com água convencional (ESFAHANI et al., 2018; HARSHA e SRUTHI, 2018).

O efeito do campo magnético nas moléculas de água é esquematizado na Figura 2.7. As moléculas de água tendem a ser atraídas umas pelas outras aglomerando-se pelas ligações de hidrogênio, formando clusters (TAGHRIED et al., 2017). Quando a água passa através de um campo magnético, os aglomerados são desconectados e o número de moléculas agrupadas diminui (ZHOU et al., 2000; ESMAEILNEZHAD et al., 2017). Além disso, os campos magnéticos enfraquecem as ligações de hidrogênio dos aglomerados, diminuindo os aglomerados maiores e formando aglomerados menores com ligações de hidrogênio mais fortes. Utilizando o espectro de luz, o ângulo de ligação diminui de 104,5° para 103° devido à exposição ao campo magnético, que desvia e aperta os pares de ligações para se aproximarem mais (TOLEDO et al., 2008; REDDY et al., 2014a; JAIN et al., 2017).

Figura 2.7 – Efeito esquematizado do tratamento magnético nas moléculas da água



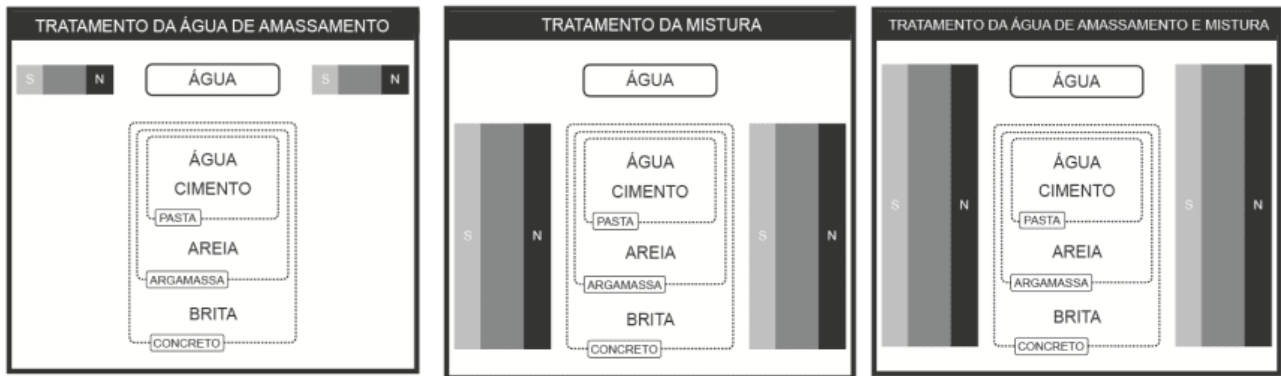
Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

Dentre as alterações que se observam na água, após submissão a um campo magnético, estão um ligeiro aumento do pH (WANG et al, 2011a; Srinidhi et al, 2019), diminuição da dureza total da água (CaCO_3) e do total de sólidos dissolvidos à medida que aumenta do número de horas de tratamento (KUMAR e KRISHNA, 2017; SRINIDHI et al, 2019), aumento da condutividade (Wei et al, 2017) e diminuição do calor específico, do ponto de ebulição, da tensão superficial e da viscosidade (FARIS et al, 2014; BHARATH et al, 2016; WEI et al, 2017).

Existem diversos métodos de tratamento magnético da água¹⁸. Os principais sistemas são: no formato aplicado sobre a água de amassamento esquematizado na figura 2.8 (A) (SU; WU; MAR, 2000; SU; WU, 2003); ou um sistema aplicado sobre a mistura conforme esquema da figura 2.8 (B) (AHMED, 2017) e, um sistema aplicado tanto sobre a água de amassamento e da mistura conforme o esquema da figura 2.8 (C) (AHMED; MANAR, 2021).

Figura 2.8 – Modalidades da exposição ao campo magnético aplicado aos materiais cimentícios. A: exposição apenas da água de amassamento, B: exposição apenas da mistura e C: exposição da água de amassamento e da mistura

¹⁸ O artigo de revisão condensa os métodos de aplicação do tratamento magnético nos materiais cimentícios: Ahmad Mohammadnezhad, Shahab Azizi, Hossein Sousanabadi Farahani, Jawdat Tashan, Asghar Habibnejad Korayem, “Understanding the magnetizing process of water and its effects on cementitious materials: A critical review”, Construction and Building Materials, Vol. 356, ISSN 0950-0618, 2022. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.129076.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

2.4.1 Suscetibilidade magnética dos materiais cimentícios

A susceptibilidade magnética (SM) é a propriedade que determina sua resposta de um material a um campo magnético, sendo uma característica intrínseca de cada material. Sua identidade está relacionada com a estrutura atômica e molecular, podendo os materiais ser comumente classificados, quanto à SM, em diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos.

A água é um material diamagnético (SUEDA et al., 2007). A água pura, como um líquido polar e associativo, pode alterar suas ligações intermoleculares sob um campo magnético, transformando-se para um estado metaestável e retendo esse estado por algum tempo (GOLOVLEVA et al., 2000).

Os materiais utilizados como matérias-primas na produção do clínquer Portland, os calcários e argilas, são particularmente pobres em minerais magnéticos (geralmente menos de 5%) (HELMUTH, 1987). No entanto, os óxidos de ferro estão presentes na composição de um dos principais compostos do cimento Portland anidro, o aluminoferrite tetracálcico (C4AF). De acordo com David et al (2005), os minerais argilosos possuem maior quantidade de óxidos de ferro, desta maneira, potencializa os valores de suscetibilidade.

As pastas, argamassas e os concretos de cimento Portland magnetizam-se paralelamente ao campo magnético ambiente devido ao alinhamento dos constituintes magnéticos encontrados no cimento Portland anidro (FARRELL; HOVER; PLUMLEY, 1991a, 1991b; BIDEGAIN; SINITO; RODRIGUEZ, 1999).

Quando o campo magnético da terra é responsável pelo alinhamento dos

grãos, o processo é chamado de magnetização remanente natural (NRM)¹⁹. O resultado líquido do alinhamento de muitos grãos magnéticos individualmente é uma magnetização geral do material (TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, 1990; FARRELL; HOVER; PLUMLEY, 1991, 1991; BIDEGAIN; SINITO; RODRIGUEZ, 1999)

Acredita-se que os constituintes magnéticos, nos materiais a base de cimento Portland, sejam o ferro elementar introduzido durante o processo de moagem do clínquer²⁰ e possivelmente das adições que contenham ferro. Uma vez alinhados ao campo local enquanto o meio está fluido, estes constituintes magnéticos são travados no lugar pelas reações de hidratação do cimento Portland, resultando efetivamente na magnetização, que se estabelece horas após a moldagem e cura (FARRELL; HOVER; PLUMLEY, 1991b; BIDEGAIN; SINITO; RODRIGUEZ, 1999).

Um ensaio com o magnetômetro de spinner²¹ é capaz de determinar a direção e a intensidade da magnetização adquirida durante o processo de moldagem e endurecimento por hidratação dos materiais de base cimentícia (TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, 1990; FARRELL; HOVER; PLUMLEY, 1991a, 1991b; BIDEGAIN; SINITO; RODRIGUEZ, 1999).

2.4.2 Efeitos nas idades iniciais dos materiais cimentícios

A viscosidade e a tensão superficial da água são reduzidas pela magnetização e desse modo a taxa de hidratação aumenta (TAGHRIED et al, 2017). Nessa mesma direção, Harsha e Sruthi, (2018) afirmam que ao passar a água através de um campo magnético, as moléculas de água perderão as suas forças atrativas e repulsivas e depois serão reorientadas, assim, as moléculas neutralizadas da água são mais facilmente atraídas para os campos eletrostáticos que naturalmente contém os grãos de cimento, acelerando o processo de hidratação.

Devido ao tamanho menor das moléculas da água tratada com campo magnético, a camada de água à volta do cimento é mais fina do que as moléculas de água usual, o que ocasionará menos procura de água de hidratação, o que beneficia as propriedades das pastas de cimento Portland hidratado fabricadas com água tratada com

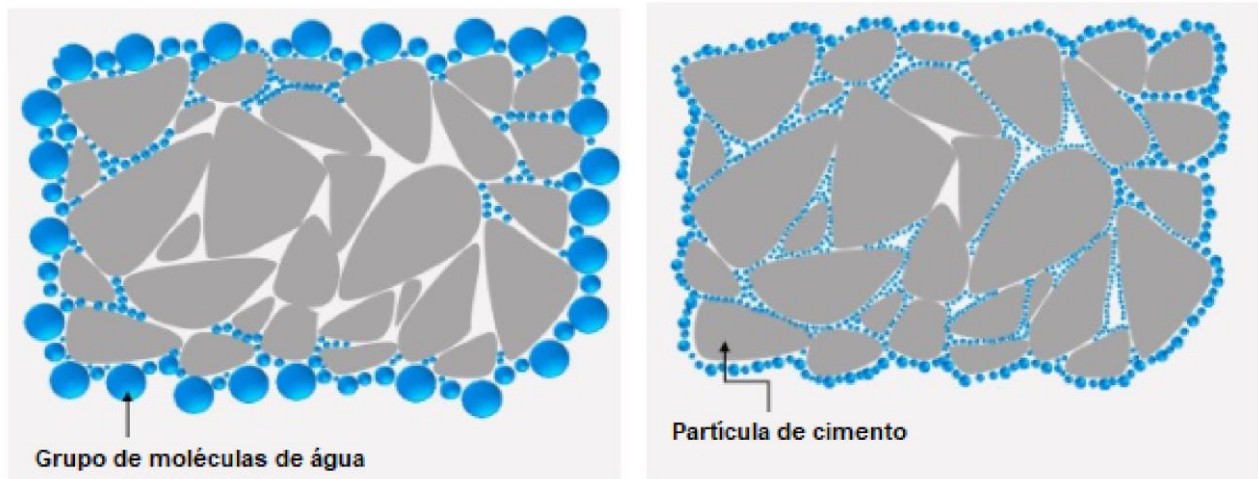
¹⁹ Classificação de processo geofísico para rochas e solos;

²⁰ Paris (1973) na Cement and Concrete Research demonstrou que o ferro elementar no cimento Portland típico é devido ao desgaste dos componentes de aço durante o processo de moagem do clínquer;

²¹ Equipamento da geologia/geofísica com sensibilidade adequada e precisão para a medição da magnetização remanente de rochas com base nos princípios clássicos. Adaptado por Farrel et al (1991) para medir NRM em pastas e argamassas de cimento contendo cinzas volantes e Bidegain et al (1999) para pastas e argamassas contendo escória granulada de alto forno.

campo magnético (Figura 2.9). Desse modo, liberaram maior calor de hidratação, com redução do tempo de pega, aumento da fluidez e da resistência à compressão em comparação com a água usual (MALATHY, R; KARUPPASAMY; BARANIDHARAN, 2017; MALATHY, RAMALINGAM; NARAYANAN; MAYAKRISHNAN, 2022).

Figura 2.9 - Acessibilidade dos grãos de cimento com água não tratada (esquerda) e tratada com campo magnético (direita)



Fonte: Traduzido de Mohammadnezhad et al. (2022)

Um consenso na literatura é que a água tratada com o campo magnético aumenta a trabalhabilidade dos materiais cimentícios sem que se aumente a relação água/cimento (a/c) (FARIS et al., 2014; PATIL e PATHAK, 2016). Para concretos autoadensáveis Gholhaki et al. (2018) afirmam que o uso da água tratada aumenta a fluidez e diminui a viscosidade e Reddy et al. (2013), na mesma direção, relatam o aumento da fluidez sem sinais de exsudação ou segregação, além de observarem redução na relação a/c de 0,50 para 0,45 sem utilizar qualquer aditivo.

Os principais estudos na literatura que avaliam os efeitos do tratamento magnético sobre a água e sua influência nas propriedades do estado fresco dos materiais cimentícios, foram consolidados na tabela a seguir:

Tabela 2.4 - Efeito do tratamento magnético da água nos materiais cimentícios no estado fresco

Campo magnético			Material cimentício	Avaliação da trabalhabilidade	Melhora	Referência
Tipo	Intensidade (mT)	Aplicação				

E	1350	Água	Argamassa	Flow table	9%	Su e Mar (2000)
E	1350	Água	Argamassa	Flow table	15%	Su e Mar (2003)
E	600	Água	Concreto (SCC) leve estrutural	Slump	4,5 - 12%	Salehi e Mazloom (2019)
E	1200	Água	Concreto (SCC)	Slump	38%	Ahmed (2017)
P	650	Água	Concreto (SCC)	Slump	6-11%	Ghorbani et al. (2020)
U	800	Água	Concreto (SCC)	Slump	3%	Gholhaki (2018)
E	600	Água	Concreto (SCC) leve estrutural	Slump	12%	Salehi e Mazloom (2019)
E	600-1500	Água	Concreto (SCC)	Slump	-	Jouzdani et al. (2020)
P	130 - 80	Água	Pasta	-	10%	Khorshidi (2014)
P	900	Água	Concreto (SCC)	Slump	25%	Ramalingam et al. (2022)

E: Eletroímã; P: Ímã permanente e U:Ímã ferradura

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

A partir da análise da tabela 2.4, a variabilidade das medidas de trabalhabilidade com mesa de abatimento para argamassa é da ordem de 10% e do ensaio de abatimento de tronco de cone fica entre 3% a 20%.

Parâmetros, perfil e controle reológico dos materiais de base cimentícia

O controle reológico²² disponível para materiais à base de cimento é realizado através de adições minerais, água ou aditivos químicos de acordo com a dosagem da mistura (CHIBULU et al., 2021; JIAO et al., 2021a, 2021b, 2021c).

Propriedades reológicas, como tensão, limite de escoamento e viscosidade plástica aparente são parâmetros físicos intrínsecos (JIAO et al., 2017; ROUSSEL et al., 2020; WALLEVIK et al., 2015) e otimizáveis, sendo o fluxo do material descrito em função desses parâmetros (TATTERSALL, 1976 apud FERRARIS, 1999).

A viscosidade plástica possui diversas aplicações práticas, como influenciar o bombeamento, a velocidade de lançamento e a resistência à segregação. No

²² O termo “Reologia” foi definido pelo Professor Bingham e está relacionado ao estudo da deformação e fluxo da matéria (BARNES; HUTTON; WALTERS, K., 1989)

entanto, dentre todos os parâmetros, a tensão de escoamento é o mais crucial quando se trata da capacidade de preenchimento das fôrmas (YAHIA; KHAYAT, 2001; SAAK; JENNINGS; SHAH, 2004; ROUSSEL, 2007; WANG et al., 2011; ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Essas características são de grande importância para descrever a fluidez e trabalhabilidade, avaliando a capacidade de bombeamento e prever o preenchimento de formas de materiais à base de cimento (ROUSSEL et al., 2019, 2020). As propriedades reológicas da pasta podem ser usadas para otimizar o concreto bombeável (JIAO et al., 2021a) e melhorar a fluidez do concreto na manufatura avançada, alcançando um equilíbrio entre bombeabilidade, adensamento e moldagem para a mesma mistura de concreto (FERRON, 2014, 2016; ESMAEILNEZHAD et al., 2017; JIAO et al., 2017, 2021a, 2021c; NAIR).

A força exigida para iniciar o fluxo de um material é conhecida como tensão de escoamento²³ ou ponto de fluxo. Em termos numéricos, corresponde ao ponto onde a curva de fluxo (que representa a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento) intercepta o eixo das ordenadas (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2006). Em termos práticos, a viscosidade representa a capacidade de um fluido em oferecer maior ou menor resistência ao seu fluxo (BRUNETTI, 2008).

