



**FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**POLYANA BARBOSA FERNANDES
THAUANY FURRIEL LIMA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM A
INSERÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *BACILLUS SUBTILIS***

PUBLICAÇÃO N°: 05

**GOIANÉSIA / GO
2022**



**POLYANA BARBOSA FERNANDES
THAUANY FURRIEL LIMA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM A
INSERÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *BACILLUS SUBTILIS***

PUBLICAÇÃO Nº: 05

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACEG.**

ORIENTADORA: Ma. JÉSSICA NAYARA DIAS

COORIENTADOR: Me. ROBSON DE OLIVEIRA FÉLIX

GOIANÉSIA / GO: 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, POLYANA BARBOSA; LIMA, THAUANY FURRIEL

Análise da resistência do concreto com a inserção de bactérias do gênero *Bacillus subtilis* 2022 xix, 59P, 297 mm (ENC/FACEG, Bacharel, Engenharia Civil, 2022).

TCC – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. Compósito cimentício | 2. Bactérias ureolíticas |
| 3. <i>Bacillus subtilis</i> | 4. Resistência à compressão |
| I. ENC/FACEG | II. Análise da resistência do concreto com a inserção de bactérias do gênero <i>Bacillus subtilis</i> |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, P. B.; LIMA, T. F. Análise da resistência do concreto com a inserção de bactérias do gênero *Bacillus subtilis*. TCC, Publicação 05 2022/1 Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 59p. 2022.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Polyana Barbosa Fernandes e Thauany Furriel Lima

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise da resistência do concreto com a inserção de bactérias do gênero *Bacillus subtilis*

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2022

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Polyana B. Fernandes

Polyana Barbosa Fernandes
polyanafernandes-@hotmail.com
76385-131 - Goianésia/GO - Brasil

Thauany Furriel Lima

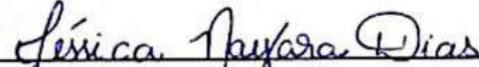
Thauany Furriel Lima
thauanyflima@outlook.com
76383-703 - Goianésia/GO - Brasil

**POLYANA BARBOSA FERNANDES
THAUANY FURRIEL LIMA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO COM A
INSERÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *BACILLUS SUBTILIS***

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA FACEG COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:



**JÉSSICA NAYARA DIAS, Mestra (FACEG)
(ORIENTADORA)**



**ROBSON DE OLIVEIRA FÉLIX, Mestre (FACEG)
(COORDENADOR)**



**VILSON DALLA LIBERA JUNIOR, Mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: GOIANÉSIA/GO, 07 de JUNHO de 2022.

*Dedico este trabalho:
aos meus pais, Deoclecio e Sandra;
as minhas irmãs, Adriana e Sara;
e aos meus avós, tios e primos.*

Polyana Fernandes

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por ter proporcionado que eu tivesse saúde e coragem para ultrapassar todos os empecilhos encontrados ao longo desses cinco anos de estudos, pelo dom da vida, por todas as oportunidades, paciência e força mesmo nos momentos em que pensei em desistir. Agradeço aos meus pais, Deoclecio e Sandra, que, com humildade e honestidade, fizeram-me melhor. A vocês todo o meu amor e gratidão. Agradeço minhas irmãs Adriana e Sara, por me ensinarem a amar, dividir e lutar. Agradeço meus avós, tios e primos pelo incentivo e por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço nossa orientadora Jéssica Dias, que nos auxiliou e esteve sempre presente, contribuindo com o desenvolvimento deste projeto. Ao nosso coorientador Robson Félix por sempre estar disposto a nos ajudar, não somente na realização deste trabalho, mas ao longo da graduação, saiba que seus ensinamentos ficarão guardados para sempre em minha memória. Ao professor Eduardo Toledo, pela amizade, apoio, incentivo e paciência, sou muito grata por tudo que fez por nós. Aos demais professores e funcionários da FACEG que contribuíram tanto para minha formação.

Agradeço a minha parceira de TCC e grande amiga Thauany Furriel, sem você a caminhada teria se tornado sem sombra de dúvidas mais árdua. Agradeço em especial a minhas amigas Kássia Policarpo e Artemisa Araújo, que juntamente com minha irmã Adriana Fernandes e minha parceira de TCC foram meu suporte e abrigo nesses cinco anos da graduação, para sempre estarão em meu coração. Em especial a Dany, que começou o curso conosco, mas hoje segue outros caminhos. E por último, não poderia deixar de agradecer a dupla dinâmica Adeyler e Wewerthon por toda a amizade, fofocas e risadas ao longo do curso.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos pelos conselhos, incentivos, companheirismo e por todos os momentos que passamos juntos, aprendi muito com cada um de vocês. Aos demais colegas do curso agradeço por todo aprendizado ao longo deste percurso.

Polyana Barbosa Fernandes

*Dedico este trabalho:
Para minha mãe e a minha irmã, Orlene e Thallita;
e aos meus avós, tios e primos.*

Thauany Furriel

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me conceder saúde e força para alcançar os meus sonhos. Que desde o início mostrou estar presente na minha vida abrindo inúmeras portas para chegar até aqui. Sou também eternamente grata a minha mãe Orlene, por ser a minha maior inspiração de coragem e determinação, que ao receber a notícia do vestibular foi a primeira a vibrar comigo, dizendo que iríamos conseguir. Obrigada, por fazer do meu sonho, o seu! Agradecer também a minha irmã Thallita pelo amor, companheirismo e paciência nas semanas de prova. Ao meu namorado Josimar por me incentivar, apoiar nos momentos difíceis e me ajudar nos trabalhos como ele mesmo dizia, palavras dele: “Quando você terminar a faculdade também serei meio engenheiro”. Estender também meus agradecimentos ao Joelcio e a Simone que sem o apoio de vocês não seria possível iniciar a graduação.

Ao professor Me. Eduardo Toledo por todos os ensinamentos, orientação e com certeza pela amizade construída durante todos esses anos. E aos meus orientadores Jéssica Nayara e Robson Felix para a produção do nosso Trabalho de Conclusão de Curso, obrigado pelas orientações, pelas sugestões e contribuir em diversas formas para a minha formação acadêmica. Quero agradecer de forma especial a minha companheira, amiga e minha dupla de TCC Polyana que tivemos afinidade uma com a outra desde os primeiros períodos e a partir daí começamos uma amizade que quero levar para vida inteira, obrigada por esses 5 anos!

Aos amigos de graduação Adeyler, Jéssica, Naiara, Wewerthon, Marcus Vinicius e Lucas pela amizade, companheirismo e superar todas as lutas do dia a dia. Em especial as minhas amigas de graduação Adriana, Artemisa, Danielle, Kássia e Polyana que sempre nos uníamos para enfrentar os problemas e claro para comemorações de cada conquista, obrigada por proporcionar momentos inesquecíveis.

Por fim, obrigada a todos os amigos e familiares que contribuíram diretamente e indiretamente para essa conquista.

Thauany Furriel Lima

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”
Albert Einstein

RESUMO

Sendo um material de grande importância para a Engenharia Civil, o concreto de cimento Portland tem um consumo estimado da ordem de 19 bilhões de toneladas por ano, perdendo somente para a água. O uso do material é bastante difundido, o que justifica o elevado número de pesquisas acerca do mesmo, seja no processo de recuperação ou reforço. Através de inúmeras pesquisas descobriu-se um grupo de bactérias do gênero *Bacillus*, denominadas ureolíticas, que possuem a capacidade de precipitar carbonato de cálcio. Esses microrganismos conseguem criar calcário dentro dos poros do concreto, aumentando assim sua resistência. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à compressão de compósitos cimentícios produzidos a partir da adição de microrganismos e determinar qual dentre os tratamentos possui melhor desempenho. Para esse estudo, foram produzidos quatro traços de concreto: um de referência, sem nenhuma adição; um com a adição de tampão de fosfato e microrganismos; e os outros dois traços com a adição dos microrganismos em diferentes concentrações. Em seguida, os corpos de prova produzidos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão. Ao analisar os dados obtidos, observou-se que o traço mais resistente foi com adição de bactérias com a concentração de 10^{10} esporos/mL de bactérias, chegando a atingir uma resistência média de 29,1 MPa aos 28 dias. Quando comparado com o de referência, traço esse que alcançou uma resistência de 23,85 MPa, nota-se um ganho na resistência em 22%. Ao comparar os dois traços que se diferem somente em suas concentrações (10^{10} e 10^5), o aumento da resistência é de 17,8% em relação ao traço com menor concentração. Sendo assim, concluiu-se que com a inserção de bactérias há aumento significativo na resistência do concreto.

Palavras-Chave: Compósito cimentício; Bactérias ureolíticas; *Bacillus subtilis*; Resistência à compressão.

ABSTRACT

Being a material of great importance for Civil Engineering, Portland cement concrete has an estimated consumption of around 19 billion tons per year, second only to water. The use of the material is widespread, which justifies the high number of researches about it, whether in the recovery or reinforcement process. Through numerous researches, a group of bacteria of the genus *Bacillus*, called ureolytic, was discovered, which have the ability to precipitate calcium carbonate. These microorganisms are able to create limestone inside the pores of the concrete, thus increasing its strength. Given the above, the objective of this work is to evaluate the compressive strength of cementitious composites produced from the addition of microorganisms and determine which among the treatments has the best performance. For this study, four concrete mixes were produced: a reference, without any additions; one with the addition of phosphate buffer and microorganisms; and the other two traces with the addition of microorganisms in different concentrations. Then, the produced specimens were submitted to compressive strength tests. When analyzing the data obtained, it was observed that the most resistant trait was with the addition of bacteria with a concentration of 10^{10} spores/mL of bacteria, reaching an average resistance of 29.1 MPa at 28 days. When compared with the reference trace, which reached a resistance of 23.85 MPa, there is a gain in resistance of 22%. When comparing the two traits that differ only in their concentrations (10^{10} and 10^5), the increase in resistance is 17.8% in relation to the trait with the lowest concentration. Therefore, it is concluded that with the insertion of bacteria there is a significant increase in the strength of the concrete.

Key words: Cementitious composite; ureolytic bacteria; *Bacillus subtilis*; Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de agregados mais comumente utilizados: a) areia e b) brita.	5
Figura 2 – Cimento Portland.	6
Figura 3 – Assentamento plástico impedido pela armadura.	11
Figura 4 – Configurações características de fissuração por dessecação superficial.	11
Figura 5 – Micrografia da bactéria <i>Bacillus subtilis</i>	14
Figura 6 – Resistência à compressão da argamassa x concentração de células em diferentes idades.	16
Figura 7 – Betoneira de 250 L utilizada no experimento.	25
Figura 8 – Equipamentos utilizados para realização do <i>Slump test</i>	26
Figura 9 – Medição do abatimento obtido pelo <i>Slump test</i>	26
Figura 10 – Moldes cilíndricos utilizados para fabricação dos corpos de prova.	27
Figura 11 – Cura inicial dos corpos de prova.	27
Figura 12 – Prensa com corpo de prova sendo preparado para o ensaio.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do ensaio de resistência a compressão do concreto.....	17
Tabela 2 – Resultados do ensaio de resistência a flexão do concreto.	17
Tabela 3 – Testes de hipóteses.....	20
Tabela 4 – Constituintes do tampão fosfato.	23
Tabela 5 – Propriedades dos materiais utilizados.....	24
Tabela 6 – Traços de concreto utilizados no experimento.	25
Tabela 7 – Descrição dos tratamentos.	29
Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.	30
Tabela 9 – Análise de Variância.....	32
Tabela 10 – Resumo do Teste de Tukey a 5% de probabilidade para os tipos de tratamento.	33
Tabela 11 – Resumo do Teste de Tukey para a variável “Tempo”.	33
Tabela 12 – Análise de variância: “Concentrações x Tempo”.	34
Tabela 13 – Teste de Tukey para interação “Concentrações x Tempo”.....	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais elementos na composição do cimento Portland.	6
Quadro 2 - Designação normativa dos aditivos.	8
Quadro 3 – Especificação de uso de aditivos.	9
Quadro 4 – Classificação das patologias de acordo com o tamanho da abertura.	10
Quadro 5 – Causas das fissuras no estado endurecido.	12
Quadro 6 – Descrição dos traços de concreto dosados no programa experimental.	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Média das resistências à compressão dos corpos de prova nas suas respectivas idades.....	31
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
BHI	<i>Brain Heart Infusion</i>
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CP	Cimento Portland
CP II - F	Cimento Portland composto com Fíler
CV	Coeficiente de variação em %
DMC	Dimensão máxima característica
FACEG	Faculdade Evangélica de Goianésia
FCK	<i>Feature Compression Know</i>
FV	Fontes de variação
GL	Grau de Liberdade
MICP	Microbiologically Induced Calcite Precipitation
NBR	Normas Brasileira Regulamentadora
NBR NM	Normas Brasileira Regulamentadora – Norma Mercosul
pH	Potencial Hidrogênico
q	Amplitude total estudentizada
QM	Quadro Médio
SQ	Soma dos Quadrados

