

MODELAGEM DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E TERMO-QUÍMICO-MECÂNICO DE CONCRETO PARA MURO MASSIVO CONSTRUÍDO POR IMPRESSÃO 3D

Larissa Duarte Fonseca dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Eduardo de Morais R. Fairbairn Oscar Aurelio Mendoza Reales

Rio de Janeiro Fevereiro de 2023

MODELAGEM DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E TERMO-QUÍMICO-MECÂNICO DE CONCRETO PARA MURO MASSIVO CONSTRUÍDO POR IMPRESSÃO 3D

Larissa Duarte Fonseca dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Prof. Eduardo de Morais R. Fairbairn, D.Sc. Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales, D.Sc. Dr. Paulo Ricardo de Matos, D.Sc. Dr. Étore Funchal de Faria, D.Sc.

> RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL FEVEREIRO DE 2023

Santos, Larissa Duarte Fonseca dos

Modelagem Do Comportamento Reológico E Termo-Químico-Mecânico De Concreto Para Muro Massivo Construído Por Impressão 3D/Larissa Duarte Fonseca dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XVI, 136 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Eduardo de Morais R. Fairbairn e Oscar Aurelio Mendoza Reales

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 117-130.

 Impressão 3D. 2. Modelagem Numérica. 3. Concreto Massa. I. Fairbairn, Eduardo de M. R. II. Reales, Oscar A.
 M. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. IV. Modelagem Do Comportamento Reológico E Termo-Químico-Mecânico De Concreto Para Muro Massivo Construído Por Impressão 3D.

Dedico este trabalho à minha base, Ivani, Thiago e Ramon.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo as pessoas mais importantes da minha vida. À minha mãe, Ivani, por ter me dado colo, base e condições para chegar até aqui. Por ser sido que eu sempre precisei, em todos os momentos da minha vida. Por ter sido espelho, que independente de qualquer circunstância, nunca desiste. É a sua força que me move nos dias mais difíceis. Ao meu irmão, Thiago, por ter sido meu exemplo e por ter me ajudado sempre que precisei. Por ter puxado minha orelha tantas e tantas vezes. E por ter me apoiado tantas outras. Ao meu Marido, Ramon, por cada dia, cada hora e cada minuto ao meu lado, sendo meu porto seguro. Por ter me dado condições de por vezes esquecer o mundo lá fora e focar no que tinha que ser feito. Por todo apoio incondicional. Sem vocês, o hoje não seria possível!

Agradeço também, imensamente, aos meus dois orientadores. Oscar e Dudu, esse trabalho é fruto de muito esforço de todos nós. Por vezes tivemos que nos reinventar para que nossas idealizações ganhassem forma, em reuniões infinitas, em novas e novas ideias a cada dia. Agradeço, mais ainda, por acreditarem em mim, por depositarem suas confianças em mim de que o tema daria frutos, e continuará dando. Oscar, obrigado pelas revisões infinitas de texto, pelo tempo e paciência dedicados a me salvar sempre. Dudu, obrigado por me ajudar a sair do breu em cada momento de dificuldade nesse mundo da modelagem.

Agradeço, ainda, ao corpo técnico de todos os laboratórios do NUMATS/LABEST, tive a experiência de ter que trabalhar em vários, e vocês fazem parte de grande parte dessa pesquisa. Sempre muito solícitos e prontos pra qualquer desafio que precisemos enfrentar para que o trabalho seja realizado. Meu muito obrigado!

Quanto às tantas mãos que me trouxeram até aqui, não poderia deixar de fora a Mariane, que me aturou com muitas mensagens sobre cada erro do programa, e no fim ainda "salvo a minha pele" desenvolvendo um programa específico para eu analisar meus dados. Ao Rodolfo, ao Alfredo e a Marina, que me ajudaram tantas e tantas vezes á desvendar o mundo que o Diana tem a oferecer. Aos mestrados e doutorando do NUMATS que me ajudaram em algum momento durante toda essa jornada.

Aos professores da COPPE, que contribuíram com todo conhecimento para que esta pesquisa tomasse vida. Aos membros da banca, Paulo e Étore, por dedicarem seus tempos a leitura e a apresentação do meu trabalho; pelas palavras, dicas e observações que engrandeceram esta pesquisa.

Aos meus amigos, de todas as fases da minha vida, guardo cada um de vocês no meu coração, e sem vocês a vida não seria a mesma.

A todos os funcionários do Programa de engenharia civil, que tornam nosso dia a dia possível.

À Capes, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E TERMO-QUÍMICO-MECÂNICO DE CONCRETO PARA MURO MASSIVO CONSTRUÍDO POR IMPRESSÃO 3D

Larissa Duarte Fonseca dos Santos

Fevereiro/2023

Orientadores: Eduardo de Morais R. Fairbairn Oscar Aurelio Mendoza Reales

Programa: Engenharia Civil

Esta dissertação apresenta a modelagem numérica de um elemento destinado à estrutura massiva de concreto impresso, analisando o comportamento termomecânico da estrutura, considerando o concreto em estágio fresco, e o processo de impressão 3D. Foi avaliado um concreto com características de material imprimível e suas propriedades foram obtidas a partir de ensaios experimentais realizados. Esses parâmetros foram utilizados como dados de entrada da modelagem e para a análise inicial da estrutura. Quanto a análise térmica, o modelo proposto demonstrou que a impressão 3D possui efetividade no controle da elevação da temperatura na estrutura, em comparação com estruturas massivas, com relação ao calor gerado pelo processo de hidratação do concreto, típico dessas. Relativamente ao comportamento estrutural, o modelo validou a aplicação da teoria de Mohr-Coulomb correspondente ao desenvolvimento das propriedades do concreto 3D no estado fresco; no que diz respeito a aplicação do processo de impressão 3D na construção de estruturas massivas, a modelagem numérica evidenciou limitações no cálculo da forma da estrutura, com base na teoria existente da impressão 3D, necessitando de maior aprofundamento para efetiva aplicabilidade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING OF RHEOLOGICAL AND THERMAL-CHEMICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE FOR MASSIVE WALL BUILT BY 3D PRINTING

Larissa Duarte Fonseca dos Santos

February/2023

Advisors: Eduardo de Morais R. Fairbairn Oscar Aurelio Mendoza Reales

Department: Civil Engineering

This dissertation presents the numerical modeling of an element destined to the massive structure of printed concrete, analyzing the thermomechanical behavior of the structure, considering the concrete in fresh stage, and the 3D printing process. A concrete with characteristics of printable material was evaluated and its properties were obtained from experimental tests carried out. These parameters were used as input data for the modeling and for the initial analysis of the structure. As for the thermal analysis, the proposed model demonstrated that 3D printing is effective in controlling the temperature rise in the structure, compared to massive structures, in relation to the heat generated by the concrete hydration process, typical of these. Regarding the structural behavior, the model validated the application of the Mohr-Coulomb theory corresponding to the development of the properties of 3D concrete in the fresh state; with regard to the application of the 3D printing process in the construction of massive structures, the numerical modeling showed limitations in the calculation of the shape of the structure, based on the existing theory of 3D printing, requiring greater depth for effective applicability.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2. MOTIVACÃO	
1.3. OBJETIVOS	
1.3.1. Objetivo Geral	
1.3.2. Objetivos específicos	
1.4. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	
2. REVISÃO DA LITERATURA	
21 ΙΙΩΙΝΑς ΠΙΝΔΕΙ ΈΤΡΙζΑς ΔΕνερςίνεις	24
2.1. Conceitos e Aspectos Corris	
2.1.1. Concentos e Aspectos Gerais	
$2.1.2. \qquad \text{Breve finitum of } SMASSIVAS DE CONCRETO$	20
2.2.1 Hidrotação do Cimento	
2.2.1. Indiatação do Cimento Termoquímico mecônico	
2.2.2. Modelo de Reoplamento Termoquímico-mecanico	
2.3.1 Processo de impressão 3D de materiais cimentícios	
2.3.2 Propriedades do concreto para impressão 3D	
2.3.3 Dosagem do concreto para impressão 3D	48
2.4 MODELAGEM DE ESTRUTURAS CONSTRUIDAS POR IMP	RESSÃO 3D
53	
2.5. CONCLUSÕES DA REVISÃO DA LITERATURA	59
3. METODOLOGIA	62
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1.1. Materiais	
3.1.2. Dosagem e Mistura	

3.1.3	. Medição de Parâmetros reológicos	65
3.1.4	. Medição de parâmetros físicos	66
3.1.5	. Medição de parâmetros mecânicos	68
3.1.6	. Medição de parâmetros térmicos	
3.1.7	Previsão de Elevação adiabática	75
3.2. N	METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA	77
3.2.1	. Modelo Numérico	
4. RES	ULTADOS EXPERIMENTAIS	84
4.1. I	PROPRIEDADES REOLÓGICAS	
4.2. I	PROPRIEDADES FÍSICAS	86
4.3. H	PROPRIEDADES MECÂNICAS	86
4.4. I	PROPRIEDADES TÉRMICAS	
4.5. I	ELEVAÇÃO ADIABÁTICA	
5. RES	ULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA	
5.1. H	PARÂMETROS DE ENTRADA	
5.2. H	ESTRUTURA DA ANÁLISE DO MODELO	
5.3. A	ANÁLISE TÉRMICA	100
5.4. <i>A</i>	ANÁLISE MECÂNICA	105
5.4.1	. Aumento do Tempo de Deposição entre camadas	108
5.4.2	. Diminuição da altura das camadas	
6. CON	ISIDERAÇÕES FINAIS	114
6.1. (CONCLUSÕES	
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
7. REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDIO	CE A	
APÊNDIO	CE B	

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de uma usina hidrelétrica reversível	5
Figura 2. Exemplos de Usinas Hidrelétricas Reversíveis	7
Figura 3. Distribuição da capacidade instalada total das UHER no mundo em 2017 27	7
Figura 4. Influência do tipo de cimento na evolução do calor de hidratação 32	2
Figura 5. Exemplos de resultados experimentais sobre influência da temperatura inicial na cinética da reação	2
Figura 6. Elevações adiabáticas de temperatura para diversas temperaturas iniciais 35	5
Figura 7. Evolução da reação de hidratação	5
Figura 8. Esquema Hausbaumaschine	9
Figura 9. Execução de elemento41	1
Figura 10. Edificações impressas por 3DCP	1
Figura 11. Casa impressa em 3D com tecnologia Brasileira42	2
Figura 12. Protótipo de pedestal de torre eólica43	3
Figura 13. Modelo físico da impressão 3D 44	4
Figura 14. Comparação do processo de impressão de uma coluna vazia de argamassa e sua simulação numérica: descrição de modelo de falha complexo dependente da forma.	4
Figura 15. Resultados numéricos de um cilindro modelado axissimétrico, representado de 5 a 40 camadas, usando as propriedades do material ensaiado. As cores plotadas representam as deformações radiais. À direita, a cor vermelha indica onde a tensão de escoamento é atingida e a deformação plástica ocorre	5
Figura 16. Resultados do modelo proposto por Ooms et. al. (2020) gerado pela ferramenta desenvolvida ilustrando as deformações radiais (mm) de um cilindro axissimétrico em (a) 20 camadas (b) 35 camadas (c) 49 camadas (falha inicial) (d) 49 camadas (durante a falha) (e) regiões de escoamento plástico (indicado em vermelho) em 49 camadas	6
Figura 17. Simulação dos padrões de falha de várias estruturas ocas sujeitas a teste de flexão de quatro pontos	8
Figura 18. Modelo de Falha típico observado na estrutura de parede livre característico da flambagem elástica	9

Figura 19. Fluxograma da Metodologia Geral adotada, parte 1
Figura 20. Fluxograma da Metodologia Geral adotada, parte 2
Figura 21. Ilustração da execução do Ensaio de Reologia
Figura 22. Procedimento para determinação da densidade no estado fresco: (a) Registro no peso do recipiente vazio; (b) Registro do peso do recipiente cheio de água; (c) Registro do peso do recipiente com concreto fresco
Figura 23. Procedimento para determinação da densidade no estado endurecido: medição do diâmetro do corpo de prova com paquímetro
Figura 24. Ilustração de tentativa de desmolde de corpo de prova no tempo de 1,5 horas. 69
Figura 25. Moldes cilíndricos em PVC com abertura lateral utilizado nos ensaios de resistência
Figura 26. (a) Ilustração do processo de desmolde do corpo de prova (b) Ilustração dos materiais utilizados no processo de desmolde
Figura 27. Ensaio de resistência a compressão uniaxial no concreto fresco: (a) corpo de prova após extração do molde diretamente sobre o equipamento; (b) corpo de prova em ensaio; (c) corpo de prova após terminado o ensaio
Figura 28. Analisador de Condutividade Térmica C-Therm TCi utilizado
Figura 29. Equipamento Calorímetro Isotérmico, com 8 canais, onde as amostras são inseridas junto com suas respectivas ampolas de referência
Figura 30. Ilustração do procedimento executado para ensaio de calorimetria isotérmica: (a) pesagem dos materiais em balança de precisão, para mistura; (b) pesagem da mistura nas ampolas para ensaio; (c) ampolas utilizadas e material para lacrar as mesmas 74
Figura 31. Geometria da camada modelada no software AutoCad 3D, em metros 78
Figura 32. Ilustração da malha utilizada na modelagem
Figura 33. Ilustração das condições de contorno quanto as restrições impostas na estrutura
Figura 34. Ilustração da camada 5 para as faces consideradas na transferência de calor81
Figura 35. Apresentação das estruturas utilizadas para análise da dissipação de calor: (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica
Figura 36. Condições de contorno adotadas nas estruturas quanto a transferência de calor e suportes na (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica
Figura 37. Malhas adotadas na análise das estruturas: (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica

Figura 38. Curvas Tensão de cisalhamento vs Taxa de Cisalhamento: (a) Repetição 01, (b) Repetição 02, (c) Repetição 03
Figura 39. Gráfico Limite de Escoamento vs Tempo resultante do ensaio de reologia. 85
Figura 40. Curvas Tensão de Compressão vs Deformação: (a) Repetição 1; (b) Repetição 2; (c) Repetição 3
Figura 41. Gráfico Resistência a compressão vs Tempo resultado do ensaio de compressão uniaxial, no estado fresco
Figura 42. Corpos de prova pós ensaio de resistência a compressão uniaxial em diferentes tempos da Repetição 3
Figura 43. Gráfico Módulo de Elasticidade vs Tempo obtido a partir do ensaio de compressão uniaxial, no estado fresco
Figura 44. Gráfico Tensão de Compressão vs Tempo do concreto, no estado endurecido
Figura 45. Gráfico Modulo de elasticidade vs Tempo do concreto, no estado endurecido
Figura 46. Resultados referente ao ensaio de condutividade térmica em diferentes idades, considerando o estado fresco
Figura 47. Resultados referente ao ensaio de condutividade térmica em diferentes idades, considerando o estado endurecido
Figura 48. Resultado de fluxo de calor no tempo obtidos no ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25°C
Figura 49. Resultado do calor acumulado no tempo obtido no ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25°C
Figura 50. Gráfico ln (Fluxo de calor), no grau de hidratação 0,5 vs o inverso da temperatura considerada em cada caso
Figura 51. Previsão da curva elevação adiabática vs tempo para o concreto ensaiado, com base nos dados do ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25°C
Figura 52. Gráfica Maturidade vs Tempo, calculado pelo DIANA FEA, em função da elevação de temperatura
Figura 53. Gráfico Módulo de Elasticidade vs Maturidade97
Figura 54. Gráfico Coesão vs Maturidade97
Figura 55. Processo de análise da estrutura em 5 fases: (a) fase 1; (b) fase 2; (c) fase 3; (d) fase 4; (e) fase 5
Figura 56. Mapeamento da análise executada no programa DIANA FEA
xiii

Figura 57. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 11100s (3h 05min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.
Figura 58. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 12300s (3h 25 min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.
Figura 59. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 14400s (4h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica 101
Figura 60. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 17700s (4h 55 min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica
Figura 61. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 20400s (5h 40min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.
Figura 62. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 25200s (7h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica 101
Figura 63. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 30000s (8h 20min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.
Figura 64. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 54000s (15h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica 102
Figura 65. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 72000s (20h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica 102
Figura 66. Ilustração dos elementos utilizados para observação dos resultados da análise térmica nas estruturas em camadas, na camada 1
Figura 67. Elevação de temperatura nas três estruturas analisadas nas: (a) camada 1; (b) camada 2; (c) camada 3; (d) camada 4; (e) camada 5
Figura 68. Ilustração do nó 9195, localizado na camada 1 106
Figura 69. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 9195 – Análise Inicial
Figura 70. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 9195 – Análise Inicial
Figura 71. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 15000s, obtido no Software Diana Fea – Análise Inicial
Figura 72. Coesão, no tempo 15000s, obtido no Software Diana Fea – Análise Inicial. 108

Figura 73. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 9195 – Primeira Solução 109
Figura 74. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 9195 – Primeira Solução
Figura 75. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 17280s, obtido no Software Diana Fea – Primeira Solução
Figura 76. Coesão, no tempo 17280s, obtido no Software Diana Fea – Primeira Solução.
Figura 77. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 6642 – Segunda Solução111
Figura 78. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 6642 – Segunda Solução
Figura 79. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 18000s, obtido no Software Diana Fea – Segunda Solução
Figura 80. Coesão, no tempo 18000s, obtido no Software Diana Fea – Segunda Solução.
Figura 81. Gráfico Índice (Tensão cisalhante máxima/Coesão) variando no tempo, das três análises consideradas

Lista de Tabelas

Tabela 1. Levantamento de traços utilizados em concretos para impressão 3D	52
Tabela 2. Materiais utilizados na pesquisa	64
Tabela 3. Composição química do cimento ensaiado	64
Tabela 4. Propriedades utilizadas na modelagem numérica	96
Tabela 5. Quantitativo das fases: camadas consideradas e tempos de processamento	98
Tabela 6. Passos de tempo utilizados para análise da estrutura	99

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil se apresenta como um país com um potencial enorme tanto no setor hidrelétrico, quanto no eólico e solar. Essas fontes de energia são limpas e renováveis, mas cada uma apresenta seus impactos ambientais e custos diferenciados de implementação e produção. No Brasil, explora-se bastante o potencial hidrelétrico dos rios, o que tem gerado resultados positivos em termos de autossuficiência de produção energética. (VALENTIM, 2020)

Tendo em conta baixo impacto ambiental, menor custo, energia renovável e não intermitência na geração de energia, a solução que melhor atende a essas condicionantes é a usina hidrelétrica reversível (UHER). Estas se baseiam no armazenamento de energia gravitacional da água através de uma diferença de elevação, e apoiam-se nos mesmos princípios de conversão de energia das usinas hidrelétricas convencionais. As UHERs passaram a ser construídas com reservatórios cada vez menores, e feitos para garantir a produção de energia elétrica, mesmo nos períodos de baixa pluviosidades.

Em Zuculin et al. (2014), um estudo de caso de UHER foi feito, onde com cerca de 800 MW de potência instalada e geração de 8 horas diárias e seis dias por semana, precisaria de um reservatório de menos de 10 hm³. Essa é uma diferença radical na análise de impactos socioambientais, pois enquanto nas UHEs convencionais o reservatório é projetado para criar ou concentrar a queda de um rio, nas UHERs a queda é o próprio desnível natural abrupto de uma serra, ficando o reservatório apenas para conter o volume de geração e bombeamento, num circuito fechado ou semiaberto.

Bacaltchuk et al. (2015), destacam o fato de que o custo de implantação das UHEs reversíveis é menor do que novas UHEs convencionais, pois não requerem, em geral, barragem, reservatório, vertedouro, ensecadeiras, desvio do rio, desapropriações de áreas inundadas, estradas de acesso, grandes canteiros de obra e outros, reduzindo assim os custos do projeto e da construção, além de reduzir as perdas d'água e consequentemente impactando menos a bacia hidrográfica onde está inserida.

A construção civil é conhecida como uma das indústrias mais poluidoras do meio ambiente além de ser uma indústria que consome uma elevada quantidade de recursos naturais. Em média, um edifício construído nos Estados Unidos da América (EUA), consome cerca de 36% de energia total das indústrias, 30% das matérias primas existentes e 12% de água potável. Adicionalmente à taxa de poluição, outro ponto que é prejudicial à construção civil, é seu baixo desempenho em relação a produtividade no processo de construção, tanto em países desenvolvidos, quando nos demais (BRUN, 2020).

Para fugir deste paradigma vários estudos com foco na inovação da construção civil têm sido realizados, grande parte com foco na sustentabilidade e inovação. Uma saída para a inovação na construção civil é procurar uma tecnologia de outros setores industriais e adaptá-la ao sistema existente para melhorar o processo, que é algo importante e necessário sendo uma resposta às necessidades, nomeadamente a qualidade (HARTY, 2008); (DONALDSON; DONALDSON, 2016).

Há algumas décadas, a indústria da construção caminha gradualmente para uma digitalização de processos. Na fase de projeto, os arquitetos trabalham em um ambiente digital e os engenheiros adotaram ferramentas numéricas para análises estruturais. A troca de dados usando Building Information Models (BIM), que permite a avaliação automatizada de projetos, tornou-se padrão em muitas práticas. Consequentemente, a automação na fase de construção está se tornando mais comum (WOLFS, 2018).

Mais recentemente, começaram as explorações de novas técnicas de manufatura aditiva para a indústria da construção. Uma técnica de fabrico aditivo é a impressão 3D, onde os produtos são construídos sobre uma base de camada por camada (BERMAN, 2012). Muitos materiais de construção podem ser usados com vários métodos de impressão 3D para fabricar objetos que variam em escala de elementos de conexão a componentes e edifícios completos. (WOLFS, 2018).

A manufatura aditiva procura a redução na exigência de trabalho: diminuindo o custo com mão de obra e com a não utilização de formas; reduzindo o canteiro de obras e o tempo da construção, pelo fato de se trabalhar num ritmo constante. Assim, diminui-se a possibilidade de erros na obra e o desperdício de materiais, possibilitando uma maior liberdade arquitetônica (GAO et al., 2015).

De acordo com Anderson (2012), estamos entrando em uma nova Revolução Industrial, visto que a popularização do emprego das impressoras 3D prenuncia outra forma e modo de produção. A utilização dessas maquinas na engenharia civil apresenta-se como uma opção para reduzir custos, prazos e impactos ambientais.

O principal material a ser utilizado para impressão na construção civil devem ser argamassas e concretos. Nessa utilização, as características do material empregado são importantes, principalmente por este ser formulado para a utilização específica de bombeamento e extrusão logo, sua composição deve permitir a produção de um concreto com consistência adequada; que seja capaz de fluir dentro de tubos quando bombeado, mas não escoe após aplicação; e para melhorar o desempenho do material podem ser utilizados aditivos de rápido endurecimentos para diminuir o tempo de cura (ALWI et al. 2013).

Durante a impressão, camadas de concreto são depositadas umas sobre as outras sem a presença de fôrmas para confinar e estabilizar o material. O concreto fresco deve, portanto, ser suficientemente forte, rígido e estável para suportar seu peso próprio e o peso das camadas acima dele, e limitar as deformações (WOLFS, 2018).