Sakano (2022) propõe que o uso de reômetros rotacionais de fluxo é o mais indicado para suspensões concentradas uma vez que permite a imposição de maiores deformações. Os reômetros desempenham um papel fundamental na obtenção do perfil reológico de materiais cimentícios. Além disso, oferecem a vantagem de permitir a simulação de processos relacionados à mistura, transporte e aplicação, possibilitando a variação da taxa de cisalhamento por meio de ensaios de fluxo, conforme discutido por Betioli et al. (2009).

Após a realização do ensaio rotacional, torna-se viável a obtenção dos principais parâmetros reológicos (listados na tabela 2.5), como viscosidade e tensão limite de escoamento, por meio da aplicação de modelos matemáticos (MEZGER, 2014). A viscosidade não pode ser medida diretamente, sendo calculada a partir da relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (SCHARAMM, 1998).

²³ As principais influências na tensão de escoamento de pastas de cimento estão descritas nos artigos: efeito parede em Saak, Jennings e Shah (2001), evolução da hidratação em Lootens (2009), distribuição das partículas em Bentz et al (2012) e a interação das partículas em Perrot (2012).

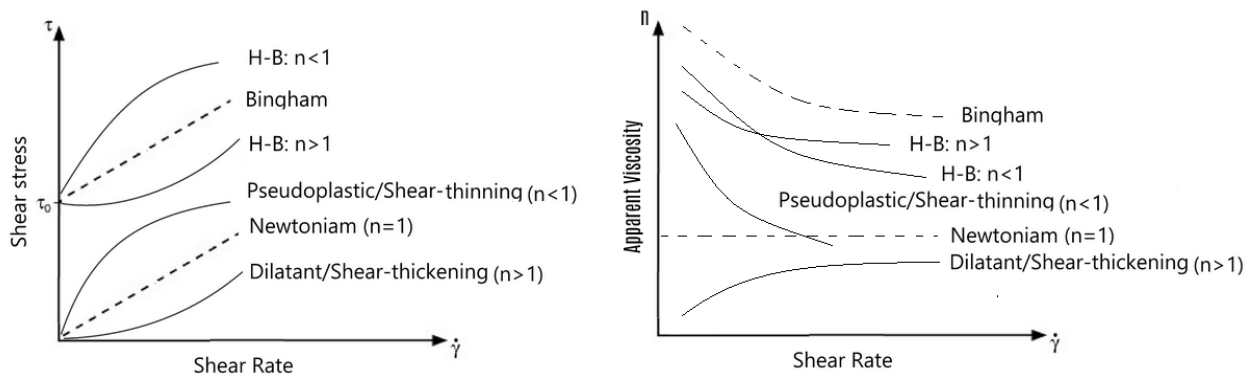
Tabela 2.5 - Principais parâmetros e conceitos reológicos dos fluidos

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Relação matemática	Descrição
Tensão de cisalhamento	τ	Pa	$F(N)/A(m^2)$	Força tangencialmente aplicada, que provoca o deslocamento do material.
Deformação	γ	% ou m/m	$dx(m)/h(m)$	Deformação do material quando submetido à tensão de cisalhamento
Taxa de Cisalhamento	$\dot{\gamma}$	s^{-1}	$v(m/s)/h(m)$	Taxa calculada a partir do diferencial de velocidade que o material apresenta ao ser submetido à uma tensão de cisalhamento, levando em conta a altura da amostra (gap)
Viscosidade	η	Pa·s	$\tau (Pa)/\dot{\gamma}(s^{-1})$	Obtenção da resistência ao fluxo do material

Fonte: Adaptado de Steffe (1996), Schramm (1998), Chhabra e Richardson (2008) e Mezger (2014)

Esses modelos matemáticos pré-determinados se fundamentam em curvas de regressão construídas a partir dos dados de tensão-deformação coletados durante o ensaio, com as características das curvas resultantes refletindo os parâmetros reológicos. Os principais modelos pré-determinados de curvas de fluxo baseados nas formulações de Herschel-Bulkley²⁴, Bingham²⁵, Pseudoplástico²⁶, Newtoniano²⁷ e Dilatante²⁸ estão apresentados na figura 2.10.

Figura 2.10 - Modelos pré-determinados de curvas de fluxo baseados Herschel-Bulkley, Bingham, Pseudoplástico, Newtoniano e Dilatante



Fonte: Adaptado de Schramm (2006), Andrade (2010), Wallevik e Wallevik (2011), Singh e Singh (2018) e Tao et al (2020)

²⁴ Modelo reológico de Herschel–Bulkley (1926): $\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$

²⁵ Modelo reológico de Bingham (1922): $\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$

²⁶ Modelo reológico de Pseudoplástico (Apud Barnes, 1989): $\tau = \eta \dot{\gamma}$, para $n < 1$

²⁷ Modelo reológico de Newton (Apud Barnes, 1989): $\tau = \eta \dot{\gamma}$

²⁸ Modelo reológico de Dilatante (Apud Barnes, 1989): $\tau = \eta \dot{\gamma}$, para $n > 1$

O modelo reológico mais básico que descreve um material com tensão de escoamento é o modelo de Bingham, que complementa o modelo de Newton com a inclusão do termo τ_0 . A viscosidade permanece constante dentro de uma faixa específica de taxas de cisalhamento, conhecida como viscosidade plástica, conforme Nehdi e Rahman (2004). O modelo de Bingham é utilizado há anos para descrever o comportamento de pastas e concretos convencionais, pois é consenso entre diversos autores (HU; DE LARRARD, 1996; FERRARIS, 1999; SCHWARTZENTRUBER et al., 2006; BANFILL, 2011; MEDINA et al., 2013; AHARI; ERDEM; RAMYAR, 2015).

O modelo de Bingham pode gerar resultados significativamente imprecisos devido à sua dificuldade em ajustar adequadamente a fase inicial do fluxo, especialmente em situações de baixas taxas de cisalhamento. Isso se torna especialmente evidente em misturas que exibem comportamento fortemente pseudoplástico, como dilatantes (shear-thickening) ou fluidificantes (shear-thinning), conforme Coussot (2005).

O comportamento reológico de misturas à base de cimento pode ser dilatante ou fluidificante, dependendo de diversos fatores, como a concentração de sólidos na pasta, interações entre as partículas, tamanho e forma das partículas, entre outros (YAHIA, 2007; NGUYEN; REMOND; GALLIAS, 2011). Normalmente, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, chamado de comportamento fluidificante (shear-thinning). No entanto, em algumas situações, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, caracterizando um comportamento dilatante (shear-thickening) (BOTELLA, 2005).

O modelo de Herschel-Bulkley é amplamente preferido quando se trata de descrever curvas de fluxo não lineares, sendo uma escolha comum entre diversos autores (DE LARRARD; FERRARIS, 1998; NGUYEN; REMOND; GALLIAS, 2011; YAHIA, 2014). O principal motivo para avaliar o fluxo de misturas à base de cimento é devido à sua capacidade de descrever adequadamente o comportamento não-linear desses materiais (YAHIA; KHAYAT, 2001; ROUSSEL, 2006; FEYS; SCHUTTER, 2013; MA et al., 2017; GUO et al., 2017).

Além dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley, outros modelos menos usuais²⁹ também podem ser empregados para análises de pastas de cimento, entre eles: o modelo de Ellis (1965), Casson (1959), Eyring (1936), Vom Berg (1979) Sisko (1958) e Williamson (1929).

²⁹ Os demais modelos podem ser encontrados em Nehdi e Rahman (2004) e Papo (1988).

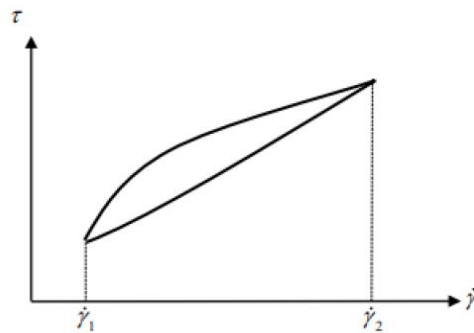
Tixotropia³⁰ é o termo usado para descrever a situação em que a viscosidade de um material diminui à medida que é submetido a um esforço de cisalhamento ao longo do tempo e, posteriormente, aumenta quando o esforço é removido (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Segundo Barnes (1997) e Mezger (2014) o comportamento tixotrópico de uma suspensão é atribuído à capacidade de certas estruturas internas do material de se desfazerem durante o cisalhamento e de se regenerarem naturalmente quando o cisalhamento é interrompido. Em situações opostas, quando a viscosidade aumenta com o passar do tempo sob a influência de um esforço cisalhante constante, esse fenômeno é conhecido como antitixotropia, reopexia ou também chamados de não tixotrópicos (BOTELLA, 2005, CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

A tixotropia é um fenômeno presente em pastas de cimento (JARNY, 2008) e rigorosamente, em todos os concretos (CASTRO, LIBORIO e PANDOLFELLI, 2011). A representação gráfica da histerese, conforme a Figura 2.11, apresentada por Green e Weltmann (1946) é a técnica utilizada para evidenciar um comportamento tixotrópico. Roussel et al. (2012) descreve que a irreversibilidade está relacionada a criação de uma rede devido a interação coloidal e “pontes” de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) interligando as partículas de cimento.

Durante o início da hidratação, as primeiras ligações do C-S-H formam-se de maneira discreta e podem ser rompidas por ação de uma força externa (cisalhamento, por exemplo) apresentando o comportamento reversível e, à medida que o tempo passa, as interações coloidais e a nucleação dos compostos hidratados aumentam a rigidez da pasta sendo necessário maior energia para quebrar a estrutura (ROUSSEL, 2012). Assim, Castro, Liborio e Pandolfelli (2011) define que a área entre parte ascendente e descendente da taxa de cisalhamento aplicada é a medida considerada como uma representação do trabalho necessário para romper algumas ligações inicialmente presentes em um volume unitário de material.

Figura 2.11 - Curva de histerese para fluidos tixotrópicos

³⁰ Os principais artigos propriedade tixotrópica de pastas de cimento são Russel (2006), Wallevik (2009) e Roussel et al (2012).



Fonte: Adaptado de Lyklema (2005)

De acordo com o estudo de Wallevik et al. (2015), várias variáveis podem exercer impacto sobre os valores das propriedades reológicas. Estas variáveis incluem os constituintes (JIAO, 2017; KAMAL e KHAYAT, 2018), o modelo reológico selecionado (DE LARRARD, FERRARIS e SEDRAN, 1998; NEHDI e RAHMAN, 2003 e 2007), a geometria utilizada (NEHDI e RAHMAN, 2003 e 2007), os intervalos de tempo e velocidade de ensaio, e até mesmo as equações empregadas pelo reômetro para converter a velocidade de rotação e o torque em taxas de cisalhamento e tensões cisalhantes (MEWIS; WAGNER, 2009), respectivamente.

Reometria de fluxo aplicado aos materiais de base cimentícia

A reometria é uma técnica de medição empregada para determinar dados reológicos por meio de testes que possibilitam a avaliação de uma ampla gama de materiais, abrangendo tanto sólidos quanto líquidos, e incluindo também os materiais viscoelásticos (MEZGER, 2014). Adicionalmente, conforme destaca Melo (2014), a reometria além medir os parâmetros, deve conceber e aprimorar os dispositivos e geometrias empregados nos ensaios.

Existem dois tipos de ensaios delineados^{31,32} para reometria rotacional de fluxo: o ensaio de taxa de cisalhamento controlada (CSR - Controlled Shear Rate), que envolve a manipulação da velocidade de distorção, e o ensaio de tensão de cisalhamento controlada (CSS - Controlled Shear Stress), onde a ênfase recai na análise dos dados nas

³¹ ISO 3219-1:2021 Rheology — Part 1: Vocabulary and symbols for rotational and oscillatory rheometry. Este documento especifica termos e definições gerais que são usados no contexto da reometria rotacional e oscilatória.

³² ISO 3219-2:2021 Rheology — Part 2: General principles of rotational and oscillatory rheometry. Este documento especifica os princípios gerais da reometria rotacional e oscilatória.

diferentes tensões tensão de cisalhamento ou torque (MEZGER, 2018).

O ensaio CSS é utilizado em situações que demandam a simulação de fluxo ou deformação contínua, em que o material responde a uma força cisalhante em ação, tais como processos de fluência, deslizamentos de encosta, avalanches, entre outros cenários similares. O ensaio CSR é empregado quando é necessário simular velocidades de fluxo específicas ou processos particulares, como o escoamento em tubulações ou a sedimentação de uma dispersão, como mencionado por Havel (2004).

O ensaio em rampas de subida (up) e descida (down) é o mais utilizado para avaliar o comportamento reológico de materiais à base de cimento Portland, sendo adotado por diversos pesquisadores (ATZENI et al., 1985; YAHIA, 2007, 2011, 2014, VANCE et al., 2015; WALLEVICK et al., 2015; HAN; FERRON, 2016; MA et al., 2016; SHANAHAN et al., 2016; ZHAO et al., 2016; GUO et al., 2017; KIM et al., 2017; SCHANKOSKI et al., 2017). No segmento ascendente da curva (associado ao aumento da taxa de cisalhamento), ocorre a quebra da estrutura formada pelas partículas de cimento, o que leva a tensões que ultrapassam as apresentadas na porção descendente da curva. Enquanto isso, a porção decrescente da curva fornece os valores usados para estimar a viscosidade plástica e a tensão de escoamento (LOMBOY; WANG; WANG, 2014). Esse ensaio possibilita também a avaliação do comportamento tixotrópico do material ao observar a histerese na curva. Nesse contexto, pressupõe-se que a área entre as curvas de aumento e diminuição seja igual numericamente à medida da tixotropia (COUSSOT, 2005; MEWIS; WAGNER, 2009).

2.4.4 Efeitos nas idades avançadas dos materiais cimentícios

Ao misturar a água e o cimento, o processo de hidratação inicia primeiramente na superfície das partículas de cimento. Assim, uma fina camada de produtos de hidratação é criada sobre as partículas de cimento, o que obstrui a hidratação posterior das partículas de cimento. Esta ação descontinuada da hidratação afeta a resistência mecânica (SU et al., 2000; JAIN et al., 2017).

De outro modo, a utilização da água tratada com campo magnético diminui a acumulação de partículas de cimento e ajuda as moléculas de água a penetrarem mais facilmente nas partículas de cimento. Portanto, o processo de hidratação será feito de forma mais eficiente, o que por sua vez, melhora as propriedades mecânicas dos materiais

cimentícios (NAN e CHEA-FANG, 2003; Jain et al., 2017; Wei et al., 2017; Gholhaki et al., 2018).

A interação da água com o campo magnético reduz o tamanho dos aglomerados de água, fazendo a mesma adentrar e transpor a partícula de cimento mais eficientemente que a água usual. Desse modo, durante o processo de hidratação são formados produtos de hidratação mais densos, com menor porosidade e resultando em uma maior resistência da pasta de cimento Portland hidratado. Como resultado ocorre uma diminuição na demanda de água no concreto com redução da relação a/c, que tem efeitos positivos bem conhecidos nas propriedades do concreto endurecido, tais como resistência, durabilidade, etc (GHOLHAKI et al., 2018; MALATHY; KARUPPASAMY; BARANIDHARAN, 2017; VENKATESH; JAGANNATHAN; PRASATH KUMAR, 2020; MALATHY; NARAYANAN; MAYAKRISHNAN, 2022).