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
f_{cj}	Resistência à compressão do concreto aos j dias (MPa)
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto (MPa)
μm	Micrômetro
MPa	Mega pascal
H_0	Hipótese nula - média igual (adimensional)
H_1	Média diferente (adimensional)
μ	Massa específica (g/cm^3)
%	porcento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 CONCRETO	4
2.1.1 Composição	4
2.1.1.1 Agregados	4
2.1.1.2 Cimento Portland	5
2.1.1.3 Aditivos e adições	8
2.2 FISSURAÇÃO DO CONCRETO	9
2.2.1 Fissuração do concreto no estado fresco	10
2.2.1.1 Assentamento plástico	10
2.2.1.2 Dessecação superficial	11
2.2.1.3 Deformação excessiva da forma	11
2.2.2 Fissuração do concreto no estado endurecido	12
2.3 O USO DE MICROORGANISMOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	13
2.3.1 Compósitos cimentícios	13
2.3.2 Caracterização das bactérias <i>Bacillus subtilis</i>	13
2.3.3 Processo de biocimentação	14
2.3.4 Processo de biomineração	15
2.3.5 Concentração e forma de adição das bactérias <i>Bacillus subtilis</i>	15
2.4 INFLUÊNCIA DAS BACTÉRIAS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	16
2.4.1 Resistências à tração e à compressão	16
2.4.2 Porosidade	17
2.5 ANÁLISE ESTÁTISTICA	18
2.5.1 Conceitos estatísticos	18
2.5.2 Erro estatístico	19
2.5.3 P-Value	20
2.5.4 Análise de variância (ANOVA)	20

2.5.5 Teste Tukey	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 MATERIAIS	23
3.2 MÉTODOS	24
3.2.1 Caracterização dos agregados	24
3.2.2 Definição dos Traços	24
3.2.3 Produção do concreto	25
3.2.4 Ensaio de Resistência à compressão	28
3.2.5 Análise estatística.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	30
4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	32
5 CONCLUSÕES.....	35
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Sendo um material de grande importância para a Engenharia Civil, o concreto de cimento Portland tem um consumo estimado da ordem de 19 bilhões de toneladas por ano, perdendo somente para a água (METHA; MONTEIRO, 2008). O uso do material é bastante difundido, o que justifica o elevado número de pesquisas, seja no processo de recuperação ou reforço do mesmo.

Normalmente, o concreto é um material surpreendentemente resistente e, quando produzido corretamente e nas situações adequadas, as estruturas de concreto duram entre 50 e 100 anos. Independentemente disso, diversos fenômenos patológicos podem atingir tais estruturas, sendo uma delas a fissuração (FREITAS *et al.*, 2021).

O aparecimento de fissuras em estruturas de concreto é comum em qualquer das idades do material, desde que o mesmo se encontre em estado plástico nas idades iniciais e ao longo de toda sua vida útil. Com o processo de fissuração, tem-se a evolução da deterioração da estrutura, induzindo o uso de medidas corretivas para que esta não atinja seu estado limite último (ELU). Dal Molin (1988) afirma que ainda que as manutenções, preventivas e corretivas, sejam realizadas corretamente, em relação ao concreto nem sempre isso é suficiente para garantir a integridade do elemento.

Os diversos problemas que surgem no concreto acabam por aumentar os custos de recuperação e manutenção do elemento ao longo da sua vida útil. Como parâmetro de comparação, somente nos Estados Unidos, o valor calculado por ano para manutenção de estruturas de concreto chega aos 20 milhões de dólares americanos (ECHEGARAY; ROJAS; ACAPANA, 2015). Desse modo, o reparo e reforço das estruturas surgem como uma grande linha de pesquisa no ramo da engenharia civil e vem atender a necessidade de aprimorar técnicas de reconstituição das condições originais das estruturas desgastadas (FREITAS *et al.*, 2021).

Além disso, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir a permeabilidade e a porosidade do concreto e torná-lo menos susceptível à ação de agentes agressivos. Essas propriedades são fatores limitantes na durabilidade e resistência dos materiais cimentícios, expressando uma razão inversamente proporcional. No concreto, quanto menor a resistência à compressão do material, maior a porosidade (DE ASSIS *et al.*, 2009).

Os chamados compósitos cimentícios vêm sendo testados com a inserção de diversos materiais, com distintas características visando a melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas. Os concretos reforçados, de modo geral, apresentam uma menor tendência a fissuração devido a maior capacidade de suporte. Uma alternativa para resolver o surgimento

de fissuras e elevar a resistência do concreto é a produção dos chamados concretos autocicatrizantes (SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2018).

Existe um grupo de microrganismos que possui a capacidade de precipitar carbonato de cálcio, denominadas ureolíticas, as bactérias do gênero *Bacillus* exsudam substâncias que se cristalizam e formam calcário dentro de poros e fissuras, conferindo uma capacidade de auto regeneração ao concreto (SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2017). As bactérias envolvidas no bioconcreto consomem hidróxido solúvel e por meio do seu metabolismo geram a bioprecipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que preenche os poros do concreto possibilitando o aumento da resistência mecânica, e eliminando geralmente com três semanas as fissuras das primeiras idades. Quando em contato com a água, os microrganismos, que estavam dormentes, são estimulados a germinarem produzindo carbonato de cálcio (COSTA; RODRIGUES, 2018).

Estas bactérias possuem capacidade de habitar diferentes ambientes, como outros seres vivos, solos, plantas e rochas. As bactérias desse gênero são capazes de viver sem oxigênio por mais de 200 anos em lugares com péssimas condições, sendo adequadas para serem incluídas na composição do concreto. As bactérias do gênero *Bacillus subtilis* destacam-se por produzirem uma variedade de enzimas, se reproduzem facilmente e em grande proporção, dessa forma, suas células são capazes de originar esporos e biofilme (MONTROYA *et al.*, 2005).

Diante do exposto, nota-se a importância de aprimorar pesquisas que confirme a viabilidade do uso de microrganismos em sua composição. Assim é possível, avaliar se o compósito produzido obteve um bom desempenho e resistência favorável.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com base na observação aprofundada das técnicas atuais, condições de mercado e forças motrizes, é estimado que um dos avanços lógicos na tecnologia da engenharia civil seja a construção com materiais alternativos, sustentáveis e que apresentem propriedades mecânicas atraentes para o reforço estrutural. Neste setor, uma solução relevante criada pelas indústrias de concreto para alcançar elementos construtivos com resistência específica e ambientalmente corretos consiste na utilização de compósitos cimentícios reforçados (VOO; POON; FOSTER, 2010). O novo material reforçado, tecnicamente, deve apresentar melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas, como por exemplo, o aumento da resistência.

Visto que o concreto é um material essencial nas obras e que com o decorrer dos anos o mesmo padece de intempéries e ações mecânicas, fazendo com que haja a perda da sua

resistência e durabilidade, implementar um concreto já reforçado é uma iniciativa que possibilita solucionar tais obstáculos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a resistência mecânica dos compósitos cimentícios produzidos com a adição de microrganismos em sua matriz e analisar a viabilidade da aplicação na construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a concentração de microrganismo adequada a ser utilizada no concreto, que atenda as especificações prevista por normas, assegurando sua eficácia;
- Examinar a resistência do concreto com microrganismos;
- Verificar as influências do acréscimo de microrganismos nas estruturas de concreto;
- Propor abordagens analíticas estáticas visando quantificar as capacidades estruturais dos compósitos cimentícios produzidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica, que é indispensável para o melhor entendimento da temática proposta. No capítulo 3 descreve-se os procedimentos experimentais realizados para atingir os objetivos propostos na pesquisa. O capítulo 4 descreve e discute os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5 tem-se a conclusão e sugestões para trabalhos futuros que possam contribuir ainda mais com a evolução do tema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

Considerado o mais importante material estrutural até os dias atuais, o concreto foi descoberto no final do século XIX, tendo seu uso intensificado no século XX. O material é considerado como um marco de inovação na arte de projetar e construir estruturas, ressaltando que a evolução desse setor sempre esteve associada ao desenvolvimento das civilizações no decorrer da história da humanidade. Ao olhar essa história, é interessante notar como as grandes modificações no modo de construir se devem à criação de novos materiais estruturais e como o domínio do conhecimento sobre os mesmos marcaram o poder e o progresso das nações durante anos (HELENE; ANDRADE, 2010).

No sentido global, concreto é qualquer produto ou massa obtida com a utilização de um ligante. Normalmente, esse meio é o produto de uma reação entre o cimento hidráulico e a água, porém, hoje essa definição pode englobar uma grande variedade de produtos (NEVILLE; BROOKS, 2013). De modo geral, os estudos acerca do material buscam encontrar a proporção adequada entre os constituintes com a finalidade de alcançar as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade exigidas para o concreto, bem como as características de trabalhabilidade requeridas para facilitar transporte, lançamento e adensamento (HELENE; ANDRADE, 2010).

2.1.1 Composição

2.1.1.1 Agregados

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019), os agregados são um dos principais constituintes da mistura do concreto, apresentando mais de dois terços do peso e volume da massa. Basicamente, tem-se dois tipos de agregados, cuja classificação se dá em detrimento do tamanho das partículas: o agregado graúdo e o agregado miúdo. A norma define que agregados miúdos são aqueles cujos grãos ficam retidos na peneira de malha de 150 μm e passam na peneira com abertura de 4,75 mm, sendo o principal exemplo a areia (Figura 1.a). Por sua vez, os agregados graúdos apresentam grãos com maiores dimensões, e sua classificação se dá de acordo com o material que fica retido na peneira de malha 4,75 mm e passam na peneira com abertura de 75 mm, as britas são os principais exemplos (Figura 1.b).

Figura 1 – Tipos de agregados mais comumente utilizados: a) areia e b) brita.



Fonte: PORTAL DO CONCRETO, 2014.

O uso de agregados na composição do concreto permite economizar com o uso do cimento nas construções. De modo geral, utiliza-se, em média, por metro cúbico de concreto, cerca de 42% de agregado graúdo, 40% de agregado miúdo, 10% de cimento Portland, 7% de água e 1% de aditivos. Ou seja, na composição do concreto é fundamental o acréscimo dos agregados para atingir a performance desejada na estrutura, correlacionando o tipo de agregado e o local onde será empregada a mistura (VALVERDE, 2001).

Para produção do concreto, é necessário determinar quais agregados serão utilizados, analisando-se suas propriedades garantem função em todo período projetado, que permita fácil manuseio durante a construção. A devida caracterização dos materiais, seguindo os procedimentos descritos em normas pertinentes, também é indispensável. As propriedades físicas e químicas desses materiais fazem com que estes sejam decisivos na vida útil da estrutura onde são empregados. No entanto, o uso inadequado dos agregados provoca rápida deterioração do concreto, sendo esta, uma das inúmeras causas de falência das estruturas (VALVERDE, 2001).

2.1.1.2 Cimento Portland

O nome Portland passou a ser usado no século XIX, pelo fato do material apresentar semelhanças com as rochas da ilha britânica de Portland. Já a palavra cimento, na antiga Roma, refere-se a pedra natural de rochedos e não esquadrejada, sua origem se deu por volta de 4.500 anos, sendo que no antigo Egito utilizava-se uma liga de gesso com calcinado. Outro marco do cimento na história, foi na construção de grandes obras realizadas pelos gregos e romanos com a utilização de solos de origem vulcânica, como o Panteão e o Coliseu (BATTAGIN, 2009).