As primeiras experiências com impressão 3D de concreto (3DCP) mostraram que tanto a printabilidade (ou seja, a integridade estrutural do objeto durante a impressão) quanto as propriedades pós-impressão (por exemplo, resistência da interface) são altamente dependentes dos parâmetros do processo de impressão, como tempo, temperatura, cinemática, etc. Isso resultou em falhas prematuras do objeto durante a impressão, bem como variações na qualidade do produto impresso (SALET, et. al., 2017; BOS, et. al., 2016; KAZEMIAN, et. al., 2017).

Para poder prever com precisão a qualidade do produto de impressão (durante e após a impressão) e evitar falhas (em outras palavras: obter um processo de impressão robusto), métodos extensivos baseados em elementos finitos foram desenvolvidos para modelar o processo de impressão, incluindo comportamento transitório, como dependências de tempo (WOLFS, 2018).

Para a 3DCP, no entanto, essa ferramenta de modelagem até agora era pouco explorada. Para aplicações de cotidianas, a necessidade de tal ferramenta pode ser dispensável. Medidas calorimétricas, por exemplo, permitem monitorar a taxa de hidratação e, quando associadas a modelagem computacional, podem ter o potencial de fornecer informações sobre a taxa de aumento da tensão na estrutura. No entanto, como a liberação de calor, nestes casos, é baixa nas etapas de maior interesse, tais medidas teriam pequena relevância.

No entanto, quando se pretende construir usinas, em geral de grande volume, definidas como estruturas massivas, e que podem apresentar fissuras induzidas pela reação de hidratação do cimento, esse processo computacional é indispensável. Fairbairn e Azenha (2018) descrevem as estruturas de concreto massa como aquelas nas quais os efeitos dos materiais cimentícios nas primeiras idades, como a geração de calor e a retração autógena, podem levar à fissuração.

Portanto, este estudo apresenta um método de modelagem experimental do processo de impressão 3D de concreto massa para avaliar a impressibilidade, baseado em uma das principais dependência desse processo: o desenvolvimento dependente do tempo das propriedades mecânicas e térmicas do concreto fresco durante a impressão; baseando-se para isso em usar esse modelo de impressão para construção de tanques para usinas hidrelétricas reversíveis, visando a inovação e a sustentabilidade que os dois modelos oferecem.

1.2. MOTIVAÇÃO

Tendo em vista que as UHERs constituem uma tecnologia que permite oferta de potência com a flexibilidade necessárias para o atendimento à variação da carga no curto prazo, a sua implantação é uma opção para garantir uma expansão do sistema elétrico de forma econômica e sustentável. Além disso, considerando a topografia específica das UHERs, que apresentam um dos reservatórios formado pelo barramento de curso d'água e o outro totalmente fechado/isolado, ou os dois fechados, com dimensões bastante inferiores às usinas hidrelétricas convencionais, a impressão 3D tem o potencial de otimizar a construção deste último, aplicando a estes modelos de tanques de quaisquer formatos melhores adaptáveis a geografia em questão.

Ainda neste contexto, a tecnologia 3DCP, no setor da construção civil, tem sido pesquisada e desenvolvida por vários grupos com diferentes objetivos, com esforços empreendidos para criação de novos instrumentos, aparatos e materiais e seriam grandes aliados para facilitar e agilizar a implementação destas usinas.

Acredita-se que o sistema de impressão em camadas pode auxiliar na melhora dos problemas termoquímicos-mecânicos particulares das estruturas massivas, podendo ainda diminuir a massividade dessas ao se imprimir vazios em seu meio que auxiliariam a dissipação do calor gerado no processo de hidratação. Há de considerar, porém, que os materiais cimentícios utilizados para impressão 3D possuem consumo de cimento mais elevados que os materiais aplicados em estruturas massivas, o que poderia acarretar em um obstáculo quanto a associação destes, sendo necessário um estudo da elevação adiabática do material imprimível.

Logo, é necessário avaliar como essas tecnologias podem se aliar e quais os fenômenos que implicam o emprego de concretos para impressão de estruturas massivas. É necessário o entendimento de como os problemas já conhecidos do concreto massa se desenvolveriam nos concretos imprimíveis. Ou seja, se a construção em camadas auxiliaria na redução do infortúnio da liberação de calor deste tipo de estrutura que consume altos teores de cimento, e ainda, se a termoativação da reação de hidratação beneficiaria a taxa de ganho tixotrópico do concreto 3D, otimizando o processo de impressão.

Levando em conta as possibilidades elencadas, faz-se oportuno a modelagem de uma estrutura massiva, utilizando-se a geometria de uma parede retilínea construída pelo processo de impressão 3D aplicável a uma UHER, considerando as propriedades de um material imprimível, empregando ainda as peculiaridades desta automação, para estudo do comportamento desta construção.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar como as características dos concretos próprios para impressão 3D influenciam os fenômenos termoquímico-mecânicos característicos das estruturas massivas aplicáveis em usinas hidrelétricas reversíveis.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Desenvolver e caracterizar uma matriz cimentícia aplicável à impressão 3D no que diz respeito a sua reologia, a cinética de hidratação e o desenvolvimento de propriedades mecânicas;
- b. Avaliar o comportamento térmico de um muro massivo construído por impressão 3D, aplicável a UHER, por meio de modelagem numérica, considerando a liberação de calor de concretos de alto consumo de cimento próprios para impressão 3D.
- c. Avaliar o comportamento mecânico um muro massivo construído por impressão
 3D aplicável a UHER, por meio de modelagem numérica, considerando a evolução de tensões desenvolvidas pelo método de deposição em camadas.

1.4. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está organizado em 7 capítulos. Este primeiro descreve, em linhas gerais, a contextualização da pesquisa, bem como as motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho e os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre as usinas hidrelétricas reversíveis; as estruturas de concreto massa: no que diz respeito a hidratação do cimento Portland e suas formulações de acoplamento termo-químico-mecânico; a impressão 3D: quanto a sua concepção e os parâmetros relevantes para impressão; e a modelagem de estruturas de impressão 3D: sobre o desenvolvimento de modelos numéricos aplicáveis ao processo.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia geral utilizada na pesquisa, de modo que serão detalhados os métodos de ensaios realizados e o modelo numérico empregado nesta dissertação: apresentando critérios geométricos adotados, modelo de cálculo implementado e condições de contorno consideradas no modelo.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e que serão utilizados para modelagem da estrutura base deste estudo. Posteriormente, no capítulo

quatro, são apresentados os parâmetros de entrada e o processo de análise utilizados para a modelagem numérica.

Nos capítulos finais, são apresentados os resultados observados na modelagem numérica e as conclusões obtidas nesta dissertação, acompanhadas das referências bibliográficas tomadas como base.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta sessão tem por objetivo exemplificar os temas que serão abordados neste trabalho, subdivididos em cinco tópicos. O item um discorrerá sobre as usinas hidrelétricas reversíveis, apresentando seus aspectos, conceitos e aplicabilidade. O segundo, abordará as estruturas massivas de concreto, utilizadas nestes tipos de Usinas e suas propriedades termo-química-mecânico pertinentes. No terceiro tópico será discutido o uso da impressão 3D na construção civil, suas aplicações, processos, as propriedades peculiares deste tipo de material e um levantamento das dosagens já estudadas para este fim. Em quarto, será apresentado uma revisão da literatura quanto a modelagens numéricas aplicadas a impressão 3D. Por fim, uma conclusão desta revisão bibliográfica.

2.1. USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

Durante a última década, as novas fontes renováveis de energia elétrica vêm fornecendo uma parcela crescente do mix de geração da matriz energética do Brasil. Todavia, a intermitência da geração eólica e solar exige, para que seja possível uma ampla difusão destas fontes, que o sistema conte com capacidade de armazenamento de energia. Neste mesmo período, constata-se o fim da hegemonia das usinas hidroelétricas, que são justamente a forma mais barata de armazenamento de energia. Este é o cenário do setor elétrico brasileiro. No entanto, há um potencial de recursos hidroelétricos ociosos. Tratase do potencial de usinas hidroelétricas reversíveis (CASTRO et al., 2018).

É neste contexto que ressurge o interesse pelas usinas hidrelétricas reversíveis – UHERs, como uma estratégia para lidar com os desequilíbrios de oferta e demanda de energia esperados para o Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) na próxima década: as UHERs representam a possibilidade de recuperação de parte da capacidade de armazenamento de energia, bem como a manutenção da matriz predominantemente renovável, a partir de fonte hídrica ao invés de fontes térmica ou químicas (baterias) (MARIANO, 2017).

2.1.1. Conceitos e Aspectos Gerais

O princípio fundamental das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHERs) é armazenar eletricidade na forma de energia potencial hidráulica ao elevar a água de um reservatório inferior para um superior. Quando necessário, esta energia armazenada pode ser convertida novamente em eletricidade por turbinamento da água a partir do reservatório superior de volta para o reservatório inferior, da mesma forma que uma central hidroelétrica convencional. O bombeamento normalmente ocorre principalmente durante períodos de pico, quando a demanda de eletricidade é baixa e os preços são mais baixos. A geração ocorre durante os períodos de pico, quando a demanda do sistema elétrico é alta. O bombeamento e a geração geralmente seguem um ciclo diário, mas também pode ser semanal ou mesmo sazonal (BARBOUR et al., 2016). Esse ciclo é ilustrado na

Figura 1.



Figura 1. Esquema de uma usina hidrelétrica reversível. Fonte: Caneles, 2015

Embora altamente eficiente, essas plantas consomem eletricidade líquida devido às perdas hidráulicas e elétricas durante o ciclo de bombeamento e turbinamento. Para cada MWh de eletricidade de entrada nesse tipo de usina, apenas entre 0,75 a 0,82 MWh de energia elétrica pode ser disponibilizado de volta para a rede (GUITTET et al., 2016).

Além da capacidade de armazenamento, eficiência, maturidade da tecnologia e tempo de descarga, outra vantagem das UHERs em relação a outras tecnologias de armazenamento é a necessidade de um curto período de tempo para passar do bombeamento para geração

máxima, cerca de 2 minutos, enquanto que uma turbina a gás precisa de 7 a 15 minutos para aquecer uniformemente (CANALES, 2015).

2.1.2. Breve Histórico

Embora o primeiro emprego da tecnologia de usinas reversíveis que se tem notícia tenha ocorrido em Zurique em 1882, a primeira UHER no mundo foi a usina de Schlaffhausen, também na Suíça que iniciou sua operação em 1909 (CHALISGAONKAR; MOHAN, 2015). Já na década de 1930, conforme Mirsaeidi *et al.* (2012), as UHER estavam amplamente disseminadas ao redor do mundo, atingindo seu apogeu construtivo entre as décadas de 1960 e 1980. A primeira turbina reversível do mundo foi instalada na Usina Elevatória de Pedreira, inaugurada em 1939 no Estado de São Paulo.

Desde as primeiras centrais reversíveis implantadas no início do século XX até os dias atuais, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis têm desempenhado diferentes papéis nos mercados mundiais de energia elétrica, sendo destacada sua relação com o desenvolvimento das usinas nucleares entre as décadas de 1960 e 1980 e o suporte à penetração das energias renováveis não controláveis, como as usinas eólicas e fotovoltaicas, a partir de 2000. (EPE, 2019)

Atualmente, a maior aplicabilidade das UHER se dá em operar conjuntamente com fontes de energia intermitentes a fim de atenuar as diferenças periódicas na disponibilidade de energia. Na relação das UHER instaladas no mundo, publicada anualmente pela *International Water Power & Dam Construction*, no anuário de 2012 há mais de 400 projetos, seja em operação ou construção, o que indica a relevância deste tipo de empreendimento nas redes elétricas do mundo.

A maior parte destes sistemas localiza-se nos países altamente industrializados, com destaque para: Estados Unidos (38 em operação, mais de 40 projetados), Japão (mais de 40 em operação), Alemanha, Espanha, China, Itália, Noruega e França (cada um desses países com mais de 20 UHER em operação ou em construção). A Figura 2 apresenta três exemplos de projetos de usinas reversíveis no mundo (CANELES, 2015).



Limberg II – Áustria

Goldisthal – Alemanha

Figura 2. Exemplos de Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Fonte: Voith, 2014.

Raccoon Mountain – Estados Unidos

De acordo com Zuculin et al. (2014), as UHERs representam parte significativa do parque gerador em diversos países e vem tendo utilização crescente. A potência instalada atual no mundo é da ordem de 127.000 MW. Conforme relatório "*The worlds water battery: Pumped Hydropower Storage and the clean Energy transition*" publicado pela IHA em 2018, a capacidade instalada das usinas hidrelétricas reversíveis no mundo totalizou ao final de 2017 cerca de 161 GW, sendo que a Europa, China, Japão e Estados Unidos detêm juntos mais de 85% deste valor (EPE, 2019), como pode ser visto na Figura 3.



Figura 3. Distribuição da capacidade instalada total das UHER no mundo em 2017. Fonte: EPE, 2019

2.2. ESTRUTURAS MASSIVAS DE CONCRETO

O concreto massa é definido como um grande volume de concreto que apresenta dimensões grandes o suficiente para que algumas medidas sejam tomadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura, ou seja, para reduzir o gradiente térmico entre as áreas interna e externa do concreto (*American Concrete Institute* – ACI 116R, 2005).

Similarmente, Kuperman (2005) destaca a definição de concreto massa como aquele que, ao ser aplicado numa estrutura, requer a tomada de precauções que evitem fissurações derivadas de seu comportamento térmico.

Neville (2016) ressalta que, o termo "concreto massa" aplicado anteriormente somente a concretos de grandes dimensões, como barragens de gravidade, no entanto, atualmente, considerando os aspectos tecnológicos do concreto massa, este termo passou a ser aplicado para qualquer elemento de concreto com dimensões tais que o comportamento térmico possa resultar em fissuração, caso não sejam tomadas medidas apropriadas. Portanto, o aspecto fundamental do concreto massa é seu comportamento térmico, sendo um dos objetivos do projeto evitar - ou reduzir- e controlar a abertura e o espaçamento das fissuras.

Assim como o concreto convencional, o concreto massa é composto de cimento, agregados e água, além de, em muitos casos, pozolana e outras adições. A dosagem tem como objetivo ou foco a seleção e a quantificação destes materiais de modo a proporcionar economia e redução do calor de hidratação, sem desconsiderar a obtenção de uma adequada trabalhabilidade, resistência, durabilidade e impermeabilidade que respeitem o propósito da estrutura na qual será aplicado. Por outro lado, Watanabe (2008) destaca alguns cuidados que precisam ser obedecidos quanto à utilização de concretos massivos referentes às variações ambientais, as alturas de camadas de concretagem, as velocidades e temperaturas de lançamento e o espaçamento das juntas de contração entre blocos de barragens.

Muitas obras utilizam o concreto massa em suas estruturas. Estas estruturas, por apresentarem grandes dimensões e grandes volumes de concreto, tornam-se preocupantes à probabilidade do surgimento de patologias, tais como fissurações e trincas. As estruturas com grande quantidade de concreto produzem uma elevação da temperatura interna do corpo, devido a reação da água com o cimento, que resulta na formação dos silicatos de cálcio hidratados (CSH) ser exotérmica, ou seja, liberar calor. Portanto, quando a temperatura do concreto se diferencia da temperatura na superfície do elemento estrutural a probabilidade de ocorrer uma fissura devido ao efeito térmico é muito grande.

Rosso e Piasentin (1997) apresentam diversas medidas que podem ser adotadas para prevenir a fissuração do concreto massa, algumas delas precisam ser adotadas durante o

projeto básico, isoladamente ou em conjunto. Uma delas seriam: a redução do tamanho dos monólitos através da introdução de juntas de contração; camadas de concretagem mais delgadas, concreto de baixa resistência com baixo teor de cimento ou cimento de baixo calor de hidratação, material pozolânico para substituição de parte do cimento Portland; sistemas de pós-refrigeração embutido em cada camada de concretagem para o controle da temperatura.

Destaca-se também que, apesar da ampla experiência na construção de barragens, no Brasil não se tem uma norma que regulamente a construção de barragens de concreto ou uma norma específica para concreto massa. Dessa maneira, as construções baseiam-se em experiências de outras construções de barragens, estudos acadêmicos, normas de outros países ou avaliação por empresas. (SOUZA, 2017)

2.2.1. Hidratação do Cimento

Mehta e Monteiro (2008) explicam que, em presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação, que com o decorrer do tempo começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos, dando origem a uma massa firme e dura, que constitui a pasta de cimento endurecida.

Basicamente, a reação de hidratação consiste na formação do silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monosulfaluminato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio, a partir da reação dos compostos do cimento (C2S, C3S, C3A e C4AF) com a água, além de gerar calor. Estas reações de hidratação são acompanhadas da liberação de energia térmica evidenciando o caráter exotérmico das reações. Por isso, a hidratação do cimento é considerada exotérmica e, ainda, é termoativada, o que significa que a evolução da temperatura influencia na cinética da hidratação.

O desenvolvimento da reação de hidratação corresponde ao aumento progressivo da quantidade de hidratos que formam o esqueleto poroso proporcionando o aumento da rigidez e da resistência do material. Devido à exotermia da reação de hidratação, o calor total gerado fornece uma boa resposta macroscópica da evolução das reações químicas que envolvem a hidratação, apesar destas gerarem diferentes taxas de evolução de calor.

Considera-se que o calor de hidratação gerado na hidratação completa de um cimento é aproximadamente uma função aditiva dos calores gerados na hidratação dos compostos

individuais do cimento, ponderados pelos teores dos compostos (MAEKAWA et. al, 1999; METHA; MONTEIRO, 1994).

Embora a evolução da hidratação dependa, de modo geral, da solubilidade e reatividade das fases e da finura, o primeiro pico de liberação de calor ocorre nos primeiros minutos. A etringita, também conhecida na literatura como trissulfoaluminato de cálcio hidratado, é normalmente o primeiro produto a cristalizar-se durante a primeira hora e hidratação do cimento à temperatura ambiente, contribuindo para o enrijecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esta também é responsável por grande parte do calor gerado pelo processo de hidratação. A formação de grandes quantidades de etringita em pasta de cimento e concreto, podem induzem a expansão e fissuras, caso tenha restrições.

A formação da etringita tardia, também conhecida na literatura pela sigla DEF (Delayed Ettringite Formation), é um processo complexo, envolvendo a formação da etringita em material cimentício já endurecido, sem que nenhum sulfato provenha do meio externo, que envolve altas temperaturas de cura e cuja fonte de sulfatos é o próprio cimento. (THAULOW et. al. 1997; JOHANSEN, THAWLOW, 1999).

Taylor et. al. (2001) relatam que a DEF tem sido observada em casos de deterioração de concretos que foram curados termicamente a temperaturas próximas ou superiores a 70°C, em contrapartida, Gomes (2011) expõe que a temperatura recomendada para a eliminação do risco considerável de formação de DEF não deve ser superior a 65°C. Ou seja, altas temperaturas possuem efeitos deletérios sobre a microestrutura do concreto, mais bem percebido com o aumento da idade do mesmo, evidenciado pela presença da etringita neoformada ou tardia nas pastas e nos concretos.

Aurich (2008) considera que a capacidade de liberação de calor é a propriedade mais importante que se deve levar em conta durante o processo de hidratação do cimento e Azenha (2004) explica que com grande liberação de calor, ocorre uma expansão volumétrica a que depois se seguirá uma contração, que na presença de restrições externas ou internas, pode provocar a fissuração do concreto, justificando a importância da caracterização física e química dos materiais e a compreensão das reações envolvidas no processo de hidratação para que seja possível a utilização de modelos de previsão que apoiem a tomada de decisões em relação à mistura de concreto a utilizar em cada situação, tendo em vista a minimização do risco de fissuração deste material.

A evolução da reação química entre água e cimento pode ser avaliada através do grau de hidratação (representado na bibliografia com ξ ou α), que constitui o parâmetro objetivo para caracterizar a maturidade do concreto. Ele é definido como a razão entre a quantidade de hidratos, m(t), e a quantidade inicial, mi, do material cimentício (DE SCHUTTER, TAERWE, 1995; LACKNER, MANG, 2004; SCHINDLER, FOLLIARD, 2005). O conceito é definido por Silva (2007) como o avanço das reações de hidratação e varia de 0 a 1.

Ademais, assumindo que a quantidade de produtos hidratados é proporcional ao calor relativo de hidratação, o grau de hidratação pode ser expresso como a relação entre a quantidade de calor liberada no tempo "t", Q(t), sobre a quantidade de calor liberado considerando uma hidratação completa, no tempo "t_∞" (Equação 2).

$$\xi(t) = \frac{Q(t)}{Q(t_{\infty})}$$
(2)

O processo de hidratação se finaliza com o decorrer do tempo, contanto que haja contato com a água, e o fim do processo é finalmente atingido quando os grãos de cimento se hidratarem de forma completa ou quando não existir água para ocorrer as reações de hidratação. A cinética desse processo sofre influência direta da composição da matéria prima do cimento, o clínquer, devido as diferentes reatividades das fases e diferentes proporções (METHA, 2008; TAYLOR, 1990), como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4. Influência do tipo de cimento na evolução do calor de hidratação. Fonte: Andrade, 1997.

Devido a termoativação da reação, à medida que a mesma progride e o calor é liberado, eleva-se a temperatura do sistema e consequentemente a velocidade da reação também. Esta provoca ainda outra consequência relevante: se a temperatura inicial da mistura for maior, sua velocidade também será, apesar de atingir a mesma variação final de temperatura que misturas iguais com menores temperaturas iniciais, pois teria a mesma energia potencial química convertida em liberação de calor, como mostrado na Figura 5. Esse efeito só pode ser considerado no casos em que a mistura não apresentar variações elevadas de temperatura, pois estas estariam sujeitas ao processo de formação de etringita tardia,, apresentam comportamento diferente das demais.



Figura 5. Exemplos de resultados experimentais sobre influência da temperatura inicial na cinética da reação.

Fonte: Azenha, 2009

A construção de estruturas de concreto massivo exige uma avaliação criteriosa da integridade mecânica do material desde o momento do seu lançamento, pois devido à reação de hidratação do cimento podem estar sujeitas à fissuração nas primeiras idades, em decorrência de deformações de origem térmica e/ou por retração autógena do material (RITA, 2015).

A evolução da reação de hidratação está diretamente relacionada à evolução das propriedades do material como módulo de elasticidade, resistência, fluência, retração, etc., evolução esta que pode ser denominada pelo termo "envelhecimento" do concreto. Por isso, existem diversos métodos diretos e indiretos que permitem determinar o grau de hidratação a partir de propriedades macroscópicas, como resistência à compressão, calor liberado, módulo de elasticidade, etc. que são relativamente fáceis e usuais no estudo do concreto. Em todos eles a evolução de cada propriedade está ligada, com um certo grau de acoplamento à evolução do grau de hidratação.