Segundo Bharath et al. (2016), o concreto com água tratada com campo magnético contém mais cristais C-S-H e os cristais de CH são menores e mais separados do que o concreto com água sem tratamento. Nesta mesma direção, Ahmed (2017) concluiu que uma grande quantidade de C-S-H e um número menor de poros ocorriam no concreto com água tratada com campo magnético.

Adicionalmente, Ahmed (2017) também investigou porosidade capilar por adsorção/dessorção de pastas de cimento usando a metodologia de Parrott (1992b) e Ngala et al. (1995) para estimar o número de poros interligados e concluiu que houve redução significativa da porosidade capilar das pastas com água tratada com campo magnético em relação à usual.

Os resultados das investigações da microestrutura indicam que, no caso da água tratada com campo magnético, a quantidade de gel hidratado de silicato de cálcio é maior, e sua morfologia se torna mais densa e menos porosa (AHMED, 2017; SOTO-BERNAL et al., 2015; VENKATESH; JAGANNATHAN; PRASATH KUMAR, 2020).

Os principais estudos na literatura que avaliam os efeitos do tratamento magnético sobre a água e sua influência nas propriedades do estado endurecido dos materiais cimentícios, estão consolidados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Efeito do tratamento magnético da água nos materiais cimentícios no estado endurecido

Campo magnético			Material cimentício	Avaliação da resistência	Melhora	Referência
Tipo	Intensidade (mT)	Aplicação				

E	1350	Água	Argamassa	Compressão	9-19%	Su e Mar (2000)
E	1350	Água	Concreto	Compressão	10-23%	Su e Mar (2003)
E	1350	Água	Argamassa	Compressão	15-20%	Su e Mar (2003)
E	600	Água	Concreto (SCC) leve estrutural	Compressão	17%	Salehi e Mazloom (2019)
E	1200	Água	Concreto (SCC)	Compressão	8-18%	Ahmed (2017)
P	650	Água	Concreto (SCC)	Compressão	5,5%	Ghorbani et al. (2020)
U	800	Água	Concreto (SCC)	Compressão	20-49%	Gholhaki et al. (2018)
E	600	Água	Concreto (SCC) leve estrutural	Compressão	16-18%	Salehi e Mazloom (2019)
E	600-1500	Água	Concreto (SCC)	Compressão	34%	Jouzdani et al. (2020)
P	130 - 80	Água	Pasta	Compressão	10%	Khorshidi et al. (2014)
P	900	Água	Concreto (SCC)	Compressão	24,1%	Ramalingam et al. (2022)
P	650	Água	Concreto celular	Compressão	50%	Ghorbani, et al. (2019)
P	650	Água	Concreto seco	Compressão	19%	Ghorbani, et al. (2018)
E	1400	Água	Argamassa	Compressão	41%	Yousry, et al. (2020)
E	260-300	Água	Concreto	Compressão	6,45-29,95%	Wei et al. (2017)

E: Eletroímã; P: Ímã permanente e U:Ímã ferradura

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

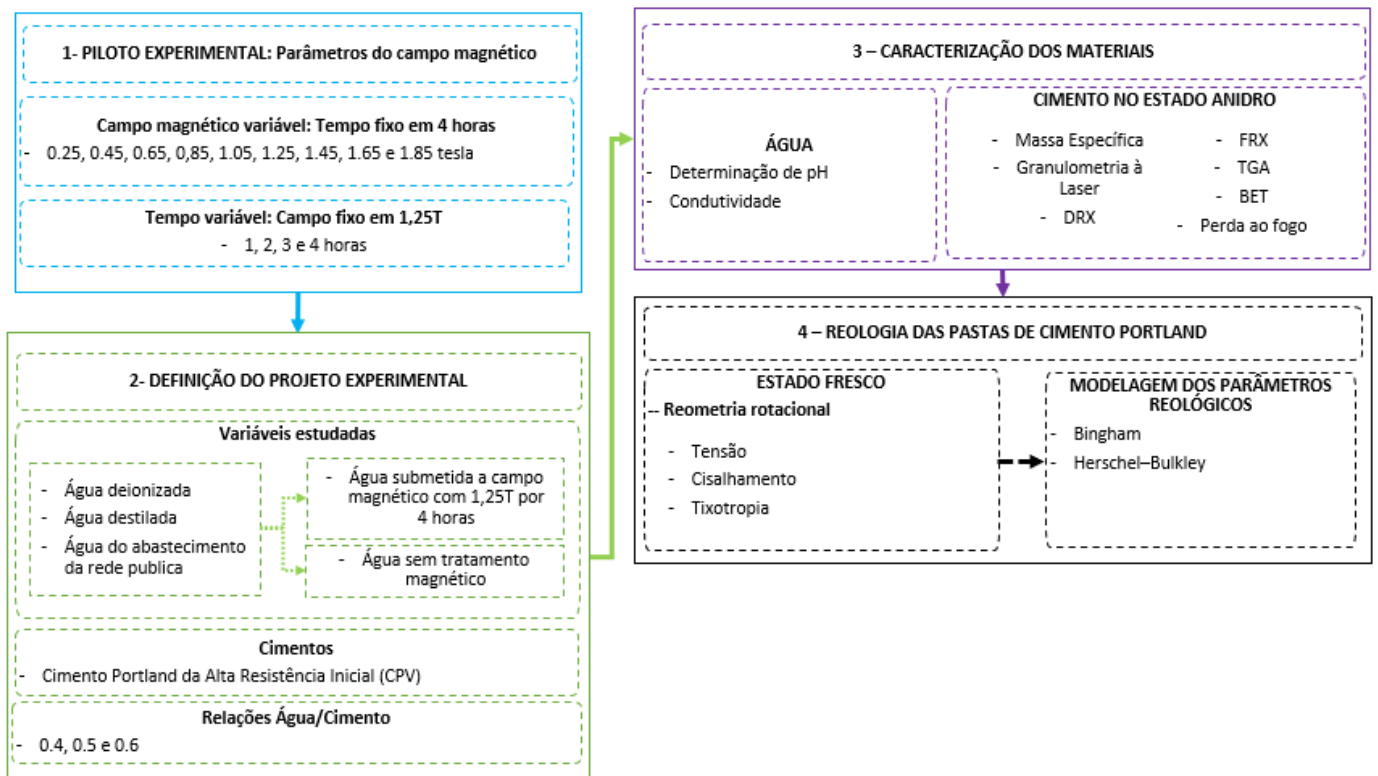
A partir da análise da tabela 2.6, a variabilidade das medidas de resistência à compressão para argamassa está entre 10% e 40% e para resistência à compressão de concretos está entre 3% a 50%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo teve caráter experimental, e conforme o fluxograma da figura 3.1, foi realizado em quatro etapas:

- i) Piloto experimental: definição dos parâmetros do campo magnético;
- ii) Definição do projeto experimental;
- iii) Caracterização dos materiais;
- iv) Reologia das pastas de cimento;

Figura 3.1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

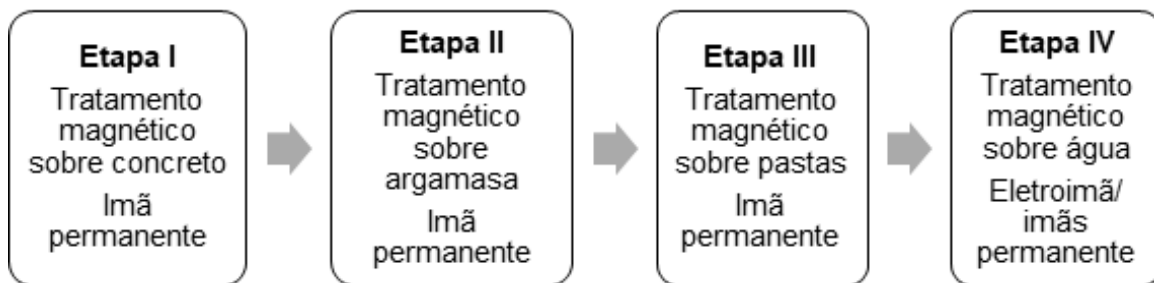
3.1 PILOTO EXPERIMENTAL – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO CAMPO MAGNÉTICO

O presente trabalho iniciou-se com um estudo prévio, denominado projeto piloto, cujo objetivo foi avaliar a influência de diferentes aplicações de campos magnéticos em materiais cimentícios no estado fresco e na água de amassamento para estabelecer o protocolo de tratamento magnético padrão que seria utilizado nesta dissertação.

As três primeiras etapas deste estudo utilizaram ímãs permanentes para

avaliar os efeitos do campo magnético nos materiais cimentícios no estado fresco. A primeira etapa consistiu em aplicar um tratamento magnético diretamente sobre o concreto, a partir da ação do campo magnético diretamente na mistura na betoneira. Nesta situação, ímãs foram fixados nas paredes externas da betoneira. A segunda etapa consistiu na aplicação do tratamento magnético sobre argamassa durante a mistura na argamassadeira, fixando-se os ímãs na parede externa desta. Na terceira etapa, aplicou-se de um campo magnético sobre pastas de cimento durante a mistura na argamassadeira, fixando-se os ímãs na parede externa desta. A quarta etapa consistiu na exploração da aplicação de campo magnético na água de amassamento. Pode-se observar as etapas na figura 3.2.

Figura 3.2 - Etapas de desenvolvimento do projeto piloto



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Etapa I – Tratamento magnético aplicado na mistura de concreto de cimento Portland

Para o estudo do tratamento magnético sobre o concreto foram fabricados seis concretos cuja dosagem se apresenta na tabela 3.1. Foram utilizados três tipos de cimento: cimento Portland CII Z, CII F e CP IV e, agregado miúdo natural da região de Foz do Iguaçu, agregado graúdo de origem basáltica e água proveniente da rede de abastecimento público.

Tabela 3.1 – Traços de concreto de cimento Portland utilizados no piloto experimental

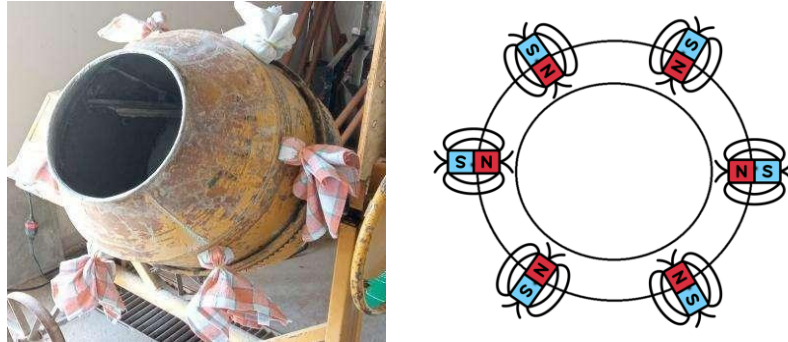
Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água	Relação A/C	Teor de argamassa (%)	Consumo de Cimento (Kg/m ³)
1	2,5	2,5	0,6	0,6	58,33	363,92

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Para cada tipo de cimento, foram fabricados concretos sem tratamento e com tratamento magnético. O tratamento magnético foi realizado fixando-se seis ímãs

permanentes de neodímio-ferro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) na betoneira, com grade N52, intensidade de aproximadamente 5 tesla, nas dimensões de 50,8x50,8x25,4mm (bloco), os ímãs foram dispostos bilateralmente de forma a proporcionar o alinhamento das linhas de campo no interior na betoneira. O campo medido na face de cada ímã foi de 5T e no interior da betoneira foi de 3T, conforme se observa na figura 3.3.

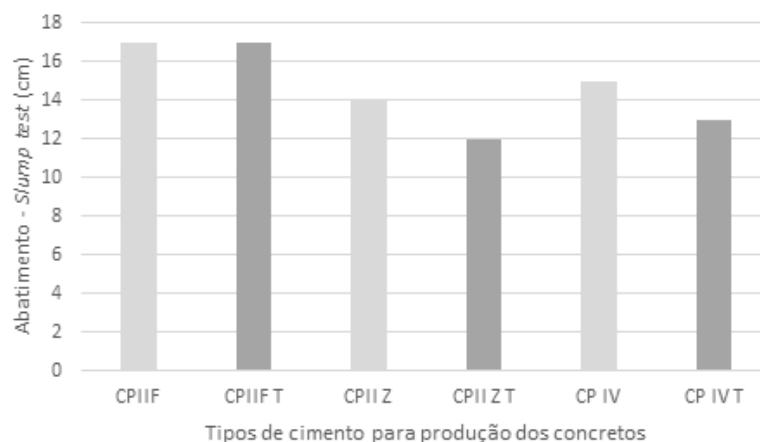
Figura 3.3 – Tratamento magnético sobre a mistura de concreto de cimento Portland



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Os concretos foram dosados e confeccionados no Laboratório de Materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI no mesmo dia, preservando as condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar. A betoneira utilizada possui capacidade de 120 litros. Foi realizado, para cada dosagem, o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). Os resultados obtidos para o ensaio de abatimento de tronco de cone estão apresentados na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com e sem tratamento magnético na betoneira



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Na figura 3.4, pode-se observar que o concreto produzido com cimento CII-F não apresentou diferença no ensaio de abatimento de tronco de cone. Os concretos produzidos com cimento CII Z e CIIV após o tratamento magnético durante a mistura da betoneira resultaram na diminuição da ordem de 10% no ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). Esse resultado contrapõe com o observado por Ahmed e Manar (2021) e Hajforoush, Kheyroddin e Rezaifar (2020).

Para observar os efeitos em menor escala, decidiu-se estudar o efeito do campo magnético na etapa de mistura de argamassas, utilizando os mesmos ímãs permanentes, o que se apresenta na etapa seguinte.

Etapa II – Tratamento magnético aplicado na mistura de argamassa de cimento Portland

A segunda etapa experimental consistiu na aplicação do tratamento magnético durante o processo de mistura de argamassa. Foram fabricadas oito argamassas cuja dosagem se apresenta na tabela 3.2, seguindo o recomendado pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram utilizados quatro tipos de cimento: cimento Portland CII Z, CII F, CII E e CP IV.

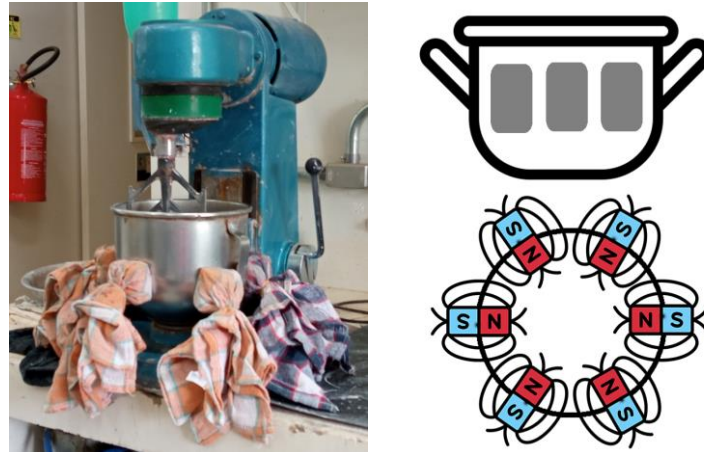
Tabela 3.2 – Traço em massa da Argamassa de cimento Portland utilizados no piloto experimental

Cimento Portland (g)	Areia Normal				Água (g)
	Fração Grossa	Fração Média Grossa	Fração Média Fina	Fração Fina	
1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,48

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

O agregado miúdo utilizado para produção das argamassas foi a areia normal brasileira, especificada na NBR 7214 (ABNT, 2015), e água proveniente da rede de abastecimento público. Para cada tipo de cimento, foram fabricadas argamassas sem tratamento e com tratamento magnético, realizado com seis ímãs permanentes de neodímio ($Nd_2Fe_{14}B$) fixados na parede externa da argamassadeira. Os ímãs foram dispostos simetricamente para o alinhamento das linhas de campo no interior na argamassadeira. O campo magnético medido na face de cada ímã foi de 5T e no interior da cuba da argamassadeira o campo magnético medido foi de 2,5T, conforme se observa na figura 3.5.