Basicamente o cimento é um pó cinza (Figura 2) com partículas variando de 1 a 50 μm , um composto seco, que ao adicionar água na mistura, leva a um processo químico chamado hidratação. Essa reação química permite a formação de uma pasta. Quando há adição de areia (agregado miúdo) a pasta é chamada de argamassa. Se houver a inclusão de brita (agregado graúdo) com ou sem algum aditivo, essa argamassa é chamada de concreto (HELENE; ANDRADE, 2010).

Figura 2 – Cimento Portland.



Fonte: PORTAL DO CONCRETO, 2014.

Na produção do cimento Portland é necessário moer os constituintes, como a sílica, calcário ou outros materiais silicosos, óxido de ferro e alumina. Em seguida, é realizada a queima em um forno à temperatura de 1400 °C, processo denominado clinquerização, originando o clínquer. Após resfriado, acrescenta-se sulfato de cálcio para retardar a pega instantânea do cimento, depois dessa mistura realiza-se a moagem até formar um pó fino. No Quadro 1 é possível observar os principais elementos do cimento e a composição em óxidos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Quadro 1 – Principais elementos na composição do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$

Fonte: NEVILLE; BROOKS, 2013.

Durante a produção dos materiais de construção são gerados impactos desfavoráveis ao meio ambiente, por exemplo, têm-se a indústria de cimento, que libera grandes quantidades de

CO₂, aproximadamente 6% do total emitido no Brasil. No decorrer das obras e ao final delas, acontece à modificação da área, ocorrem alterações na circulação dos veículos urbanos, em consequência do transporte dos materiais de construção efetuado do ponto de extração até o canteiro de obras. Além disso, há ainda a grande geração de resíduos sólidos, e a maneira incorreta de descartá-los (ROTH; GARCÍAS, 2009).

Os cimentos Portland abrangem diversas características específicas para aplicação em obras, desse modo, foram desenvolvidos diversos cimentos para garantir uma boa resistência e durabilidade e atender as diferentes aplicações, de acordo com cada tipo, conforme especificado a ABCP (Associação Brasileira Cimento Portland, 2018):

- Cimento Portland Comum (CP-I): Geralmente utilizado em obras que não apresentam exposição em ambientes desfavoráveis como sulfato no solo ou água subterrânea. Não possui nenhum tipo de adição;
- Cimento Portland Composto (CP-II): Usado em obras com calor de hidratação moderado e obras com contato moderado de sulfato;
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP-III): Produzido com adição de 35% a 70% de escória de alto-forno. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É menos poroso e mais durável;
- Cimento Portland de Pozolânico (CP-IV): Possui de 15% a 50% de material pozolânico. Possui baixo calor de hidratação, sendo assim, é recomendável na concretagem de obras com grandes volumes e sob temperaturas elevadas;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI): Um fator decisivo para diferenciação entre o cimento Portland comum e o de alta resistência inicial é a finura de cada um. Aplicado em casos que deseja desenformar rápido ou em obras que a resistência deve ser atingida de forma rápida;
- Cimento Resistente a Sulfatos (RS): Quando o cimento encontra submetido à meios agressivos como redes de esgoto, estruturas marinhas, ambientes industriais etc. O uso desse cimento deve ser especificado por não ser de uso geral;
- Cimentos Portland Branco (CPB): Muito usado para fins arquitetônicos por ter acabamento em cor pastel ou uma coloração branca. A cor é obtida através de matérias-primas com baixo teor de manganês e ferro;

- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC): Tem finalidade de retardar o desprendimento do calor, dificultando o aparecimento de fissuras. Criado nos Estados Unidos para aplicar em obras de grandes barragens de gravidade.

O concreto de cimento Portland pertence ao mais recente dos materiais utilizados na construção de estruturas, marcado como uma das principais descobertas da humanidade e com grande contribuição para a qualidade de vida das pessoas. Com o grande avanço das cidades, busca-se cada vez mais o aprimoramento dos materiais de engenharia, dentre eles o concreto, para intensificar suas propriedades mecânica e impulsionar as construções do mundo. O concreto é um material aplicado em diversas áreas da construção civil, de acordo com suas especificações de resistência e trabalhabilidade (CLAUDINO *et al.*, 2017).

2.1.1.3 Aditivos e adições

O uso de aditivos no concreto é antigo tanto quanto o cimento, na antiguidade os romanos misturavam sangue, banha, clara de ovo ou leite para melhorar a trabalhabilidade do material (COUTINHO, 1997). Com o passar dos anos, houve o desenvolvimento de substâncias que são inseridas na mistura propositalmente, com intuito de reforçar, melhorar o preparo e intensificar algumas características (PETRUCCI, 1995).

Os aditivos, assim como o concreto, os agregados e outros elementos construtivos, devem cumprir algumas especificações técnicas, que são prescritas pela NBR 11768 (ABNT, 2019) – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Os aditivos de concreto são adicionados na mistura, porém, não podem ultrapassar uma quantidade de 5% da massa de material cimentício. De acordo com a referida norma, estes possuem algumas designações, que são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Designação normativa dos aditivos.

ADITIVOS	ABREVEATURA
Aditivo redutor de água/plastificante	PR, PA, PN
Aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I	SP-I R, SP-I A, SP-I N
Aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II	SP-II R, SP-II A, SP-II N
Aditivo incorporador de ar	IA
Aditivo acelerador de pega	AP
Aditivo acelerador de resistência	AR
Aditivo retardador de pega	RP

Fonte: ABNT NBR 11768, 2019.

Cada tipo de aditivo químico, de acordo com a sua composição, apresenta uma especificação de uso, que contribuirá de forma melhor para o resultado final do elemento construtivo no qual é empregado. Fonseca (2010), em seu trabalho, apresenta essa relação adequada do uso para cada tipo, que é mostrada no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificação de uso de aditivos.

ADITIVOS	ESPECIFICAÇÃO
Tenso-ativos (plastificantes)	Esse aditivo proporciona uma melhor compactação, reduz a quantidade de água, aumenta a resistência, possibilita a fluidez e plasticidade do concreto.
Incorporadores de ar	Minimiza a possibilidade de segregação, potencializando a plasticidade, aumenta a durabilidade e resistência do concreto, diminui o atrito entre os agregados.
Aceleradores de pega	São usados principalmente em pré-moldados, serviços de reparo e contato com temperaturas baixas. Permite aumento na velocidade da resistência para executar a desforma ou outros serviços.
Retardadores de pega	Retarda o endurecimento do concreto, viabilizando acabamentos arquitetônico com agregado exposto, evita juntas frias, auxilia na concretagem com temperaturas elevadas, etc.
Impermeabilizantes	Tem função de reforçar o concreto para reduzir a penetração de água, basicamente, é misturado junto com argamassas, rejuntas e concretos de reservatórios.
Produtores de gás ou espuma	Usados em lajes, pisos e na recuperação de estruturas, apresenta melhor desempenho no isolamento térmico e proteção contra o fogo.
Inibidores de corrosão	Serve para proteger as armaduras onde ocorre a ação de cloretos no concreto.
Fungicidas, germicidas e inseticidas	São usados para conter as algas ou líquens que aparecem no concreto endurecido.

Fonte: Fonseca, 2010.

2.2 FISSURAÇÃO DO CONCRETO

Na construção civil, patologia é o termo usado para elementos estruturais que apresentam ocorrências no sentido de prejudicar o ciclo da vida de uma obra (MÂNICA, 2019). As fissuras reduzem significativamente a vida útil do concreto e acarretam altos custos de restauração (SEIFAN *et al.*, 2016). Segundo Dal Molin (1988), a repercussão de fissuração é tão remota quanto o uso do concreto. As mesmas são causadas geralmente pela falta de controle de qualidade nas inúmeras fases de construção, ocasionando não somente problemas de segurança e o conforto, mas também danos psicológicos aos usuários.

As patologias são caracterizadas de acordo com a abertura que se tem de face a face. Segundo Silva e Jonov (2018), essas aberturas podem ser classificadas como fissuras, trincas,

rachaduras, fendas e brechas, de acordo com o tamanho, em milímetros, da sua abertura. O Quadro 4 apresenta a classificação das mesmas.

Quadro 4 – Classificação das patologias de acordo com o tamanho da abertura.

ANOMALIAS	ABERTURAS (mm)
Fissura	até 0,5
Trinca	de 0,5 a 1,5
Rachadura	de 1,5 a 5,0
Fenda	de 5,0 a 10,0
Brecha	acima de 10,0

Fonte: SILVA; JONOV, 2018.

2.2.1 Fissuração do concreto no estado fresco

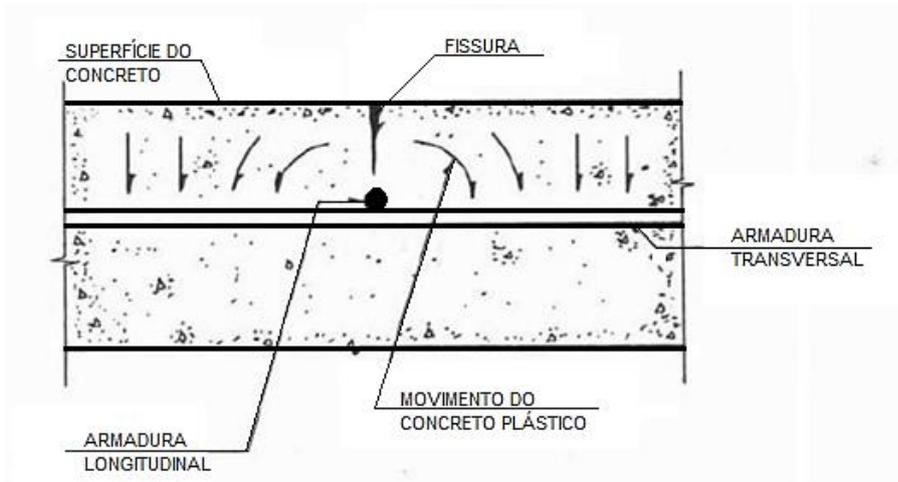
Andrade e Silva (2005), observam que erros de execução, especialmente no que se refere à concretagem, comprometem a durabilidade da estrutura e sua segurança. Para Dal Molin (1988), as fissuras que podem ser examinadas pelo cálculo estrutural são aquelas originadas das ações na estrutura, entretanto as demais fissuras podem ser aliviadas tomando cuidados no projeto e execução. As causas de fissuração do concreto no estado fresco podem ser classificadas em: Assentamento plástico; Dessecação superficial e Deformação excessiva da fôrma, que são descritas nos tópicos subsequentes.

2.2.1.1 Assentamento plástico

Nas primeiras horas após a concretagem, as partículas maiores do concreto tendem a se assentar e a água e o ar tendem a vazar. No processo, a massa e o volume do concreto diminuem. Se houver obstáculos para impedir o movimento das partículas depositadas, como armaduras, agregados ou elementos de espessura variável, podem ocorrer fissuras (DAL MOLIN, 1988). As fissuras mostradas na Figura 3 são maiores do que aquelas causadas pela secagem do concreto e geralmente se estendem por toda a profundidade do elemento.

Os motivos podem ser diversos: concreto com grande exsudação, o concreto no estado fresco possuir vibração excessiva, período de tempo grande entre o lançamento e início de pega e a ausência de estanqueidade das fôrmas. Suas origens se dão de um concreto mal dosado, aditivos em excesso, temperaturas que dificultam o início da pega, vibração excessiva ou vibração das armaduras (DAL MOLIN, 1988).

Figura 3 – Assentamento plástico impedido pela armadura.