Por isso, é de suma importância ter conhecimento dos fenômenos termoquímicomecânicos do concreto, como, por exemplo, compreender as relações constitutivas entre tensões, deslocamentos e a cinética da reação de hidratação.

2.2.2. Modelo de Acoplamento Termoquímico-mecânico

Dada uma massa de concreto, de acordo com a teoria desenvolvida por Ulm e Coussy em seus estudos, a descrição da evolução da reação de hidratação é dada, de modo a considerar a exotermia e a termoativação da reação, a partir da solução da equação de evolução dos campos térmicos em um dado volume. Desta forma, a equação do calor no tempo, considerando-se o acoplamento termoquímico (geração de calor de hidratação com termoativação) seguindo o quadro teórico de acoplamentos termoquímicos, pode ser colocada sob a forma (ULM, COUSSY, 1995; ULM, COUSSY, 1996; ULM, COUSSY, 1998):

$$C_p \dot{T} = \dot{Q} + L_m \dot{m} + k \nabla^2 T \tag{3}$$

onde podem ser conhecidos os termos $C_p \dot{T} = Q + k \nabla^2 T$, como a equação padrão de evolução dos campos térmicos, sendo:

C_p o calor específico a deformação constante para o concreto;

 \dot{Q} o fluxo de calor originário de alguma fonte de calor;

k a condutividade térmica;

T a temperatura;

 $L_m \dot{m}$ corresponde ao acoplamento termoquímico e representa a geração de calor pela reação de hidratação (exotermia); sendo L_m , o calor latente de hidratação, positivo devido à natureza exotérmica da reação de hidratação e, \dot{m} , a velocidade da reação representada pela velocidade com que a massa de esqueleto aumenta (derivada de m em relação ao tempo).

Como descrito anteriormente, o grau de hidratação pode ser considerado como uma normalização da variável m, isto é, a variação da massa do esqueleto, logo:

$$\xi(t) = \frac{m(t)}{m_{\infty}} \tag{4}$$

Utilizando a equação acima, temos que:

$$\frac{dm}{dt} = m_{\infty} \frac{d\xi}{dt}$$
(5)

Assim podemos reescrever a equação 3, em função do grau de hidratação, como:

$$C_p \dot{T} = \dot{Q} + L \dot{\xi} + k \nabla^2 T \tag{6}$$

onde $L = m_{\infty}L_{\rm m}$ é também uma constante do material.

A equação 3 permite, então, através do termo $L\dot{\xi}$, que seja calculado o campo de temperaturas considerando o calor gerado pela hidratação. É importante salientar que $\dot{\xi}$ denota a velocidade da reação de hidratação e depende do estado em que se encontra a mesma, ou seja, devemos escrever formalmente $\dot{\xi}(\xi)$. Visto que a reação de hidratação é termoativada, o estado em que se encontra a reação de hidratação também dependerá da evolução do campo de temperaturas.

Diante disso, para a solução numérica desta equação é essencial que seja conhecido o campo das hidratações para todos os passos de tempo em que seja calculado o campo de temperaturas T, ou seja, para que a equação 3 seja resolvida é necessário estabelecer a cinética da hidratação ($\dot{\xi}(\xi)$) para cada passo de tempo.

Ao considerarmos a cinética da hidratação (ou seja, a velocidade com que a reação se processa), podemos encarar um ensaio de elevação adiabática da temperatura como correspondendo a "fotografias" da evolução da reação química. Visto que a reação é termoativada, é razoável que curvas de elevação adiabática correspondentes a diversas temperaturas iniciais dos corpos de prova tenham a forma similar às curvas mostradas na Figura 6 (DE FARIAS, 2004).



Figura 6. Elevações adiabáticas de temperatura para diversas temperaturas iniciais. Fonte: De Farias, 2004.

O modelo de Ulm e Coussy considera o concreto como um meio poroso quimicamente reativo, formado por um esqueleto sólido, composto de grãos de cimento anidro e hidratos CSH, e poros preenchidos por ar ou água, conforme mostra a Figura 7. A microdifusão da água é controlada pelo desequilíbrio termodinâmico entre a água livre e a água combinada no esqueleto sólido. Esse fenômeno de afinidade química também é amplificado pela termoativação.



Figura 7. Evolução da reação de hidratação.

Fonte: De Fraga, 2004.

A evolução da reação de hidratação é representada por uma lei do tipo Arrhenius, dada pela equação 7, que considera a exotermia e a termoativação da reação de hidratação.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d\xi}{dt} m_{\infty} = \frac{1}{\eta(\xi)} A(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$
(7)

onde:

 $\eta(\xi)$ é um termo de viscosidade que representa o aumento da barreira física de acesso da água livre ao cimento anidro, provocado pelo aumento dos hidratos CSH;

 $A(\xi)$ é a afinidade química da reação, em outras palavras, a ação termodinâmica associada a velocidade de formação de hidratos, que também depende do estado da reação, ou seja, o potencial que os reagentes têm de se combinarem quimicamente;

 E_a é a energia de ativação aparente da reação, considerada constante com relação ao grau de hidratação;

R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta.

O termo da equação, exp $\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$, considerando que os termos E_a e R são constantes, varia em função da temperatura e representa o efeito da termoativação, ou seja, a reação se intensifica em temperaturas mais elevadas.

A equação 7, pode ser escrita de modo mais apropriado, como dado pela equação 8, onde surge o termo $\tilde{A}(\xi)$ que é a afinidade química normalizada e é uma função intrínseca do material que descreve a evolução da reação de hidratação. A curva da afinidade normalizada que caracteriza o material pode ser obtida através de ensaios de elevação adiabática da temperatura.

$$\frac{d\xi}{dt} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$
(8)

Na formulação apresentada na Equação 6 do acoplamento termoquímico de Ulm e Coussy, há algumas propriedades térmicas apresentadas que são bastante relevantes para descrever problemas térmicos do concreto, tais como: condutividade térmica, calor específico e capacidade térmica. É importante ressaltar que essas propriedades são da natureza de cada componente do concreto e também da dosagem da mistura. Essas
propriedades também variam com a temperatura, mas muitas vezes o cálculo é simplificado adotando-se valores constantes ao longo da vida útil da estrutura (Valentim, 2020).

As características térmicas de um concreto dependem da natureza de seus constituintes e de sua formulação. No entanto, teoricamente, uma simples lei de dosagem seria insuficiente para determinar suas propriedades, visto que com o desenvolvimento da reação de hidratação, novos produtos são produzidos e fazem parte do estado termodinâmico do material. Além disso, essas propriedades sofrem mudanças com a temperatura. Portanto, em uma idade jovem, os parâmetros da equação do calor estão relacionados com a composição do concreto, o grau de hidratação e a temperatura (FRAGA, 2018).

A condutividade térmica mede a capacidade de um material de conduzir calor e é definido entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. Esta é medida em joules por segundo por metro quadrado de área de um corpo quando a diferença de temperatura é de 1°C por metro de espessura do corpo (J/m².s°C/m). O calor específico representa a capacidade térmica do concreto e é um pouco influenciado pelas características mineralógicas do agregado, mas aumenta bastante com a elevação do teor de umidade do concreto. Esse é a quantidade de energia necessária para aumentar em 1 unidade de massa 1 unidade de temperatura (J/kg°C). A capacidade térmica, ou calor específico volumétrico, é o calor específico multiplicado pela massa específica (J/m^{3°}C) (NEVILLE, 2016).

Medições experimentais de calor específico no concreto envolvem o mesmo princípio que as medições da condutividade térmica, com medições térmicas dinâmicas (transitórias), em Pomianowski et al. (2014), ou uma combinação de medições transientes e estacionárias, onde o calor específico é calculado com base no coeficiente de difusão térmica (obtido a partir do método transiente) e a condutividade térmica (obtida a partir do método transiente) e a condutividade térmica (obtida a partir do método transiente) e a condutividade térmica (obtida a partir do método de estado estacionário), proposto por Luca e Mrawira (2005). Assim como na condutividade térmica, o calor específico do concreto depende fortemente do calor específico dos diferentes componentes i. Seu valor pode ser estimado através da dosagem (Bentz, 2008) com base nas frações de massa dos componentes, i, desde que o calor específico de cada fase independente, Ci, seja conhecido.

A solução da equação 6 possibilita o conhecimento dos campos de temperatura e de grau de hidratação para cada passo de tempo, possibilitando a determinação das propriedades mecânicas, tais como resistências, módulo de elasticidade, e parâmetros de fluência, como uma função da evolução da hidratação para cada ponto da estrutura.

Os ensaios necessários para avaliação das propriedades do concreto massa são os mesmos recomendados aos concretos convencionais, tendo ainda que realizar a verificação no comportamento destes materiais quanto a possibilidade de expansões advindas de agregados reativos, bem como o comportamento em relação a elevação de temperaturas (DE SOUZA, 2017).

Neste sentido, o estudo da evolução da temperatura em estruturas massivas de concreto, pertinentes a este trabalho, decorrente do calor liberado pela reação exotérmica da hidratação do cimento, será possível através do conhecimento da elevação adiabática da temperatura do concreto. Esse calor, embora possa ser medido por ensaios com o próprio cimento na pasta pura ou em argamassa, só pode ser conhecido com exatidão através da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto, medida em um calorímetro adiabático, determinado pela ABNT NBR 12819:2012 (DE SOUZA, 2017).

Uma estimativa precisa das tensões no concreto causadas pelo calor e mudanças volumétricas induzidas pela hidratação requer uma previsão numérica do campo de temperatura ao longo das idades iniciais. Por isso, serão determinados, também, a condutividade térmica do concreto e o seu calor específico.

2.3. IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo Impressão 3D – sinónimo do tecnicamente mais adequado Fabricação Aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) – cobre na verdade uma diversa gama de processos e tecnologias, que oferecem a capacidade de produzir frações ou produtos completos desenhados em software CAD, a partir de diferentes materiais. O que estes processos têm em comum, e os unifica sob este termo, é a forma como a produção decorre: de forma aditiva, geralmente camada sobre camada (3DPI, 2014).

A aplicação inicial da impressão 3D, que projetou a tecnologia e incentivou o seu desenvolvimento, ocorreu na área da prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*, RP) – sobretudo de peças mecânicas – uma vez que permitiu a criação de forma rápida e barata

de modelos físicos, passíveis de serem testados e discutidos, numa fase preliminar do processo de fabrico (WOHLERS; GORNET, 2012).

Certamente que esta tecnologia e suas impressionantes possibilidades de automação e produção no local, redução de custos, redução de desperdícios e efeitos poluentes, aliado a grande liberdade de design e customização permitida, com a otimização estrutural também geraram interesse no setor da construção civil (LOPES, 2016).

A ideia de criar uma fábrica de construções foi idealizada pela primeira vez por Ernest Neufert em 1943, seu conceito chamado de Hausbaumaschine, a tradução seria "máquina de construção", funcionaria colocando uma enorme fábrica de construção de casas sobre trilhos de trem que se moveria lentamente deixando para trás construções de cinco andares. A ideia nunca chegou a ser implantada, mas algumas ideias baseadas nesse conceito foram testadas na Alemanha Oriental. O resultado foi muitas mortes acidentais. Dessa forma, todas as tentativas de criar uma máquina geradora de casas foram malsucedidas e perigosas (WEINERSMITH; WEINERSMITH, 2018). A Figura 8 ilustra a representação do esquema da Hausbaumaschine.



Figura 8. Esquema Hausbaumaschine. Fonte: Neufert, 1943.

Seis décadas mais tarde, em 2001, sob a liderança do pesquisador Behrokh Koshnevis da Universidade do Sul da Califórnia, é criada a primeira tecnologia de Impressão 3D de Cimento Portland (3DCP) intitulada *Contour Crafting* (CC), que consiste na extrusão de concreto em estado pastoso com deposição controlada por computador. Após o CC, surgiram outras iniciativas utilizando a 3DCP, como pesquisas em universidades,

empresas de arquitetura e engenharia, ainda iniciativas individuais não filiadas a nenhum tipo de organização, motivando muitas vezes a criação de startups. São exemplos os projetos *D-Shape*, na Itália, *Concrete Printing*, no Reino Unido, e o WinSun, na China, projetos tecnicamente distintos, que utilizam a fabricação digital de peças grandes por sobreposição de camadas de concreto (FLORÊNCIO et. al., 2017).

Winsun é uma empresa chinesa, com origem em Xangai, seu objetivo inicial era o desenvolvimento de novos materiais ecológicos e técnicas de construção. A empresa ganhou notoriedade com o desenvolvimento da sua impressora 3D e atualmente é uma das que mais realizou avanços concretos a nível da implementação da tecnologia de Impressão 3D na construção (GRENZEL, 2019).

Diferente do CC que realiza a construção in loco, a empresa Chinesa criou um sistema de impressão formado por um braço robótico de 6,6m de altura, que se desloca por uma barra horizontal de 10m de largura, que por sua vez está instalada em dois trilhos através dos quais se pode deslocar ao longo de uma profundidade máxima de 40m. Dessa forma a empresa criou uma fábrica, equipada com uma espécie de linha de montagem de Impressão 3D que pode operar até um máximo de quatro impressoras em simultâneo, totalizando 150 metros de comprimento (LOPES, 2016).

Da mesma forma que na *Contour Crafting* as paredes são compostas de duas faces, uma interna e a outra externa podendo conter um padrão diagonal de reforço no interior que são depositados camada por camada através de um bico extrusor (Figura 9). Os vãos entre o padrão diagonal podem permitir a passagem de cabos e tubulações, mas que também, devido aos espaços de ar interiores, pode assumir as funções de isolante térmico (PORTO, 2016).



Figura 9. Execução de elemento. Fonte: Wu et al, 2016.

Com esta técnica, a empresa construiu diversos edifícios, provando a aplicabilidade das impressoras na construção civil. Em 2014, dez casas de 200 m² foram montadas em um dia com partes impressas, cada casa custou 4.800 dólares. No ano seguinte, construiu uma mansão de 1100m² e um edifício de 5 andares que até o momento é o mais alto já executado por métodos de fabricação aditiva (CHARRON, 2015).



Figura 10. Edificações impressas por 3DCP. Fonte: Winsun, 2020.

Um grupo de 3 engenheiros, da 3DHomeConstruction, finalizaram, em 2020, a primeira casa impressa em 3D do Brasil. A ideia do projeto surgiu em 2017, dentro da Universidade Potiguar no Rio Grande do Norte, como projeto de graduação. Eles construíram sua primeira estrutura com área de impressão de 3 metros de altura, 7,6 metros de largura, e 12 metros de comprimento (Figura 11), que pode imprimir facilmente estruturas maiores. A edificação de 66 m² conta com os vãos de porta e parede. A

tecnologia reduziu os custos da construção, que ficou em torno de R\$30,00 o m² de parede, com esse valor podendo ainda ser reduzido ainda mais. Considerando os acabamentos da casa, o valor total da obra foi estimado em R\$ 50 o m² (INOVAHOUSE3D, 2020).



Figura 11. Casa impressa em 3D com tecnologia Brasileira. Fonte: InovaHouse3D, 2020.

Além da vasta utilização da impressão 3D para edifícios e casas, esta tecnologia está presente em várias áreas. Recentemente, a GE Renewable Energy, COBOD e LafargeHolcim fizeram uma parceria para co-desenvolver turbinas eólicas com bases otimizadas de concreto impresso em 3D, atingindo alturas recordes de até 200 metros. O primeiro protótipo (Figura 12), um pedestal de torre de 10 metros de altura, foi impresso com sucesso em outubro de 2019 em Copenhague. Ao explorar maneiras de desenvolver economicamente as torres mais altas que capturam ventos mais fortes, os três parceiros visam gerar mais energia renovável por turbina (LAFARGEHOLCIM, 2020).

Tradicionalmente construídas em aço ou concreto pré-moldado, as torres dos aerogeradores costumam ser limitadas a uma altura inferior a 100 metros, dado que a largura da base não pode ultrapassar um diâmetro de 4,5 metros para poder ser transportado por rodovia, sem adição de custos excessivos. A impressão de uma base de altura variável diretamente no local com tecnologia de concreto impresso em 3D permitirá a construção de torres de 150 a 200 metros de altura. Normalmente, uma turbina de 5 MW a 80 metros gera, anualmente, 15,1 GWh. Em comparação, a mesma turbina a 160 metros geraria 20,2 GWh, ou seja, mais de 33% de energia extra (LAFARGEHOLCIM, 2020).



Figura 12. Protótipo de pedestal de torre eólica. Fonte: Lafargeholcim, 2020.

2.3.1. Processo de impressão 3D de materiais cimentícios

A tecnologia das impressoras 3D, também chamadas de máquinas de Prototipagem Rápida, vem se desenvolvendo ao longo do tempo e mudando o modo de fabricação de objetos. Já existem uma variedade de métodos de impressão, e cada um trabalha de forma distinta e utiliza matérias próprios. (PORTO, 2016)

A impressão 3D origina-se do desenvolvimento do modelo em 3 dimensões em software de edição. Após isto, direciona-se este modelo para um software específico para impressão 3D, onde é determinado como imprimi-lo definindo a espessura das camadas sobrepostas e o tempo de impressão.

Após estabelecido as configurações principais, o software de impressão compila os dados e converte o arquivo em múltiplas camadas horizontais, em um processo chamado fatiamento. Cada uma das fatias é um conjunto de coordenadas cartesianas que farão com que a ponteira se movimente nas direções x e y, enquanto extruda o material. É necessário observar ainda o concreto a ser utilizado, pois ele limita a abertura da ponteira, dado que sua abertura deve ser maior do que o maior agregado nele contido.

O bombeamento do concreto é uma parte vital do procedimento. Um bombeamento ineficaz pode segregar as partículas dentro da mistura ou fazê-la iniciar a pega ainda dentro da impressora. A pressão necessária ao bombeamento de concreto é da ordem de

1 a 4 MPa (PAUL, 2018). É necessário também que haja um sistema de controle, capaz de interromper o bombeamento no caso de haver descontinuidades geométricas do objeto a ser impresso.

Com relação as máquinas utilizadas no processo, é inevitável que as mesmas venham tendo sido criadas conforme a impressão vem se desenvolvimento, ganhando grandes dimensões, permitindo assim o aumento da escala das estruturas construídas e perdendo a similaridade com as impressoras tipicamente usadas.

O modelo físico de uma impressão 3D de que utiliza matriz cimentícia pode ser visualizado na Figura 13. O modelo representa um processo de impressão 3D por meio de deposição de sucessivas camadas e ilustra os parâmetros relevantes ao processo impressivo. Q representa a vazão injetada no sistema, V representa a velocidade do bico extrusor e L representa o comprimento a ser vencido. A altura total é denominada Hm enquanto a altura de cada camada é denominada h. Por último, W representa a espessura da camada. (WANGLER, 2016)



Figura 13. Modelo físico da impressão 3D. Fonte: Wangler, 2016.

2.3.2. Propriedades do concreto para impressão 3D

Na área da construção civil, vários materiais têm sido continuamente desenvolvidos e testados. Muitos deles são materiais tradicionais com algumas adições, outros são completamente inovadores, quanto à sua génese e características. Tem sido dada muita importância à procura de materiais biodegradáveis e recicláveis, bem como ao desenvolvimento da capacidade da impressora para empregar materiais provenientes do

local onde vai decorrer a construção. Algumas das exigências que estes têm de verificar são a necessária resistência estrutural que uma edificação implica e a consolidação correta de uma camada antes da deposição da seguinte, mantendo sempre um nível de humidade que permita uma boa aderência (duas exigências de difícil conciliação, e que complicam a criação destes materiais) (PORTO, 2016).

A trabalhabilidade e as propriedades reológicas fundamentais, a evolução reversível e não reversível, a tixotropia, a perda de abatimento, o tempo de pega, a exsudação, a segregação e as questões práticas relacionadas com o enchimento e pressão das fôrmas são tratadas entre as propriedades do concreto fresco (KOVLER; ROUSSEL, 2011).

Segundo Kovler e Roussel (2011) tem que se dar especial atenção aos aspectos de testes das propriedades do concreto, a interpretação dos resultados dos testes, modelagem e previsão de propriedades, bem como a correlação entre as propriedades do concreto fresco e sua durabilidade, efeitos de aglomerantes especiais, tipos de agregados, reforço de fibra, adições minerais e químicas, e propriedades de concretos especiais.

O estudo do comportamento de um fluxo é chamado de reologia. Segundo Brodley (1967), a reologia é o estudo do comportamento mecânico (escoamento da matéria) e da deformação de corpos devido à ação de tensões, sob determinadas condições termodinâmicas ao longo de um intervalo de tempo.

Do ponto de vista reológico, o concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido (pasta de cimento). Sendo assim, seu comportamento no estado fresco e suas propriedades deve ser estudado a partir dos conceitos da reologia. Além disso, a facilidade de aplicação, a consolidação, a durabilidade e a resistência do concreto dependem dessas propriedades reológicas.

Os materiais imprimíveis, assim como quaisquer outros materiais cimentícios, se comportam aproximadamente como material visco-plástico de Bingham. Eles fluem somente quando submetidos a tensões superiores a um valor limite crítico τ_c chamado de limite de escoamento. Quando fluem, apresentam um comportamento viscoso e a taxa de cisalhamento é proporcional à tensão que excede a tensão de escoamento através de uma constante μ_p chamada de viscosidade plástica (TATERSALL et. al, 1983).

No entanto, para a maioria dos processos de impressão, esses materiais fluem apenas na curta fase de bombeamento e deposição. Durante a maior parte do processo de impressão, eles estão em repouso. Logo, mais do que seu comportamento visco-plástico ao fluir é, portanto, o seu comportamento elásto-plástico que importa. Abaixo da tensão de escoamento, esses materiais exibem um comportamento aproximadamente elástico. Seu módulo elástico de cisalhamento (G) pode ser expresso através da equação 9, sendo γ_c a tensão de cisalhamento crítica antes do material fluir (ROUSSEL, 2018).

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \tag{9}$$

Nos fluidos tixotrópicos a viscosidade diminui com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. Segundo Galindo (2013), essa diminuição ocorre devido às alterações reversíveis na microestrutura do fluido. No entanto, a diminuição é reversível: a viscosidade aumenta uma vez cessada a força externa.

Quando o material é depositado, exibe uma tensão de escoamento inicial (τ_0). Abaixo dessa tensão de escoamento o material apresenta um comportamento elástico. Devido a fenômenos tixotrópicos e à hidratação do cimento, o limite de escoamento da matriz cimentícia aumenta com o tempo. O limite de escoamento inicial, isto é, aquele medido assim que a matriz foi misturada, determinará a altura máxima ($h_{m,max}$) que cada camada poderá ter através da equação a seguir (WANGLER, 2016).

$$h_{\max} = \frac{\tau_{0,0}\sqrt{3}}{\rho g} \tag{10}$$

Onde:

 h_{max} é a altura máxima de cada camada; $au_{0,0}$ é o limite de escoamento inicial; ho é a densidade da matriz cimentícia; g é a aceleração da gravidade.