Figura 3.5 – Tratamento magnético sobre a mistura de argamassa de cimento Portland

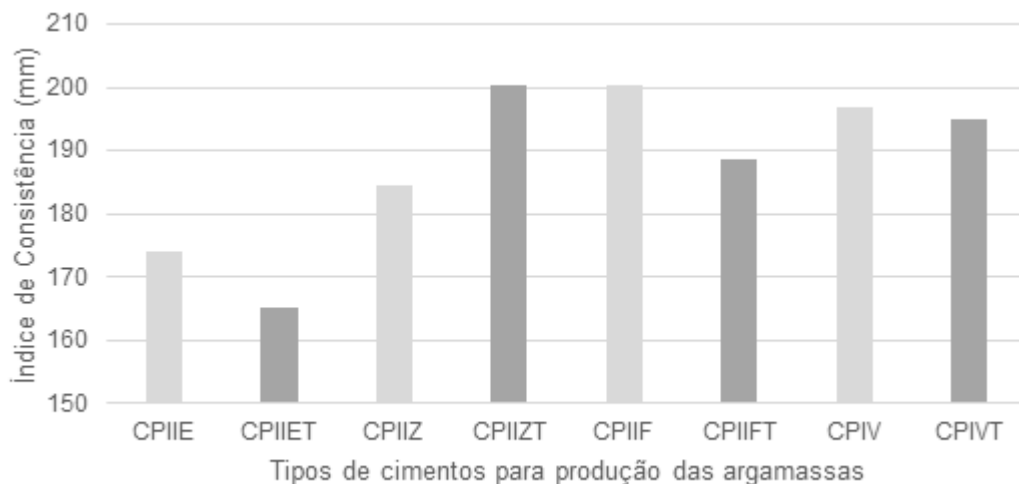


Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

As argamassas foram dosadas e confeccionadas no Laboratório de Materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI no mesmo dia, preservando as condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar. A argamassadeira utilizada possui capacidade nominal de 5 litros de acordo com a norma ASTM C230 (ASTM, 2017).

Para cada traço, foi realizado o ensaio de mesa de consistência de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016). Os resultados obtidos de índice de consistência para as argamassas produzidas estão apresentados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Índice de consistência das argamassas produzidas com e sem campo magnético



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

As argamassas produzidas com os cimentos CII-E, CII-F e CP-IV apresentaram resultados uma ordem de 15%% menor para o índice de consistência. A argamassa produzida com cimento CII-Z apresentou aumento do índice de consistência na ordem de 15%. Essa medida aumento de trabalhabilidade condiz com o relatado por Su

e Mar (2000) e Su e Mar (2003).

Para observar os efeitos no estado fresco dos materiais cimentícios, considerando a ação do campo magnético, decidiu-se conduzir o estudo em pasta de cimento que, segundo Taylor (1997), permite que não haja interação entre os agregados e pasta. Dessa forma, possibilita maior controle sobre as condições experimentais, conduzindo à obtenção de informações mais precisas e detalhadas sobre os parâmetros estudados.

Etapa III – Tratamento magnético aplicado sobre pastas de cimento Portland

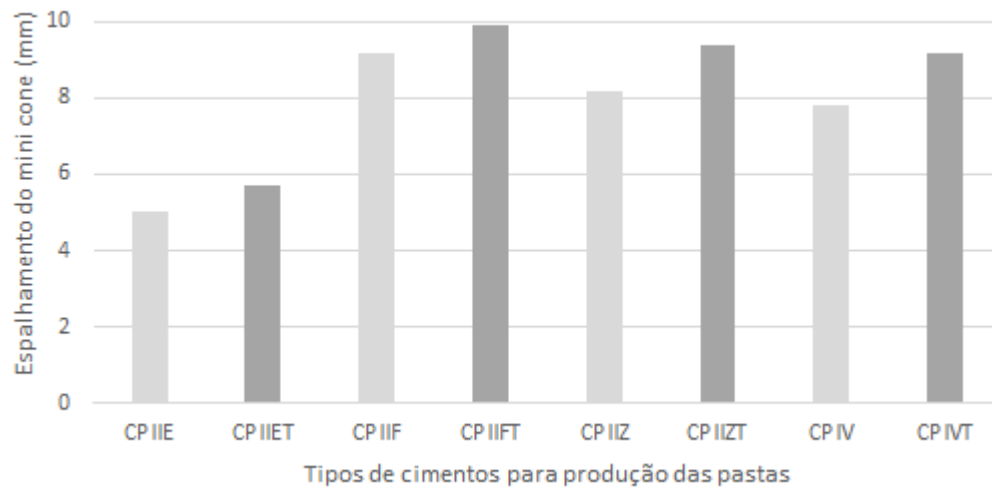
A terceira etapa do projeto piloto consistiu na aplicação do tratamento magnético sobre pastas de cimento Portland. Os ímãs foram dispostos simetricamente com polos alternados para o alinhamento das linhas de campo no interior na argamassadeira. O tratamento foi realizado com o mesmo aparato experimental desenvolvido para argamassas (ímãs permanentes na argamassadeira). O campo magnético medido na face de cada ímã foi de 5T e no interior da cuba da argamassadeira o campo magnético medido foi de 2,5T.

As pastas de cimento Portland foram dosadas e confeccionadas no Laboratório de Materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI no mesmo dia, preservando as condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar. A argamassadeira utilizada possui capacidade nominal de 5 litros de acordo com a norma ASTM C230 (ASTM, 2017).

Para a mistura das pastas foi empregado o seguinte procedimento na argamassadeira: mistura de 90% em peso de água com cimento sob velocidade baixa, durante 2 min; homogeneização manual em menos de 1 minuto; em seguida, foi adicionado o restante da água e misturado por mais 1 min, na mesma velocidade.

Para a das pastas de cimento Portland, foi analisado o ensaio de espalhamento do mini cone de abatimento (Kantro, 1980) conforme a figura 3.7

Figura 3.7 - Espalhamento das pastas de cimento Portland produzidas com e sem campo magnético



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Os resultados para o mini-cone de abatimento, para todos os cimentos CII-E, CII-F, CII-Z e CP-IV apresentaram maior medida de trabalhabilidade, maior fluidez determinada por espalhamento do mini cone de Kantro (1980). O resultado encontrado condiz com os resultados obtidos por outras pesquisas utilizando outras medidas de trabalhabilidade, por exemplo, abatimento de tronco de cone para concretos e mesa de abatimento para argamassas.

Durante as etapas I, II e III do piloto experimental, o campo magnético foi aplicado diretamente no momento das misturas dos concretos, argamassas e pastas de cimento Portland. As frações magnéticas³³ do agregado graúdo, miúdo e do cimento Portland, principalmente, no cimento Portland pozolânico foram separadas da mistura do material de base cimentícia. Esse efeito pode ser visualizado na figura 3.8.

Figura 3.8 - Suscetibilidade magnética dos agregados e do cimento Portland

³³ As investigações desse objeto de estudo podem ser encontradas na Tese: Active rheology control of cementitious materials using magnetic field do Dengwu Jiao (2021) na Ghent University. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8688855>.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

De acordo com Jiao et al. (2021), Farrell, Hover e Plumley, (1991) e Gomes et al. (1999), os cimentos pozolânicos apresentam maior suscetibilidade magnética o que resultaria em maiores abatimentos com o tratamento magnético com ímãs permanentes. O alinhamento das partículas responsivas ao campo magnético modificam as propriedades do estado fresco e endurecido dos materiais cimentícios mesmo após a remoção do campo magnético conforme a figura 3.8 (Jiao et al., 2019b).

Outras limitações como a garantia da área de contato efetiva do material cimentício com o campo magnético, a limitação do tempo de tratamento restrito ao tempo de mistura, a influência das condições ambientais e do operador motivaram a próxima etapa experimental com o tratamento magnético na água de amassamento.

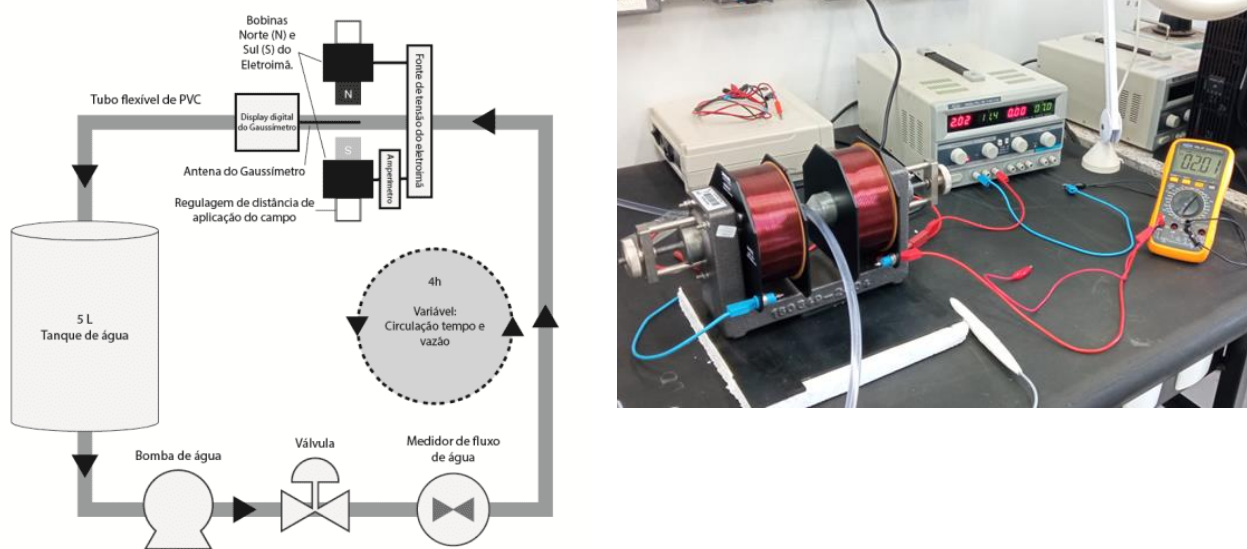
Etapa IV – Tratamento magnético aplicado sobre a água de amassamento

Na sequência, após realizar o tratamento magnético durante a mistura de concretos, argamassas e pastas de cimento Portland, definiu-se pelo estudo dos efeitos do campo magnético sobre a água de amassamento, uma vez que esta foi a forma de tratamento que se mostrou mais objetiva para alteração das propriedades dos materiais estudados.

O processo de tratamento da água adotado foi o de um campo magnético fixo, com um eletroímã tipo u, com sistema de circulação de água conforme figura 3.9. Nesta etapa, a água utilizada foi proveniente do abastecimento público, Sanepar, (água potável) utilizada usualmente na construção civil para produção de concretos e argamassas. O experimento foi realizado em temperatura ambiente, aproximadamente de 25°, e utilizou-se a tubulação para circulação da água de poliuretano na cor cristal com 8mm de diâmetro

nominal e bomba submersa com vazão de 180l/h e coluna máxima de 75cm.

Figura 3.9 – Diagrama esquemático e aparato experimental do processo de tratamento magnético da água



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Na figura 3.10 pode-se observar os equipamentos utilizados, sendo eles, um eletroímã da marca PHYWE® com 833 espiras e resistência de $2,66\Omega$ por bobina, de fabricação alemã, em forma de u, uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC) da marca POLITERM® modelo POL-16E com voltagem e amperagem máxima de 32V e 5A; um multímetro digital da marca POLITERM® de baixa impedância e um gaussímetro da marca SOONDA® (Teslâmetro) com exatidão de 5% e capacidade de mensuração de 200mT a 2000mT por meio de sonda Hall. Todos os materiais utilizados pertencem à Universidade Federal da Integração Latino Americana-UNILA.

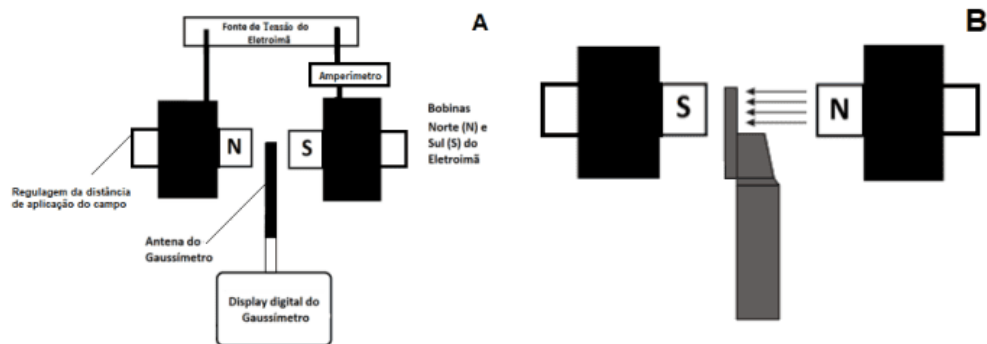
Figura 3.10 – A: Eletroímã; B: Fonte de alimentação (DC); C: Multímetro e D: Gaussímetro (com sensor Hall)



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

A calibração do campo magnético gerado pelo eletroímã foi realizada conforme o diagrama da figura 3.11. A partir da regulação da distância dos polos magnéticos, a intensidade da corrente fornecida pela fonte de alimentação (DC) foi aferida pelo multímetro na função de amperímetro e então procedeu-se à medição do campo gerado a partir do gaussímetro. Mediu-se o componente de indução eletromagnética com a sonda de Hall tangencial na vertical da placa portadora sendo possível reconhecer a direção do campo magnético. Ao decorrer do tratamento, foram monitorados periodicamente: a corrente, a voltagem, a temperatura do eletroímã e o campo magnético gerado.

Figura 3.11 – A: Montagem experimental e calibração do eletroímã e B: Medição do campo magnético com sensor Hall tangencial



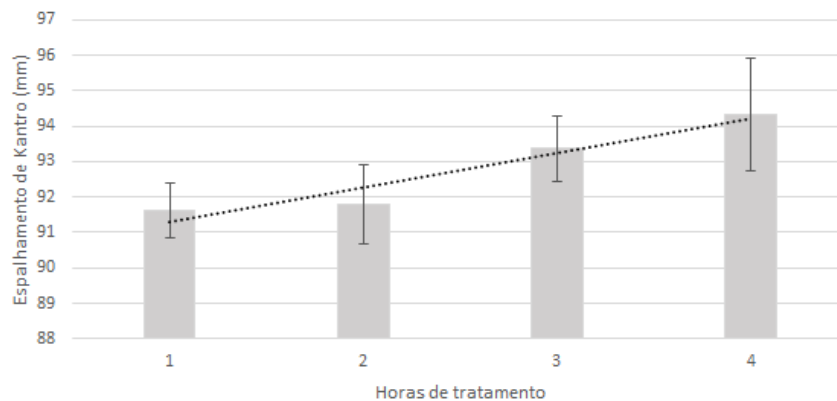
Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Definição do tratamento: Tempo e campo ótimo

O tempo de tratamento da água foi estabelecido através de uma série de tratamentos em campo fixo e tempo variável, entre uma e quatro horas. O campo fixo

aplicado para esta série de experimentos foi de 1,25T e a escolha do tempo ótimo se deu pela análise do ensaio de espalhamento do mini abatimento de cone (Kantro, 1980). Obteve-se uma relação linear, conforme mostra a figura 3.12, também observada por Seelent (2017)³⁴.