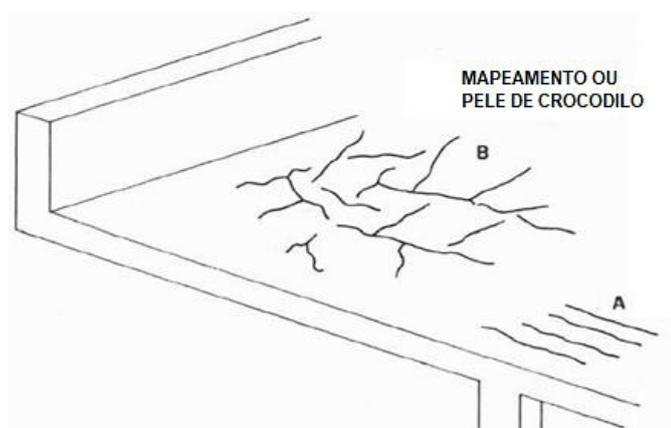


Fonte: DAL MOLIN, 1988.

2.2.1.2 Dessecação superficial

A formação de fissuras devido à dessecação superficial ocorre pela evaporação demasiada da água de amassamento do concreto ou por exagerada absorção dos agregados ou das fôrmas. As fissuras com essas características são superficiais e de baixa profundidade. Sua disposição não cumpre linhas determinadas, mas se subdividem-se ou apresentam ziguezagues, com aparência de um mapa hidrográfico, como apresentado na Figura 4. No canto de lajes as fissuras encontram-se paralelas, dispostas a 45° (DAL MOLIN, 1988).

Figura 4 – Configurações características de fissuração por dessecação superficial.



Fonte: DAL MOLIN, 1988.

2.2.1.3 Deformação excessiva da forma

Dal Molin (1988) afirma que para construir uma estrutura de concreto, é necessário a utilização de moldes através dos quais o concreto plástico, lançado, toma a forma e dimensões

desejadas. Todo o movimento das fôrmas que se produzir entre o momento do lançamento do concreto até o início de pega pode provocar o aparecimento de fissuras. As causas deste movimento podem estar ligadas a diversos fatores, dos quais se destacam as sobrecargas, a maneira como essas fôrmas estão escoradas, os detalhes construtivos, mão de obra e o próprio lançamento do concreto.

2.2.2 Fissuração do concreto no estado endurecido

As fissuras que ocorrem no concreto no estado endurecido originam-se dos esforços que a estrutura suporta ao longo da sua vida útil. O concreto nessa situação, a partir de determinada idade, já alcançou alguma resistência, em função disso é menos propenso ao aparecimento de fissuras do que em fases muito iniciais de sua cura (ASSIS; RABELO, 2013).

Thomaz (1989) correlaciona as causas de fissuração nas estruturas de concreto armado (Quadro 5), não analisando as oriundas do mau uso da construção ou de eventualidades e tendo todas essas surgido pós-processo de endurecimento do concreto.

Quadro 5 – Causas das fissuras no estado endurecido.

Causa	Características
Atividades provocadas por mudanças térmicas e de umidade	São causadas pelos movimentos de dilatação e contração em decorrência das variações de temperaturas. Essas mudanças climáticas geram alteração dimensional, sendo assim, surgem tensões que pode provocar fissuras.
Ação de sobrecargas ou acumulação de tensões.	A ação de sobrecargas, esperadas ou não em projetos, pode causar fissuras nos elementos estruturais e de vedação. Elas acontecem pelo carregamento exagerado de compressão. Geralmente são as mais graves.
Recalques	São causadas pelos recalques diferenciais.
Contração de produtos à base de ligantes hidráulicos	Quando os anidros do cimento reagem com a água dando origem a compostos hidratados, ocorre o que chamamos de retração hidráulica. Essa retração da massa endurecida na maioria das vezes é impedida pela reação de outros elementos, causando tensões de tração que, se forem maiores que a resistência do concreto, haverá fissuras.
Transformações químicas de insumos de construção	A reação álcali-agregado é a resposta química que acontece no concreto já endurecido, entre compostos do cimento, água de amassamento ou agentes externos que adentram no concreto e elementos mineralógicos reagente do agregado, ocasionando fissuras.

Fonte: THOMAZ, 1989.

2.3 O USO DE MICROORGANISMOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

2.3.1 Compósitos cimentícios

A engenharia ecológica trata sobre a necessidade de preservar o meio ambiente e reduzir a emissão de gases prejudiciais ao planeta e à saúde humana. Esta concepção tem levado à uma nova perspectiva sobre o uso de tecnologias que empregam os recursos naturais de forma mais econômica e menos destrutiva (TEIXEIRA, 2005). Essa ciência é usada na busca de materiais sustentáveis, com maior resistência e um desempenho adequado (SCHWANTES-CEZARIO, 2017).

O constante desenvolvimento é o que impulsiona a busca de novos produtos que apresentem um bom desempenho, baixo custo e sejam sustentavelmente viáveis. Dessa forma, é inevitável que se busque novos materiais que tenham desenvolvimento igual ou superior em relação aos convencionais (OVIEDO *et al.*, 2013). Nessa perspectiva, os compósitos cimentícios se mostram como um exemplo, sendo formados pela combinação de, no mínimo, outros dois materiais combinados quimicamente entre si. A origem da matriz dos compósitos pode ser cerâmica, metálica, polimérica, com uma unidade organizacional macroscópica e manter a estrutura do conjunto organizada (FERREIRA *et al.*, 2017).

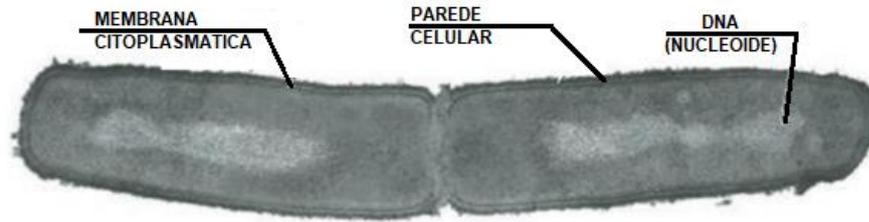
2.3.2 Caracterização das bactérias *Bacillus subtilis*

Na década de 70 e 80, com a evolução dos métodos em microbiologia molecular, a *Bacillus subtilis* tornou-se o primeiro microrganismo modelo não patogênico com genoma totalmente sequenciado e produtora de endósporos (HORNSTRA *et al.*, 2006).

A bactéria *Bacillus subtilis* tem formato de bastonete conforme mostrado na Figura 5. São usadas como modelo de estudo celular bacteriano, morfogênese e crescimento. Mardigan *et al.* (2010), as caracterizam por formar esporos, além disso são Gram positivas, esporulante, aeróbias ou anaeróbias facultativas e com parede celular comum. Uma vantagem do estudo desses microrganismos é que suas células são maiores e facilitam a visualização por microscopia de fluorescência, desse modo, permite aos pesquisadores a geração de mutantes.

Essas bactérias, ao entrar em contato com materiais cimentícios, ficam sem nutrientes suficientes para sobreviver, principalmente por estarem interagindo com materiais altamente alcalinos. Nesse caso, o estudo de esporulação torna-se crucial para compreender a formação dos esporos na autorregeneração do concreto (RAMACHANDRAN *et al.*, 2001).

Figura 5 – Micrografia da bactéria *Bacillus subtilis*.



Fonte: MARDIGAN *et al.*, 2010.

O processo esporulação¹ das bactérias *Bacillus subtilis* dura em torno de 8 horas e se inicia após a divisão celular assimétrica, o mesmo permite a formação de esporos. Além disso garante a sobrevivência desses microrganismos através de três etapas: ativação, germinação e extrusão. Quando a bactéria se encontra em situações críticas de sobrevivência ocorre ativação, em seguida, ao adaptar no novo habitat entra em contato com alimento ou circunstâncias que permite a germinação. Já a extrusão acontece quando o esporo é rompido e começa o seu crescimento. Alguns estudos genéticos de mutantes referenciam que mais de 200 genes da bactéria *Bacillus* são formados através do processo (MARDIGAN *et al.*, 2010).

2.3.3 Processo de biocimentação

As bactérias do gênero *Bacillus* são estudadas por inúmeros pesquisadores de diversas áreas do conhecimento, que vem desenvolvendo técnicas e métodos de análises químicas e analíticas para otimização de novos materiais. Dessa forma, o processo de biocimentação tem se tornado alvo por ter como objetivo principal assimilar a relação entre a matriz orgânica e a cristalização (PARK *et al.*, 2012).

Segundo Pedreira (2014), a biocimentação pode ser chamada de técnica MICP (Microbiologically Induced Calcite Precipitation). Nesse processo pode ser introduzido microrganismos nos materiais cimentícios, sendo uma técnica natural e uma alternativa sustentável, para intensificar suas propriedades mecânicas. Outro ponto positivo é na melhoria na durabilidade com aumento da resistência à compressão, diminuindo a porosidade e os índices de vazios, devido a capacidade de precipitar carbonato de cálcio CaCO_3 . Os microrganismos podem ser acrescentados nos materiais cimentícios em diferentes concentrações, no entanto, há interferência em algumas propriedades, incluindo o estado endurecido (PARK *et al.*, 2012).

De acordo com Montoya *et al.* (2005), algumas bactérias utilizadas para biocimentação são aquelas capaz de realizarem a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), como por

¹ Processo de esporulação: é um fenômeno para produção de endósporos é um método de proteção que permite a sobrevivência das bactérias por muitos anos, com condições extremas, como ausência de água e/ou nutrientes.

exemplo: *Bacillus cereus*, *Bacillus pasteurii*, *Bacillus subtilis* e *Mixococcus xanthus*. Marvasi *et al.* (2010), decidiram usar a *Bacillus subtilis* por ser uma bactéria encontrada com facilidade, suas células são capazes de produzir biofilme com o aumento de pH. Diante disso, os materiais cimentícios, por terem em sua composição substâncias alcalinas e variação no pH, favorecem a precipitação das bactérias introduzidas.

2.3.4 Processo de biomineração

Desde o século XIX, pesquisadores de diversas áreas do conhecimento, vem desenvolvendo técnicas e métodos de análises químicas e analíticas para otimização de novos materiais (BOULINGAND, 2004). O processo de biomineração tem por objetivo principal assimilar a relação entre a matriz orgânica e a cristalização.

As substâncias minerais provenientes de organismos vivos incluem a nucleação e o aumento na produção de um depósito cristalino. Estas dispõem de uma área de interação entre macromoléculas orgânicas e íons inorgânicos (LOWENSTAM; WEINER, 1989). Nos organismos vivos pode ser encontrado cerca de 60 tipos diferentes de minerais biogênicos, dentre eles estão magnésio, cálcio, fosfato de ferro, sulfato de estrôncio e o carbonato de cálcio (LOWENSTAM; WEINER, 1989).

2.3.5 Concentração e forma de adição das bactérias *Bacillus subtilis*

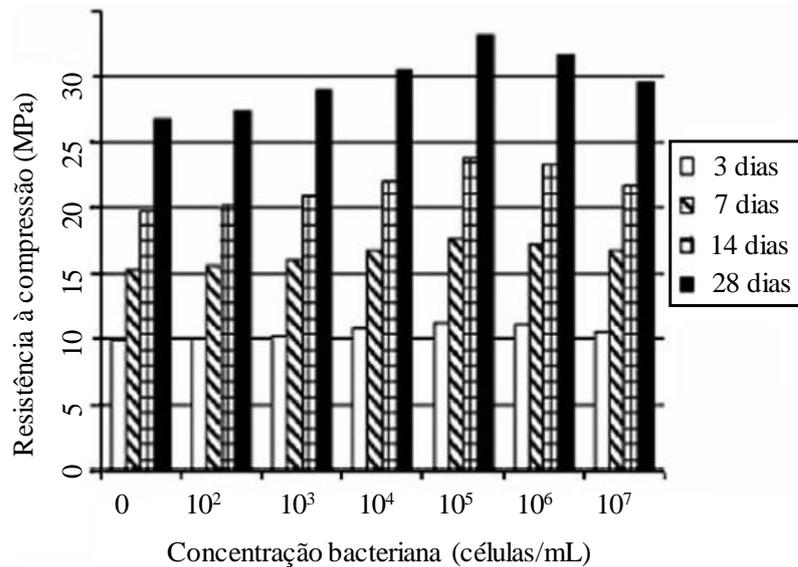
A concentração de bactérias inseridas nos materiais cimentícios influencia diretamente em algumas propriedades, especialmente no estado endurecido. Em seu trabalho, Ghosh *et al.* (2009), escolheram a concentração de 10^5 esporos de bactérias do gênero *Bacillus*, a justificativa foi por apresentar melhores resultados na resistência a compressão em até 25% e redução da porosidade aos 28 dias, como pode ser observado na Figura 6.