A tixotropia desses tipos de materiais e sua capacidade de construir uma estrutura interna em repouso é a chave para a maioria das aplicações da impressão (ROUSSEL, 2018). Logo, uma propriedade reológica importante é o ganho tixotrópico (A_{thix}). Corresponde à taxa de incremento de limite de escoamento ao longo do tempo, isto é, quanto maior for o ganho tixotrópico, mais rápido o cimento ganhará limite de escoamento.

Após a deposição das camadas, os parâmetros reológicos evoluem, e os resultados experimentais mostram que, enquanto a tensão de escoamento e o módulo de cisalhamento aumentam, a deformação das camadas diminuem, em função do tempo (WOLFS et. al., 2018; LINUS et. al., 2016). O material se torna não apenas mais resistente (maior tensão de escoamento), mas também mais rígido, ou seja, maior módulo de elasticidade (ROUSSEL, 2018).

Ao depositar camadas sucessivamente, as tensões induzidas pela gravidade aumentam progressivamente. Portanto, é imprescindível que a camada inferior tenha limite de escoamento suficiente para suportar seu peso próprio além do peso da camada superior. A fim de evitar o colapso, a cinética estrutural do objeto deve obedecer a seu tamanho e a sua janela de tempo. A relação entre o tempo de espera mínimo necessário entre as camadas ($t_{h,min}$) e o ganho tixotrópico é dado pela equação 11(WANGLER, 2016).

$$t_{h,min} = \frac{\rho g h}{A_{thix}\sqrt{3}} \tag{11}$$

A velocidade máxima de impressão V_{max} pode ser obtida dividindo-se o comprimento de impressão (*L*), que é o trajeto a ser percorrido, pelo tempo de espera mínimo e pode ser obtido a partir da equação 12. A impressão em velocidades superiores à máxima irá levar a estrutura ao colapso.

$$V_{máx} = \frac{A_{thix}\sqrt{3} \times L}{\rho gh}$$
(12)

Como citado acima, uma estruturação rápida é um dos benefícios da impressão 3D. Porém, há um limite para esta taxa de crescimento do ponto de vista reológico. Estudos recentes em concretos imprimíveis consideram que tempos elevados entre uma camada e outra podem levar as chamadas "juntas frias" que levam a zonas de interface fraca entre essas camadas e ainda, quanto maior a tixotropia, mais fraca é também a interface (ZAREIYAN et. al., 2017). Portanto, conclui-se que a tixotropia é a causa das juntas frias que limitam a mistura das camadas. Logo, isto ocorre, se um tempo crítico de descanso entre as sucessivas deposições for excedido, definindo assim um tempo máximo entre camadas (T_{max}) dado pela equação 13 (ROUSSEL, 2018):

$$t_{h,máx} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho g h)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h_0}\right)^2}}{A_{thix}}$$
(13)

onde V é a velocidade horizontal.

No entanto, deve-se observar que existe uma velocidade horizontal mínima absoluta $(V_{mín})$, pois este deve ser maior que o tempo de produção da camada, para evitar juntas frias, mas também maior que o menor tempo possível de extrusão da camada dado pela equação 11. Isso implica que a velocidade mínima deve ser igual a:

$$V_{min} = \frac{\rho g h^2}{4\mu_p} \tag{14}$$

É possível obter ainda, a partir da equação 10, considerando a altura máxima da estrutura (H_m) e a tensão de escoamento final do concreto, o número máximo de camadas que podem ser impressas. Ao final do processo de impressão, a tensão de escoamento final, da camada mais inferior ($\tau_{0,f}$), deve ser suficiente para suportar toda a altura da estrutura (H_m) .

$$\tau_{0,f} = \frac{\rho g H_m}{\sqrt{3}} \tag{15}$$

Portanto, a razão entre as tensões de escoamento inicial e final, a partir das equações 10 e 15, é:

$$\frac{\tau_{0,f}}{\tau_{0,0}} = \frac{H_m}{h} \tag{16}$$

2.3.3. Dosagem do concreto para impressão 3D

Como parte indissociável da tecnologia 3DCP, tem crescido a pesquisa e o desenvolvimento acerca dos materiais relacionados a sua aplicação. Estes, via de regra, consistem em concretos especiais, com características específicas, determinadas pela

necessidade de bombeamento e extrusão por meio de bicos, além de características reológicas, de resistência e outras coerentes ao uso pretendido (LIM et al, 2012).

Diversos estudos sobre 3DCP indicam que inexiste uma mistura única para o concreto que permita sua deposição por extrusão controlada em uma superfície. De forma que questões relacionadas à composição e ao aproveitamento de materiais diversos no preparo deixam margem à inovação, estimulando a pesquisa e desenvolvimento (P&D) relacionada ao produto (FLORÊNCIO et. al., 2017).

Em busca das características fundamentais ao concreto para uso em impressão 3D, é importante observar que a maior parte dos métodos conhecidos de 3DCP se apoia nos princípios presentes no projeto Contour Crafting, desenvolvido pelo prof. Behrokh Khoshnevis, para formação de uma estrutura através do depósito de camadas de filamento cimentício (BOS et. al., 2016).

Sendo possível identificar, dentro da literatura disponível sobre 3DCP, algumas características tidas como essenciais ao concreto a ser utilizado para tal finalidade (LIM et. al., 2012; VALKENAERS et. al., 2014; PAUL et. al., 2016; ZIJL et. al., 2016), são elas:

- a) Bombeabilidade: é a possibilidade de o concreto mover-se pelo sistema de impressão 3D;
- b) Extrudabilidade: consiste na capacidade do concreto ser forçado através de um bico em um fluxo contínuo;
- c) Tempo de cura controlado: detém a capacidade do material manter as propriedades acima descritas dentro de uma margem de tolerância, após a qual o concreto endurece;
- d) Edificabilidade: é definida pela resistência apresentada pela camada de concreto recém-depositada de suportar a carga de outra camada de concreto sem sofrer significativas deformações.

Com o objetivo de ajustar as características acima citadas aos parâmetros necessários à impressão, diversas misturas de concreto têm sido utilizadas, por diversos autores, com o objetivo de criar uma matriz ótima para impressão 3D. Ma et. al. (2018) elencaram as principais estratégias utilizadas para lidar com cada uma dessas características.

Existem duas formas mais utilizadas para se alterar a fluidez do concreto. Uma consiste em modificar a relação água-cimento da matriz. Quanto maior essa relação, mais fluida será a pasta, no entanto este aumento provoca um efeito colateral de redução da resistência do concreto. Alternativamente, pode-se adicionar aditivos plastificantes superplastificantes. Esses aditivos preservam e até mesmo melhoram a trabalhabilidade do concreto fresco, para a mesma relação água/cimento.

A extrudabilidade pode ser controlada com a limitação dos tamanhos e formas das partículas constituintes da mistura. Quanto mais uniformes, com uma distribuição contínua do tamanho das partículas, e menores forem estas, a passagem da pasta ocorrerá mais facilmente. Ma et. al. (2018) afirmam que o tamanho máximo de um agregado não deve ultrapassar 10% do diâmetro da ponteira de impressão.

Já no caso da edificabilidade, uma alternativa seria a adição agentes capazes de alterar a resistência inicial das pastas, garantindo sua estabilidade. Ma et. al. (2018) citam três deles: carbonato de Lítio, hidróxido de lítio e sulfatos.

Como a impressão 3D não possui forma definida, o ponto crítico na dosagem do concreto é o meio termo entre a extrudabilidade e a edificabilidade. O material deve ser tal que uma camada consiga aderir à camada inferior ao mesmo tempo que tenha resistência suficiente para suportar o peso da camada superior.

Para alcançar as propriedades essenciais acima descritas, bem como outras propriedades específicas, os pesquisadores têm testado diferentes variações do tradicional concreto de Cimento Portland, modificando as proporções da mistura ou agregando aditivos em busca de determinadas características reológicas ou outras características desejáveis.

A partir de uma revisão bibliográfica da literatura, foi possível a construção da Tabela 1, onde foram consideradas misturas de concreto estudadas que apresentaram resultados satisfatórios para a finalidade da impressão 3D.

A partir dos dados abaixo mencionados, é possível perceber a frequência com que alguns materiais são utilizados em misturas de concreto para impressão 3D. Além do cimento Portland, matérias primas como a cinza volante, sílica fume e o uso das fibras são empregados nos concretos recorrentemente. Quanto aos aditivos, são encontrados com facilidade: superplastificantes, modificadores de viscosidade (VMA), retardadores e aceleradores.

É possível observar ainda que, pra o uso em estruturas impressas, os concretos são comumente empregues com altos teores de cimento, como podemos verificar na tabela acima uma média de aproximadamente 546 kg/m³, e essa quantidade de cimento na mistura influência diretamente na liberação total de calor. O consumo de cimento, no caso do concreto massa, em barragens, variam em média de 100 a 200 kg/m³, segundo Amaro (2006).

Percebe-se ainda, pela análise das diversas misturas ensaiadas, que os componentes da mistura de 3DCP é composto apenas de agregado miúdo, com ausência do agregado graúdo, apesar de ser comumente chamado de concreto.

Portanto, a solução deverá se apresentar na forma de utilização de consumos de cimentos minimamente baixos a fim de se reduzir as elevações de temperatura, e relativamente altos a fim de se obter as propriedades fundamentais para uma estrutura impressa em 3D, além da adoção de compostos que auxiliem a este fim.

	Consumo de cada material em kg/m ³												
Artigos	ID das misturas	Cimento	Areia	Água	Cinza volante	Silica fume	Fibra	Nano- Clay	Gesso	VMA	Superplas- tificantes	Retar- dante	Fator w/b
Panda, B. et. al., 2017	RF	290	1211	285	278	145					7		0,40
Kazemian et al., 2017	SFPM	600	1357	259		60						1,1	0,39
	FRPM	600	1379	259			1,2			0,6		0,4	0,43
	NCPM	600	1379	259				1,8				0,9	0,43
Nerella et. al., 2019	C2	391	1260	164	213	213					16		0,20
Paul et. al., 2018	M2	290	1211	285	278	145					7		0,40
	M3	289	1209	284	277	145	13,5				9		0,40
Vaitkevičius et. al., 2018	RF	625,1	1340	349					65,5				0,51
Nerella et. al., 2016	RF	430	1240	180	170	180					10		0,23
Le, T.T. et. al., 2012b	RF	579	1241	232	165	83	1,2				16,5		0,28
Anell, L.H., 2015	RF	659	1140	228	87	83	1,2				11,6		0,28
Rahul et al., 2019	RF	663	1243	265	165,7		1,8				0,8		0,32
	SF	573,6	1229	262	164	81,9	1,8				1,4		0,32
	NC	663	1243	265	165,7		1,8	2,47			1,1		0,32
	VM	663	1243	265	165,7		1,8			0,8	1,5		0,32
LE, T.T. et. al., 2012	RF	579	1241	216	165	83	1,2				8,3	4,1	0,26
Roussel, 2006	RF	787	1428	152		23					17		0,19

Tabela 1. Levantamento de traços utilizados em concretos para impressão 3D

RF: Referência

2.4. MODELAGEM DE ESTRUTURAS CONSTRUIDAS POR IMPRESSÃO 3D

A partir da revisão da literatura, pode-se constatar que para o concreto de impressão 3D, o desenvolvimento da resistência no estado fresco em poucas idades é crucial. É a questão chave para prever corretamente o desempenho da estrutura impressa durante a construção. No entanto, os estudos atuais sobre o desenvolvimento de resistência do concreto impresso em 3D nas primeiras horas após a extrusão ainda são insuficientes. A principal razão é que o desenvolvimento de resistência nesta fase do concreto moldado in loco tradicional é menos importante, pois não necessita de nenhuma capacidade de suporte. Na literatura disponível, pesquisas sobre concreto impresso em 3D no estado fresco têm focado no desempenho da impressão, assim como nas propriedades reológicas. (DING et. al., 2020).

Apesar do sucesso da impressão 3D de concreto nas últimas décadas, o conhecimento detalhado sobre a influência de parâmetros e condições específicas de fabricação no comportamento mecânico do objeto durante o processo de impressão é limitado. Isso pode ser atribuído em grande parte à complexidade e diversidade dos parâmetros do processo, que podem resultar em falhas imprevistas por falta de desempenho mecânico ou precisão dimensional (SUIKER, 2018).

Um dos grandes desafios na impressão 3D de concreto é a ausência de fôrmas, o que implica que o concreto impresso deve ser capaz de suportar seu próprio peso (e potenciais cargas externas) imediatamente após a impressão. Caso contrário, o colapso pode ocorrer. Para evitar o colapso durante a impressão, é necessário o conhecimento do comportamento do concreto na fase inicial. Para tanto, podem ser utilizados modelos analíticos e numéricos utilizando parâmetros de entrada de testes experimentais (ANDERSEN et. al., 2020).

Como a principal condição de carregamento durante a impressão 3D é o peso próprio dos objetos impressos, à medida que a complexidade do objeto aumenta, outros tipos de carregamentos podem ocorrer devido à colocação excêntricas das camadas, ou pressão cinemática do processo de deposição. Quanto a isso, a modelagem numérica pode

fornecer informações detalhadas sobre o comportamento estrutural, bem como a ocorrência e o tipo de falha na impressão.

Nesta fase, para o modelo 3D do método dos Elementos Finitos (FEM), o material é modelado usando um comportamento elástico-plástico, empregando um critério plástico dependente do tempo (Lei de Coulomb) (PERROT et. al. 2021).

A aplicação de métodos numéricos no controle do comportamento estrutural durante a impressão do concreto 3D foi demonstrada pela primeira vez por Wolfs et. al. (2018). Foi desenvolvido um modelo 3D FEM, que simula a colocação sucessiva de filamentos durante o processo de impressão e o correspondente desenvolvimento das propriedades do material. Como o Modelo inclui parâmetros de resistência e rigidez, e ainda apresenta uma análise geometricamente não linear, o comportamento estrutural durante a impressão pode ser estudado sistematicamente considerando os tipos de falhas de flambagem elástica e colapso plástico, conforme demonstrado na Figura *14* (PERROT et. al. 2021).



Figura 14. Comparação do processo de impressão de uma coluna vazia de argamassa e sua simulação numérica: descrição de modelo de falha complexo dependente da forma. Fonte: Perrot et. al. 2021.

Wolf et al. (2018) apresentaram um modelo numérico para prever modos de falha do concreto para impressão 3D, usando o ABAQUS, com parâmetros de entrada determinados a partir de testes de compressão triaxial e modelos de testes de cisalhamento para prever o comportamento mecânico do concreto impresso no estágio inicial de idade, utilizando nos modelos o Critério de falha de Mohr-Coulomb e condições globais de flambagem para avaliar o colapso. A resposta do modelo computacional desenvolvido pelos autores para previsão de falhas está ilustrada na Figura *15*.



Figura 15. Resultados numéricos de um cilindro modelado axissimétrico, representado de 5 a 40 camadas, usando as propriedades do material ensaiado. As cores plotadas representam as deformações radiais. À direita, a cor vermelha indica onde a tensão de escoamento é atingida e a deformação plástica ocorre.

Fonte: Wolf et al., 2018.

Suiker (2018) desenvolveu um modelo paramétrico mecanicista que pode ser aplicado para a previsão de falha de estruturas de parede reta durante processos de impressão 3D baseados em extrusão. Os parâmetros do processo e as propriedades do material foram reduzidas a parâmetros adimensionais exclusivos para definir tanto a flambagem elástica quanto o colapso plástico. O autor adotou um procedimento numérico para três casos geométricos: uma parede livre, uma parede simplesmente apoiada e uma parede totalmente restringida.

Em estudo subsequente, Wolf et al. (2019) compararam as duas abordagens numéricas, baseada em estudos experimentais do comportamento mecânico em poucas idades do compresso imprimível. Os resultados de ambos foram congruentes.

Andersen et. al. (2020) sugeriram um modelo numérico para descrever o comportamento da fase inicial do concreto para impressão 3D até o colapso. Foi utilizado um modelo constitutivo de material viscoelástico modelado de forma incremental a partir do software ABAQUS, considerando efeitos de tempo e de temperatura. Os parâmetros de entrada do modelo foram inicialmente determinados com base em teste convencionais de concreto e posteriormente ajustados através de um loop de otimização minimizando a diferença entre os deslocamentos previstos pelo modelo e dados por medições realizadas por meio de ensaios. Baseado no conceito apresentado por Wolfs et. al., um estudo similar, a fim de otimizar e simular o processo de impressão, foi parametrizado por Ooms et. al. (2020), que desenvolveram uma ferramenta capaz de gerar automaticamente arquivos de entrada para a análise numérica, independentemente da complexidade da geometria de impressão, simulando o comportamento estrutural de um objeto de forma aleatória durante a impressão (Figura *16*). O programa permite simular o processo de impressão de modo a torna-lo mais eficiente e evitar o desperdício de material.





Fonte: Ooms et. al., 2020.

Embora os métodos numéricos sejam considerados mais precisos do que os analíticos, os custos computacionais são um preço a ser pago. Como a comunidade da impressão 3D de concreto vem se movendo cada vez mais para feedback e controle em tempo real, assim como as demandas crescentes, é necessária uma rápida tomada de decisão e, para isso, uma avaliação analítica mais simplificada pode ser suficiente.

Kruger et al. (2019) propuseram um modelo analítico matemático de limite inferior baseado em um material de Mohr-Coulomb com parâmetros de material reológico como entrada para avaliar a capacidade de construção do concreto (Edificabilidade).

Esposito et. al. (2021) exploraram os aspectos críticos relacionados à determinação das propriedades em pequenas idades de um material a base de cimento imprimível em 3D em diferentes tempos de repouso. Foram utilizados resultados experimentais para calibrar o modelo analítico utilizado. O modelo viscoelástico calibrado é usado para avaliar o

deslocamento vertical de um elemento impresso em 3D, com foco na influência tanto do intervalo de tempo entre duas camadas subsequentes quanto da rigidez da argamassa imprimível. Investigou-se a resposta viscoelástica da argamassa segundo o Modelo de Burgers. A abordagem numérica mostrou-se satisfatória quanto a comparação da curva analítica de deformação total versus tempo do modelo com o correspondente experimental, representando essa um comportamento aproximado para avaliar o acumulo de deformação das camadas do elemento impresso.

Quanto a modelagem do processo de impressão, o comportamento do material é expresso em função do tempo. No entanto, Wolfs et. al. (2019) demonstraram que parâmetros do ambiente e de processos adicionais podem exercer um importante papel no desempenho da estrutura: como a variação de temperatura durante a impressão, que tem efeito significativo nas propriedades de resistência e rigidez no estágio inicial do concreto, induzindo a ocorrência de falhas no processo.

Além disso, as forças de ligação entre camadas é uma característica crítica que demonstrou em estudos ser fortemente dependente também dos parâmetros do processo e das condições ambientais. A inclusão de parâmetros térmicos e hídricos nas simulações numéricas podem servir como base para estender a simulação para a fase endurecida (PERROT et. al., 2021).

A sinergia entre a mecânica experimental e computacional é fundamental para o desenvolvimento futuro do concreto impresso. Considerando o estado endurecido, Wang et. al. (2020) recentemente exploraram o método de elementos discretos para simular numericamente mecanismos de falha de elementos de concreto leve impressos em 3D com diferentes geometrias (Figura 17). Bos et. al. (2019) investigaram a ductilidade de concretos impressos em 3D reforçados com fibras de aço curtas, empregando o modelo de material Abaqus de plasticidade de dano eminente para simular a resposta de flexão de vigas de concreto 3D.

Da mesma forma, Xiao et. al. (2021) empregaram o modelo de dano plástico do concreto em combinação com uma relação constitutiva de elemento discreto de tração-separação para explorar os efeitos das propriedades da ligação interfacial entre as camadas no comportamento mecânico do concreto impresso, em carregamentos de compressão e flexão.



Figura 17. Simulação dos padrões de falha de várias estruturas ocas sujeitas a teste de flexão de quatro pontos. Fonte: Wang et. al., 2020.

A partir de dados de ensaios experimentais, Heever et. al. (2021) avaliaram os parâmetros característicos do material por meio de um modelo de elementos finitos de plasticidade multi-superfície contínua de Rankine-Hill anisotrópico, simulando aberturas de fissuras em concreto imprimível reforçado com fibras, obtendo concordância nos resultados obtidos.

Feng et. al. (2015) implementaram uma análise de elementos finitos, baseadas na relação tensão-deformação de compressão experimentalmente determinada e em um critério de

tensão máxima, para investigar o efeito da direção de impressão na capacidade de carga de uma estrutura de arco impressa em 3D.

Ze Chang et. al. (2022) exploram a quantificação da construtibilidade de objetos de concreto impressos em 3D com malha aleatória, considerando a falha estrutural por flambagem elástica. O modelo proposto pelos autores considera os parâmetros de impressão mais relevantes, incluindo comportamentos de material dependentes do tempo, velocidade de impressão, dano localizado e influência do processo de impressão sequencial. Os testes computacionais realizados analisaram do processo de impressão 3D de uma estrutura de parede livre e um layout quadrado. O modelo reproduziu a assimetria da falha por flambagem com precisão e a altura de impressão crítica prevista em acordo com os dados experimentais da literatura (Figura 18).



Figura 18. Modelo de Falha típico observado na estrutura de parede livre característico da flambagem elástica.

Fonte: Ze Chang et. al., 2022.

2.5. CONCLUSÕES DA REVISÃO DA LITERATURA

A partir da revisão da literatura, foi possível verificar que as estruturas massivas possuem características particulares, no que diz respeito ao seu comportamento térmico, que devem ser minuciosamente observados e estudados a fim de se evitar (ou controlar) fissuras no concreto. A formação de fissuras nas primeiras idades do concreto pode

aumentar a permeabilidade da estrutura, diminuir sua durabilidade e, no caso de barragens, por exemplo, comprometer a estabilidade e estanqueidade da estrutura.

Grandes estruturas de concreto, como os reservatórios das UHERs, são classificadas como estruturas de concreto massa porque estão sujeitas a formação de fissuras nas primeiras idades devido às reações de hidratação do cimento. Como essa reação dos compostos do cimento é exotérmica, e a condutividade térmica do cimento é relativamente baixa, ele atua como um isolante, o que pode causar uma elevação importante da temperatura no interior de uma grande massa de concreto durante a hidratação. Ao mesmo tempo, o exterior da massa de concreto perde parte do calor, formando um significativo gradiente de temperatura, com posterior resfriamento, que resulta em sérios problemas de fissuração.

Essas fissurações, devido as tensões de origem térmicas, podem ser reduzidas, por exemplo, se a concretagem ocorrer em camadas, de modo a diminuir as alturas de concretagem e volumes de cimento, sendo assim, consequentemente obtendo a redução de geração de calor de hidratação do material cimentício.

Ao adotar medidas para controle da temperatura desenvolvida no maciço de concreto, a altura e o intervalo entre as camadas têm efeito considerável. Por exemplo, Andriolo e Skwarczynski, em 1998, indicam que, para intervalos usuais em obras de barragem e concreto convencional, a mudança da altura de uma camada de 1,5m para 1,0m gera uma redução de 6°C a 7°C no calor liberado.