Figura 3.12 - Tempo ótimo para o tratamento com campo eletromagnético fixo em 1,25T



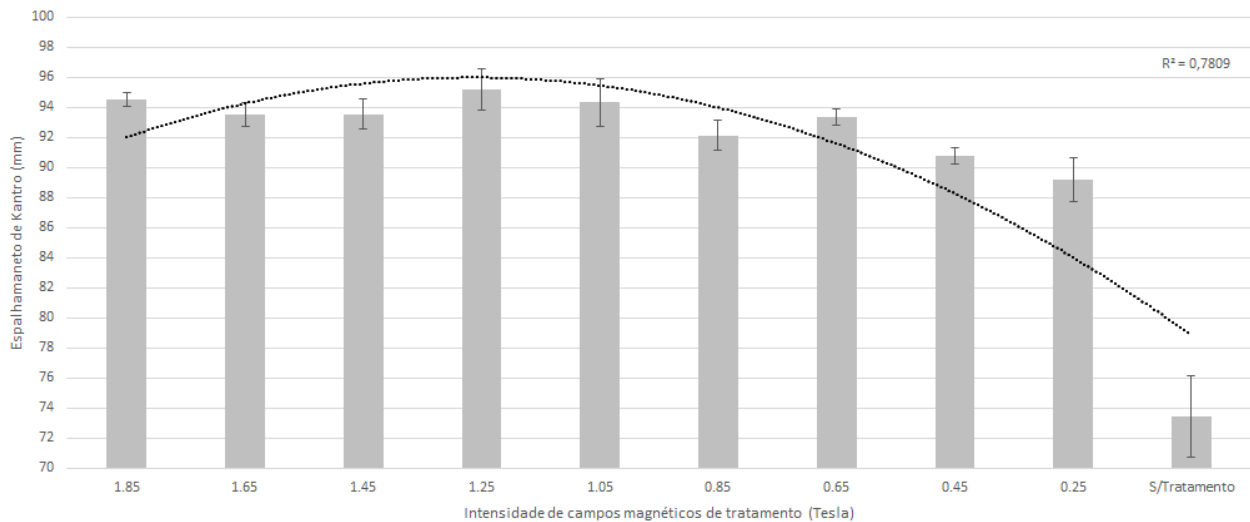
Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Nesta figura pode-se observar que o aumento do tempo de exposição da água ao campo magnético produz um aumento no diâmetro de espalhamento. O tempo de quatro horas foi estabelecido como tempo ótimo para a realização de nossa pesquisa, devido à limitação imposta pelo aquecimento do eletroímã, quando utilizado por maior período.

Para estabelecer a intensidade do campo eletromagnético que será utilizada nesta pesquisa, realizou-se o estudo com campos magnéticos variando entre 0,25T a 1,85T (Figura 3.13).

Figura 3.13 – Efeitos no mini-abatimento de vários campos magnéticos aplicado para o tratamento da água

³⁴ TCC UNILA: Água submetida a campo magnético: influência do tempo de exposição na resistência à compressão e trabalhabilidade de concretos e argamassas (Seelent, 2017)



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Na figura 3.8 pode-se observar que os maiores valores de espalhamento ocorreram para campos magnéticos de intensidade de 12,500 Gauss ou 1,25T, sendo este valor estabelecido o campo ótimo para nossa pesquisa. Investigações anteriores de Figueredo et al. (2019) determinaram que o campo ótimo estava entre 1T e 1,2T, similar ao valor ótimo observado por Su e Wu (2003) que ficou entre 0,8T e 1,2T. O ensaio do mini abatimento sem tratamento magnético da água apresentou o menor espalhamento.

3.2 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL

Foram estabelecidas, a partir da revisão bibliográfica, estudos anteriores realizados na UNILA^{35,36,37} e através do piloto experimental, as seguintes variáveis de estudo:

- a) A consideração de três relações água/cimento para as pastas confeccionadas (0,4; 0,5 e 0,6);
- b) Utilização de água destilada, deionizada e da rede de abastecimento público;
- c) Tratamento magnético da água, com aplicação de 1,25T por 4 horas

³⁵ TCC UNILA: Efeito dos diferentes tipos de cimentos em argamassas elaboradas com água submetida a um campo magnético (ANDREA; ANCI, 2017)

³⁶ TCC UNILA: Estudo da técnica de magnetização da água com eletroímã para produção de concreto (CLAUDIA BARBOSA, 2017)

³⁷ TCC UNILA: Água submetida a campo magnético: influência do tempo de exposição na resistência à compressão e trabalhabilidade de concretos e argamassas (SEELENT, 2017)

- no sistema recirculador com vazão de 180l/h;
- d) Grupo de controle sem tratamento para avaliar o efeito do tratamento magnético da água (0,4; 0,5 e 0,6).

Considerando as variáveis de estudo propostas acima, foram realizadas 18 diferentes pastas de cimentos.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para caracterização da água tratada antes e após a aplicação do campo magnético, o sistema de medição de bancada utilizado foi composto por uma célula potenciométrica de pH e outra de condutividade, composto por um eletrodo de hidrogênio e platina e outro eletrodo de referência Ag/AgCl. As medidas foram corrigidas em função da temperatura do ambiente 23°C.

Para formulação das pastas, o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) foi escolhido dentre os cimentos normatizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018) e disponível no mercado local.

O cimento foi caracterizado pelos ensaios de massa específica segundo NBR 16605 (ABNT, 2017), finura Blaine (ABNT, 1998), perda ao fogo (ABNT, 2004), massa unitária segundo Mattana (2013), granulometria à laser de acordo com ISO 13220 (ISO, 2009)⁶, área específica por BET de acordo com ISO 9277 (ISO, 2010)³⁸, espectrometria por difração de Raios-X (DRX) e espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) de acordo com a NBR 16137 (ABNT, 2016).

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Caracterização e Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA/PTI com exceção da espectrometria de difração de raios-X (DRX) que foi realizado no Laboratório de difração de Raios-X no Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas da UNILA e a espectrometria por fluorescência de Raios-X em laboratório externo à universidade³⁹.

O ensaio de granulometria a laser foi realizado em três amostras no equipamento da marca CILAS, modelo 1190, conforme a figura 3.14 (A). A faixa de leitura

³⁸ Norma de ensaio geral

³⁹ O ensaio de espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado na Universidade Federal de Goiás (UFG).

dos grãos compreende entre 0,04 e 2500 μm e são analisadas em líquido (água destilada), sem a presença de dispersante e com índice de obscuração de aproximadamente 25%.

O ensaio de área específica BET foi realizado no equipamento da marca Quantachrome, modelo NOVA 3200e conforme a figura 3.14 (B). O protocolo utilizado foi aquele proposto por SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, (2016) recomendando a desgaseificação da amostra de cimento (200mg) inserida no porta amostra de quartzo, empregando vácuo à 40°C por 16 horas. Após o processo de desgaseificação, a amostra foi submetida ao ensaio, no qual o porta amostra foi retirado do compartimento de desgaseificação, e a amostra foi submetida novamente ao vácuo e ao fluxo de nitrogênio, e imersa no nitrogênio líquido, onde o equipamento faz a leitura da amostra.

O equipamento utilizado para a análise térmica é da marca Percking Elmer, modelo STA 8000 conforme a figura 3.14 (C), disponível no Laboratório de caracterização e materiais e Dosagem (LADEMA) da UNILA/PTI, com faixa de leitura variando entre 15 e 1600 °C. Para o ensaio do cimento Portland, utilizou-se nitrogênio grau analítico (50 mL/minuto) como purga dos gases volatilizados. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/minuto entre 35 °C e 1.000 °C, em cadinho de alumina sem tampa. A massa média da amostra necessária foi de 50 mg.

A caracterização por difratometria de Raios X foi realizada em um difratômetro Empyrean de propósito múltiplo conforme a Figura 3.14 (D). A radiação utilizada foi de cobre K alfa, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, entre 10° e 80° de 2θ para identificação e quantificação de fases das amostras.

Figura 3.14 – A: Granulômetro à laser CILAS® 1190; B: Analisador de área superficial e poros QUANTACROMER® NOVA 3200e; C: Analisador térmico simultâneo PERKINELMER® STA 8000 e D: Difratômetro multipropósito EMPYREAN da PANalytical

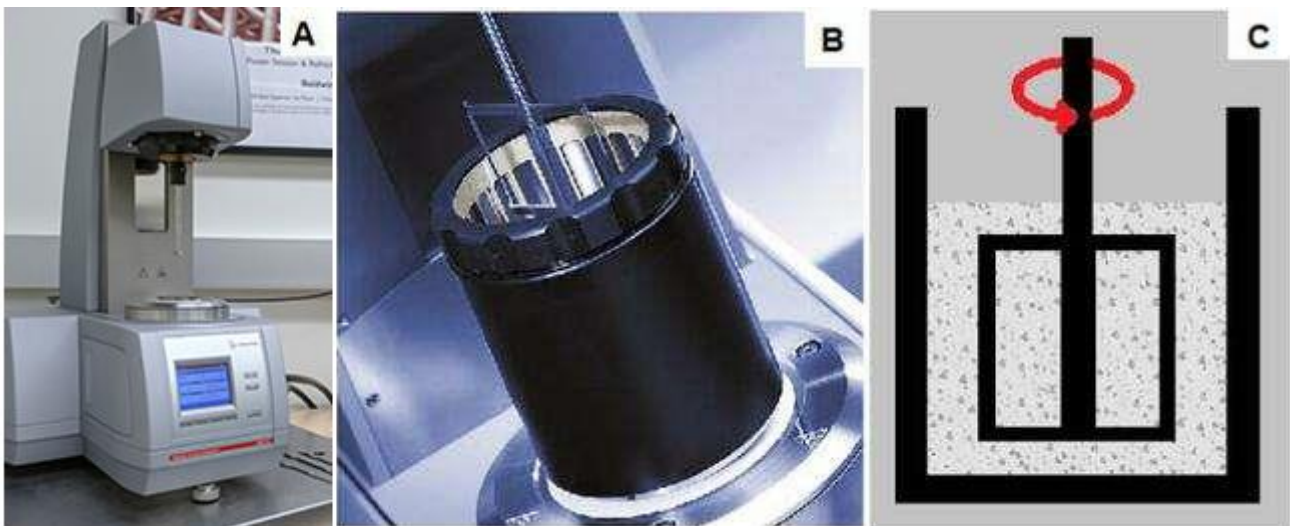


3.4 PASTAS DE CIMENTO PORTLAND – ESTADO FRESCO

O ensaio do mini abatimento ou *mini-slump* (Kantro, 1980) foi utilizado como medição indireta da consistência da pasta de cimento a partir da obtenção do raio médio de espalhamento e a análise por reometria rotacional de fluxo foi utilizada como medição direta da fluidez da pasta de cimento a partir da obtenção das curvas de fluxo de acordo com a ASTM C1749-17a⁴⁰ e ISO 3219 Parte 1 e 2 (2021) .

Para as análises por reometria de fluxo, foi utilizado o reômetro MCR 102 da Anton Paar® conforme a Figura 3.15 (A) com peça para materiais de construção⁴¹ (BMC 90) Figura 3.15 (B), esquematizada na figura 3.15 (C).

Figura 3.15 - A: Diagrama esquemático da reometria rotacional B: Célula de materiais de construção (BMC 90) – Agitador (ST59-2V), copo (BMC90) e placa de revestimento (P-PTD200/80/I) C: Reômetro MCR 102 Anton Paar®



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

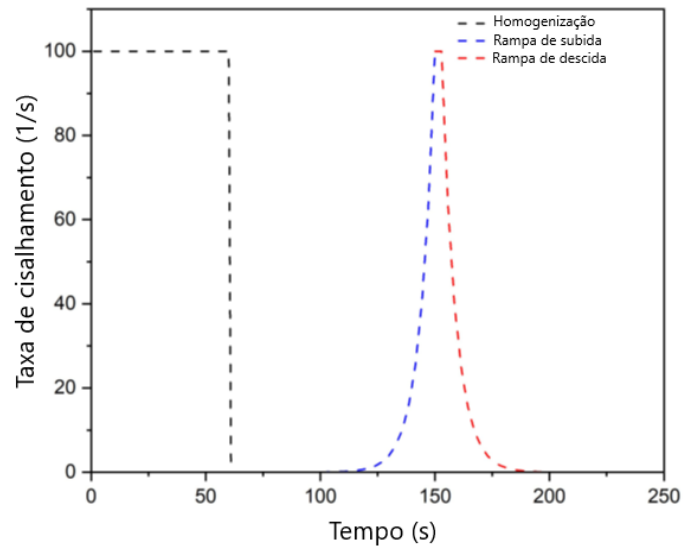
Para esse tipo de análise, são indicados os testes rotacionais que controlam a taxa de cisalhamento, CSR (Controlled Shear Rate) de acordo com a norma ISO 3219 (ISO, 1993). Para determinação da faixa de trabalho da taxa de cisalhamento e do conjunto copo e geometria de medição “ST59 stirrer” foi adaptado o protocolo de três passos baseado em Muzenda et al (2020) e Peng et. al. (2014). O protocolo inicia com uma homogeneização inicial

⁴⁰ ASTM C1749-17a Standard Guide for Measurement of the Rheological Properties of Hydraulic Cementious Paste Using a Rotational Rheometer. Norma geral para medir as propriedades reológicas de pasta de cimento fresco.

⁴¹ A célula de materiais de construção (BMC 90) permite medições em materiais cimentícios com partículas de tamanho até 5mm, ideal para caldas, pastas, contrapisos, argamassas e concretos de materiais a base de cimento Portland ou materiais a base de gipsita.

seguido de uma rampa de subida e descida logarítmica, de acordo com a figura 3.16. Os dados para as regressões de Bingham e Herschel–Bulkley são obtidos a partir das curvas descendentes.

Figura 3.16 - Protocolo para medição de reometria de fluxo em três passos



Fonte: Adaptado de Muzenda et al (2020) e Peng et. al. (2014)

3.5 ARTIGO

As etapas da metodologia experimental do trabalho, incluindo a caracterização dos materiais, ensaios realizados e principais resultados do desenvolvimento do estudo, acrescidos das análises pertinentes estão apresentadas em forma de artigo conforme consta no Capítulo 4 – Resultados e Discussão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5 CONCLUSÕES

Este tópico apresenta as principais considerações sobre os resultados obtidos neste trabalho. Adicionalmente, propõe-se algumas sugestões para novos trabalhos.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efeito físico-químico na água foi avaliado por medição de pH e condutividade. Houve um ligeiro aumento no pH e na condutividade com o tratamento magnético.