Outros pesquisadores como Chahal *et al.* (2012) e Chahal e Siddique (2013) obtiveram os mesmos resultados, estes avaliaram as concentrações de 10^3 , 10^5 e 10^7 células/mL e chegaram a resultados positivos usando a concentração de 10^5 células/mL. No entanto, existe outros fatores que interferem nas propriedades dos materiais cimentícios, sendo um deles a forma como essas bactérias serão adicionadas aos materiais compósitos.

No aspecto inserção das bactérias na matriz cimentícia, Jonkers *et al.* (2010) afirmam que existem duas formas de adicioná-las: pela água de amassamento na mistura; ou aplicação da solução bacteriana diretamente nas fissuras do corpo de prova depois da desmoldagem.

Dessa forma, as bactérias conseguem realizar a bioprecipitação do carbonato de cálcio possibilitando assim o fechamento dos poros, ou seja, a autocicatrização.

Figura 6 – Resistência à compressão da argamassa x concentração de células em diferentes idades.



Fonte: Adaptado de GHOSH *et al.*, 2009.

2.4 INFLUÊNCIA DAS BACTÉRIAS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Estruturas de concreto tem como função a resistência de edificações, com uma boa durabilidade, visando baixa manutenção e mantendo características de conforto para os usuários (PARK; PAULAY, 1975). Desse modo, é crucial entender quais propriedades do material cimentício podem ser influenciadas com a adição dos microrganismos e analisar o comportamento do material mediante a adição, conforme apresenta-se nesta seção.

2.4.1 Resistências à tração e à compressão

A obtenção da resistência do concreto, por intermédio de ensaios, é um fator determinante para engenheiros e projetistas assegurarem a qualidade e durabilidade da estrutura. Essa propriedade basicamente determina o quanto o material resiste as tensões aplicadas sem romper ou chegar ao colapso (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em seu trabalho, Silva e Passarini (2017) realizaram ensaios de resistência à compressão e flexão em corpos de prova de concreto convencional e no bioconcreto reforçado por bactérias, de modo a comparar seus desempenhos. Os testes foram feitos nas idades de 7 e 28 dias e, conforme pode ser observado nas Tabelas 1 e 2, notou-se um aumento na resistência no bioconcreto nos dois testes.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de resistência a compressão do concreto.

Ensaio	Dias	Concreto convencional (MPa)	Bioconcreto (MPa)
1	7	20,84	27,09
2	28	29,99	38,98

Fonte: SILVA; PASSARINI, 2017.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de resistência a flexão do concreto.

Ensaio	Dias	Concreto convencional (MPa)	Bioconcreto (MPa)
1	7	3,92	4,60
2	28	7,07	7,85

Fonte: SILVA; PASSARINI, 2017.

Esse aumento na resistência pode ser justificado pelo comportamento das células das bactérias inseridas nos corpos de prova, uma vez que com a absorção de água nos materiais cimentícios as mesmas se reproduzem e formam calcita. Assim, fecham-se os poros bloqueando a entrada de umidade, nutrientes e oxigênio no material, as bactérias começam então a agir como fibras orgânicas dentro dos materiais cimentícios (ACHAL *et al.*, 2010).

2.4.2 Porosidade

A porosidade em materiais cimentícios reflete diretamente na durabilidade da estrutura, sendo provocada por alguns fatores, como: fissuração, água na mistura, a distribuição e tamanho dos poros e deficiência na produção dos concretos (CAMPITELI, 1987). De maneira geral, isso pode afetar certas propriedades, como permeabilidade, durabilidade, dureza. Desse modo, a porosidade de uma pasta cimentícia está diretamente associada com a sua resistência à compressão e módulo de elasticidade (BEAUDOIN *et al.*, 1994).

Segundo Dullien (1979), um elemento poroso pode ser caracterizado como aquele que possui espaços em intervalos não preenchido por matérias sólidas (poros), arranjados na matriz. A fonte dos poros nas pastas de cimento está diretamente ligada à hidratação do cimento e a evaporação da água livre (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Neville e Brooks (2013) o teor de água imposto para a hidratação do cimento é 0,28 na relação água/cimento. Sempre que a quantidade de água for superior a necessária, o excesso resultará em água livre, que após a evaporação ocasionará no aumento do volume de poros capilares.

Os poros capilares são gerados nos espaços cheios de água que não são preenchidos por compostos de hidratação e tem tamanho variando de moderados nanômetros a dezenas de micrômetros (GALLUCCI *et al.*, 2007). Dessa maneira, a porosidade capilar é a que mais

influencia as propriedades dos materiais cimentícios, por manifestar uma rede interligada de poros, simplifica o transporte de água e agentes hostis para o interior dos materiais, tornando mais rápido seu processo de degradação e reduzindo sua durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Como a porosidade está correlacionada a durabilidade do material, os dados de porosidade total, assim como a distribuição dos poros em sua microestrutura, permitem compreender resultados sobre o desempenho deste elemento ao longo do tempo (BEAUDOIN *et al.*, 1994).

2.5 ANÁLISE ESTÁTISTICA

2.5.1 Conceitos estatísticos

Com intuito de atingir determinada qualidade de um produto, existe inúmeros parâmetros que são responsáveis pelas ações e composições dos materiais. Os tratamentos dos materiais são todas as combinações possíveis controláveis do experimento e sua produção deve atingir o desempenho mínimo do produto (MONTGOMERY, 2009; MONTGOMERY, 2004).

Ao se realizar um ensaio, a análise estatística é de suma importância para auxiliar no entendimento e interpretação dos resultados obtidos. Existem alguns conceitos relevantes para facilitar a compreensão da estatística, sendo o primeiro deles o ensaio, que é um estudo anteriormente planejado e que segue princípios definidos no qual se faz a comparação dos efeitos dos tratamentos. Um tratamento é um termo geral para denominar o método, elemento ou material cuja intenção deseja-se medir ou comparar em um ensaio. Já uma unidade experimental ou parcela vai ganhar o tratamento e fornecer dados que precisarão refletir seu efeito. A forma como os tratamentos serão indicados às unidades experimentais é conhecida como delineamento experimental. Por fim, existe um grupo ou subgrupo de dados obtidos de uma população, que é denominado amostra (BANZATTO; KRONKA, 2006).

Para analisar se existem, na amostra, indícios suficientes para se deduzir que uma condição seja verdadeira para toda a população, utiliza-se um teste de hipótese: a hipótese nula (H_0), que garante não haver diferença significativa entre os tratamentos e a hipótese alternativa (H_1), que é contrária a hipótese nula, onde há uma diferença entre os tratamentos. Desse modo, é possível afirmar que a análise estatística visa verificar os dados e a conclusão dos mesmos. Segundo Silvestre (2007), pode-se descrever essa análise em seis objetivos básicos:

- Sintetização e redução dos dados: organização dos dados e redução dos mesmos em números sintéticos sem perda de informações;

- Inferência para outros conjuntos de dados: permite definir o grau de confiança e avaliar a precisão dos dados;
- Identificação de relações entre conjuntos de dados: verificação dos dados e suas relações;
- Redução da dimensionalidade de dados multivariados: refere-se à observação de um determinado número x em um conjunto de indivíduos verificando as relações entre suas características;
- Classificação e discriminação: a classificação trata da inserção de um dado em um grupo já definido e a discriminação é a distinção dos grupos;
- Agrupamento de dados: agrupamento de indivíduos ou objetos.

2.5.2 Erro estatístico

Segundo Montgomery (2009) e DeVor *et al.* (1992), existe dois tipos de erros possíveis que rejeitam ou não a hipótese nula: O chamado erro tipo I, usado para rejeitar a hipótese nula quando verdadeira, chamado erro α , que é apresentado na Eq. (1), e o erro tipo II, que não rejeita a hipótese nula quando falsa, chamado erro β , apresentado na Eq. (2).

$$\alpha = P(\text{rejeitar } H_0/H_0 \text{ verdadeiro}) \quad (1)$$

$$\beta = P(\text{não rejeitar } H_0/H_0 \text{ falsa}) \quad (2)$$

Para testar estas hipóteses, analisa-se as duas estimativas para definir se são verdadeiras, em seguida, distingue-se qual adotar. No entanto, estes erros são associados e inversamente proporcionais, ou seja, quando se diminui a probabilidade de um deles, automaticamente aumenta-se a probabilidade do outro (DEVOR *et al.*, 1992).

De modo geral, na estatística, verifica-se o erro do tipo I, através dos níveis de significância de 5% ou 1%, basicamente significa que há 5 possibilidades em 100 ou 1 possibilidade em 100 de descartar a hipótese H_0 quando verdadeira. Outro termo importante é o grau de confiança do teste, descrito em forma de porcentagem e representado conforme mostra a Tabela 3 (BANZATTO; KRONKA, 2006).

Tabela 3 – Testes de hipóteses.

Decisão das hipóteses nula	Hipóteses Nula	
	Verdadeira	Falsa
Não rejeitar H_0	Decisão correta com probabilidade $(1-\alpha)$	Erro Tipo II com probabilidade (β)
Rejeitar H_0	Erro Tipo I com probabilidade (α)	Decisão correta com probabilidade $(1-\beta)$

Fonte: DEVOR *et al.* (1992).

O teste descrito é expresso por $(1-\alpha)$, definido quando se assume a decisão de não rejeitar uma hipótese nula caso verdadeira, ou $(1-\beta)$, quando a probabilidade de rejeitar a hipótese nula caso falsa (DEVOR *et al.*, 1992).

2.5.3 P-Value

O *p-value* é estipulado como a probabilidade de a estatística do teste de hipótese manifestar um valor que seja ao menos o valor extremo, em relação ao valor examinado, quando a hipótese nula é verdadeira (MONTGOMERY, 2009). Quando o *p-value* é superior ao nível de significância proposto, o teste não é significativo ao nível testado. Neste caso, tem-se uma hipótese nula (H_0), onde não é possível garantir diferença entre os efeitos dos tratamentos, nesse nível de probabilidade (BANZATTO; KRONKA, 2006).

Quando o *p-value* for inferior ao nível de significância proposto, o teste é significativo no nível testado. Sendo assim, tem-se uma hipótese alternativa (H_1), onde conclui-se que os efeitos dos tratamentos diferem nesse nível de probabilidade, e essas desigualdades não devem ser concedidas ao acaso, mas sim aos efeitos maiores de alguns dos tratamentos (BANZATTO; KRONKA, 2006). Portanto, quanto menor for o *p-value*, maior será a evidência de que a hipótese nula deve ser descartada (MONTGOMERY, 2009).

2.5.4 Análise de variância (ANOVA)

Utilizada para comparar médias, a análise da Variância (ANOVA, do inglês *Analysis of Variance*) é uma técnica estatística utilizada para a identificação da existência de efeitos dos níveis de fatores. É um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais através das análises de variâncias amostrais. Os dados amostrais são separados em grupos segundo uma característica (tratamento). Dentre os modelos de análise de variância, pode-se destacar a Anova de dois fatores (com A e B em vários níveis de interesse) (BRAVO, 2016).

A verificação dos dados do modelo de regressão é baseada na soma dos quadrados das diferenças com relação ao valor médio. Sendo a soma dos quadrados total de dois fatores, descritas pela Eq. (3).

$$SQ_{total} = SQ_a + SQ_b + SQ_{ab} + SQ_{erro} \quad (3)$$

Onde os termos da soma total dos quadrados são divididos em 4 partes, sendo duas referentes a quantidade de tratamentos que se diferem, SQ_a para fator A e SQ_b para o fator B, com os respectivos graus de liberdade de $(a - 1)$ e $(b - 1)$. O SQ_{ab} , por sua vez, quantifica as interações entre os fatores com o grau de liberdade $(a - 1)(b - 1)$. Por fim, o SQ_{erro} é a quantidade de erros onde o grau de liberdade para o erro $ab(n - 1)$.