Como meio de otimização do processo de construção, foi pensado no modelo de impressão 3D que utiliza da deposição de camadas finas para construção da estrutura. Este método, além do potencial de aumentar a produtividade da obra, em comparação aos métodos mais comumente utilizados, eliminaria os procedimentos de compactação e da necessidade de tratamento das interfaces da estrutura.

Porém, este modelo constitutivo também possui particularidades que devem ser verificadas. Além de fazer uso de um concreto especial, com características específicas para fácil bombeamento e extrusão, esta revisão bibliográfica mostra que o mesmo utiliza altos teores de cimento, dado que no caso das estruturas massivas, essa questão da liberação de calor devido as reações de hidratação são de suma importância, pois pode resultar em patologias na estrutura.

60

Observa-se que, na literatura, desenvolveu-se um modelo analítico que pode ser usado para fornecer estimativas dos requisitos reológicos dos materiais e dos parâmetros do processo de impressão, como previsão da altura da camada e a cinética da construção. No entanto, estes cálculos não são precisos o suficiente para fornecer uma sistemática completa e abrangente do processo.

Para isso, soluções numéricas avançadas têm sido desenvolvidas. O método dos elementos finitos (MEF) é capaz de simular a etapa de deposição e fornecer a descrição da forma da camada depositada ou prever a estabilidade da estrutura durante a impressão. Assim, essas ferramentas estão sendo utilizadas para otimizar o processo de impressão de formas complexas, que podem levar em conta a heterogeneidade do material e também a evolução química e física de suas propriedades nas primeiras horas após a deposição.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo descrever os métodos e materiais utilizados nesta pesquisa para caracterização do material empregado no estudo, além da metodologia utilizadas para avaliação do seu desempenho através de modelagem numérica, conforme ilustra o fluxograma da Figura 19 e da Figura 20.

Serão retratados os ensaios laboratoriais executados, assim como a descrição do modelo numérico adotado no estudo, com o intuito de atender os objetivos acima propostos.



Figura 19. Fluxograma da Metodologia Geral adotada, parte 1



Figura 20. Fluxograma da Metodologia Geral adotada, parte 2

3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A partir da revisão na literatura realizada das dosagens de concreto para impressão 3D, foi utilizado como referência um concreto com quantidades observadas em estudos bibliográficos como pertinente. Para este material foram realizados ensaios afins de se obter os parâmetros necessários a modelagem numérica e a impressão 3D da estrutura.

A seguir serão descritas as propriedades essenciais e os ensaios realizados para caracterização do material e do desempenho da estrutura massiva.

3.1.1. Materiais

Para confecção do concreto para impressão 3D, foram utilizados os seguintes materiais listados na Tabela 2.

Material	Fornecedor	Propriedades		
Areia natural	Areial Santa Rosa	seca ao ar livre;		
	Thomas Sunta Rosa	passada na peneira #1,18mm		
		Composição: Sílica amorfa, óxido		
Sílica Ativa	SILMIX	de ferro, cálcio, alumínio,		
		magnésio, sódio e potássio.		
		Composição química: Tabela 3;		
		Massa específica: 3050 kg/m ³ ; Resistência a compressão (experimentalmente obtidos):		
Cimanta Dortland				
CD II = 22	Lafarge Holcim			
CP II F 32		3 dias - 19,4 MPa		
		7 dias - 22,7 Mpa		
		28 dias - 29,9 MPa		
Água	NUMATS/COPPE/UFRJ			
Superplastificante	Master Builders Solutions			
MasterGlenium 51	BASF			

Tabela 2. Materiais utilizados na pesquisa

Tabela 3	Composição	auímica do	cimento	ensaiado
Tabera J.	Composição	quinnea uo	cimento	ciisaiauo

Common and an	%					
Componentes	FRX 1	PF	Final			
CaO	75,007	-	63,14			
SiO ₂	11,844	-	9,97			
Fe2O ₃	4,261	-	3,59			
Al2O ₃	4,123	-	3,47			
SO_3	3,528	-	2,97			
K ₂ O	0,550	-	0,46			
SrO	0,335	-	0,28			
TiO ₂	0,237	-	0,20			
MnO	0,080	-	0,07			
ZnO	0,036	-	0,03			
Perda ao fogo	-	15,822	15,82			

3.1.2. Dosagem e Mistura

Neste trabalho foi empregado como referência o concreto estudo por Kazemian (2017), contendo: 540 kg/m³ de Cimento Portland CPII F 32, 1357 kg/m³ de areia natural, 60kg/m³ de Sílica ativa, 259kg/m³ de água e, para garantir a trabalhabilidade da mistura, 0,8% em relação a massa de aglomerante de Superplastificante.

Os concretos foram produzidos em sala climatizada a $21^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$, utilizando misturador tipo argamassadeira, de 5 litros. O procedimento de mistura foi realizado na seguinte ordem:

- a) Umedecimento do misturador com água, retirando o excesso com um pano;
- b) Lançamento do agregado, misturando por 1 minuto, visando perfeita homogeneização;
- c) Adição do cimento, misturando por 1 minuto com o agregado;
- d) Adição de metade da quantidade total de água, misturando por 1 minuto, visando melhor absorção;
- e) Adição do restante da água (segunda metade) e de todo o superplastificante, misturando por 8 minutos, para total ação do superplastificante e conclusão do processo de mistura do concreto.
- 3.1.3. Medição de Parâmetros reológicos

A reologia do concreto estudado foi medida usando um viscosímetro. Este equipamento mede a relação entre a tensão e a taxa de deformação para diferentes fluidos. A partir dessa medida foi possível determinar diversos outros parâmetros do material.

O ensaio neste tipo de reômetro consiste em introduzir uma palheta giratória do tipo Vane em um fluido, onde essa tentará iniciar movimento e o equipamento irá medir a tensão de escoamento estática, desenvolvida na base da palheta. A palheta produz na amostra uma taxa de cisalhamento crescente até que seja atingida uma taxa de 0,2s⁻¹ em 180s. O resultado deste ensaio é dado na forma de um gráfico que representa o torque gerado na palheta pelo tempo percorrido. Então, converte-se o torque em tensão de cisalhamento, a partir de expressão obtida no manual do equipamento, para cada modelo de palheta utilizado.

O equipamento utilizado foi um viscosímetro produzido pela BrookField, modelo DV-III Ultra. Utilizou-se uma palheta de quatro aletas com diâmetro de 0,69 cm e altura de 1,176 cm (modelo Vane-74), e 5 beckers de 150 ml com diâmetro de aproximadamente 5,63 cm, para cada tempo de ensaio (Figura 21). Ao final de cada tempo de espera, o respectivo becker era posicionado embaixo do reômetro, alinhando o centro do becker com a palheta. Descia-se, então, o reômetro até que a palheta atingisse sua meia altura. Todo o procedimento ocorreu em temperatura ambiente. O valor do limite de escoamento $\tau_{0,t}$ da pasta com tempo de repouso t é determinado pela máxima tensão gerada pelo fluido na palheta ao longo do ensaio. Já o coeficiente de ganho tixotrópico (A_{thix}), parâmetro que avalia o incremento no limite de escoamento ao longo do tempo, é obtido através do coeficiente angular da reta que melhor ajusta os valores dos limites de escoamento obtidos nos tempos ensaiados. Com os parâmetros reológicos $\tau_{0,t}$ e A_{thix}, é possível obter os parâmetros de impressão necessários à garantia de estabilidade e resistência das camadas impressas.

Convertida às tensões de cisalhamento em cada tempo, a reta foi extrapolada a fim de se considerar o seu aumento constante em todo período pré-endurecimento. Essa equação foi considerada como a relação constitutiva da tensão de cisalhamento.



Figura 21. Ilustração da execução do Ensaio de Reologia.

3.1.4. Medição de parâmetros físicos

Densidade no estado fresco

Dado as composições cimentícias empregadas, os materiais imprimíveis geralmente se classificam como argamassa, devido ao tamanho do agregado miúdo ser inferior a 4 mm, porém o termo "concreto" ainda é considerado adequado em função de sua aplicação no ambiente construído e de acordo com a terminologia mais frequentemente usado na arena de pesquisa 3DCP (Heever et. al. 2021).

Logo, o procedimento experimental para aferir a densidade de massa de argamassas está descrito na ABNT NBR 13278 (2005). A densidade no estado fresco foi auferida a partir da relação entre o peso e o volume de um recipiente conhecido.

O procedimento consiste, inicialmente em calibra-se o recipiente cilíndrico utilizado como molde. Pesou-se o mesmo vazio (m_v) (Figura 22a). Em seguida, encheu-se este com água, e pesou-o a fim de registrar-se o seu volume (v_r) (Figura 22b).

Após calibrado o molde, imediatamente após o preparado da mistura, segundo item 3.1.2, introduziu-se suavemente, com uso de uma colher, porções da argamassa no recipiente cilíndrico, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada aplicaram-se golpes ao fundo do recipiente com a função de realizar o devido assentamento do concreto, exercendo um leve adensamento do material, afim de assemelhar-se ao processo de deposição das camadas, onde o processo do adensamento não é efetivamente realizado.

Após a execução das camadas, rasou-se o recipiente com uma espátula, e registrou-se a massa do molde com o concreto (m_c) (Figura 22c). Calculou-se a densidade de massa do concreto, no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³) através da seguinte equação:

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \tag{17}$$



Figura 22. Procedimento para determinação da densidade no estado fresco: (a) Registro no peso do recipiente vazio; (b) Registro do peso do recipiente cheio de água; (c) Registro do peso do recipiente com concreto fresco.

Para determinação da densidade efetuou-se o procedimento do ensaio 3 vezes, obtendose três valores de densidade a partir da eq. 17, e tirou-se a média destes.

Densidade no estado endurecido

O procedimento de ensaio consiste basicamente em misturar e homogeneizar os materiais constituintes conforme descrito no item 3.1.2. Após esta mistura foram moldados 20 corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 50 mm de altura e 25 mm de diâmetro, aos quais foram mantidos em temperatura ambiente até a idade de ruptura. Destes 20 corpos de prova, 12 foram desmoldados, faceados e medidos em idade igual a 7 dias, 4 em 22 dias e 4 em 28 dias.

Prosseguindo fez-se a pesagem em balança de precisão e medição com o paquímetro das dimensões: diâmetros e alturas, considerando pelo menos duas medidas paralelas de cada, para obter as médias respectivas. A densidade de massa, no estado endurecido do concreto, foi calculada dividindo a massa em gramas pelo volume expresso em milímetros cúbicos, do corpo de prova cilíndrico.



Figura 23. Procedimento para determinação da densidade no estado endurecido: medição do diâmetro do corpo de prova com paquímetro.

3.1.5. Medição de parâmetros mecânicos

Uma vez que as peças obtidas através da tecnologia de impressão 3D são avaliadas quanto a sua estabilidade, se faz necessário o conhecimento das propriedades mecânicas do concreto estudado. Na determinação da resistência do concreto foram realizados ensaios tanto no concreto no estado fresco, atendendo as propriedades para bombeamento e extrusão do processo de impressão 3D, quanto para o estado endurecido, avaliando a estabilidade da estrutura.

Para os dois estados, foi utilizado o ensaio de resistência à compressão uniaxial com o objetivo de elucidar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de impressão, de acordo com a NBR 5739 (2018); utilizado a prensa Shimadzu 100kN do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ, com v = 0,1 mm/min, empregue em diferentes corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de altura e 25 mm de diâmetro.

Resistência no estado fresco

Levando em conta o concreto no estado fresco foram utilizados diferentes tempos de repouso, a partir do início da mistura, até o tempo total de 5 horas, tomando este como o tempo de fim de pega do material. As idades foram definidas a partir de ensaios experimentais no aparelho de Vicat, que indicaram o fim de pega entre 4 e 5 horas. Os testes iniciaram duas horas após o primeiro contato do cimento com a água devido os corpos de prova não apresentarem resistência suficiente para serem desmoldados e ensaiados antes deste período. A Figura 24 ilustra o corpo de prova desmoldado do tempo de 1,5 horas, que não apresentou coesão suficiente para que fosse possível sua desmoldagem sem avaria.



Figura 24. Ilustração de tentativa de desmolde de corpo de prova no tempo de 1,5 horas.

Os ensaios de resistência a compressão foram realizados, após desmoldagem do corpo de prova, nos tempos de 2, 3, 4 e 5 horas, contados a partir do primeiro contato da mistura com a água.

Foram utilizados moldes em PVC com abertura lateral para facilitar o desmolde do concreto ainda fresco, sendo este desmoldado já na prensa para minimizar interferências no corpo de prova. É possível observar na Figura 25 os moldes utilizados no ensaio.



Figura 25. Moldes cilíndricos em PVC com abertura lateral utilizado nos ensaios de resistência.

Os corpos de prova foram cuidadosamente "extrudados" dos moldes com o auxílio de um soquete, com mesmo diâmetro dos moldes, que expulsou os cilindros levemente de cima para baixo dos recipientes, sobre o equipamento, com a inserção de espátula na abertura lateral para manter a mesma aberta durante o processo de desmolde (Figura 26). A Figura 27 apresenta a execução do ensaio de resistência a compressão axial no material em estado fresco, ilustrando o corpo de prova já desmoldado sobre o aparelho.



Figura 26. (a) Ilustração do processo de desmolde do corpo de prova (b) Ilustração dos materiais utilizados no processo de desmolde



Figura 27. Ensaio de resistência a compressão uniaxial no concreto fresco: (a) corpo de prova após extração do molde diretamente sobre o equipamento; (b) corpo de prova em ensaio; (c) corpo de prova após terminado o ensaio.

Para apresentação da relação tensão-deformação dos ensaios foi empregado o deslocamento induzido pelo próprio equipamento no material, e considerado como comprimento inicial à altura do molde. A partir desta relação foi obtido o módulo de elasticidade de cada mistura em cada tempo ensaiado.

Resistência no estado endurecido

Para o concreto no estado endurecido, também se considerou diferentes tempos, de 2, 7 e 28 dias. Foram moldados 4 corpos de prova para cada tempo considerado, e os mesmos foram curados à temperatura ambiente. Antes da realização dos ensaios, estes foram faceados em torno mecânico, para uniformização das superfícies, tanto do topo quanto da

base. Isto evita a ruptura indevida dos cilindros causada por concentrações de tensões em algum ponto das superfícies.

Para os corpos de prova no estado endurecido considerou-se os deslocamentos medidos nos LVDT`s fixados ao equipamento e aos corpos de prova. Com os dados da curva tensão x deformação, obtida no ensaio, foram determinados a resistência de pico (f_c) e a deformação de pico (ϵ), obtendo assim a resistência a compressão do concreto no tempo.

Além desses parâmetros, também foi calculado o modulo de elasticidade tangente do concreto no tempo, correspondente à inclinação da curva tensão versus deformação obtida quando o corpo de prova cilíndrico é submetido a um carregamento uniaxial de compressão com velocidade controlada.

3.1.6. Medição de parâmetros térmicos

> Condutividade Térmica e Calor específico

A condutividade térmica do concreto, que descreve a capacidade do concreto em conduzir calor no nível macroscópico de suas estruturas, foi analisada utilizando o Analisador de condutividade térmica *C-Therm TCi* no Laboratório do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS) da COPPE/UFRJ (Figura 28).



Figura 28. Analisador de Condutividade Térmica C-Therm TCi utilizado

O ensaio consiste em depositar uma amostra no sensor, que fornece uma pequena quantidade de calor ao material. O equipamento monitora um aumento da temperatura na
interface entre o sensor e a amostra que produz como resultado a condutividade térmica (k) e a efusividade do concreto ensaiado.

O calor específico, entendido como sendo a quantidade de energia em J, necessária para aumentar 1 unidade de massa em kg, de um dado material por uma unidade de temperatura, K, pode ser calculado a partir do gerados pelo C-Therm TCi, através da equação 18.

$$Efusividade = \sqrt{k\rho c_p} \tag{18}$$

Onde k é a condutividade térmica, ρ é a densidade do material e c_p é o calor específico.

A partir dos dados obtidos é possível, ainda, a obtenção da capacidade térmica do material que corresponde ao calor específico multiplicado pela densidade do mesmo, que assim como esta varia conforme o estado físico em que o concreto se encontra.

Calorimetria isotérmica

O fluxo de calor liberado pelas pastas nas condições isotérmicas e o calor total liberado nas reações de hidratação foram medidos com auxílio do calorímetro TAM Air (TA Instruments) do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ, constituído de 8 canais independentes, ao qual cada canal, tem uma configuração semelhante. Um lado é destinado à ampola contendo a amostra e o outro à ampola de referência (Figura 29).



Figura 29. Equipamento Calorímetro Isotérmico, com 8 canais, onde as amostras são inseridas junto com suas respectivas ampolas de referência.

Para o preparo das ampolas com as amostras, foram produzidos 100g da mistura. A quantidade necessária de cada material para mistura foi diretamente pesada em beckers. Com todos os materiais já pesados, iniciou-se a mistura. Foram adicionados os materiais secos no béquer de mistura e homogeneizados à mão durante 1,0 minutos. Em seguida foram adicionados a água e o superplastificantes, misturando por 8 minutos. Posteriormente, a massa de cada mistura, aproximadamente 5g cada, equivalente a capacidade calorífica da água de referência, foi pesada na ampola da amostra com o auxílio de uma seringa, com a precaução de não sujar as paredes laterais nem a borda da ampola. A ampola foi, então, fechada e colocada dentro do canal, e o ensaio foi iniciado. Processo ilustrado na Figura 30.



Figura 30. Ilustração do procedimento executado para ensaio de calorimetria isotérmica: (a) pesagem dos materiais em balança de precisão, para mistura; (b) pesagem da mistura nas ampolas para ensaio; (c) ampolas utilizadas e material para lacrar as mesmas.

O tempo entre o momento em que a água entra em contato com o cimento e o momento em que a ampola da amostra é colocada dentro do canal foi cronometrado para cada amostra.

A fim de determinar os fluxos de calor acumulado e determinar a energia de ativação do concreto, necessários a transformação das condições isotérmicas para adiabáticas, foram realizados dois ensaios: nas temperaturas de 65 °C e de 25°C, com duração de cada teste de 168 h (aproximadamente 7 dias).

Baseado na evolução do calor de hidratação, conforme ilustrado acima, alguns parâmetros foram obtidos por meio das curvas de fluxo de calor seguindo a metodologia de Rocha (2015). Um destes foi o calor de hidratação total acumulado até o final do ensaio a partir da curva de calor acumulado. A curva de calor acumulado foi obtida pela integração da curva de taxa de liberação de calor, a partir do período de indução para cada mistura. O fluxo de calor e o calor acumulado foram normalizados pela massa de material cimentício presente em cada amostra.

De posse do fluxo de calor e o calor acumulado extraído do ensaio, os resultados foram processados para consecução do gráfico de elevação adiabática versus tempo, com base na formulação dada por Reis (2020), descritos no item a seguir.

3.1.7. Previsão de Elevação adiabática

A equação de Arrhenius, expressa na eq. 8, ao qual representa a evolução da reação de hidratação, pode ser expressa como:

$$k = Ae^{\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right)} \tag{19}$$

Onde A é a constante de proporcionalidade com a mesma unidade de k; e, o número de Euler; Ea é a energia de ativação; R é a constante universal dos gases e T_c é a temperatura no qual a reação ocorre, no caso a temperatura do ensaio de calorimetria isotérmica.

Para o cálculo da energia de ativação aparente das misturas, foi utilizado o método descrito pela ASTM C 1074:2017, por intermédio da eq. 19, sendo o k representado pelos valores de fluxo de calor para uma mesma mistura cimentícia em temperaturas diversas, considerando o mesmo grau de hidratação.

A equação 19, em escala logarítmica, apresenta a taxa de reação (k) numa relação linear com o inverso da temperatura (T_c), como a inclinação representada pela constante Ea/R (eq. 20). Logo, plotam-se os valores de ln(k) em função do inverso das respectivas temperaturas ensaiadas no ensaio de calorimetria isotérmica, obtendo assim o valor de Ea/R.

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{R} \cdot \frac{1}{T}$$
(20)

Tendo como base a eq. 6, descrita no capítulo anterior, esta pode ser reescrita considerando a evolução dos campos térmicos para condições isotérmicas, onde não há variação de temperatura ou fontes de calor externas nas amostras do ensaio como sendo:

$$0 = Q_{m\acute{a}x}\dot{\xi} + k\nabla^2 T \tag{21}$$

Como visto anteriormente, $Q_{máx}$ é um parâmetro de exotermia da hidratação, equivalente a quantidade de calor máximo acumulado ao longo da reação. E a parcela $k\nabla^2 T$ equivale à taxa de calor correspondente a condutividade da amostra a uma certa temperatura, podendo ser reescrito como dq/dt. Reescrevendo a eq. 21 temos:

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{1}{Q_{m\acute{a}x}} \left(\frac{dq}{dt}\right) \tag{22}$$

Substituindo a eq. 22 na equação de evolução química baseada na Lei de Arrhenius (eq. 8), tem-se que:

$$\tilde{A}(\xi) = -\frac{1}{Q_{máx}} \left(\frac{dq}{dt}\right) e^{\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right)}$$
(23)

Obtidos os valores de evolução de calor $(Q_{máx})$ e o fluxo de calor (dq/dt), no ensaio de calorimetria isotérmica, é possível calcular a curva de afinidade química por grau de hidratação a partir da equação 23.

Reis (2020) desenvolveu um modelo de predição de evolução de temperatura adiabática, que consiste em um algoritmo iterativo para calcular a curva $\tilde{A}(\xi)$, em função do grau de hidratação, utilizando dados isotérmicos, e posteriormente, a partir de resolução de sistemas de equações diferenciais ordinárias, calcular a temperatura adiabática para diversas temperaturas, baseada na curva inicialmente obtida (APÊNDICE A).

Este método foi utilizado para obtenção da curva Elevação adiabática x tempo. Como entrada, o programa utiliza a energia de ativação aparente, o calor específico da amostra, a temperatura ensaiada isotermicamente, e a quantidade de calor máxima obtida. Além destes é necessário determinar os passos de tempo iterativos e o tempo total de evolução

da reação de hidratação desejados, e ainda a temperatura inicial do ensaio, que considerando a elevação adiabática equivale a 0°C.

3.2. METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica foi realizada com base no método de Elementos Finitos utilizando o programa computacional DIANA® (DIsplacement ANAlyzer), versão 10.5.

O programa permite que a estrutura seja avaliada quanto ao transiente da transferência e distribuição das temperaturas e a hidratação da estrutura no tempo, considerando a exotermia e a termoativação da reação de hidratação. O mesmo possibilita, ainda, avaliar o modelo, considerando os parâmetros mecânicos do concreto estudado, obtidos experimentalmente no tempo, quanto as deformações nas camadas durante o processo de deposição das mesmas similar a impressão 3D. Pode-se também examinar o histórico de tensões, deslocamentos e potencial de fissuração do concreto, considerando a retração de origem térmica e a evolução das propriedades do material.