A avaliação do comportamento reológico das misturas foi feita por meio de um reômetro e analisadas as curvas ascendente e descendente a partir da reologia de fluxo. A modelagem reológica levou em consideração apenas a curva descendente para os ajustes dos modelos de *Bingham* e de *Herschel-Bulkley*. Dentre os fatores analisados, o tratamento magnético da água impactou a reologia das pastas de cimento. Foi observado o aumento da tensão de cisalhamento independente do tipo da água (deionizada, destilada e de abastecimento). Como resultado do tratamento magnético, um aumento na área tixotrópica foi observado para todos os casos e um aumento na viscosidade plástica também para todas as relações água/cimento. O aumento da relação água/cimento influenciou os parâmetros medidos de forma muito mais significativa do que o tratamento magnético. O método de ensaio utilizado não foi capaz de analisar os efeitos do tratamento magnético para as relações água/cimento de 0,4 e 0,6, acredita-se que este resultado se deva mais à geometria do equipamento do que propriamente ao tratamento magnético.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há diversos trabalhos que analisam o tratamento magnético da água aplicado aos materiais cimentícios, mas ainda há poucas pesquisas e entendimento mais aprofundado sobre os mecanismos de ação nas propriedades dos materiais cimentícios. Devido a necessidade de definir um roteiro experimental limitado pelo tempo do mestrado e compatível com a estrutura disponível na UNILA, alguns tópicos não foram explorados em todo seu potencial. Dessa forma, seguem algumas sugestões para desenvolvimento de pesquisas no tema:

- Desenvolvimento de um sistema de tratamento magnético da água eficiente para construção civil: para que seja viável o uso em grande escala (em centrais de concreto ou estação de bombeamento, por exemplo) é necessário estudar uma forma mais eficiente de tratamento do que a proposta no trabalho (eletroímã).
- A investigação da durabilidade dos materiais cimentícios produzidos com água tratada com campo magnético: Apesar dos resultados da reologia e termogravimetria da pasta de cimento indicar avanço no grau de hidratação, o que tende a melhorar a durabilidade, ensaios avaliativos de durabilidade não foram realizados, tais como migração de íons cloretos, carbonatação, ataques de sulfatos, entre outros.
- A interação do tratamento magnético da água com aditivos: no presente trabalho, não foi avaliado o emprego de aditivos. Para a utilização do tratamento magnético da água nos materiais cimentícios em grande escala, é necessário avaliar a interação do tratamento com os aditivos empregados em concretos, tais como plastificantes, superplastificantes, polifuncionais, incorporadores de ar, modificadores de pega, impermeabilizantes, hidrofugantes, entre outros.
- Uso de outros tipos de cimento: cimentos com características distintas do utilizado podem resultar em comportamento diferenciado do observado. Diferentes comportamentos no estado fresco, ocorrência de maior ou menor atividade pozolânica, presença de pozolanas com maior suscetibilidade magnética (maior resposta a aplicação do campo magnético externo).

REFERÊNCIAS

- ABDELHADY, R. S. *et al.* An empirical model for salt removal percentage in water under the effect of different current intensities of current carrying coil at different flow rates. **Journal of Advanced Research**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 351–355, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2011.01.009>.
- ADETUNJI ALABI, A MATTEO CHIESA, b C. G. and G. P. Advances in Anti-scale Magnetic Water Treatment. **Environmental Science: Water Research & Technology**, [s. l.], v. 00, p. 19, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1039/C5EW00052A>
- AFSHIN, H.; GHOLIZADEH, M.; KHORSHIDI, N. Improving Mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology. **Scientia Iranica**, [s. l.], v. 17, n. 1 A, p. 74–79, 2010.
- AHMED, H. I. Behavior of magnetic concrete incorporated with Egyptian nano alumina. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 150, p. 404–408, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.022>
- AHMED, S. M.; MANAR, D. F. Effect of static magnetic field treatment on fresh concrete and water reduction potential. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 14, p. e00535, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00535>
- ALI, Y. *et al.* Magnetic Water Treatment in Environmental Management: A Review of the Recent Advances and Future Perspectives. **Current World Environment**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 1008–1016, 2014. Available at: <https://doi.org/10.12944/cwe.9.3.56>
- AIHUA, D.; HUIMIN, H.; WENJIN, J. Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation in the Presence of Foreign Ions. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 556, p. 649–656, 2012. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.649>
- AKAMATSU, M. *et al.* Numerical Prediction on Heat Transfer Phenomenon in Paramagnetic and Diamagnetic Fluids Under a Vertical Magnetic Field Gradient. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 1674–1681, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1109/TASC.2004.831033>
- AL-QAHTANI, H. Effect of magnetic treatment on Gulf seawater. **Desalination**, [s. l.], v. 107, n. 1, p. 75–81, 1996. Available at: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(96\)00152-X](https://doi.org/10.1016/0011-9164(96)00152-X)

ALABI, A. *et al.* Advances in anti-scale magnetic water treatment. **Environmental Science: Water Research and Technology**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 408–425, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1039/c5ew00052a>

ALI EBRAHIM, S.; AZAB, A. E. Biological Effects of Magnetic Water on Human and Animals. **Biomedical Sciences**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 78, 2017. Available at: <https://doi.org/10.11648/j.bs.20170304.12>

ALIMI, F. *et al.* Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions. **Surface Engineering and Applied Electrochemistry**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 56–62, 2009. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>

AMIRI, M. C.; DADKHAH, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 278, n. 1–3, p. 252–255, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>

AMOR, H. Ben *et al.* Effect of Magnetic Treatment on Surface Tension and Water Evaporation. **International Journal of Advance Industrial Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 119–124, 2013. Available at: <https://doi.org/10.14741/ijae/5.3.4>

ANIS, S. F.; HASHAIKEH, R.; HILAL, N. Functional materials in desalination: A review. **Desalination**, [s. l.], v. 468, p. 114077, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114077>

BANFILL, P. F. G. **Rheology Of Fresh Cement And Concrete**. In: *Rheology Reviews* 2006. London: The British Society of Rheology, 2006. p. 61–130.

BIKUL, G.; RUCHINSKENE, A.; DENINIS, V. Corrosion Behavior of Low-Carbon Steel in Tap Water Treated with Permanent Magnetic Field. **Protection of Metals**, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 492–496, 2003.

BAKER, J. S.; JUDD, S. J. Magnetic amelioration of scale formation. **Water Research**, [s. l.], v. 30, n.2, p.247–260, 1996. Available at: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00184-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00184-0)

BEDNARZ, T. P. *et al.* Effects of a transverse, horizontal magnetic field on natural

convection of a paramagnetic fluid in a cube. **International Journal of Thermal Sciences**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 26–33, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.011>

Betioli, A. M., John, V. M., Gleize, P. J. P., & Pileggi, R. G.. (2009). **Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares**. *Ambiente Construído*, 9(4), 37–48. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212009000400516>

BEN AMOR, H. *et al.* Characteristic study of some parameters of soil irrigated by magnetized waters. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 13, n. 19, p. 1007, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06015-0>

BIDEGAIN, J. C.; SINITO, A. M.; RODRIGUEZ, M. E. Remanent magnetization in Portland-cement-based materials. **Studia Geophysica et Geodaetica**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 289–302, 1999. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1023346711700>

BRAITHWAITE, D.; BEAUGNON, E.; TOURNIER, R. Magnetically controlled convection in a paramagnetic fluid. **Nature**, [s. l.], v. 354, n. 6349, p. 134–136, 1991. Available at: <https://doi.org/10.1038/354134a0>

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo, SP: Pearson, 2008.

BUCHACHENKO, A. Why magnetic and electromagnetic effects in biology are irreproducible and contradictory? **Bioelectromagnetics**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 1–13, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1002/bem.21947>

BHATTACHARJEE, A. *et al.* Comparative study of the microstructural and magnetic properties of fly ashes obtained from different thermal power plants in West Bengal, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 185, n. 10, p. 8673–8683, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-013-3203-6>.

CAI, R. *et al.* The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. **Journal of Molecular Structure**, [s. l.], v. 938, n. 1–3, p. 15–19, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037>

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto

desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, 57, 63-75, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000100009>

CEFALAS, A. C. *et al.* Magnetic Field Trapping in Coherent Antisymmetric States of Liquid Water Molecular Rotors. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 1800–1805, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1166/jctn.2010.1544>

CEFALAS, A. C. *et al.* Nanocrystallization of CaCO₃ at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 254, n. 21, p. 6715–6724, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.056>

CHANG, K.-T.; WENG, C.-I. An investigation into the structure of aqueous NaCl electrolyte solutions under magnetic fields. **Computational Materials Science**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 1048–1055, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.02.020>

CHANG, K.-T.; WENG, C.-I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 100, n. 4, p. 043917, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.2335971>

CHAPLIN, M. Theory vs Experiment : What is the Surface Charge of Water ? **Water**, [s. l.], v. 1, n. July, p. 1–28, 2009. Available at: <https://doi.org/10.14294/WATER.2009.2>

CHAPLIN, M. F. Water: its importance to life. **Biochemistry and Molecular Biology Education**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 54–59, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1539-3429.2001.tb00070.x>

CHIBOWSKI, E.; HOTYSZ, L.; SZCZESÍ, A. Time dependent changes in zeta potential of freshly precipitated calcium carbonate. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 222, n. 1–3, p. 41–54, 2003. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00232-2)

CHIBOWSKI, Emil *et al.* Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 225, n. 1–3, p. 63–73, 2003. Available at: <https://doi.org/10.1016/S0927->

7757(03)00133-X

CHIBOWSKI, Emil; HOŁYSZ, L.; SZCZEŚ, A. Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. **Water Research**, [s. l.], v. 37, n. 19, p. 4685–4692, 2003. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.07.001>

CHIBOWSKI, Emil; HOTYSZ, L. Changes in zeta potential of TiO₂ and CaCO₃ suspensions treated with a radiofrequency electric field as measured with a ZetaPlus instrument. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 105, p. 211–220, 1995. Available at: [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03321-1](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03321-1)

CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ, A. Magnetic Field Effects on Aqueous Anionic and Cationic Surfactant Solutions Part I: Water Evaporation. **Edelweiss Chemical Science Journal**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 7–13, 2019. Available at: <https://doi.org/10.33805/2641-7383.108>

CHIBOWSKI, Emil; SZCZEŚ, A.; HOŁYSZ, L. Influence of Magnetic Field on Evaporation Rate and Surface Tension of Water. **Colloids and Interfaces**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 68, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/colloids2040068>

CHIBOWSKI, E.; SZCZEŚ, A. Magnetic water treatment—A review of the latest approaches. **Chemosphere**, [s. l.], v. 203, p. 54–67, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653518305836>.

CHIBULU, C. *et al.* Active stiffening control by magnetically induced blocking in confined flow of fly ash pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 313, n. July, p. 125485, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125485>

Chhabra R. P and J. F Richardson. 2008. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology : Engineering Applications** (version 2nd edition). 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann/Elsevier.

COEY, J. M. D. Magnetic water treatment – how might it work? **Philosophical Magazine**, [s. l.], v. 92, n. 31, p. 3857–3865, 2012. Available at:

<https://doi.org/10.1080/14786435.2012.685968>

COEY, J. M. .; CASS, S. Magnetic water treatment. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [s. l.], v. 209, n. 1–3, p. 71–74, 2000. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00648-4)

COLIC, M.; MORSE, D. Effects of Amplitude of the Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Aqueous Suspensions and Solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 200, n. 2, p. 265–272, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5367>

COLIC, M.; MORSE, D. The elusive mechanism of the magnetic ‘memory’ of water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 154, n. 1–2, p. 167–174, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00894-2](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00894-2)

COSTIN, G.-E.; A. BIRLEA, S.; A. NORRIS, D. Trends in Wound Repair: Cellular and Molecular Basis of Regenerative Therapy Using Electromagnetic Fields. **Current Molecular Medicine**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 14–26, 2011. Available at: <https://doi.org/10.2174/156652412798376143>

Coussot, P., Wagner, N.J. **The future of suspension rheophysics: comments on the 2008 workshop**. *Rheol Acta* 48, 827–829 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00397-009-0380-x>

CHIBULU, C. *et al.* Active stiffening control by magnetically induced blocking in confined flow of fly ash pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 313, n. November, p. 125485, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125485>

CHOI, M. S. *et al.* Effects of an externally imposed electromagnetic field on the formation of a lubrication layer in concrete pumping. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 61, p. 18–23, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.071>

DEMICHELI, R. *et al.* Stable prenucleation mineral clusters are liquid-like ionic polymers. **Nature Communications**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 590, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1038/ncomms1604>

DENG, A. H.; HUANG, H. M.; JI, W. J. Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation in the Presence of Foreign Ions. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 554–556, p. 649–656, 2012. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.649>

DERKANI, M. H. *et al.* Mechanisms of Surface Charge Modification of Carbonates in Aqueous Electrolyte Solutions. **Colloids and Interfaces**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 62, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3390/colloids3040062>

DUEÑAS, J. A. *et al.* Magnetic influence on water evaporation rate: an empirical triadic model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [s. l.], v. 539, n. August, p. 168377, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168377>

EBRAHIMI JOUZDANI, B.; REISI, M. Effect of magnetized water characteristics on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 242, p. 118196, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118196>

ESMAEILNEZHAD, E. *et al.* Characteristics and applications of magnetized water as a green technology. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 161, p. 908–921, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.166>

FARRELL, Charles W.; HOVER, Kenneth C.; PLUMLEY, Peter W. Natural remanent magnetization of Portland cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 489–495, 1991a. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90098-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90098-3)

FARRELL, Charles W.; HOVER, Kenneth C.; PLUMLEY, Peter W. Natural remanent magnetization of Portland cement paste and mortar. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 32–37, 1991b. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472678>

FAUNCE, A. B.; CABELL, S. G. **ELECTRIC MEANS POR PREVENTING BOLER IN CRUSTATION Patent N°. 438,579**. Concessão: 1890.

FERRARIS, C.F. **Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology Volume 104, Number 5, September–October 1999

FORNALIK, E. *et al.* Effect of a magnetic field on the convection of paramagnetic fluid in unstable and stable thermosyphon-like configurations. **International Journal of Heat and**

Mass Transfer, [s. l.], v. 49, n. 15–16, p. 2642–2651, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.11.034>

GABRIELLI, C. Magnetic water treatment for scale prevention. **Water Research**, [s. l.], v. 35, n.13, p.3249–3259, 2001. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00010-0)

GEBAUER, D.; CÖLFEN, H. Prenucleation clusters and non-classical nucleation. **Nano Today**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 564–584, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.10.005>

GEBAUER, D.; VÖLKEL, A.; CÖLFEN, H. Stable Prenucleation Calcium Carbonate Clusters. **Science**, [s. l.], v. 322, n. 5909, p. 1819–1822, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1164271>

GHAURI, S. A.; ANSARI, M. S. Increase of water viscosity under the influence of magnetic field. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 100, n. 6, p. 066101, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.2347702>

GOMES, S. *et al.* Characterization of magnetite in silico-aluminous fly ash by SEM, TEM, XRD, magnetic susceptibility, and Moessbauer spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 1705–1711, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00133-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00133-7)

GOMES, S.; FRANÇOIS, M. Characterization of mullite in silicoaluminous fly ash by XRD, TEM, and ²⁹Si MAS NMR. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 175–181, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00226-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00226-4)

GONCHARUK, V. V *et al.* Crystalization of Calcium Carbonate in Magnetized Water in the Presence of Ions of Iron and Manganese. **Journal of Water Chemistry and Technology**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 160–163, 2011. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1063455X11030052>

GONCHARUK, V. V *et al.* Crystallization of calcium carbonate in magnetic water in the presence of paramagnetic substances. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 81, n. 12, p. 2108–2111, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1070427208120124>

GOPALAKRISHNAN, R.; BARATHAN, S.; GOVINDARAJAN, D. Magnetic Susceptibility

Measurements on Fly Ash Admixture Cement Hydrated with Groundwater and Seawater. **American Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 32–36, 2012. DOI: 10.5923/j.materials.20120201.06

GOVINDARAJAN, D.; GOPALAKRISHNAN, R. Magnetic susceptibility measurements on metakaolin admixture cement hydrated with ground water and sea water. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 349–354, 2009. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S1674-4799\(09\)60063-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60063-7).