O quadrado médio é a razão entre a soma de quadrados e os graus de liberdade. As Eq. (4), (5), (6) e (7) descrevem os quadrados médios para os fatores A, B, interação AB e erro.

$$QM_a = \frac{SQ_a}{a - 1} \quad (4)$$

$$QM_b = \frac{SQ_b}{b - 1} \quad (5)$$

$$QM_{ab} = \frac{SQ_{ab}}{(a - 1)(b - 1)} \quad (6)$$

$$QM_{erro} = \frac{SQ_e}{ab(n - 1)} \quad (7)$$

O Teste-F tem por objetivo verificar estimativas de variância. Para empregar o Teste-F na análise de variância, usa-se sempre no denominador o QM_{erro} . O Teste-F é uma relação entre duas variâncias: uma correspondente aos efeitos do fator controlado e outra devida aos efeitos dos fatores incontrolados ou acaso (QM_{erro}) (BANZATTO; KRONKA, 2006).

$$F_a = \frac{QM_a}{QM_{erro}} \quad (8)$$

$$F_b = \frac{QM_b}{QM_{erro}} \quad (9)$$

$$F_{ab} = \frac{QM_{ab}}{QM_{erro}} \quad (10)$$

A análise de regressão, definida como coeficiente de correlação múltipla de *Pearson* (R^2), tem a razão variando entre os valores 0 e 1, de modo que quanto mais próximo de 1 se obtém esse coeficiente, mais a curva gráfica tende a atingir todos os pontos de análise. Deve-se levar em consideração o uso da estatística F para verificar as hipóteses e se as médias obtidas serão estimativas tendenciosas (BANZATTO; KRONKA, 2006).

2.5.5 Teste Tukey

Atualmente o teste Tukey é o mais comum nas comparações de médias, o que se deve ao fato deste ser de fácil aplicação e apresentar bons resultados. O teste consiste em realizar comparações de todos os possíveis pares de médias, em amostras de tamanhos iguais, e se baseia na diferença mínima significativa (D.M.S.), considerando os percentis do grupo. Para obtenção do D.M.S, o teste emprega valores crítico da amplitude estudentizada, denominado como q e apresentado na Eq. (11) (COSTA NETO, 1977).

$$\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}} \quad (11)$$

Na Equação (11), Δ representa a diferença mínima significativa; q a amplitude total estudentizada; s a raiz quadrada do quadrado médio do erro ($\sqrt{QM_{erro}}$) e r o número de repetições com que foram calculadas as médias.

O valor q é definido como valor da amplitude total obtido em função do número de tratamentos a serem comparados. Em seguida, é feito o cálculo das estimativas dos contrastes de duas médias, compara-se as estimativas de contraste com diferença mínima significativa e indica-se a significância do teste no valor da do contraste (BANZATTO; KRONKA, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O preparo do material compósito com adição de bactérias foi realizado com a cooperação e utilização de ferramentas disponíveis no Laboratório de Materiais e Estruturas, localizado no Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA. Cabe ressaltar que as amostras de esporos bacterianos foram isoladas, preparadas e cedidas pelo Laboratório de Microbiologia Agrícola da Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG.

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, os seguintes materiais foram empregados: Cimento Portland CII F-32, areia quartzosa de rio como agregado miúdo; brita 1 como agregado graúdo; esporos da bactéria *Bacillus subtilis* e solução tampão de fosfato, em concentração descrita por Schwantes-Cezário, Nogueira e Toralles (2017) (Tabela 4), sendo ambos fornecidos pelo Laboratório de Microbiologia Agrícola da Faculdade Evangélica de Goianésia; e água fornecida pelo Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás.

Tabela 4 – Constituintes do tampão fosfato.

Características	Quantidade (g/L)	Quantidade em relação a massa de cimento (%)
Fosfato de sódio (bibásico-anidro)	1,05	0,07
Fosfato de sódio (monobásico)	0,36	0,02
Cloreto de sódio	8,17	0,51

Fonte: SCHWANTES-CEZÁRIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017.

A solução tampão fosfato foi empregada para preservar o meio isotônico para a bactéria, uma vez que seu pH é de 7,2. Segundo Ramachandran *et al.* (2001) a distribuição das bactérias em solução tampão é mais benéfica, em termos de resistência à compressão, do que a adição de solução salina, em função disso esta solução foi escolhida. No concreto armado, utiliza-se armações feitas com barras de aço, sendo assim, o cloreto de sódio pode vir a ser prejudicial em estudos usando-se esse tipo de material.

Vale evidenciar que a concentração de 10^5 esporos de *B. subtilis*/mL dentre os estudos realizados, foi a que ocasionou melhor resistência à compressão e menores resultados de absorção de água, de acordo com estudos feitos por Ghosh *et al.* 2009, Chahal *et al.* 2012, Chahal e Siddique, 2013 e Krishnapriya *et al.* 2015.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização dos agregados

Os agregados, gráudo e miúdo, utilizados na mistura já haviam sido classificados pelo Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Tecnológico, onde foram realizados os ensaios. As propriedades dos agregados são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais utilizados.

Agregados	Propriedades	Valores
Areia Natural (média fina)	Massa específica	2,483 g/cm ³
	Massa unitária	2,496 g/cm ³
	Módulo de finura	3,6
Brita 01	Massa específica	2,834 g/cm ³
	Massa unitária	2,392 g/cm ³
	DMC	19 mm

Fonte: As autoras (2021).

3.2.2 Definição dos Traços

O traço de referência utilizado no programa experimental foi definido a partir do método ABCP (Associação Brasileira Cimento Portland) e sua composição, em massa, foi de 1:2,496:2,392:0,56 (cimento:areia:brita:água). A dosagem foi definida de modo a atingir os 20 MPa aos 28 dias. Além do traço de referência, outros três traços foram dosados com a inserção da substância contendo as bactérias em sua composição, sendo estes descritos no Quadro 6. A determinação dos referidos traços foi feita de maneira rápida, sendo necessário somente recalcular a quantidade de água/solução tampão de fosfato e esporos/mL por meio da regra de três simples, mantendo a quantidade de cimento, areia e brita. Os resultados obtidos para cada quantidade presente nos referidos traços são apresentados na Tabela 6.

Quadro 6 – Descrição dos traços de concreto dosados no programa experimental.

Traços	Descrição dos Traços
Referência	Traço de referência sem nenhuma adição.
Traço I	Traço com adição de tampão fosfato no lugar da água da mistura e 10 ⁵ esporos/mL de bactéria <i>B. subtilis</i> .
Traço II	Traço com adição de 10 ¹⁰ esporos/mL de bactéria <i>B. subtilis</i> .
Traço III	Traço com adição de 10 ⁵ esporos/mL de bactéria <i>B. subtilis</i> .

Fonte: As autoras, 2022.

Tabela 6 – Traços de concreto utilizados no experimento.

Traços	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (kg)	Tampão de fosfato (kg)	Esporos de <i>B. subtilis</i> /mL
Referência	7,50	18,72	17,94	4,20	0	0
Traço I	7,50	18,72	17,94	0	4,20	10 ⁵ (1)
Traço II	7,50	18,72	17,94	4,20	0	10 ¹⁰ (2)
Traço III	7,50	18,72	17,94	4,20	0	10 ⁵ (1)

(1) A concentração de 10⁵ foi dispersa nos 4,20 kg de solução tampão de fosfato/água.

(2) A concentração de 10¹⁰ foi dispersa nos 4,20 kg de água.

Fonte: As autoras, (2022).

3.2.3 Produção do concreto

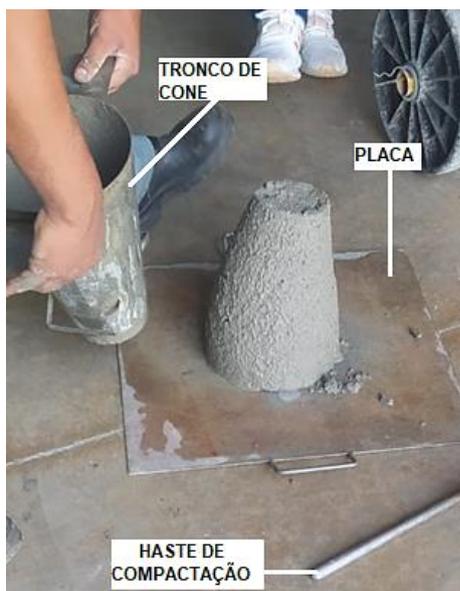
Seguindo os procedimentos especificados pela NBR 12655 (ABNT, 2015) e tendo os traços devidamente calculados, foi realizada a fabricação do concreto. Para tanto, utilizou-se uma betoneira com capacidade de 250 litros (Figura 7), disponível no laboratório de materiais do Centro Tecnológico.

Figura 7 – Betoneira de 250 L utilizada no experimento.

Fonte: As autoras, 2022.

Após a fabricação da massa de concreto, parte foi transferida para o tronco de cone para a realização do teste de abatimento, de modo a verificar sua trabalhabilidade. Os materiais usados no ensaio foram: placa de base, tronco cônico e haste de compactação, que são mostrados na Figura 8 e prescritos na NM 67 (ABNT, 1998). Para realização do teste, colocou-se o concreto no tronco cônico em três camadas que receberam 25 golpes cada com a haste de compactação.

Figura 8 – Equipamentos utilizados para realização do *Slump test*.



Fonte: As autoras, 2022.

Em seguida, para medição do abatimento, retirou-se o tronco de cone, que foi colocado invertido ao lado da massa de concreto, e, com auxílio da haste metálica e uma trena, realizou-se a medição, onde todos atenderam a normativa, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Medição do abatimento obtido pelo *Slump Test*.



Fonte: As autoras, 2022.

Para moldagem dos corpos de prova, foi coletada amostragem de concreto fresco, conforme especifica a NBR NM 16886 (ABNT, 2020). No total foram moldados 48 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), sendo 12 para cada traço fabricado neste trabalho (Quadro 6), separados em 3 conjuntos de 4 amostras, à serem rompidas aos 7, 14 e 28 dias da moldagem. Em relação ao processo de moldagem, inicialmente

os moldes metálicos foram lubrificados com auxílio de um pincel, para facilitar a posterior desmoldagem dos corpos de prova. Em seguida, inseriu-se o concreto fresco dentro dos moldes, conforme especificações da NBR NM 33 (ABNT, 1998), em duas camadas, onde cada uma recebeu 12 golpes de adensamento. A Figura 10 mostra os moldes cilíndricos que foram utilizados no processo de confecção dos corpos de prova.

Figura 10 – Moldes cilíndricos utilizados para fabricação dos corpos de prova.



Fonte: As autoras, 2022.

Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em processo de cura inicial por um período de 24h, onde ficaram em uma superfície horizontal, sem vibrações e perturbação, conforme mostra a Figura 11. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e transportados para câmara úmida, onde ficaram até as idades de rompimento de 7, 14 e 28 dias, para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial. Todo processo de cura foi feito segundo o prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 11 – Cura inicial dos corpos de prova.



Fonte: As autoras, 2022.

3.2.4 Ensaio de Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de rompimento de 7, 14 e 28 dias. Para execução do ensaio, inicialmente, o corpo de prova foi centralizado no prato inferior da prensa, conforme mostra a Figura 12. O carregamento foi aplicado de forma contínua até acontecer a ruptura do espécime, ou seja, quando a prensa apresentou queda no valor da força aplicada. Esse teste foi realizado também no Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA.

Figura 12 – Prensa com corpo de prova sendo preparado para o ensaio.



Fonte: Autoras, 2022.

3.2.5 Análise estatística

Os arranjos foram dispostos em um esquema fatorial 4x3, sendo 4 tipos de traços (Referência, Traço I, Traço II e Traço III) e 3 idades de rompimento (7, 14 e 28 dias), totalizando 12 tratamentos com 4 repetições.

Através da Tabela 7 é possível observar como os tratamentos foram nomeados, uma vez que para a divisão dos dados é essencial denominar cada tratamento para auxiliar o entendimento das variáveis observadas e quantidade total.

Tabela 7 – Descrição dos tratamentos.