É necessário, para uma análise considerando o estado fresco do concreto, estabelecer suas propriedades em função do tempo, e ainda, para o estudo da elevação da temperatura da estrutura massiva, as condições térmicas do concreto. Além disso, é importante ser fixado as condições de temperaturas ambiente e de lançamento do concreto.

A estrutura modelo para este estudo se baseia na idealização de uma estrutura massiva que poderia ser aplicável ao tanque de uma Usina Hidrelétrica Reversível, que dado a sua especificidade e ainda com o advento da impressão 3D, poderia tomar uma diversidade de formas, a depender da geografia da região.

A modelagem em questão, simplificadamente, reproduziu a geometria de um muro linear, aplicando condições de contorno para figurar sua continuidade; simulando o processo de impressão 3D construindo este por deposição em camadas; fazendo uso, em planta, de uma geometria treliçada, pois, conforme demonstra Fairbairn et. al. (2022), este tipo de estrutura vazada apresenta bons resultados de estabilidade estrutural, além de ser uma opção mais leve, quando comparado a um muro sólido, e é de fácil execução para consecução por impressão 3D.

3.2.1. Modelo Numérico

O modelo Numérico consiste em uma estrutura 3D treliçada, desenvolvida no software AutoCad 3D, de dimensões, em metros, exemplificada na Figura 31. Para Análise no DIANA, a estrutura foi exportada como uma única camada e, copiada sobre essa, novas 4 camadas, construindo uma estrutura com 5 camadas.

A estrutura foi assim modelada, considerando apenas 5 camadas para considerar apenas o concreto no estado fresco. Para deposição de uma sexta camada, a primeira camada depositada entraria em estágio de material endurecido, incorrendo em um erro considerála pelo método de cálculo adotado.

Foram considerados análises estruturais e térmicas, definidos como padrão malha hexagonal/quadrática, de elementos sólidos quadráticos de 0,05x 0,05m e nós linearmente interpolados Figura 32.



Figura 31. Geometria da camada modelada no software AutoCad 3D, em metros.



Figura 32. Ilustração da malha utilizada na modelagem

A "resistência verde" que permite que o concreto fresco carregue seu próprio peso imediatamente após a mistura ou compactação, é atribuída a um atrito e uma coesão entre partículas combinados. Este comportamento mecânico é semelhante ao dos solos, e como tal um critério de Mohr-Coulomb é adotado no presente estudo, e ainda, de forma a incluir o desenvolvimento dependente do tempo das propriedades do material, foi descrito como:

$$\tau_{\gamma} = c(t) + \tau_n \tan \phi(t) \tag{24}$$

Onde c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito interno causado pela resistência ao atrito e o intertravamento entre as partículas internas, sendo ambas variáveis no tempo. A tensão de escoamento e a tensão normal atuantes são dadas respectivamente por $\tau_y e \tau_n$.

Para possibilitar a modelagem das reações químicas de hidratação do cimento, o programa DIANA FEA simula a geração de calor com base no grau de reação ou na idade do elemento. Na análise de fluxo de calor devido à hidratação, é necessário especificar a condutividade térmica e capacitância do material.

Para a previsão da evolução das propriedades mecânicas do concreto foi utilizada, para o cálculo da idade equivalente do material, a equação de Arrhenius, descrita como:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{\left(c_A \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)}\right)\right)} d\tau$$
(25)

em que c_A é a constante de Arrhenius e T_{ref} é a temperatura de referência. No software, o conceito de idade equivalente e maturidade se equivalem e ambos representam a progressão da reação de hidratação do material.

Logo, o material foi modelado em consoante aos modelos indexados no Diana, segundo Classe *Concrete and Masonry*, Modelo *Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Plasticity*; aplicando as propriedades do material conforme *Mohr-Coulomb Plasticity*, considerando os aspectos dos: efeitos térmicos, efeitos de maturidade e o fluxo de calor.

De acordo com este modelo, levou-se em conta, a partir da campanha experimental realizada: a densidade do material, o módulo de elasticidade *vs* maturidade, a coesão *vs* maturidade, o ângulo de atrito, a condutividade térmica e a capacidade térmica em função do tempo e, por fim, o processamento do calor de hidratação segundo elevação adiabática baseado no grau de hidratação da estrutura.

Considerou-se ainda, com base na literatura: coeficiente de Poisson (Wolfs, 2018), coeficiente de expansão térmica e coeficiente de transferência de calor (Fairbairn, 2015); seus valores serão apresentados nos capítulos seguintes.

Quanto as condições de contorno, para simular a continuidade da estrutura, fixou-se as laterais na direção x, e ainda, a camada mais inferior na direção z, e nesta também em um ponto em y (Figura 33). Foram definidos ainda a temperatura de lançamento do concreto e a temperatura ambiente.



Figura 33. Ilustração das condições de contorno quanto as restrições impostas na estrutura

Entre cada camada foi inserido uma interface para análise da transferência de calor entre estas, tendo em conta todas as faces externas de cada camada, exceto as laterais, na direção x, responsáveis por simular a continuidade da estrutura (Figura 34). Foi, então, definido o valor deste coeficiente de transferência. Considerou-se o carregamento atuante na estrutura como o seu peso próprio e os resultantes da análise térmica.



Figura 34. Ilustração da camada 5 para as faces consideradas na transferência de calor

No processamento da análise da estrutura, cada camada foi modelada considerando construção em camadas, com sua deposição a cada tempo calculado a partir dos parâmetros experimentais. Tendo em conta: análise não-linear, análise do calor de hidratação e o cálculo da idade equivalente da estrutura.

Como parte do estudo do calor de hidratação da estrutura, comparou-se a modelagem base dessa pesquisa com mais duas estruturas com as mesmas propriedades, dimensões e condições de contorno: uma igualmente em camadas, porém sem espaços vazios (a); e uma segunda monolítica (b). As duas formas estão apresentadas na Figura 35. As condições de contorno adotadas e a malha utilizada estão ilustradas nas Figura *36* e Figura *37*, respectivamente.



Figura 35. Apresentação das estruturas utilizadas para análise da dissipação de calor: (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica.



Figura 36. Condições de contorno adotadas nas estruturas quanto a transferência de calor e suportes na (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica.



Figura 37. Malhas adotadas na análise das estruturas: (a) estrutura em camadas sólida; (b) estrutura monolítica.

Concebendo a análise mecânica, como forma de simplificação do modelo adotou-se o ângulo de atrito interno igual a zero, assim sendo a tensão de escoamento da estrutura será igual a coesão do material no tempo.

A partir da equação 9, tem-se que quando a tensão cisalhante crítica da estrutura ultrapassa a tensão de escoamento do material, o modelo flui, conduzindo à plasticidade da estrutura. Logo, para investigação do comportamento estrutural do modelo, levou-se em conta o índice I (equação 26), como sendo a inverso do módulo cisalhante (G), pressupondo que valores acima de 1 exprimem a plasticidade do elemento.

$$I = \frac{1}{G} = \frac{\gamma_c}{\tau_c} = \frac{\gamma_c}{c}$$
(26)

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados. Para todos os testes foram realizadas pelo menos 3 repetições, enumeradas como repetição 1, 2 e 3, para avaliação de valores com maior confiabilidade.

4.1. PROPRIEDADES REOLÓGICAS

Quanto a reologia, foram feitas 3 misturas, onde, para todas, foram realizados testes em várias idades de concreto fresco de t = 0, 23, 45, 68 e 90 minutos. Assim, t = 0 é o primeiro tempo possível levando em consideração a colocação dos corpos de prova na configuração de teste e início do teste, que levou aproximadamente 7 min. Wolfs et. al. (2018) descreve que este intervalo de tempo de 0 a 90 min corresponde à duração típica de um processo de impressão 3D e está dentro do período de dormência do material, pois o tempo de configuração inicial é definido em aproximadamente 2 horas por medições padrão Vicat.

O resultado do ensaio se dá na forma de um gráfico de torque gerado na base da palheta *versus* taxa de cisalhamento. Converteu-se o torque em tensão de cisalhamento ao multiplicá-lo por 80, expressão obtida no manual do equipamento para o modelo de palheta utilizado, expressando os gráficos apresentados na Figura 38.

O valor do limite de escoamento $\tau_{0,t}$ da pasta em cada tempo de repouso t foi determinado pela máxima tensão gerada pelo fluido na palheta ao longo dos ensaios. Já o ganho tixotrópico A_{thix}, parâmetro que avalia o incremento no limite de escoamento ao longo do tempo, foi obtido através do coeficiente angular da reta que melhor ajustava os valores dos limites de escoamento obtidos nos 5 tempos, para cada mistura, ensaiados. A partir da Figura 39, temos $\tau_{0,0}$ e o A_{thix} respectivamente iguais a 2088,9 Pa e 51,6 Pa/min, equivalente a 0,86 Pa/s.

Com os parâmetros reológicos $\tau_{0,0}$ e A_{thix}, é possível obter os parâmetros de impressão necessários à garantia de estabilidade e resistência das camadas impressas, sendo estes: altura máxima de camada (h_{máx}) igual a 17,4 cm, tempo mínimo de impressão de camada (t_{h,mín}) igual a 40 minutos e velocidade máxima de impressão da camada (V_{máx}) de



aproximadamente 48 x 10^{-3} cm/s/m. As expressões matemáticas que relacionam os parâmetros tixotrópicos e os parâmetros de impressão são (10), (11) e (12).

Figura 38. Curvas Tensão de cisalhamento *vs* Taxa de Cisalhamento: (a) Repetição 01, (b) Repetição 02, (c) Repetição 03



Figura 39. Gráfico Limite de Escoamento vs Tempo resultante do ensaio de reologia

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

Quanto a densidade do material no estado fresco, a partir dos dados medidos experimentalmente, foi obtido um valor médio de 2123 kg/m³ com um coeficiente de variação de 0,93%. Já a densidade do material em estado endurecido, baseado no cálculo da densidade dos 20 corpos de prova estudados, temos um valor média de 2053 kg/m³, considerando coeficiente de variação de 1,74%.

4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Quanto aos ensaios para avaliação da resistência do concreto, foram realizados com 3 repetições da mistura padrão, na qual foram ensaiados variados corpos de prova em diferentes idades, desde o estado fresco até os 28 dias.

Resistência no estado fresco

A Figura 40 apresenta as curvas típicas de Tensão *versus* Deformação para cada corpo de prova ensaiado, nos tempos de 2, 3, 4 e 5 horas, para as 3 repetições. Considerando as tensões máximas alcançados nos ensaios, foi possível relacionar o ganho de resistência no tempo do concreto, então traçou-se a curva Tensão *vs* Tempo a partir da média destes valores (Figura 41).



Figura 40. Curvas Tensão de Compressão vs Deformação: (a) Repetição 1; (b) Repetição 2; (c) Repetição 3



Figura 41. Gráfico Resistência a compressão vs Tempo resultado do ensaio de compressão uniaxial, no estado fresco

É possível observar, a partir dos dados e mais visivelmente pela Figura 42, o ganho de resistência e consequentemente a diminuição da deformação no tempo, em cada corpo de prova.



Figura 42. Corpos de prova pós ensaio de resistência a compressão uniaxial em diferentes tempos da Repetição 3.

A partir dos ensaios de resistência a compressão realizados, foram obtidos analiticamente os módulos de elasticidade pertinentes a cada ensaio como a inclinação de cada curva tensão *vs* deformação nos tempos de 2, 3, 4 e 5 horas para as três repetições. Por essa metodologia, mediu-se a deformação na presa, devido à dificuldade de se adotar os procedimentos descritos em norma para medição deste parâmetro, que utiliza apenas a porção intermediária dos corpos de prova, para valores mais fidedignos. Este método só é possível para o concreto no estado endurecido.

A Figura 43 apresenta a relação da evolução do Módulo de Young no tempo para o concreto no estado fresco.



Figura 43. Gráfico Módulo de Elasticidade vs Tempo obtido a partir do ensaio de compressão uniaxial, no estado fresco

Além dos ensaios realizados considerando o concreto no estado fresco, também foram executados ensaios de compressão e obtidos os módulos de elasticidade em corpos de prova com idades de 2, 7 e 28 dias, considerando o estado endurecido do concreto, expostos respectivamente na Figura 44 e na Figura 45.



Figura 44. Gráfico Tensão de Compressão vs Tempo do concreto, no estado endurecido



Figura 45. Gráfico Modulo de elasticidade vs Tempo do concreto, no estado endurecido

4.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS

Quantos ao ensaio de Condutividade térmica, foram realizados dois ensaios, considerando o concreto fresco e o concreto endurecido em ambos, variando em diferentes tempos a partir do primeiro contato do cimento com a água.

O instrumento utilizado no ensaio permite ajuste quanto a consistência do material medido, variando seu método de cálculo, e o mesmo expressa em resultado os valores da efusividade térmica e da condutividade térmica das amostras. Considerou-se estado sólido a partir de 5 horas. A partir dos valores das densidades do material fresco e endurecido, foi possível o cálculo quanto ao calor específico do concreto.

Nas Figura 46 e Figura 47 é possível observar os dados da condutividade térmica relativos ao ensaio no estado fresco e no estado endurecido, respectivamente. Observa-se que a condutividade oscila em torno de um mesmo valor independente da idade da mistura ensaiada, acredita-se que devido a elevada quantidade de agregado na mistura que interfere consideravelmente em cada amostra ensaiada, dada a sensibilidade do equipamento. Levando em conta que o calor específico varia em função da densidade, assumem-se valores distintos para cada consistência considerada.

Atribui-se, logo, o valor de 4,07 W/mK, com desvio de ± 0,37, para a condutividade do material, como a média dos resultados extraídos; 1387 J/kgK para o calor específico do material no estado fresco e 1026 J/kgK para o estado endurecido.



Figura 46. Resultados referente ao ensaio de condutividade térmica em diferentes idades, considerando o estado fresco.



Figura 47. Resultados referente ao ensaio de condutividade térmica em diferentes idades, considerando o estado endurecido.

Quanto ao ensaio de calorimetria isotérmica, foram realizados dois experimentos, considerando temperaturas constantes de 65°C, no primeiro, e 25 °C no segundo, com três amostras em cada. Os ensaios ocorreram durante aproximadamente 7 dias, considerando um total de 168 horas. A partir dos métodos anteriormente descritos, obteve-se os fluxos de calor por quantidade de material cimentício de cada uma das amostras. São apresentados na Figura *48* as primeiras 50 horas do ensaio, para melhor visualização.



Figura 48. Resultado de fluxo de calor no tempo obtidos no ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25°C.

Levando em conta que as amostras tiveram comportamentos muito similares, elegeu-se o canal 8 e 3 para corresponder as duas temperaturas ensaiadas. A Figura *49* apresentada o calor acumulado no tempo para as duas temperaturas.



Figura 49. Resultado do calor acumulado no tempo obtido no ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25°C.

4.5. ELEVAÇÃO ADIABÁTICA

Tendo em conta o fluxo de calor em determinado grau de hidratação para cada temperatura, é possível traçar o gráfico *ln (fluxo) vs 1/T* para determinação da energia de ativação da mistura. Considerou-se o grau de hidratação de 0,5 para duas amostras nas temperaturas de 65°C e 25°C e, com base na equação 20, teve-se como resultado um valor de E_a/R igual a 3661,5 K (Figura *50*).



Figura 50. Gráfico ln (Fluxo de calor), no grau de hidratação 0,5 *vs* o inverso da temperatura considerada em cada caso.

A partir dos dados de energia de ativação aparente, calor acumulado, calor específico e temperatura de base, é possível a obtenção da curva de elevação adiabática, com base no algoritmo desenvolvido por Reis (2020). As curvas previstas correspondentes a elevação adiabática do material estudado vs o tempo equivalente; definido como o tempo pelo qual uma massa de concreto seria curado a uma temperatura de referência constante, para atingir a mesma maturidade que outra massa de concreto submetido a um histórico de cura real; relativas as duas temperaturas ensaiadas, estão apresentadas na Figura 51.



Figura 51. Previsão da curva elevação adiabática vs tempo para o concreto ensaiado, com base nos dados do ensaio de calorimetria isotérmica nas temperaturas de 65°C e 25° C

Observa-se uma semelhança quanto ao comportamento das duas curvas, porém uma diferença quanto a temperatura máxima alcançada em cada temperatura. Infere-se que a 65°C a mistura desencadeie reações que não ocorreriam nas primeiras idades à 25°C, dissipando mais calor.

5. RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

5.1. PARÂMETROS DE ENTRADA

Baseado no programa experimental desenvolvido, foram implementados os dados de entrada no programa para o material ensaiado e a estrutura proposta. Foram modeladas 5 camadas para análise da estrutura, por motivos de otimização e limitação computacional.

Com relação a característica do material impresso, a altura das camadas simuladas foi determinada a partir da equação 10, o tempo decorrido entre elas e a velocidade máxima para impressão foram definidos pelas equações 11, 12 e 13. Com base nestas, foram adotados para a estrutura: altura de camada igual a 0,15m e intervalo de deposição entre camadas de 1 hora, para simplificação da modelagem numérica. Considerou-se o material em estado fresco no período de tempo de 0 a 5 horas, e estado endurecido a partir de 5h.

Wolfs et. al. (2018) determinou o coeficiente de Poisson a partir das deformações laterais nos ensaios de compressão a 5% de deformação do material. Os autores determinaram uma relação constante de aproximadamente 0,3 de coeficiente, durante os primeiros 90 min, logo este valor foi utilizado como constante, para o material em estado fresco.

O coeficiente de transferência de calor por convecção foi assumido a partir de Fairbairn et. al. (2015), que determinou tal valor para um concreto com parâmetros térmicos similares ao material estudado.

Segundo NBR 6118 (2014), para efeito de análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica do concreto pode ser admitido como sendo igual a 10⁻⁵/°C.

Baseado no estudo experimental e na literatura adotou-se os seguintes dados para o material:

	Propriedades		
	Estado Fresco	Estado Endurecido	
Densidade	2123 kg/m ³ 2053 kg/m ³		
Coeficiente de Poisson	0,3		
Coeficiente de dilatação térmica	10 ⁻⁵ /°C		
Coeficiente de transferência de calor	14,4 W/m²K		
Condutividade térmica	4,07 W/mK		
Capacidade térmica	2,94E+06 J/m ³ K	2,11E+06 J/m ³ K	
Módulo de elasticidade	Figura 53		
Coesão	Figura 54		
Ângulo de atrito interno	0°		
Energia de Ativação	3661,5 K		
Elevação adiabática	Figura 51		

Tabela 4. Propriedades utilizadas na modelagem numérica

Baseado no modelo adotado no Diana FEA, o software considera o comportamento mecânico da estrutura influenciado pelo grau de maturidade, que é calculado internamente pelo mesmo, segundo a equação 25. Logo, realizou-se uma pré-análise da estrutura para determinação da maturidade em função do tempo (Figura 52). Assim, o módulo de elasticidade como parâmetro de entrada da estrutura varia conforme Figura 53.



Figura 52. Gráfica Maturidade vs Tempo, calculado pelo DIANA FEA, em função da elevação de temperatura



Figura 53. Gráfico Módulo de Elasticidade vs Maturidade

Levando em conta o modelo numérico a ser estudado, entende-se que o comportamento mecânico pode ser simulado baseado no método Mohr-Coulomb. Adotou-se o ângulo de atrito igual a zero e o incremento de Coesão, baseado na equação 24, igual a variação do limite de escoamento no tempo, segundo Figura 39. Logo, considerando o cálculo da maturidade realizado pelo programa e o resultado obtido no ensaio experimental até o tempo máximo considerado para o estado fresco, temos a coesão variando conforme Figura 54.



Figura 54. Gráfico Coesão vs Maturidade

Com o intuito de observar a interação do grau de hidratação com as propriedades da estrutura, levou-se em consideração a elevação adiabática apresentada na Figura 51. Com base nos estudos desenvolvidos por Reis (2020), a curva de previsão da elevação adiabática apresenta menores erros em maiores temperaturas, sendo estas melhores

aproximações do resultado obtido experimentalmente. Logo, optou-se por utilizar a curva referente a 65°C.

5.2. ESTRUTURA DA ANÁLISE DO MODELO

A estrutura foi analisada em cinco fases, para simular o processo de impressão 3D: começando pela fase 1, iniciando no tempo 0s, e considerando apenas a primeira camada, pelo tempo de deposição considerado de 1 hora; continuando a cada fase iniciando na hora seguinte e com o incremento de mais uma camada; finalizando na fase 5 iniciando no tempo 14400s e terminando no tempo 18000s com as cincos camadas depositadas. Este processo está exemplificado na Tabela 5 e na Figura 55.

Tabela 5. Quantitativo das fases: camadas consideradas e tempos de processamento.

Fases	Quantid. de camadas	Inicio (s)	cio Término s) (s)	
1	1	0	3600	
2	2	3600	7200	
3	3	7200	10800	
4	4	10800	14400	
5	5	14400	18000	



Figura 55. Processo de análise da estrutura em 5 fases: (a) fase 1; (b) fase 2; (c) fase 3; (d) fase 4; (e) fase 5.

No processo de análise, a cada fase, executou-se o processamento térmico e o processamento mecânico, na estrutura em estudo, transpondo a cada nova fase os resultados obtidos na fase anterior, conforme ilustrado na Figura 56.



Figura 56. Mapeamento da análise executada no programa DIANA FEA.

Analisou-se a estrutura simulando o processo de impressão 3D, e durante o mesmo, considerou-se o material ainda fresco no tempo de 0 a 18000s, equivalente a um processamento de 5 horas. Para esta análise o programa executou passos de carga considerando como incrementos de tempo, e devido à complexidade de processamento de cada fase, utilizou-se variados passos de tempo, apresentados na Tabela 6, totalizando a passagem de 3600s em cada uma, considerando a convergência dos resultados em até no máximo 20 interações e com uma tolerância de 0.001 para análise térmica e 0.005 para análise mecânica.

Tabela 6. Passos de tempo utilizados para análise da estrutura

Fases	Análise Térmica		Análise Mecânica	
	Quant. de passos de tempo	Passo de tempo (s)	Quant. de passos de tempo	Passo de tempo (s)
1	24	150	12	300
2	12	300	12	300
3	12	300	6	600
4	12	300	6	600
5	12	300	6	600

5.3. ANÁLISE TÉRMICA

A fim de investigar a elevação e dissipação da temperatura na estrutura analisou-se termicamente o modelo por um período de 55 horas, comparando-se a mesma com duas outras estruturas, de mesmas dimensões e propriedades, porém com geometrias variadas.

Aplicou-se o mesmo mecanismo de análise do modelo em estudo para uma estrutura, também em camada, porém sem os espaços vazios advindos da estrutura treliçada. Foram modeladas 5 camadas sólidas, compondo uma estrutura rígida, mas simulando uma construção em etapas, considerando a cada 1 hora a deposição de uma camada de 15 cm.

Modelou-se ainda uma terceira estrutura composta por uma única camada, de mesma altura das outras duas estruturas: 75 cm.

Observou-se o comportamento da elevação da temperatura nas três estruturas nas Figura 57 a Figura 65.