GHORBANI, S. *et al.* Using statistical analysis and laboratory testing to evaluate the effect of magnetized water on the stability of foaming agents and foam concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 207, p. 28–40, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.098>

GHORBANI, S.; GHOLIZADEH, M.; DE BRITO, J. Effect of magnetized water on the mechanical and durability properties of concrete block pavers. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1–16, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma11091647>

GREEN, H.; WELTMANN, R.N. Equations of thixotropic breakdown for rotational viscometer. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, v. 18, n. 3, 167- 172. 1946. DOI: <https://doi.org/10.1021/i560151a004>

GUO, Y. Z. *et al.* Evaporation rate of water as a function of a magnetic field and field gradient. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 16916–16928, 2012. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms131216916>

H, G. A.; NIKMANESH, E. The Effect of Magnetic Field on Total Dissolved Solid of Water. **Research Journal of Chemistry and Environment**, [s. l.], v. 17, n. 9, 2013.

HIGASHITANI, K. *et al.* Effects of a Magnetic Field on the Formation of CaCO₃ Particles. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 156, n. 1, p. 90–95, 1993a. Available at: <https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1085>

HOLYSZ, L.; CHIBOWSKI, E.; SZCZEŚ, A. Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. **Water Research**, [s. l.], v. 37, n. 14, p. 3351–3360, 2003. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00159-3)

HOLYSZ, L.; SZCZES, A.; CHIBOWSKI, E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 316, n. 2, p. 996–1002, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.08.026>

HU, H. X.; DENG, C. Effect of magnetized water on the stability and consolidation compressive strength of cement grout. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 1–18, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma14020275>

HU, H. XIAO; DENG, C.; CHEN, W. The effect of magnetization conditions on the stability of cement grout. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. October 2021, p. e01016, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01016>

IWASAKA, M.; UENO, S. Structure of water molecules under 14 T magnetic field. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 83, n. 11, p. 6459–6461, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.367737>

JARNY, S. et al. Modelling thixotropic behavior of fresh cement pastes from mri measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 616 – 623. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.001>

JHA, P. et al. An Overview on Magnetic Field and Electric Field Interactions with Ice Crystallisation; Application in the Case of Frozen Food. **Crystals**, [s. l.], v. 7, n. 10, p. 299, 2017. Available at: <https://doi.org/10.3390/cryst7100299>

JIAO, D. et al. Possibilities of fly ash as responsive additive in magneto-rheology control of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 296, p. 123656, 2021a. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123656>

JIAO, D. et al. Rheological behavior of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field: Magneto-rheological responses and conceptual calculations. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 120, n. March, p. 104035, 2021b. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104035>

JIAO, D. et al. Rheological properties of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field: Flow curve and nanoparticle agglomeration. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 22, p. 1–15, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13225164>

JIAO, D. et al. Structural evolution of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field - Effect of concentration and particle size of nano-Fe₃O₄. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 120, n. March, p. 104036, 2021c. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104036>

LIN, L. et al. A critical review of the application of electromagnetic fields for scaling control in water systems: mechanisms, characterization, and operation. **npj Clean Water**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 25, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41545-020-0071-9>.

LIPUS, L. C.; ACKO, B.; HAMLER, A. Magnetic device simulation modelling and optimisation for scale control. **International Journal of Simulation Modelling**, [s. l.], v. 11,

n. 3, p. 141–149, 2012. DOI:10.2507/IJSIMM11(3)3.205

KANEDA, M. *et al.* Natural convection of paramagnetic fluid along a vertical heated wall under a magnetic field from a single permanent magnet. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [s. l.], v. 502, n. November 2019, p. 166574, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166574>

KENJEREŠ, S. *et al.* Inversion of flow and heat transfer of the paramagnetic fluid in a differentially heated cube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 151, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119407>

KNEY, A. D.; PARSONS, S. A. A spectrophotometer-based study of magnetic water treatment: Assessment of ionic vs. surface mechanisms. **Water Research**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 517–524, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.019>

KOBE, S. *et al.* Control over nanocrystalization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. **Materials Science and Engineering: C**, [s. l.], v. 23, n. 6–8, p. 811–815, 2003. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2003.09.136>

KOBE, S. *et al.* Nucleation and crystallization of CaCO₃ in applied magnetic fields. **Crystal Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 3–4, p. 243–253, 2002. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1463-0184\(02\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S1463-0184(02)00035-7)

KOBE, Spomenka *et al.* The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [s. l.], v. 236, n. 1–2, p. 71–76, 2001. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2)

KOZIC, V. *et al.* Laboratory measurements on magnetic water treatment device. *In*: , 2000. **IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)**. [S. l.]: IEEE, 2000. p. 2190–2193. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON.2001.975633>

KRASZEWSKA, A.; PYRDA, L.; DONIZAK, J. High magnetic field impact on the natural

convection behaviour of a magnetic fluid. **Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 54, n. 8, p. 2383–2394, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2153-x>

KREMS, R. V. Breaking van der Waals Molecules with Magnetic Fields. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 013201, 2004a. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.013201>

KUKIER, U. *et al.* Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 123, n. 2, p. 255–266, 2003. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00376-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00376-7)

KARIMIPOUR, A.; EDALATI, M.; DE BRITO, J. Influence of magnetized water and water/cement ratio on the properties of untreated coal fine aggregates concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 122, p. 104121, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104121>

KHREEF, S. M.; ABBAS, Z. K. The effects of using magnetized water in reactive powder concrete with different curing methods. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 1067, n. 1, p. 012017, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1067/1/012017>

LA LUMIA, F. *et al.* Preparation and co-dispersion of TiO₂-Y₂O₃ suspensions through the study of their rheological and electrokinetic properties. **Ceramics International**, [s. l.], v. 45, n. 3, p. 3023–3032, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.123>

LIPUS, L. C.; AČKO, B.; HAMLER, A. Electromagnets for high-flow water processing. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 50, n. 9, p. 952–958, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.07.004>

LIPUS, L. C.; DOBERSEK, D. Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 62, n. 7, p. 2089–2095, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.051>

LIU, Y.-Q. *et al.* Improved biological wastewater treatment and sludge characteristics by applying magnetic field to aerobic granules. **AIMS Bioengineering**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 412–424, 2016. Available at: <https://doi.org/10.3934/bioeng.2016.4.412>

LIU, Z. *et al.* Study on the effect of magnesium ion on the crystal phase of calcium carbonate. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 556, p. 35–38, 2012. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.35>

LUBOMSKA, M.; CHIBOWSKI, E. Effect of Radio Frequency Electric Fields on the Surface Free Energy and Zeta Potential of Al₂O₃. **Langmuir**, [s. l.], v. 17, n. 14, p. 4181–4188, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1021/la001068v>

LYKLEMA J. **Fundamentals of Interface and Colloid Science**. Vol. IV : Particulate Colloids. Amsterdam: Elsevier, 2005. 750 p.

MACADAM, J.; PARSONS, S. A. Calcium carbonate scale formation and control. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 159–169, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11157-004-3849-1>

MARTINEZ-BOUBETA, C.; SIMEONIDIS, K. Magnetic Nanoparticles for Water Purification. *In*: NANOSCALE MATERIALS IN WATER PURIFICATION. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 521–552. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813926-4.00026-4>.

MGHAIQUINI, R. *et al.* Physicochemical property monitoring of magnetized water by impedance and dielectric spectroscopy in the kinetic condition. **International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. 91–104, 2020. Disponível em: <http://www.science-gate.com/IJAAS/2020/V7I8/1021833ijaas202008010.html>.

MGHAIQUINI, R. *et al.* Elaboration and physico-mechanical characterization of a new eco-mortar composite based on magnetized water and fly ash. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 225–254, 2020. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/119816>

MGHAIQUINI, R. *et al.* The Electromagnetic Memory of Water at Kinetic Condition. **International Journal of Current Engineering and Technology**, [s. l.], v. 10, n. 01, p. 11–18, 2021. Disponível em: <http://inpressco.com/the-electromagnetic-memory-of-water-at-kinetic-condition/>.

MALATHY, R; KARUPPASAMY, N.; BARANIDHARAN, S. Effect of Magnetic Water on Mixing and Curing of M 25 Grade Concrete. **International Journal of ChemTech Research**, v. 10, n. 11, p. 131–139, 2017.

MALATHY, R.; NARAYANAN, K.; MAYAKRISHNAN, P. Performance of prestressed concrete beams using magnetic water for concrete mixing. **Journal of Adhesion Science**

and Technology, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 666–684, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1936383>

MARDONOV, U. INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON THE VISCOSITY COEFFICIENT OF LUBRICOOLANT THAT IS USED IN THE CUTTING PROCESS. **International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics**, [s. l.], v. i, n. 8, 2020. Available at: <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue8.50>

MEZGER, T. G. **The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers**. 2nd ed. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co KG, 2006. 303 p.

MEZGER, T.G. **The rheology handbook**. 4th ed. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co KG, 2014. 432 p.

MEZGER, T. G. **Reologia aplicada**. 1st ed. Graz: Anton Paar GmbH, 2018. 196 p.

Jan MEWIS, Norman J. WAGNER. **Current trends in suspension rheology**, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Volume 157, Issue 3, 2009, Pages 147-150, ISSN 0377-0257, <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.11.004>.

MOSIN, O.; IGNATOV, I. Basic Concepts of Magnetic Water Treatment. **European Journal of Molecular Biotechnology**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 72–85, 2014. Available at: <https://doi.org/10.13187/ejmb.2014.4.72>

NAKAGAWA, J. *et al.* Magnetic field enhancement of water vaporization. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 86, n. 5, p. 2923–2925, 1999. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.371144>

NAKAMURA, H. *et al.* Magnetically Controlled Convection in a Diamagnetic Fluid. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 94, n. 14, p. 144501, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.144501>

NAKAYAMA, M. *et al.* Liquid-crystalline calcium carbonate: biomimetic synthesis and alignment of nanorod calcite. **Chemical Science**, [s. l.], v. 6, n. 11, p. 6230–6234, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1039/c5sc01820j>

NAIR, S. D.; FERRON, R. D. Set-on-demand concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 57, p. 13–27, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.001>

OLAFUR Haraldsson Wallevik, JON Elvar Wallevik, **Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes**, *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 12, 2011, Pages 1279-1288, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>.

OSHITANI, J. *et al.* Magnetic Effect on Ion-Exchange Kinetics. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 210, n. 1, p. 1–7, 1999. Available at: <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5952>

OTSUKA, I.; OZEKI, S. Does Magnetic Treatment of Water Change Its Properties? **The Journal of Physical Chemistry B**, [s. l.], v. 110, n. 4, p. 1509–1512, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1021/jp056198x>

PANG, X.; DENG, B. Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field. **Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy**, [s. l.], v. 51, n. 11, p. 1621–1632, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11433-008-0182-7>

POUGET, E. M. *et al.* The Initial Stages of Template-Controlled CaCO₃ Formation Revealed by Cryo-TEM. **Science**, [s. l.], v. 323, n. 5920, p. 1455–1458, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1169434>

PYRDA, L. *et al.* An analysis of unsteady thermal convection of paramagnetic fluid in cubical enclosure under strong magnetic field gradient. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 395, n. 1, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/395/1/012125>

PRESUEL-MORENO, F. J.; SAGÜÉS, A. A. Bulk magnetic susceptibility measurements for determination of fly ash presence in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 95–101, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.004>.

RODGERS, C. T. Magnetic field effects in chemical systems. **Pure and Applied Chemistry**, [s. l.], v. 81, n. 1, p. 19–43, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-08-10-18>

ROUSSEL, N. et al. **The origins of thixotropy of fresh cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, 148–157. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.004>

ROMANO, R.C.O.; CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G. **Propriedades do Concreto no Estado Fresco**. In: ISAIA, G.C. (ed) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 453-500, 2011.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. **A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow**. *Cement and Concrete Research*, Elmsford , v. 34, n. 3, p. 363- 371, Mar. 2004.

SAKANO, Victor Keniti. **Métodos avançados para avaliação da natureza reológica de suspensões concentradas aplicados ao escoamento pós-colapso de barragens de rejeito**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Université de São Paulo, São Paulo, 2022. doi:10.11606/T.3.2022.tde-11072022-103548.

SAKSONO, N. *et al.* Effects of magnetic field on calcium carbonate precipitation: Ionic and particle mechanisms. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 1145–1150, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11814-008-0188-x>

SAKSONO, N. *et al.* EFFECTS OF pH ON CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION UNDER MAGNETIC FIELD. **MAKARA of Technology Series**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 79–85, 2010. Available at: <https://doi.org/10.7454/mst.v13i2.479>

SALMAN, M. A.; SAFAR, M.; NUWAIBIT, G. A.-. The Effect of Magnetic Treatment on Retarding Scaling Deposition. **The Online Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 62–77, 2015. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tojsat/issue/22630/241817>

SAMMER, M. *et al.* Strong gradients in weak magnetic fields induce DOLLOP formation in tap water. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 1–19, 2016. Available at:

<https://doi.org/10.3390/w8030079>

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Tradução e adaptação: Mothé, C. G. et al. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 237 p.

STEFFE, J. F. . **Rheological methods in food process engineering**. (2^a ed.) USA: East Lansing, Michigan: Freeman Press, p. 418. 1996.

SHCHERBAKOV, I. A. *et al.* Influence of a Constant Magnetic Field on Some Properties of Water Solutions. **Doklady Physics**, [s. l.], v. 65, n. 8, p. 273–275, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028335820080078>

SHI, E. *et al.* Non-uniform magnetic field impact on thermomagnetic convection of paramagnetic air in a permanent magnet-inserted horizontal annulus. **European Physical Journal Plus**, [s. l.], v. 136, n. 2, p. 1–19, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01136-1>

SILVA, I. B.; QUEIROZ NETO, J. C.; PETRI, D. F. S. The effect of magnetic field on ion hydration and sulfate scale formation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 465, p. 175–183, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.10.054>

SCHANKOSKI, R.A; PILAR, R; PRUDÊNCIO JR, L.R; FERRON, R.D. **Evaluation of fresh cement pastes containing quarry by-product powders**. Construction and Building Materials, Volume 133, February 2017, Pages 234–242

SOHAILI, J. *et al.* Removal of scale deposition on pipe walls by using magnetic field treatment and the effects of magnetic strength. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, p. 1393–1399, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.028>

SREBRENİK, S.; NADIV, S.; LIN, I. J. Magnetic Treatment of Water—A Theoretical Quantum Model. **Magnetic and Electrical Separation**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 71–91, 1993. Available at: <https://doi.org/10.1155/1993/56708>

SRONSRI, C.; U-YEN, K.; SITTIPOL, W. Analyses of vibrational spectroscopy, thermal property and salt solubility of magnetized water. **Journal of Molecular Liquids**, [s. l.], v. 323, n. xxxx, p. 114613, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114613>

SUGAWARA, H. *et al.* Magnetic field effect on interface profile between immiscible nonmagnetic liquids—Enhanced Moses effect. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 79, n. 8, p. 4721, 1996. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.361652>

SUTOMO *et al.* The influence of wave frequency of solenoid magnetic field on CaCO₃ scale formation in piping system. *In:* , 2019. **AIP Conference Proceedings**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 030063. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5098238>

SZCZEŚ, A. *et al.* Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 124–127, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.12.005>

SZCZEŚ, Aleksandra; CHIBOWSKI, E.; RZEŹNIK, E. Magnetic Field Effect on Water Surface Tension in Aspect of Glass and Mica Wettability. **Colloids and Interfaces**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 37, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/colloids4030037>

SZKATULA, A.; BALANDA, M.; KOPEĆ, M. Magnetic treatment of industrial water. Silica activation. **The European Physical Journal Applied Physics**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 41–49, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1051/epjap:2002025>

Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (Eds.). (2016). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials** (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19074>

SIVA KONDA REDDY, B.; GHORPADE, D. G.; RAO, D. Use of magnetic water for mixing and curing of concrete. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E Int. J. Adv. Engg. Res. Studies/IV/I**, [s. l.], p. 2249–897493, 2014.