Nomenclatura	Descrição
Referência - 07	Tempo de 7 dias, sem nenhuma adição
Traço I - 07	Tempo de 7 dias, concentração de 10^5 esporos/mL e solução tampão de fosfato
Traço II - 07	Tempo de 7 dias, concentração de 10^{10} esporos/mL
Traço III - 07	Tempo de 7 dias, concentração de 10^5 esporos/mL
Referência - 14	Tempo de 14 dias, sem nenhuma adição
Traço I - 14	Tempo de 14 dias, concentração de 10^5 esporos/mL e solução tampão de fosfato
Traço II - 14	Tempo de 14 dias, concentração de 10^{10} esporos/mL
Traço III - 14	Tempo de 14 dias, concentração de 10^5 esporos/mL
Referência - 28	Tempo de 28 dias, sem nenhuma adição
Traço I - 28	Tempo de 28 dias, concentração de 10^5 esporos/mL e solução tampão de fosfato
Traço II - 28	Tempo de 28 dias, concentração de 10^{10} esporos/mL
Traço III - 28	Tempo de 28 dias, concentração de 10^5 esporos/mL

Fonte: Autoras, 2022.

Para a realização da análise estatística foi utilizado o *software* SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2014), os dados foram inseridos e submetidos à análise de variância (ANOVA), comparativo de média pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e a análise de regressão quando significativo, para a variável resistência à compressão, em desdobramento da soma dos quadrados da interação (concentrações x tempo), para verificação de significância.

Essa análise permite examinar a relação entre as variáveis, mostrando as diferenças apresentadas e identificando quais apresentaram maior impacto para o tema em questão, onde se objetiva mostrar o ganho de resistência do concreto com a adição de bactérias em comparação com o concreto convencional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para as idades de 7, 14 e 28 dias de idade do concreto. Nestas idades, foram ensaiados 4 corpos de prova para cada traço analisado, apresentados no Quadro 6, totalizando o rompimento de 16 corpos de prova em cada idade. A Tabela 8 apresenta todos os resultados obtidos para cada concentração e o traço de referência.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.

Idade (dias)	Resistência a compressão (MPa)			
	Referência	Traço I	Traço II	Traço III
7	19,1	23,3	25,6	21,4
	19,4	23,8	26,1	21,9
	18,7	23,9	26,5	21,7
	19,7	23,6	26,1	20,4
14	22,2	26,9	26,0	23,9
	21,7	26,2	27,3	23,4
	22,5	25,7	26,9	23,0
	22,7	25,6	26,7	24,4
28	24,2	27,3	27,4	24,5
	24,0	27,9	30,2	25,6
	24,8	27,0	29,3	23,1
	22,4	25,4	29,5	25,6

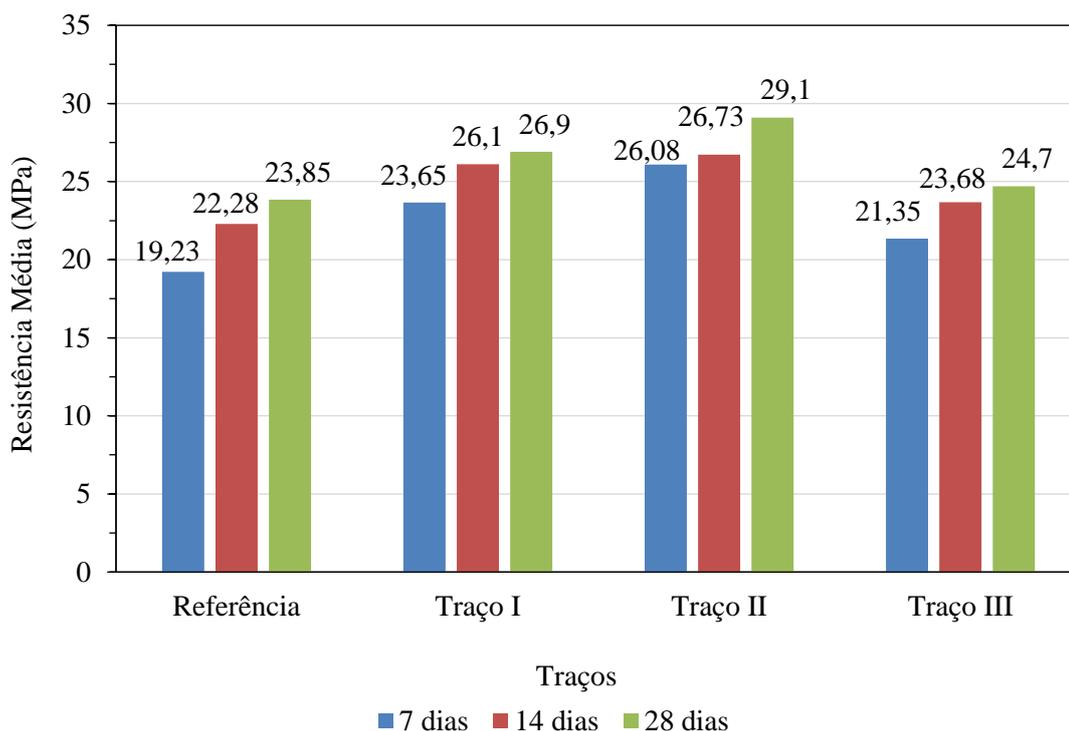
Fonte: As autoras, 2022.

Para a melhor visualização dos resultados, no Gráfico 1 estão apresentadas as médias em MPa obtidas nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova, de acordo com cada traço (Quadro 6) e o dia específico para o teste de ruptura.

Com a análise da Tabela 8 e do Gráfico 1, verificou-se que todos os corpos de prova apresentaram um aumento da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias, o que era esperado. Verificou-se ainda que todos os traços com a adição dos esporos bacterianos possuem uma resistência maior, quando comparados com o traço sem nenhuma adição.

Aos 28 dias, os traços I, II e III, quando comparados ao de referência, possuem aumentos de resistência de 12,79%, 22,01% e 3,56%, respectivamente. Segundo estudos realizados por Ghosh *et al.* (2009), Chahal *et al.* (2012), Chahal e Siddique (2013), esse aumento na resistência se deve pela adição de esporos no material levar a bioprecipitação de CaCO_3 , onde ocorre o fechamento dos poros obstruindo a passagem de umidade. Sendo assim, as bactérias criam fibras orgânicas dentro dos materiais aumentando sua resistência.

Gráfico 1 – Média das resistências à compressão dos corpos de prova nas suas respectivas idades.



Fonte: As autoras, 2022.

Ao realizar uma comparação entre os traços II e III, que se diferem somente por suas concentrações de esporos (10^{10} e 10^5 , respectivamente), é possível perceber que aos 28 dias há uma diferença na resistência à compressão obtida de 17,81% a favor do traço II, ou seja, o traço que possuía uma maior concentração de células por mL, apresentou uma maior resistência. De acordo com Schwantes-Cezario (2017), as bactérias do gênero *Bacillus*, tem a capacidade de formar calcário dentro dos poros, portanto, uma maior concentração leva a uma maior produção de calcário e conseqüentemente, a maior resistência.

Outra comparação pertinente é entre os traços I e III, que possuem a mesma concentração de bactérias, porém, o traço I apresenta em sua composição a solução tampão de fosfato. Tomando por base os resultados obtidos para ambos aos 28 dias, é possível notar que o traço I obteve uma resistência superior ao traço III em 8,91%. Outra possibilidade de comparação é entre o traço I e o traço II se os dois traços estivessem com adição de tampão de fosfato. De acordo com Ramachandran *et al.* (2001) a solução tampão é mais benéfica, em termos de resistência à compressão, uma vez que essa solução tem a função de preservar o meio onde as bactérias estão sendo inseridas.

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística, foi assegurado que os dados atendessem aos pressupostos básicos de normalidade e homogeneidade, conseqüentemente, não foi necessário realizar qualquer transformação de dados. A análise de variância para o esquema fatorial 4x3 (4 tipos de traços e 3 idades de rompimento) é apresentada pela Tabela 9, onde constam os dados do ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova de cada traço e as idades de rompimento de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 9 – Análise de Variância.

FV	GL	SQ	QM	F	P-Value
Concentrações	3	214,827	71,609	121,557	0,0000*
Tempo	2	102,746	51,373	87,207	0,0000*
Concentrações x Tempo	6	8,282	1,380	2,343	0,0517
Resíduo	36	21,207	0,589		
Total	47	347,063			
CV (%) =	3,14				
Média geral:	24,469	Número de observações: 48			

*Significativo pelo teste de F a 5% de probabilidade. FV = Fontes de Variação, GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma dos Quadrados, QM = Quadrado Médio, CV = Coeficiente de Variação %

Fonte: As autoras, 2022.

Após o processamento desta análise, as fontes de variação (FV) foram tidas como variáveis perguntas. Assim, para cada uma delas foi constatado se os valores *p-value* são inferiores a 0,05 (5%) de probabilidade. É possível perceber, com base nos resultados expressos na Tabela 9, que somente as variáveis “Concentrações” e “Tempo” possuem valores inferiores a 5%, reprovando assim a hipótese nula H_0 , ou seja, existe uma diferença significativa entre os tratamentos. Já para a interação “Concentrações x Tempo” não houve uma diferença significativa para os desdobramentos das concentrações usadas dentro do tempo.

Considerando que existe uma diferença significativa entre os tratamentos, é crucial a aplicação de um teste de comparação de médias entre eles de modo a determinar qual o melhor a ser aplicado. Nesse caso, especificamente, foi utilizado o Teste de Tukey, por ser de fácil aplicação e compreensão. A Tabela 10 apresenta os dados do Teste de Tukey, onde as médias são em relação ao somatório das idades de 7, 14 e 28 dias, representadas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Tabela 10 – Resumo do Teste de Tukey a 5% de probabilidade para os tipos de tratamento.

Tratamentos	Média (MPa)	Resultado do teste
Traço II	27,300	a
Traço I	25,550	b
Traço III	23,241	c
Referência	21,783	d

Fonte: As autoras, 2022.

Através dos resultados apresentados na Tabela 10, é possível observar que o traço II apresentou a melhor média e o traço de referência, que não possuía nenhum tipo de adição, a menor. De acordo com Jonkers *et al.* (2010), o fechamento dos poros dos materiais cimentícios está ligada a capacidade de as bactérias formarem calcário dentro dos poros. Além da adição das bactérias, Perito *et al.* (2014) descrevem que a concentração também influencia na precipitação do carbonato de cálcio, uma vez que há crescimento dos esporos dormentes, atingindo o local de nucleação dos cristais.

Em seguida o teste de Tukey foi realizado tendo como variável o “Tempo”. O resultado das médias está exposto na Tabela 11.

Tabela 11 – Resumo do Teste de Tukey para a variável “Tempo”.

Tratamentos	Média (MPa)	Resultado do teste
28	26,137	a
14	24,693	b
7	22,575	c

Fonte: As autoras, 2022.

Como mostrado na Tabela 11, aos 28 dias a média de resistência a compressão chegou aos 26,14 MPa, sendo assim, o melhor resultado. Segundo Neville e Brooks (2013), o tempo de cura é proporcional a resistência do concreto. Fato esse que se comprovou, uma vez que a maior resistência foi aos 28 dias.

Analisando o desdobramento das concentrações de células/mL para cada tempo, têm-se que ambas possuem diferença significativa entre si, visto que o *p-value* foi inferior a 5%, conforme exposto na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise de variância: “Concentrações x Tempo”.

FV	GL	SQ	QM	F	P-Value
Concentrações / 7 dias	3	104,515	34,838	59,139	0,0000*
Concentrações / 14 dias	3	51,967	17,322	29,405	0,0000*
Concentrações / 28 dias	3	66,627	22,209	37,700	0,0000*
Resíduo	36	21,207	0,589		

*Significativo pelo teste de F a 5% de probabilidade. FV = Fontes de Variação, GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma dos Quadrados, QM = Quadrado Médio, CV = Coeficiente de Variação %

Fonte: As autoras, 2022.

A partir do teste de Tukey, entre as concentrações e interação com o tempo de 28 dias, é possível perceber na Tabela 13 que o traço II é superior as demais, chegando a atingir uma resistência de 29,1 MPa.