Figura 57. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 11100s (3h 05min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 58. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 12300s (3h 25 min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 59. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 14400s (4h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 60. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 17700s (4h 55 min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 61. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 20400s (5h 40min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 62. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 25200s (7h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 63. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 30000s (8h 20min) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 64. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 54000s (15h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.



Figura 65. Ilustração do comportamento da elevação de temperatura no tempo 72000s (20h) na estrutura: (a) em camada treliçada; (b) em camada sólida; (c) monolítica.

Nas duas estruturas em camadas, tomou-se como referência os elementos centrais, no plano z, na lateral extrema de cada uma das cinco camadas, optando pelo nó de maior temperatura (Figura *66*). Na estrutura de camada única, foi analisado o elemento central da estrutura.



Figura 66. Ilustração dos elementos utilizados para observação dos resultados da análise térmica nas estruturas em camadas, na camada 1.

Comparou-se as elevações de temperatura, em cada camada, nos elementos de referência, nas três estruturas em análise, conforme observa-se na Figura 67.

Ao observar o comportamento da elevação adiabática nas estruturas, verifica-se que o núcleo onde se concentram as maiores temperaturas vai se deslocando para as camadas superiores conforme a passagem do tempo, alcançando os maiores valores na última camada. Na estrutura de camada única, a temperatura apresenta maiores dificuldade para dissipar a temperatura gerada pela hidratação do concreto, apresentando maiores temperaturas em comparação as outras duas.

Logo, constata-se que a utilização da estrutura em camadas reduz consideravelmente a elevação de temperatura na estrutura, conforme observa-se na Figura 67. A Estrutura monolítica apresenta uma variação de temperatura de aproximadamente 25°C; e a estrutura em camadas sólidas uma variação de 20,3°C, e o modelo treliçado de 18,8°C, na última camada.

Apesar da pequena variação de elevação de temperatura quando comparado as duas estruturas em camadas, nota-se que a matriz com vazios, típico das estruturas impressas em 3D, auxilia na aceleração da dissipação do calor gerado no processo de cura do material. Vê-se nas Figura 61 e Figura 62 que embora a estrutura treliçada (a) apresente proximidade quanto a temperatura máxima da estrutura de camada sólida (b), isso só ocorre pontualmente, diferentemente do comportamento apresentado na estrutura sem vazios.



Figura 67. Elevação de temperatura nas três estruturas analisadas nas: (a) camada 1; (b) camada 2; (c) camada 3; (d) camada 4; (e) camada 5.

Além disso, constata-se que, mesmo o material empregado na impressão 3D sendo um concreto com elevada quantidade de cimento em sua composição, não apresenta elevados valores de variação de temperatura, como esperado.

5.4. ANÁLISE MECÂNICA

A partir da análise utilizada, no DIANA FEA, é possível a obtenção dos dados, em cada elemento, das tensões cisalhantes máximas e da coesão. Tendo em vista que estes valores variam no tempo, e ainda variam com a elevação de temperatura, foi necessário observar se os mesmos excediam um ao outro em algum momento durante todo o processo de impressão, pois este comportamento indicaria a plastificação do elemento.

Para isto, foi aferido o índice (I), variando no tempo, para garantir que a estrutura se manteria no estágio elástico. O programa utilizado não contém este parâmetro como dado de saída, visto que emprega o modelo plástico de Mohr-Coulomb como método de análise, e ao a estrutura entrar no estágio plástico o mesmo não considera como incongruência. Logo, o índice não pôde ser facilmente exportado pelo Diana Fea.

Para esta análise, foram utilizados os dados de saída do software como parâmetros de entrada em um outro programa numérico desenvolvido em Fortran. Foram exportados os valores da tensão cisalhante máxima e da Coesão em cada elemento, nos nós da estrutura, em cada passo de tempo analisado.

Como o DIANA FEA apresenta os seus resultados por elemento e o objetivo é analisar os valores do índice I em cada nó, o programa concebido foi implementado para constituir as médias das tensões cisalhantes máximas e das coesões dos elementos em cada nó, em cada passo de tempo, e calcular o parâmetro I como sendo a razão entre estes (APÊNDICE B).

Na estrutura em estudo, dos 123.758 nós gerados pela malha utilizada no software, o programa numérico exportou 25 nós, todos na camada 1, onde o índice apresenta valores maiores que 1, ou seja, onde a tensão cisalhante máxima ultrapassa o valor da coesão em determinado tempo, indicando a plastificação do material nestas regiões.

Aplicou-se a análise no pior nó observado, ou seja, o que apresentou maior índice I, para ilustrar o resultado obtido nos dois programas, a saber: nó 9195 de coordenada (x, y, z) igual a 3,6 m; 1,3 m e 0,125 m; situado na extremidade interna direita da primeira camada, evidenciado na Figura *6*8.



Figura 68. Ilustração do nó 9195, localizado na camada 1.

O nó em questão, no software Diana Fea, apresenta valores de Tensão cisalhante máxima maiores que a Coesão em três elementos, no tempo 15000s, indicando um valor de I maior que um. Observa-se tal constatação na Figura *69*, exportada do software, onde o mesmo trata a tensão máxima como "Tmax" e a Coesão como "COHESION". Além disso, as curvas de coesão dos três elementos não variam, conforme ocorre nas tensões máximas, sobrepondo-se uma sobre a outra.

No modelo em Fortran, devido ao cálculo das médias dos valores nos nós, o respectivo nó apresenta índice (I) maior que um, porém no tempo 17400s, evidenciando a plasticidade do nó, conforme observa-se na Figura 70.



Figura 69. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 9195 – Análise Inicial.



Figura 70. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 9195 – Análise Inicial.

Observa-se, com base nos resultados obtidos no Diana, no tempo 15000s, que os pontos onde a estrutura apresenta tensões cisalhantes máximas (na Figura 71) não coincide com os pontos de maiores resistências (Figura 72), por isso ocorre a plasticidade em determinados pontos da estrutura.



Figura 71. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 15000s, obtido no Software Diana Fea – Análise Inicial.



Figura 72. Coesão, no tempo 15000s, obtido no Software Diana Fea - Análise Inicial.

Com objetivo de solucionar o problema identificado, realizou-se duas novas análises: uma aumentando o tempo de deposição entre as camadas, até então de 1 hora, para 1:20h; e a segunda diminuindo a altura da camada, inicialmente considerada como 15 cm, para 10 cm.

5.4.1. Aumento do Tempo de Deposição entre camadas

Na primeira análise alterou-se o tempo de deposição entre as camadas afim de que nos pontos de fragilidade a estrutura ganhasse mais resistência, antes de receber uma nova camada, contribuindo para o aumento da coesão e da tensão máxima nesses pontos. Os mesmos parâmetros de entrada foram utilizados; com mesma geometria, propriedades e condições de contorno; alterando-se apenas o processo de análise e os passos de tempo utilizados.

Com base no programa numérico desenvolvido, como resultado da primeira solução, observou que os mesmos 25 nós apresentaram índices maiores que 1, porém em tempo posterior. Dado que a estrutura possui a mesma geometria que a análise inicial, foi possível observar o resultado obtido, no programa desenvolvido e no Diana Fea, no mesmo nó inicialmente observado.

O nó em estudo, no software Diana Fea, apresenta valores de Tensão máxima maiores que a Coesão nos mesmos três elementos, porém no tempo 17280s (Figura 73); já no outro programa, o respectivo nó apresenta índice (I) maior que um no tempo 18000s, evidenciado na Figura 74.


Figura 73. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 9195 – Primeira Solução.



Figura 74. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 9195 – Primeira Solução.

É possível verificar as mesmas relações locais das tensões máximas com a coesão, observadas na análise inicial, nas Figura 75 e Figura 76.

Contata-se, logo, que o tempo de deposição entre as camadas influencia pouco no incremento de resistência da camada. Como este parâmetro possui ainda o limitante correspondente a possibilidade de juntas frias no caso de tempos elevados de deposição entre uma faixa e outra, optou-se por alterar a altura da camada como segunda solução adotada.



Figura 75. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 17280s, obtido no Software Diana Fea – Primeira Solução.



Figura 76. Coesão, no tempo 17280s, obtido no Software Diana Fea - Primeira Solução.

5.4.2. Diminuição da altura das camadas

Na segunda solução, diminui-se a altura da camada no intuito de reduzir as tensões presentes na estrutura. Os mesmos parâmetros de entrada foram novamente utilizados; com mesmas propriedades e condições de contorno, porém com nova geometria; e mantendo-se o mesmo processo de análise e os mesmos passos de tempo inicialmente utilizados.

Como resultado obtido no programa em Fortran, tem-se que todos os nós da estrutura apresentaram valores de índices menores que 1, alcançando o objetivo e não plastificação da estrutura. Para comparabilidade com as demais soluções, variou-se a coordenada z, para que o nó anteriormente observado continuasse a ser considerado na extremidade

direita da primeira camada (3,6 m; 1,3 m; 0,075 m), considerando a Tensão máxima e a Coesão, neste caso, no nó 6642, nos dois programas (Figura 77 e Figura 78).



Figura 77. Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo software Diana Fea, no nó 6642 – Segunda Solução.



Figura 78. Gráfico Tensão Cisalhante máxima e Coesão no tempo, obtidos pelo programa numérico, no nó 6642 – Segunda Solução.

É possível observar nas Figura 79 e Figura 80 que, mesmo no tempo 18000s, os valores de coesão se diferenciam consideravelmente dos valores de tensão cisalhante máxima, em toda a estrutura.

A comparação dos índices das três análises pode ser observada na Figura 81.



Figura 79. Tensão Cisalhante Máxima, no tempo 18000s, obtido no Software Diana Fea – Segunda Solução.



Figura 80. Coesão, no tempo 18000s, obtido no Software Diana Fea – Segunda Solução.



Figura 81. Gráfico Índice (Tensão cisalhante máxima/Coesão) variando no tempo, das três análises consideradas.

Observa-se que ao depositarmos sucessivamente as camadas, as tensões induzidas pela estrutura aumentam progressivamente. O material não apenas se torna mais resistente (com o aumento da tensão de escoamento, considerada como a coesão neste caso) como também mais rígido (com o aumento do módulo de elasticidade).

Levando em conta o comportamento elásto-plástico do material imprimível, quando em repouso, espera-se que para valores de tensão abaixo da tensão de escoamento esses matérias exibam um comportamento aproximadamente elástico. Logo, buscou-se manter a estrutura neste patamar.

Verifica-se que as equações até então determinadas pela literatura para dimensionamento de estruturas imprimíveis apresentaram limitações de aplicabilidade. Contata-se nas soluções utilizadas que alterações no tempo de deposição são pouco sensíveis a mudanças na estrutura e em contra partida a mudança na altura das camadas influem significativamente na resposta da estrutura as tensões resistidas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a aplicabilidade da construção por impressão 3D de estruturas massivas. Este tipo de estrutura, devido a utilização de grandes volumes de concreto, apresenta particularidade quando a liberação de calor por efeito da hidratação dos materiais cimentícios, que devem ser consideradas a fim de se evitar uma exagerada elevação da temperatura na estrutura, reduzindo a ocorrência de fissuras.

No cenário da impressão 3D, preocupações quanto a cinética de estruturação no seu processo de impressão, que envolvem a altura de camada máxima suportada pelas tensões induzidas pela gravidade e ainda quanto a janela de tempo necessária para que a estrutura atinja resistência e rigidez suficiente para a deposição das próximas camadas, foram analisadas.

Com esse intuito, utilizou-se do recurso da modelagem numérica para simular uma estrutura massiva impressa pela metodologia de deposição em camadas. Para tanto, foi necessário a execução de ensaios experimentais para obtenção dos parâmetros reológicos, térmicos e mecânicos de um composto cimentício aplicável ao processo de impressão.

Quanto aos ensaios reológicos, o concreto apresentou propriedades compatíveis com o material para impressão, quando a trabalhabilidade e a resistência. Com relação aos ensaios térmicos, o material apresentou características esperadas para o cimento utilizado. No que diz respeito aos ensaios mecânicos, o composto cimentício apresentou maiores variações quanto ao módulo de elasticidade devido a deformação ter sido medida indiretamente através da prensa no ensaio de compressão.

As propriedades do concreto ensaiado foram utilizadas como dados de entrada na modelagem computacional, e também empregues no cálculo preliminar quanto aos parâmetros do processo de impressão 3D.

Com base na modelagem inicial preocupou-se em verificar a elevação da temperatura na estrutura. Observou-se que com advento da estratificação da estrutura em camadas de

pequenas alturas já aliviaria consideravelmente a variação de temperatura interna na estrutura, conduzindo a menor probabilidade de aparecimento de fissuras, independente da geometria utilizada na impressão. Para além, o uso da estrutura treliçada, ou seja, com vazios, auxilia ainda mais na dissipação do calor gerado pelo processo de hidratação.

Estes ganhos, quanto a elevação da temperatura na estrutura, corroboram que apesar do material imprimível fazer uso de elevadas quantidades de cimento, incomumente utilizadas em estruturas massivas, o processo de impressão 3D ajudaria nos problemas termoquímicos particulares dessas estruturas.

A teoria de Mohr-Coulomb aplicada na modelagem, com o desenvolvimento dependente do tempo das propriedades do material, representou satisfatoriamente o comportamento da estrutura.

A tensão de cisalhamento apresentou um comportamento exponencial, enquanto que a coesão apresentou um comportamento linear, assim como inicialmente considerada. Os parâmetros calculados preliminarmente para o processo de impressão 3D apresentaram problemas quanto a estrutura considerada, demonstrando que outros fatores também interferem no processo. Vale ressaltar que a consideração da linearidade do limite de escoamento e do ângulo de atrito igual a zero também podem ter feito parte do problema observado.

Por fim, pode-se concluir que os ensaios realizados apresentarem valores coerentes quanto as propriedades do concreto e verificou-se que a modelagem numérica considerada, simulando um muro aplicável a uma Usina Hidrelétrica Reversível, se mostrou adequada para análise do comportamento estrutural do objeto durante o processo de impressão 3D, e ainda que a aplicabilidade da impressão 3D em estruturas massivas, como no caso da UHER, se mostra viável.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

 Verificar experimentalmente a suposição de que o ângulo de atrito é próximo de zero, ou ainda, investigar a influência desse valor nos resultados de Tensão Máxima alcançados;

- Apurar o incremento da coesão durante todo o tempo de cura do concreto e observar o seu comportamento;
- Aferir experimentalmente a viscosidade plástica do material a fim de calcular o tempo máxima de deposição entre as camadas, evitando a ocorrência de juntas frias, e assim simular com mais propriedade o melhor tempo considerado para o processo de impressão 3D;
- Investigar o cálculo preliminar do processo de impressão 3D com o propósito de aferir os parâmetros de maiores influências na estrutura massiva e possibilitar melhores estimativas de construção.
- Examinar outras misturas de concreto para impressão 3D, com diferentes composições, por exemplo utilizando cimento com baixo calor de hidratação ou com adição de aditivos minerais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

____. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

____. NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

____. NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

____. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

3DPI. (2014). 3D Printing History: The Free Beginner's Guide. 3D Printing Industry.
Disponível em: https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3DPrinting-Guide.pdf. Acesso em: 03 Fevereiro 2020.

ALWI, A.; KARAYIANNIS, S.; STARKEY, B.; GARDNER, M.; REODIQUE, K.; VARLEY, T. Construction megascale 3D printing. In MegaScale 3D Printing; University of Surrey: Guildford, UK, 2013; pp. 199–200.

AMARO, Paulo R. **Barragem de concreto a serviço do desenvolvimento sustentável.** Ibracon. Concreto e Construções (2006), p7, n42.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. ACI 116R. Farmington Hills, 2005.

ANDERSEN, S. DA SILVA, W.R.L. PAEGLE, I. NIELSEN, J.H. Numerical model describing the early age behavior of 3D printed concrete–work in progress, in: Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2020, RILEM Bookseries, 28, Springer Nature, 2020, pp. 175–184.

ANDERSON, C. Makers A Nova Revolução Industrial. Elsevier Brasil, 2012.

ANDRADE, W. P., Equipe do Laboratório de Concreto de furnas, concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e Propriedades, 1P a P. ed., Ed. PINI, São Paulo, 1997.

ANDRIOLO, F. R.; SKWARCZYNSKI, T. M. Concreto Pré-Refrigerado no Brasil: Uma Evolução com Mais de 20 Anos. Logos Engenharia S. A., São Paulo. 1988.

ANELL, L.H. (2015), **Concrete 3d printer**, MSc thesis, Civil engineering, Lund University.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto -Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ATSM). C1074 -Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, PA, 2017.

AURICH, M. Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades. 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

AZENHA, M. A. D. **Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica**. 2004. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, FEUP, Portugal, 2004.

AZENHA, M. A. D., 2009, Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro.

BACALTCHUK, J.; PLATCHECK, E.R.; CASTELO, G. (2015). Usinas Hidrelétricas
Reversíveis com uso compartilhado de reservatórios existentes. In Anais do Comitê
Brasileiro de Barragens, XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens Foz do Iguaçu
– Paraná. 2015.

BARBOUR, E. et al. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 61, p. 421-432, 2016.

BENTZ, D., 2008, **A review of early-age properties of cement-based materials.** Cement and Concrete Research, v. 38, pp. 196-204.

BRODKEY, R. S. The phenomena of fluid motions. Dover Publications, Inc. New York, 1967.

BRUN, Francis Giovani. Aplicação de Impressão 3D na Construção Civil: Caso de
Estudo de Mobiliário Urbano. Dissertação de Mestrado, Politécnico de Leiria, Leiria,
2020.

BOS, F.P. WOLFS, R.J.M. AHMED, Z.Y. SALET, T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping, v.11, n.3, p.209-225, 2016.

BOS, F.P. BOSCO, E. SALET, T.A.M. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers, Virtual Phys. Prototyp. 14 (2019) 160–174.

CAMPBELL-ALLEN, D., THORNE, C., 1963, **The thermal conductivity of concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 122, n. 15, pp. 39-48.

CANALES, F. A. A. B. C. A. B. M. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v.19, n. 2, p. 1230-1249, 2015.

CASTRO, Nivalde de; BRANDÃO, Roberto; HUNT, Julian David; CATÓLICO, Ana Carolina. Características e Funcionalidades das Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Agência CanalEnergia. Rio de Janeiro, 23 de julho de 2018.

CHALISGAONKAR, R.; MOHAN, M Prospects of developing pumped storage projetcs utilising the reservoir of exisisting hydropower. International Conference on Hydropower for Sustainable Development. Anais... Dehradun: 2015. CHANG, Z., ZHANG, H., LIANG, M., SCHLANGEN, E., & ŠAVIJA, B. Numerical simulation of elastic buckling in 3D concrete printing using the lattice model with geometric nonlinearity. Automation in Construction, 142, 2022.

CHARRON, K. 2015. WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest3Dprintedapartmentbuilding.Disponívelem:http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-
tallest-3d-printed-building-in-china.html. Acesso em: 04 fevereiro 2020.04 fevereiro 2020.

CONSTANTINIDES, Georgios; ULM, Franz-Josef. **The nanogranular nature of C–S– H.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids 55 (2007) 64–90.

C-THERM TECHNOLOGIES. C-Therm TCi Thermal Conductivity Analyzer. 2016. Disponível em: <u>https://www.youtube.com/watch?v=BTG1ucxhgwo</u>. Acesso em: 9 mar 2021.

DE FARIA, E. F., 2004, **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termoquímico e modelo de dados.** Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Outubro.

DE SCHUTTER, G., TAERWE, L., 1995. General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 3, pp. 593-604.

DE SOUZA, GRAZIELLE TIGRE., 2017, **Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem**. Dissertação de Mestrado, UFPA, Tucuruí – PA.

DING, T. XIAO, J. QIN, F. DUAN, Z. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages, Construction and Building Materials, Volume 248, 2020, 118654.

DONALDSON, T. H. and DONALDSON, T. H. (2016). Managing the Internal **Process, Credit Control in Boom and Recession**, pp. 161–173. doi: 10.1057/9780230390249_12.

DUDA, Pedro Luiz Souza Pereira. **Estudo comparativo entre nano e micropartículas como agentes tixotrópicos em pastas de cimento para impressão 3D.** Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020. (78 p.) Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2020.

ESPOSITO, L., CASAGRANDE, L., MENNA, C. ET AL. Early-age creep behaviour of 3D printable mortars: Experimental characterisation and analytical modelling. Mater Struct 54, 207 (2021).

FAIRBAIRN, E. M. R., AZENHA, M. **Thermal cracking of massive structures**. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS. Springer. 2018.

FAIRBAIRN, E.D.M.R., SANTOS, L.D.F., FARIAS, M.B., REALES, O.A.M. (2022). Numerical Modeling of New Conceptions of 3D Printed Concrete Structures for Pumped Storage Hydropower. In: Rossi, P., Tailhan, JL. (eds) Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures. SSCS 2022. RILEM Bookseries, vol 38. Springer, Cham. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-031-07746-3_12</u>.

FENG, P. MENG, X. CHEN, J. YE, L. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, Construct. Build. Mater. 93 (2015) 486–497.

FLORÊNCIO, Eduardo Quintella et al. **Concreto para uso em impressora 3d e sua utilização na construção de edificações: um estudo prospectivo.** Cadernos de Prospecção, Salvador, v. 10, n. 3, p.578-589, 30 set. 2017.

FRAGA, Igor de Azevedo. **Análise de sensibilidade do modelo termoquímicomecânico para estruturas de concreto massa.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018. Dissertação (mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2018.

GALINDO, M. S. V, **Desenvolvimento de uma Metodologia para Determinação da Viscosidade de Solos.** Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS C., WANG, C. C. L., SHIN, Y. C., ZHANG S., ZAVATTIERI, P. D. (2015). **The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering.** CAD Computer Aided Design. ISSN 00104485. Vol. 69 (2015), p. 65-89. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.

GOMES, F. M. P. **Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada.** Goiânia, 2011, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil.

GRENZEL, Lucas Yagor dos Santos. **Estudo das técnicas de fabricação aditiva** (**impressão 3d**) **e da sua aplicação na construção civil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil – UNIJUÍ, Santa Rosa, 2019.

GUITTET, M. et al. Study of the drivers and asset management of pumped-storage power plants historical and geographical perspective. Energy, v. 111, p. 560-579, 2016.

HARTY, Chris. (2008). **Implementing innovation in construction: Contexts, relative boundedness and actor-network theory**, Construction Management and Economics. ISSN 01446193. Vol 26 nº 10, p. 1029–1041. doi: 10.1080/01446190802298413.

HEEVER, M. Van Den; BESTER, F.; POURBEHI, M.; KRUGER, J.; VAN ZIJL, G. **Mechanical characterisation for numerical simulation of extrusion-based 3D concrete printing**, Journal of Building Engineering, Volume 44, 2021, 102944, ISSN 2352-7102.

INOVAHOUSE3D,2020,Disponívelem:https://www.inovahouse3d.com.br/post/brasil-constr%C3%B3i-sua-primeira-casa-modelo-impressa-em-3d.Acesso em: 04 fevereiro 2020.