SU, N.; WU, C. F. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 681–688, 2003. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00098-7)

SU, N.; WU, Y. H.; MAR, C. Y. Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, [s. l.],

v. 30, n. 4, p. 599–605, 2000. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00215-5)

TAI, C. Y.; CHANG, M.-C.; YEH, S.-W. Synergetic effects of temperature and magnetic field on the aragonite and calcite growth. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 66, n. 6, p. 1246–1253, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.12.036>

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2nd edition. Thomas Telford Publishing, 1997. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. [S. l.: s. n.], 1990. ISSN 00280836.v. 770 Available at: <https://doi.org/10.1038/127783a0>

TIJING, L. D. *et al.* Effect of high-frequency electric fields on calcium carbonate scaling. **Desalination**, [s. l.], v. 279, n. 1–3, p. 47–53, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.072>

TOLEDO, E. J. L.; RAMALHO, T. C.; MAGRIOTIS, Z. M. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. **Journal of Molecular Structure**, [s. l.], v. 888, n. 1–3, p. 409–415, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010>

TOMBACZ, E. *et al.* Effect of a weak magnetic field on hematite sol in stationary and flowing systems. **Colloid & Polymer Science**, [s. l.], v. 269, n. 3, p. 278–289, 1991. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00665502>

TARBOZAGH, A. S.; REZAIFAR, O.; GHOLHAKI, M. Silica concrete compressive behavior under alternating magnetic field. **Magazine of Civil Engineering**, [s. l.], v. 101, n. 1, 2021. Available at: <https://doi.org/10.34910/MCE.101.12>

TSUKADA, K. *et al.* Magnetic susceptibility and magnetic resonance measurements of the moisture content and hydration condition of a magnetic mixture material. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 115, n. 17, p. 6–9, 2014.

UENO, S; IWASAKA, M. Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 75, n. 10, p. 7177–7179, 1994. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.356686>

UENO, Shoogo; IWASAKA, M. Magnetic Nerve Stimulation and Effects of Magnetic Fields on Biological, Physical and Chemical Processes. **Biological Effects of Magnetic and Electromagnetic Fields**, New York, NY, p. 1–21, 1996. Available at: https://doi.org/10.1007/978-0-585-31661-1_1

USANOV, A. D. *et al.* Monitoring of Changes in Cluster Structures in Water under AC Magnetic Field. **Optics and Spectroscopy**, [s. l.], v. 120, n. 1, p. 82–85, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0030400X16010239>

VENKATESH, S.; JAGANNATHAN, P.; PRASATH KUMAR, V. R. An Experimental Study on the Effect of Magnetized Water on Mechanical Properties of Concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 912, n. 3, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/3/032081>

WANG, Y. *et al.* Effects of low-intensity DC magnetic field on the freezing process of aqueous solution and beef. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 42, p. 1–11, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1590/fst.72221>

WANG, Y. *et al.* Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field. **Water Research**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 346–350, 1997. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00243-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00243-6)

WANG, Youkai; WEI, H.; LI, Z. Effect of magnetic field on the physical properties of water. **Results in Physics**, [s. l.], v. 8, p. 262–267, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022>

WANG, Yubin *et al.* The Influence Mechanism of Magnesium Ions on the Morphology and Crystal Structure of Magnetized Anti-Scaling Products. **Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 997, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/min10110997>

WEI, H.; WANG, Y.; LUO, J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 147, p. 91–100, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.140>

XIAO FENG PANG. The Experimental Evidences of the Magnetism of Water by Magnetic-Field Treatment. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 1–6, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2340455>

YOUSRY, O. M. M. *et al.* A study for improving compressive strength of cementitious mortar utilizing magnetic water. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 8, 2020. Available at: <https://doi.org/10.3390/MA13081971>

YANG, Q.; WEI, H.; LI, Z. Enhancing water evaporation by combining dynamic and static treatment of magnetic field. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, [s. l.], v. 216, n. January, p. 299–305, 2021. Available at: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26829>

YAHIA, Ammar; KHAYAT, K. H. **Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout**. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 731-738, 2001.

YIN, J. *et al.* Influence of Water Physical and Chemical Performance by Magnetizing. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 281, p. 223–227, 2011. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.281.223>

ZAIDI, N. S. *et al.* Enhancement of nitrification efficiency during sludge bulking by magnetic field under long sludge retention time. **3 Biotech**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 408, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02398-9>

ZAIDI, N. S. *et al.* Magnetic Field Application and its Potential in Water and Wastewater Treatment Systems. **Separation and Purification Reviews**, [s. l.], n. February 2015, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148>

ZAIDI, N. S. *et al.* Magnetic Field Application and its Potential in Water and Wastewater Treatment Systems. **Separation and Purification Reviews**, [s. l.], n. February 2015, 2014a.

ZAIDI, N. S. *et al.* Magnetic Field Application and its Potential in Water and Wastewater Treatment Systems. **Separation & Purification Reviews**, v. 43, n. 3, p. 206–240, 2014b. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15422119.2013.794148>.

ZHAO, K. *et al.* Preparation of Electric- and Magnetic-Activated Water and Its Influence on the Workability and Mechanical Properties of Cement Mortar. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 4546, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13084546>

ZHOU, K. X. *et al.* Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field. **Journal of**

Applied Physics, [s. l.], v. 88, n. 4, p. 1802–1805, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.1305324>

ZIELIŃSKI, M. *et al.* Enhancement of sedimentation and coagulation with static magnetic field. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 22, p. 1–8, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200203>

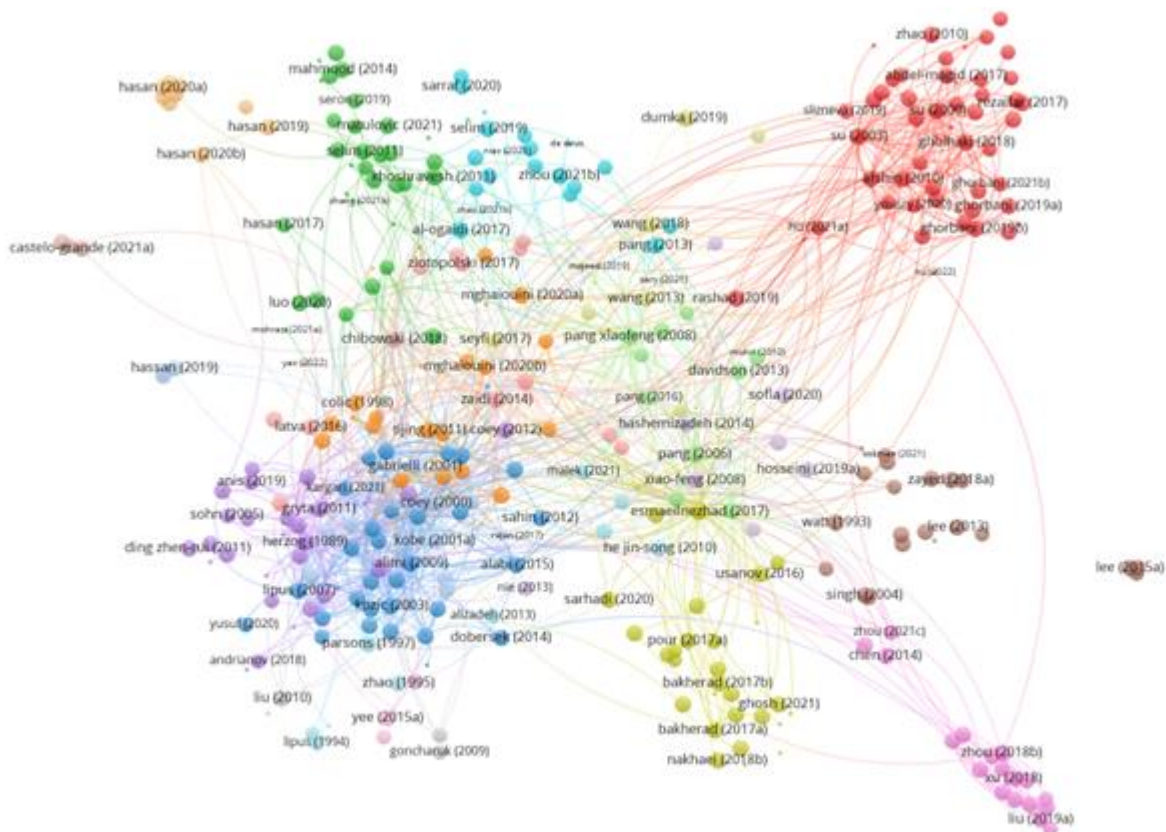
ZHANG, Z. *et al.* Effect of Alternating Electromagnetic Activated Water on Properties of Cement Mortar. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 634, n. 1, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/634/1/012138>

ZHAO, K. *et al.* Preparation of electric- and magnetic-activated water and its influence on the workability and mechanical properties of cement mortar. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 8, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13084546>

APÊNDICE I

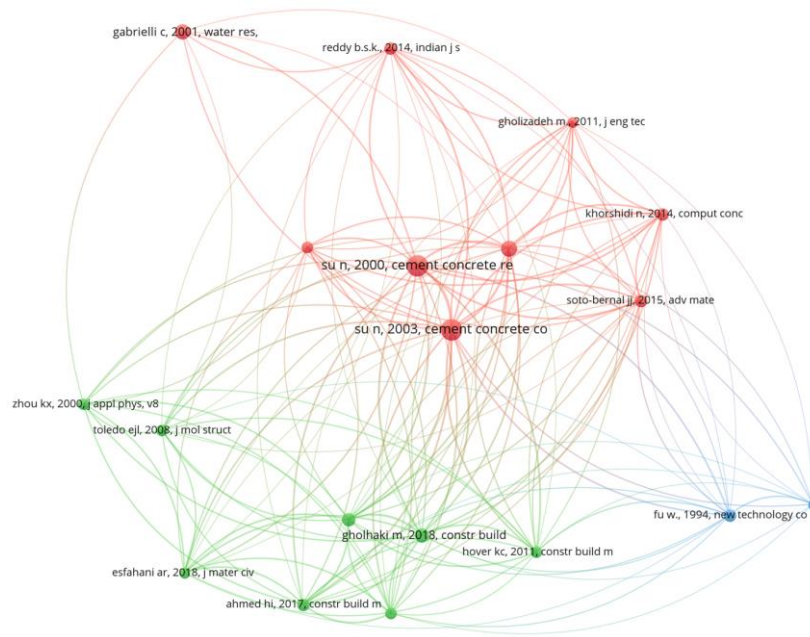
O acompanhamento das publicações delimitadas pela área da engenharia civil foi realizado com o alerta de pesquisa: TÓPICO: ("MAGNETIC WATER" or "WATER MAGNETIZATION" or "MAGNETIZED WATER" or "MAGNETIZED MIXING WATER" or "MAGNETIC FIELD TREATED WATER") Refined by: WEB OF SCIENCE CATEGORIES: (ENGINEERING CIVIL OR CONSTRUCTION BUILDING TECHNOLOGY) na base Web of Science. A reunião dos artigos levantados mais citados está apresentado na figura A.1, os artigos levantados refinados pela categoria de engenharia civil e materiais de construção estão apresentados na figura A.2 e listados na figura A.3.

Figura A.1 - Levantamento bibliográfico do tratamento magnético da água



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

Figura A.2 - Levantamento bibliográfico do tratamento magnético da água aplicado aos materiais cimentícios



Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)

Figura A.3 - Lista dos principais trabalhos do tratamento magnético da água aplicado aos materiais cimentícios

TÍTULO DO ARTIGO	PUBLICAÇÃO	TIPO	AUTORES	CONTATO
Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash	CEMENT & CONCRETE COMPOSITES	Article	Su, N; Wu, CF	sun@pine.yuntech.edu.tw
Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag	CEMENT AND CONCRETE RESEARCH	Article	Su, N; Wu, YH; Mar, CY	sun@pine.yuntech.edu.tw
An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Article	Gholhaki, Majid; Kheyroddin, Ali; Hajforoush, Mohammad; Kazemi, Mostafa	mgholhaki@semnan.ac.ir
Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology	SCIENTIA IRANICA TRANSACTION A-CIVIL ENGINEERING	Article	Afshin, H.; Gholizadeh, M.; Khorshidi, N.	m_gholizadeh@sttu.ac.ir
Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Article	Wei, Huinan; Wang, Youkai; Luo, Jianjun	huinanw@yeah.net
Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Article	Ghorbani, Saeid; Ghorbani, Sahar; Tao, Zhong; de Brito, Jorge; Tavakkolizadeh, Mohammadreza	Saeid.ghorbani@mail.um.ac.ir; Sahar.ghorbani@mail.um.ac.ir; Z.Tao@westernsydney.edu.au; Jb@civil.ist.utl.pt; ddt@um.ac.ir
An investigation of water magnetization and its influence on some concrete specificities like fluidity and compressive strength	COMPUTERS AND CONCRETE	Article	Khorshidi, N.; Ansari, M.; Bayat, M.	mbayat14@yahoo.com
Interaction of magnetic water, silica fume and superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete	ADVANCES IN CONCRETE CONSTRUCTION	Article	Mazloom, Moosa; Miri, Sayed Mojtaba	Mazloom@Srttu.edu
Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea	TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY	Article	Jung, Hyuk-sang; Han, Yun-su; Chung, Sung-rae; Chun, Byung-sik; Lee, Yong-Joo	yoricom@korail.com; yunsu@hhi.co.kr; sj9171@chol.com; hengdang@unitel.co.kr; ucesyjl@seoul-tech.ac.kr
Behavior of magnetic concrete incorporated with Egyptian nano alumina	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Article	Ahmed, H. I.	hany281@yahoo.com
Effects of Magnetized Water and Irrigation Water Salinity on Soil Moisture Distribution in Trickle Irrigation	JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING	Article	Mostafazadeh-Fard, Behrouz; Khoshravesh, Mojtaba; Mousavi, Sayed-Farhad; Kiani, Ali-Reza	behrouz@cc.iut.ac.ir
Using statistical analysis and laboratory testing to evaluate the effect of magnetized water on the stability of foaming agents and foam concrete	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Article	Ghorbani, Saeid; Sharifi, Sohrab; de Brito, Jorge; Ghorbani, Sahar; Jalayer, Mandi Ahmadi; Tavakkolizadeh, Mohammadreza	Saeid.ghorbani@mail.um.ac.ir; Sharifi.Sohrab@mail.um.ac.ir; jb@civil.ist.utl.pt; Sahar.ghorbani@mail.um.ac.ir; ddt@um.ac.ir
Magnetized Water Effect on Compressive Strength and Dosage of Superplasticizers and Water in Self-Compacting Concrete	JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING	Article	Esfahani, Amirsalar R.; Reisi, Mohammad; Mohr, Benjamin	arabbanie42@students.tntech.edu; mreisi@iaukhsh.ac.ir; BMohr@tntech.edu
Effect of rock flour type on rheology and strength of self-compacting lightweight concrete	COMPUTERS AND CONCRETE	Article	Mazloom, Moosa; Homayoni, Seyed Mohammad; Miri, Sayed Mojtaba	mazloom@srttu.edu; hero.msh.eng@gmail.com; miri.s.mojtaba@gmail.com

Fonte: Adaptado pelo Autor (2023)