Tabela 13 – Teste de Tukey para interação “Concentrações x Tempo”.

Tratamentos	Média (MPa)	Resultado do teste
Traço II	29,100	a
Traço I	26,900	b
Traço III	24,700	c
Referência	23,850	c

Fonte: As autoras, 2022.

De acordo com Jonkers *et al.* (2010), uma vez que as bactérias estão inseridas em matriz cimentícia, acontece o fechamento dos poros. Isso acontece devido a produção de calcário que as bactérias do gênero *Bacillus* conseguem realizar. Com a diminuição dos índices de vazios, há aumento na resistência do concreto. Segundo Schwantes-Cezario (2017), a concentração de células/mL está relacionada com a resistência do concreto, sendo o traço II com a maior concentração de bactérias, atingiu uma maior resistência.

Conforme a Tabela 13, os traços III e de referência são estatisticamente iguais entre si, corroborando com Schwantes-Cezario (2017) e Jonkers *et al.* (2010) a respeito da concentração de bactérias, uma vez que em uma concentração menor haverá uma menor resistência.

Apesar de o traço I possuir a mesma concentração de bactérias que o traço III, se diferindo apenas em sua composição, sendo que o traço I possuía em sua constituição a solução tampão de fosfato no lugar da água, comprovando que a solução realmente preservou o meio isotônico para as bactérias (RAMACHANDRAN *et al.*, 2001).

5 CONCLUSÕES

De modo geral, a partir dos resultados obtidos, verificou-se que a adição dos microrganismos nas concentrações descritas, promoveu ganho de resistência ao material, em comparação com o traço de concreto convencional, em todas as adições realizadas. Isso se deve a bioprecipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que ocorre com a inserção da bactéria na mistura, apresentando um resultado satisfatório no ensaio de resistência à compressão.

Nesta pesquisa, especificamente, o traço com melhor resultado, aos 28 dias de vida do concreto, foi aquele com uma concentração de 10^{10} células/mL de *Bacillus subtilis* na água de amassamento, apresentando resistência média 22% maior quando comparada com o traço de referência. Isso se justifica devido a capacidade das bactérias do gênero *Bacillus* formarem calcário dentro dos poros, portanto, uma maior concentração leva a uma maior produção de calcário e conseqüentemente, a uma maior resistência.

Logo, o resultado mostra que a adição de esporos bacterianos no interior do concreto passa a se comportar como fibra orgânica preenchendo os poros e impedindo que o oxigênio, nutrientes e a umidade entre no material cimentício, possibilitando o aumento da resistência mecânica. Dessa forma, é notável que o uso das bactérias na composição do concreto faz com que ocorra um aumento na resistência do mesmo.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios mecânicos de tração e flexão para avaliar a resistência no concreto sem adições e com adições de microrganismos;
- Avaliar o custo e comportamento a longo prazo em fissuras de uma construção com microrganismos já adicionados no concreto;
- Estudar outro gene de bactérias capazes de realizar a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3);
- Analisar a possibilidade de adição de outros componentes químicos juntamente com os microrganismos que potencializam sua precipitação;
- Usar outras concentrações de células/mL;
- Analisar o comportamento do conjunto concreto armado, verificando o comportamento do aço em contato com os microrganismos, bem como o tampão com características alcalinas.

REFERÊNCIAS

- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A; REDDY, M.S. **Biocalcification by Sporosarcina pasteurii using Corn steep liquor as nutrient source**. Ind. Biotechnol, v. 6, p. 170–174, 2010.
- ASSIS, F. F.; RABELO, Q. R. **Fissuras por movimentação térmica em estruturas de concreto armado**. 2013. 74 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Goiás, Goiânia, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. 2018. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- _____. **ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- _____. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. **ABNT NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **ABNT NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. **ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- _____. **ABNT NBR 16886: Concreto — Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- _____. **ABNT NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- _____. **ABNT NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ANDRADE, T; SILVA, A. J. C. **Patologia das estruturas**. In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.
- BANZATTO, D. A; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: Funep, 2006.
- BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2009.
- BEAUDOIN, J. J.; FELDMAN, R. F.; TUMIDAJSLI, P. J. **Pore structure of hardened Portland cement pastes and its influence on properties**. Advanced Cement Based Materials, v. 1, n. 5, p. 224-236, 1994.

BOULIGAND, Y. **The renewal of ideas about biomineralisations**. Comptes Rendus Palevol, v. 3, n. 6-7, p. 617-628, 2004.

BRAVO, D. P. **Delineamento de experimento aplicado ao processamento da cerâmica zircônia estabilizada com ítria via sinterização por corrente elétrica pulsada**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do concreto**. Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, São Paulo, 1987.

CHAHAL, N.; SIDDIQUE, R. Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: influence of Ureolytic bacteria. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 161-174, 2013.

CHAHAL, N.; RAJOR, A.; SIDDIQUE, R. Calcium carbonate precipitation by different bacterial strains. **African Journal of Biotechnology**, 10(42), 8359–8372, 2012.

CLAUDINO, C. M. de A.; GOMES, B. M. C.; NEVES, Y. T.; NASCIMENTO, M. V. **Presença de bactérias no concreto: uma análise da biodeterioração e bioregeneração**. Anais da Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas, 1, 2017.

COSTA, A. S.; RODRIGUES, F. A. Desenvolvimento de concretos auto curáveis utilizando a bactéria *Bacillus megaterium*. **Revista Científica UMC**, 2018.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. v. 1 ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DEVOR, R. E.; CHANG, T. H.; SUTHERLAND, J. W. **Statistical quality design and control: contemporary concepts and methods**. New York: Prentiss-Hall, 1992.

DE ASSIS, J. T.; LIMA, I.; CARVALHO, G.; EINSFELD, R.; PESSÔA, J. R. C.; LOPES, R. T.; BREDE, R. L. B. **Concrete matrix porosity study by microtomography images**. 7th EURO MECH Solid Mechanics Conference, 2009.

DULLIEN, F. A. L. **Porous Media - Fluid transport and pore structure**. Academic Press, New York, 1979.

ECHEGARAY, C. F. P. L.; ROJAS, S. K. H.; ACAPANA, E. S. Los beneficios del uso de bacterias en el concreto auto-regenerante. **Revista CIVILIZATE**. nº 7, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.2, p.109-112, 2014.

FERREIRA, J. A.; JÚNIOR, A. I. O.; SOUZA, J. R. P. de. Comparação das resistências mecânicas do compósito resina poliéster/fibra de coco e madeiras brasileiras de usos estruturais. **Engevista**, v.19, n. 5 p. 1364-1375, 2017.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

FREITAS, A. A.; ROMÃO, E. M.; ANICIO, S. O.; BARROS, A. J. Bioconcrete: A review of its application in civil construction. **Research, Society and Development** v. 10, n. 4, p. e37210414270, 2021.

GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.; GROSO, A.; STAMPANONI, M.; MARGARITONDO, G. **3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT)**. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 3, p. 360-368, 2007.

GHOSH, S.; BISWAS, M.; CHATTOPADHYAY, B. D.; MANDAL, S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 2, p. 93-98, 2009.

HELENE, P. ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In ISAIA, Geraldo C. (Org) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo, Cap. 29, p. 905-944, 2010.

HORNSTRA, L. M. Y. P. VRIES, M. H. J. WELLS-BENNIK, W. M. VOS e T. ABEE. Characterization of Germination Receptors of *Bacillus cereus* ATCC 14579. **Applied and Environmental Microbiology**. v.72, n.1, p. 44-53, 2006.

JONKERS, H. M.; THIJSEN, A.; MUYZER, G.; COPUROGLU, O.; SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 230-235, 2010.

KRISHNAPRIYA, S.; VENKATESH BABU, D. L.; PRINCE ARULRAJ G. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. **Microbiological research**, v. 174, p.48-55, 2015.

LOWENSTAM, H. A.; WEINER S. **On biomineralization**. Oxford University Press on Demand, 1989.

MARDIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; DUNLAP, P.V.; CLARL, D. P. **Microbiologia de Brock**. Porto Alegre: Artmed, 12. ed., 2010.

MÂNICA, G. **Utilização de microrganismo autógeno para a recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. 2019. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

MARVASI, M.; VISSCHER, P. T.; PERITO, B.; MASTROMEI, G.; CASILLAS MARTÍNEZ, L. Physiological requirements for carbonate precipitation during biofilm development of *Bacillus subtilis* etfA mutant. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 71, n. 3, p. 341-350, 2010.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2. ed., 2014.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7.ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTOYA, C.; MARQUEZ, M. A.; LOPEZ, J. M.; CUERVO, C. Characterization of calcite bioprecipitated by a native *Bacillus subtilis* isolate. **Revista Colombiana de Biotecnologia**, v. 2, 2005.

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

OVIEDO, M. A. S.; LEMOS, C; CARVALHO, F. P.; **Processo de granulação de poliolefina, resina de poliolefina, fibra de poliolefina, uso da fibra de poliolefina e compósito cimentício**. Patente, 2013.

PARK, S. J.; PARK, J. M.; KIM, W. J.; GHIM, S. Y. Application of *Bacillus subtilis* 168 as a multifunctional agent for improvement of the durability of cement mortar. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 22, p. 1568-1574, 2012.

PARK, R.; PAULAY, T. Reinforced concrete structures. **John Wiley & Sons**, 1975.

PEDREIRA, R. R. **Biocimentação de solos arenosos para melhoramento das suas características hidro-mecânicas**. 2014. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

PERITO, B.; MARVASI, M.; BARABESI, C.; MASTROMEI, G.; BRACCI, S.; VENDRELL, M.; TIANO, P. A *Bacillus subtilis* cell fraction (BCF) inducing calcium carbonate precipitation: biotechnological perspectives for monumental stone reinforcement. **Journal of Cultural Heritage**, v. 15, n. 4, p. 345-351, 2014.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo, 1995.

PORTAL DO CONCRETO. **Agregados para concreto**. 2014. Disponível em: <https://www.portaldoconcreto.com.br/agregados>. Acesso em 07 nov. 2021.

RAMACHANDRAN, S.K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S.S. Remediation of concrete using micro-organisms. **ACI Materials Journal**, v. 98, p. 3-9, 2001.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento em Questão**. v.7, n.13, p. 111-128, 2009.

SCHWANTES-CEZARIO, N. **Desempenho de *Bacillus sp.* na biocimentação de materiais cimentícios**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; MEDEIROS, L. P.; DE OLIVEIRA, A. G.; NAKAZATO, G.; KOBAYASHI, R. K. T.; TORALLES, B. M. Bioprecipitation of calcium carbonate induced by *Bacillus subtilis* isolated in Brazil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 123, n. 2017, p. 200–205, 2017.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; PERES, M. V. N. do N.; FRUET, T. K.; NOGUEIRA, G. S. F.; TORALLES, B. M.; CEZARIO, D. D. S. (2018). Crack filling in concrete by addition of *Bacillus subtilis* spores – Preliminary study. **DYNA**, v. 85, n. 205, p.132–139, 2018.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; NOGUEIRA, G. S. F.; TORALLES, B. M. (2017). Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de *Bacillus subtilis* AP91. **Revista de engenharia civil IMED**, v. 4, n. 2, p.142–158, 2017.

SEIFAN, M., SAMANI, A. K. & BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology** v. 100, p. 2591–2602, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>>. Acesso em: 18 set. 2021.

SILVA, A., JONOV, C. M. **Falhas e patologias dos materiais de construção**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

SILVA, F. P. C.; PASSARINI, V. C. Bioconcreto: A tecnologia para construção sustentável. **Complexo Educacional Faculdade Metropolitana Unidas**. São Paulo, v.5, n.2, p. 41-58, 2017.

SILVESTRE, A. L. **Análise de dados e estatística descritiva**. 1. ed. São Paulo: Escolar Editora, 2007.

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: O exemplo do resíduo de madeira**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1989.

VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. **Balanço mineral brasileiro**, 2001.

VOO, Y. L.; POON, W. K.; FOSTER, S. J. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh-Performance Concrete Beams without Stirrups. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 11, p. 1393–1400, 2010.