JOHANSEN, V.; THAULOW, N. Heat curing and late formation of ettringite. In: ERLIN, Bernard (editor). Ettringite: the sometimes host of destruction. Michigan, USA: American Concrete Institute, 1999, p. 47-64.

KAZEMIAN, Ali; YUAN, Xiao; COCHRAN, Evan; KHOSHNEVIS, Behrokh, Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, Construction and Building Materials, Volume 145, 2017, Pages 639-647.

KOVLER, K., & ROUSSEL, N. **Properties of fresh and hardened concrete.** Cement and Concrete Research, 41(7), 775–792. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.009. 2011.

KRUGER, J. ZERANKA, S. VAN ZIJL, G. **3D concrete printing: a lower bound analytical model for buildability performance quantification**, Autom. ConStruct. 106 (2019) 102904.

KUPERMAN, S.C. Concreto massa convencional e compactado com rolo para barragens. In: ISAIA, G.C. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Vol II, cap.41, p.1260-1295. São Paulo, 2005.

LACKNER, R., MANG, H. A., 2004, Chemoplastic material model for the simulation of early-age cracking: From the constitutive law to numerical analyses of massive concrete structures. Cement and Concrete Composites, v. 26, pp. 551-562.

LAFARGEHOLCIM.2020.Disponívelem:https://www.lafargeholcim.com/lafargeholcim-record-wind-turbine-towers-3d-printed-concrete.Acesso em: 04 fevereiro 2020.

LE, T.T., AUSTIN, S.A., LIM, S. ET AL. Mix design and fresh properties for highperformance printing concrete. Mater Struct V45, pp.1221–1232 (2012). https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z.

LE, T.T., AUSTIN, S.A., LIM, A., BUSWELL, R.A., LAW, R., GIBB, A.G.F. AND THORPE, TT. (2012b), **Hardened properties of high-performance printing concrete**, Cement and Concrete Research, Vol. 42 No. 3, pp. 558-566.

LIBANORI, Gustavo Henrique Duzzi. **Modelagem numérica de otimização aplicada** a sistemas combinados de geração de energia elétrica por fontes intermitentes e usinas hidrelétricas reversíveis. 2017. recurso online (100 p.). Dissertação (mestrado) -Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/330607>. Acesso em: 09 julho 2020.

LIM, S. et al. **Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction**. n.21, p. 262-268, 2012. LINUS K. METTLER, FALK K. WITTEL, ROBERT J. FLATT, HANS J. HERRMANN. Evolution of strength and failure of SCC during early hydration. Cem. Concr. Res. 89 (2016) 288–296.

LOPES, Gonçalo Teixeira Ferreira. **Exploração das possibilidades da impressão 3d na construção.** 2016. (92 p.) Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

LUCA, J., MRAWIRA, D., 2005, New Measurement of Thermal Properties of Superpave Asphalt Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 17, pp. 72-79.

MA, G., WANG, L., JU, Y., State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction, Science China Technological Sciences. 2018.

MAEKAWA, K., CHAUBE, R. AND KISHI, T., Modeling of Concrete Performance, Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport, 1 ed., London, E & FN Spon, 1999.

MARIANO, Maria de Oliveira Cruz. Usinas hidrelétricas reversíveis: considerações sobre rebaixamento rápido na estabilidade de taludes. 2017. (97 p.) Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, 1 ed., São Paulo, Ed. Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674p.

MIRSAEIDI, S. et al. Power system load regulation by pumped storage power plants. In: Electrical Power Distribution Networks, 17., 2012, Teheran. Proceedings... Teheran: IEEE, 2012. p. 1-5.

MWH (Washington). Technical Analysis of Pumped Storage and Integration with Wind Power in the Pacific Northwest. Bellevue: Mwh, 2009. Disponível em:

<http://www.hydro.org/wp-content/uploads/2011/07/PS-Wind-Integration-Final-Report-without-Exhibits-MWH-3.pdf>. Acesso em: 26 janeiro 2021.

NERELLA, V.N., KRAUSE, M., NÄTHER, M. and MECHTCHERINE, V. (2016), Studying printability of fresh concrete for formwork free concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D), in Proceeding for the 25th conference on Rheology of Building Materials, Regensburg.

NERELLA, Venkatesh Naidu; HEMPEL, Simone; MECHTCHERINE, Viktor, Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing, Construction and Building Materials, Volume 205, 2019, Pages 586-601.

NEUFERT, Ernst. 1943. **Bauordnungslehre.** Edited by Albert Speer. Berlin: Volk u. Reich Verl.

NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. 5ª ed., Bookman. Porto Alegre, 2016.

EPE, 2019. (EPE-DEE-NT-006/2019-r0). **Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.** Disponível em: http://bit.ly/UHR-EPE. Acesso em: 29 junho 2020.

ODLER, I., **Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement**. In: Hewlett, P.C. (ed), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4 ed., chapter 6, 2004.

OOMS, T. VANTYGHEM, G. COILE, R. V. AND DE CORTE, W. A parametric modelling strategy for the numerical simulation of 3D concrete printing with complex geometries, Additive Manufacturing, (2020).

PANDA, B., CHANDRA PAUL, S., JEN TAN, M., Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, Mater. Lett., vol. 209, pp. 146–149, 2017.

PANZERA, A. C., GOMES, A. E. Q, MOURA, D.G. Impactos Ambientais da produção de energia elétrica. Educação Ambiental Centro de Referência Virtual do Professor, Minas Gerais, 2010.

PAUL, C. et. Al. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. Material Science Forum, v. 861, p. 177-181, 2016.

PAUL, S. C., VAN ZIJL, G. P. A. G., GIBSON, I.. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. Rapid Prototyping Journal. 2018.

PAUL, Suvash Chandra; TAY, Yi Wei Daniel; PANDA, Biranchi; TAN, Ming Jen. **Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction,** Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 18, Issue 1, 2018, Pages 311-319.

PERROT, A. PIERRE, A. NERELLA, V. N. WOLFS, R. J. M. KEITA, E. NAIR, S. A. NEITHALATH, N. ROUSSEL, N. MECHTCHERINE, V. From analytical methods to numerical simulations: a process engineering toolbox for 3D concrete printing, Cem. Concr. Compos. 122 (2021), 104164.

POMIANOWSKI, M., HEISELBERG, P., JENSEN, R., et al., 2014, A new experimental method to determine speci_c heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. Cement and Concrete Research, v. 55, pp. 22-34.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. Estudo dos avanços da tecnologia de impressão
3D e da sua aplicação na construção civil, Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica,
2016. (80 p.) Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Curso de Engenharia Civil, 2016.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, Manu; MEENA, Hitesh; GHANI, Zimam. **3D printable concrete: Mixture design and test methods,** Cement and Concrete Composites, Volume 97, 2019, Pages 13-23.

REIS, V. D., Modelagem da reação de hidratação do cimento Portland utilizando métodos de calorimetria. Dissertação de Mestrado, Coppe/UFRJ, 2020.

RILEM, 2018, Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS. Springer International Publishing. RITA, M. R., Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto Massa em Ambiente Paralelo. Dissertação de Mestrado, Coppe/UFRJ, 2015.

ROCHA, C.A.A., **Influência da Pressão e Temperatura de Cura e da Adição de NaCl e KCl no Comportamento de Pastas para Cimentação de Poços de Petróleo.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

ROSSO, J. A., PIASENTIN, C. Estudos sobre a fissuração dos contrafortes da Barragem de Itaipu. In: XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB. Tema III, 1997.

ROUSSEL, Nicolas. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 10, 2006, Pages 1797-1806.

ROUSSEL, Nicolas. **Rheological requirements for printable concretes.** Cement and Concrete Research, (2018), 76-85, vol. 112.

SCHINDLER, A. K., FOLLIARD, K. J., 2005, Heat of hydration models for cementitious materials. ACI Materials Journal, v. 102, n. 1, pp. 24-33.

SCHREIBER, G. P. Usinas hidrelétricas. São Paulo: Edgard Blucher, 1978.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. [s.l: s.n.].

SEELOW, A. (2018). The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius' Concepts for Rationalizing Architecture. Arts, 7(4), 95. https://doi.org/10.3390/arts7040095.

SILVA, E.F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SILVOSO, M.M. Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

SIQUEIRA, I. S., Influência de Micro e Nano Reforço Celulósico na Hidratação e Resistência Mecânica de Pastas de Cimentação Leves e de Densidade Normal. Tese de Doutorado, Coppe/UFRJ, 2019.

SOUZA, G. T. **Dosagem experimental de concreto massa com adição de sílica ativa aplicado em barragem.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Universidade Federal do Pará, Tucuruí-PA, 2017.

SUIKER, A. Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: theory, design tools and experiments, Int. J. Mech. Sci. 137 (2018) 145–170.

T.A.M. Salet, F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, **3D Concrete Printing – A Structural Engineering Perspective**, Proc. of FIB Symp. 2017 Maastricht, (2017).

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. **Delayed ettringite formation**. Cement and concrete research, v. 31, p. 683-693, 2001.

THAULOW, N.; JOHANSEN V.; JAKOBSEN U.H. **What causes Delayed Ettringite Formation?** In: Proceedings of the materials research society's. In: SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J.F (editors). Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Boston, USA: E&FN SPON,1997, p.219-226.

TATERSALL, G.H.; BANFILL, P.G.F. **The Rheology of Fresh Concrete**, Pitman, London, 1983.

TAYLOR, H. F. W., Cement Chemistry, 2 ed., London, Thomas Telford, 1997.

ULM, F. J., COUSSY, O., 1995. Modeling of thermo-chemo-mechanical couplings of concrete at early ages. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), pp. 785-794.

ULM, F.-J., COUSSY, O., 1996. Strength Growth as Chemo-Plastic Hardening in Early Age Concrete. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), v. 122, pp. 1123-1132.

ULM, F.-J., COUSSY, O., 1998. Couplings in early-age concrete: from material modeling to structural design. International Journal of Solids and Structures, v. 35, pp. 4295-4311.

VAITKEVIČIUS, Vitoldas; ŠERELIS, Evaldas; KERŠEVIČIUS, Vidas. Effect of ultrasonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology, Construction & building materials v.169, 2018, pp.354–363.

VALENTIM, Gabriella Pinto. Estudo da Fissuração Térmica de Blocos de Contraforte da UHE Itaipu: Análise Numérica termo-químico-mecânica. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020. 80 p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2020.

VALKENAERS, H. et al. Additive Manufacturing for concrete: a 3D print principle. In: 14° euspen International Conference. Non-KU Leuven Association publications. Dubrovnik: euspen. jun. 2014, p. 139-142.

VOITH. Multifunctional Power Plant Pumped storage - A successful energy transition with pumped storage hydropower plants, 2014.

WANG, H.; LU, G.; FENG, S.; WEN, X.; YANG, J. Characterization of Bitumen Modified with Pyrolytic Carbon Black from Scrap Tires. Sustainability 2019, 11, 1631.

WANG, L. JIANG, H. LI, Z. MA, G. Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section, Archives of Civil and Mechanical Engineering 20 (2020) 1–17.

WANGLER, T. et al. **Digital Concrete: Opportunities and Challenges**, RILEM Tech. Lett., vol. 1, p. 67, 2016.

WATANABE, P.S. **Concretos Especiais – Propriedades, Materiais e Aplicações.** Relatório Final de Pesquisa - Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2008.

WEINERSMITH, Kelly; WEINERSMITH, Zack. Logo: Dez novas tecnologias que vão melhorar e/ou arruinar tudo. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2018. 382 p.

WINSUN, Disponível em: ">http://www.winsun3d.com/En/>. Acesso em: 04 Fevereiro 2020.

WOLFS, R.J.M.; BOS, F.P.; SALET, T.A.M.. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research, Volume 106, 2018, Pages 103-116, ISSN 0008-8846.

WOLFS, R.J.M. BOS, F.P. SALET, T.A.M. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing, Cement Concr. Compos. (2019) 103344.

WOLFS, R. SUIKER, A. Structural failure during extrusion-based 3D printing processes, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 104 (2019) 565–584.

WOHLERS, T. GORNET, T. (2012). History of additive manufacturing, Wohlers Report.

WU, P., WANG, J., WANG, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Curtin University, 2016.

XIAO, J. LIU, H. DING, T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of **3D** printed concrete under compression and flexure, Additive Manufacturing 39 (2021) 101712.

ZIJL, V. et al. **Properties of 3D Printable Concrete. In: 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing.** Progress in additive manufacturing. Singapore: 2016, p. 421-426.

ZOU, SHUAI; XIAO, JIANZHUANG; DING, TAO; DUAN, ZHENHUA; ZHANG, QINGTIAN. **Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand**, Construction and Building Materials, Volume 273, 2021, 121699, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121699.

ZUCULIN, S.; PINTO, M.A.R. R. C.; BARBOSA, P. S. F. A retomada do conceito de usinas hidrelétricas reversíveis no setor elétrico brasileiro. In: Anais do Seminário Eletronorte sobre Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Setor Elétrico Brasileiro. Novembro de 2014.

APÊNDICE A

Programa desenvolvido, por Reis (2020), para predição da evolução da temperatura adiabática, utilizando dados isotérmicos.

1	program testes
	implicit none
	real*8 actenerg,hydeg,tol,erro
	logical conv1, conv2
	integer numit1,numit2,numit3
	real*8 res1,res2,temp,minhydeg,maxhydeg,p,prevhydeg,der,prevtemp,tempi,lce,actvenergy
	real*8 time, timestep
	integer subk
	double precision subtimestep
10	hvdeg = 0.00
11	temp = 24.4d0
12	tempi = 0
13	tol = 1d-6
14	lce = 35,80d0
15	actvenergy = 4290.00
16	
17	time = 0
18	timestep = $0.01667d\theta$
19	
20	
21	do while (time .lt. 90.0667d0)
22	erro = 2*tol
23	prevhydeg = hydeg
24	numiti = 0
25	tempi = temp
26	
27	subk = 100
28	subtimestep = timestep/subk
29	do while $(subk > 0)$
30	der = actenerg(hvdeg)*FXF(-actvenergy/(273.d0+temp))*subtimestep
31	hydeg = hydeg + der
32	temp = temp + lce [*] der
33	subk = subk - 1
34	end do
25	
36	time = time + timestep
37	print*.time.temp
38	<pre>write(2,*) time,temp</pre>
39	
40	
41	end program testes
42	
43	<pre>function actenerg(hydeg)</pre>
44	implicit none
45	real*8 actenerg,hydeg
46	if ((hydeg .le. 1.d0) .and. (hydeg .ge. 0.d0)) then
47	actenerg = -5038278.35*(hydeg**6) + 18162123.61*(hydeg**5) - 26106546.01*(hydeg**4) + &
48	19236492.89*(hydeg**3) - 7688301.07*(hydeg**2) + 1430848.42*(hydeg) + 3340.61
	end if
50	if ((hydeg .lt. 0.d0) .or. (hydeg .gt. 1.d0)) then
51	actenerg = 0.d0
52	end 1f
53	end function actenerg
54	

APÊNDICE B

Programa desenvolvido, por Mariane R. Rita, para Cálculo do Índice tensão cisalhante máxima dividido pela coesão, por nós, variando no tempo.

1	
2	! UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO !
	PROGRAMA DE ENGENHARTA CTVTL - PEC - COPPE
4	
	I ETNALTDADE: procedimento de Leitura e conversão de arquivos I
2	do norultado do Diana
7	
	: : : : : : : : : : : : : : : : : : :
ð	i versao intelat: 11/2022 \$Autora: Martane R. Rita i
9	!!
10	program read_tiles
11	implicit none
12	c Definição de variáveis
13	character*60 fileconfig,filein,filein_coes,fileout
14	integer nnode,nsteps,iflag
15	c Variáveis de controle de arquivos
16	integer narq0,narq1,narq2,narq3
17	c Arquivos de entrada e saída
18	data narq0 /20/, narq1 /21/ , narq2 /22/ ,narq3 /23/
19	c Variáveis de interface de linha de comando
20	integer nargs
21	character*80 arg1
22	c Definição de matrizes e vetores
23	real*8 allocatable :: taumax(::).coes(::) indice(::)
24	real*8 allocatable ··· vsten(·) coor(··)
2	
25	npint* ""
20	print,
27 20	print', inicio do Procedimento
20	prince,
29	cc
30	c Abertura do arquivo de configurações
31	CC
32	nargs = largc()
33	10 continue
34	if(nargs .gt. 0) then
35	call getarg(1,arg1)
36	else
37	print*, ""

```
37  print*, ""
38  print*, "Nome do arquivo de configuracao:'
39  read(*,'(a)') fileconfig
40  endif
41 C ...
42  open(narq0,file=fileconfig,status='unknown',err=15)
43  goto 20
44  15  continue
45  print*, 'Arquivo nao existente !',fileconfig
46  nargs = 0
47  goto 10
48  20  continue
```

```
50 c ... Leitura do arquivo de configurações
         call read_config(narq0,nnode,nsteps,iflag,filein,filein_coes,
                                fileout)
         open(narq1,file=filein,status='unknown',err=25)
         open(narg2,file=filein coes,status='unknown',err=30)
         open(narg3,file=fileout,status='unknown',err=35)
         goto 40
       print*, 'Arquivo nao existente !',filein
         goto 20
    30 continue
     print*, 'Arquivo nao existente !',filein_coes
goto 20
    print*, 'Arquivo nao existente !',fileout
goto ac
         goto 20
   c ... Alocação de variáveis
   с -----
         allocate(taumax(nsteps,nnode),coes(nsteps,nnode))
         allocate(indice(nsteps,nnode),vstep(nsteps),coor(nnode,3))
75 c
76 c ... Zerando variáveis
         call mzero(taumax,nsteps,nnode)
         call mzero(coes,nsteps,nnode)
      call mzero(coor,nnode,3)
82 c ... Início do Procedimento
```

```
print*, "-----"
print*, "Lendo arquivo de dados de Taumax!"
print*, "..."
          call readfile(narq1,nnode,nsteps,taumax,vstep,coor)
          print*, "Leitura completa!"
print*, "-----"
          print*, "Lendo arquivo de dados de Coesao!"
print*, "..."
          call readfile(narq2,nnode,nsteps,coes,vstep,coor)
          print*, "Leitura completa!"
           print*, "Avaliando o indice e escrevendo arquivo de saida!"
print*, "..."
          call eval_indice(narq3,nsteps,nnode,taumax,coes,coor,vstep,indice
                             ,iflag)
           close(narq1)
           close(narq2)
           close(narq3)
106 c ----
         print*,"-----
print*," Fim do Procedim
print*," Digite enter para
                       Fim do Procedimento
Digite enter para encerrar!
          print*,
          print*,"-----
111 c ----
```

```
pause 1
           end program
Subrotinas utilizadas:117 c118 c ... readfile: Lê os arquivos de dados119 c
           subroutine readfile(narq,nnode,nsteps,vble,vstep,coor)
           character*70 cdum
           integer i,j,io,nnode,node,elem,nsteps,tstep,istep,layer,narq
           real<sup>*8</sup> x,y,z,tmax,time
          integer, allocatable :: ic(:,:)
           real*8 vble(nsteps,nnode),vstep(nsteps),coor(nnode,3)
           allocate(ic(nsteps,nnode))
           ic(1:nsteps,1:nnode) = 0
          vstep(1:nsteps) = 0.d0
          read(narq,*) cdum
read(narq,*) cdum
read(narq,*) cdum
          read(narg,*,iostat=io) cdum,tstep,time,elem,node,layer,x,y
          .,z,tmax
           vstep(1) = time
           istep = 1
           backspace(narg)
           time
                  = 0
145 c ...
146
           do while (eof(narq) .eqv. .false.)
             read(narq,*,iostat=io) cdum,tstep,time,elem,node,layer,x,y
          .,z,tmax
              if(time .eq. vstep(istep)) then
                 vble(istep,node) = vble(istep,node) + tmax
ic(istep,node) = ic(istep,node) + 1
vstep(istep) = time
                 coor(node,1)
                                   = x
                 coor(node,2)
                 coor(node,3)
                                   = z
              if(time .ne. vstep(istep) .or. eof(narq) .eqv. .true.) then
                 do i = 1, nnode
                     if (ic(istep,i).ne.0) then
                        vble(istep,i) = vble(istep,i)/ic(istep,i)
                 if(istep .lt. nsteps) then
                   istep = istep + 1
                    vstep(istep) = time
                 if(eof(narq) .eqv. .false.) backspace(narq)
           deallocate(ic)
```

```
177 c ... eval_indice: Calcula o índice e imprime resultados
178 c ======
          subroutine eval_indice(narq,nsteps,nnode,taumax,coes,coor,vstep,
                                 indice,iflag)
          integer i,j,nsteps,nnode,narq,iflag,count
          real*8 taumax(nsteps,nnode),coes(nsteps,nnode)
          real*8 indice(nsteps,nnode),vstep(nsteps),coor(nnode,3)
186 c ... iflag = 1 -> imprime todos os resultados
187 c ... iflag = 2 -> imprime resultados para indice >= 1
          do i = 1, nsteps
             do j = 1, nnode
                indice(i,j) = taumax(i,j)/coes(i,j)
             if(iflag.eq.1) then
               write(narq,10) vstep(i),j,coor(j,1:3),taumax(i,j),
                              coes(i,j),indice(i,j)
             if(indice(i,j) .ge. 1.d0) then
                if(iflag.eq.2) then
                write(narq,10) vstep(i),j,coor(j,1:3),taumax(i,j),
                             coes(i,j),indice(i,j)
```

```
print*,"Numero de nos com indice maior ou igual a 1:", count
       10 format (f15.2,i8,4f15.4,f15.2,f15.4)
          end subroutine
217 c ======
218 c ... read config: Lê o arquivo de configurações
219 c ======
            subroutine read_config(narq,nnode,nsteps,iflag,filein,filein_coes,
                                        fileout)
            character*60 filein,filein_coes,fileout,cdum
integer narq,nnode,nsteps,iflag
         read(narq,*) cdum
read(narq,*) cdum
            read(narq,*) nnode,nsteps,iflag
           print*, "nnode:",nnode
print*, "nsteps:",nsteps
print*, "iprint:", iflag
print*, "-----
234 c
            print*, 'Arquivo de dados para Tmax (com extensao):'
            read(narq,'(a)') filein
            print*,filein
            print*, 'Arquivo de dados para Coesao (com extensao):'
```

```
      240
      read(narq, '(a)') filein_coes

      241
      print*, filein_coes

      242
      print*, ""

      243
      print*, 'Arquivo de saida (com extensao):'

      244
      read(narq, '(a)') fileout

      245
      print*, fileout

      246
      print*, fileout

      247
      print*, ""

      246
      print*, "ieitura completa!"

      247
      print*, "teitura completa!"

      248
      close(narq)

      249
      c

      250
      end subroutine

      251
      c

      252
      c

      254
      subroutine mzero(m,l,c)

      255
      implicit none

      256
      integer i,j,l,c

      257
      real*8 m(l,c)

      258
      c

      259
      do i = 1, 1

      260
      do j = 1, c

      261
      m(i,j) = 0.d0

      262
      enddo

      263
      enddo

      264
      end subroutine
```