

ESTUDO DA FISSURAÇÃO TÉRMICA DE BLOCOS DE CONTRAFORTE DA
UHE ITAIPU: ANÁLISE NUMÉRICA TERMO-QUÍMICO-MECÂNICA

Gabriella Pinto Valentim

Dissertação de Mestrado apresentada 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: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

ESTUDO DA FISSURAÇÃO TÉRMICA DE BLOCOS DE CONTRAFORTE DA
UHE ITAIPU: ANÁLISE NUMÉRICA TERMO-QUÍMICO-MECÂNICA

Gabriella Pinto Valentim

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

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Aprovada por: Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Prof^a. Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva

Prof^a. Eugênia Fonseca da Silva

Eng. Étore Funchal de Faria

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2020

Valentim, Gabriella Pinto

Estudo da Fissuração Térmica de Blocos de Contraforte da UHE Itaipu: Análise Numérica termo-químico-mecânica/ Gabriella Pinto Valentim. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020.

XIV, 80 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p.76-80.

1. Fissuração térmica. 2. Estruturas massivas de concreto 3. Barragem de Itaipu. I. Fairbairn, Eduardo de Moraes Rego II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“nem a morte, nem a vida, nem os anjos, nem os principados.
nem o presente, nem o futuro, nem as potestades, nem as alturas,
nem os abismos, nem outra qualquer criatura nos poderá apartar
do amor que Deus nos testemunha em Cristo Jesus, Nosso Senhor.”*

Rom 8, 38-39

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento em primeiro lugar é a Deus, criador de todas as coisas.

À minha mãe, Graça, que sempre me transmitiu a importância da educação e do conhecimento e que, apesar de nem sempre concordar com minhas decisões, apoia-me nas minhas empreitadas. À minha irmã Daniella, que rezou muito por mim e também esteve presente nos momentos mais importantes da minha vida. A meu noivo Rômulo, que me ama tanto que topou viver um relacionamento à distância pela segunda vez em prol dos meus estudos. A meu pai Alzerino, que do céu com certeza intercede por mim a Deus.

Às famílias que me acolheram no Rio de Janeiro: Dona Cely, Sr Manoel, Giovani, Saint Clair, Gianni, Vó Zelma e Israel, e ao João. Obrigada por tornarem minha vida nessa cidade mais tranquila e por me terem feito sentir em casa.

Aos mestres da UnB que me incentivaram a buscar novas águas na COPPE e aos ilustres mestres da COPPE, com quem tive o prazer e a honra de ser lecionada.

Ao meu orientador Eduardo Fairbairn, Dudu, que de maneira simples e descontraída, transmitia um conhecimento gigantesco. Você me inspira por ser tão prendado nas artes, na engenharia e na vida! Obrigada por tanto me ensinar e me dar essa oportunidade de me aprofundar em um tema tão enriquecedor!

Ao engenheiro Étore e à Itaipu Binacional, por me receberem e terem me dado acesso a todo o material, recursos e suporte que precisei durante minha estada na usina também durante toda minha pesquisa.

Aos meus amigos da COPPE, com os quais tive o privilégio de caminhar. Aos que cursaram disciplinas comigo: trilhamos um árduo caminho juntos e nos ajudamos bastante mutuamente. Aos colegas do Numats e do Laboratório de Numéricas: obrigada pela ajuda, pela paciência, pela companhia e pelos ensinamentos.

Aos meus amigos do CMB, UnB, da Igreja e da vida, obrigada por essa amizade tão sincera e duradoura, e por me apoiarem nessa fase da vida.

Ao PEC/COPPE/UFRJ, por ter me proporcionado a oportunidade de ser mestre em Engenharia Civil.

Ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa.

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

ESTUDO DA FISSURAÇÃO TÉRMICA DE BLOCOS DE CONTRAFORTE DA UHE ITAIPU: ANÁLISE NUMÉRICA TERMO-QUÍMICO-MECÂNICA

Gabriella Pinto Valentim

Fevereiro/2020

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Programa: Engenharia Civil

A usina hidrelétrica de Itaipu é líder mundial em energia limpa e renovável. Uma de suas estruturas, a barragem lateral direita composta por blocos de contraforte, começou a ser construída em 1978 e, em 1980, as primeiras fissuras já foram observadas. O surgimento de tensões de origem térmica em estruturas massivas, como esses blocos da barragem, pode ser explicado pelo modelo termo-químico-mecânico, que prevê aumento de temperatura no interior da massa de concreto, devido à hidratação do cimento. Com o objetivo de validar esse modelo para blocos de contraforte e verificar se essas fissuras observadas nos contrafortes de Itaipu são de origem térmica, o bloco foi modelado no software DamThe, tanto em Estado Plano de Tensões, quanto em 3D, simulando o bloco D38. Também foi feita uma análise de sensibilidade com o calor específico e condutividade térmica, além da verificação da hipótese alternativa de que as fissuras podem ter origem exclusivamente mecânica. Pelas simulações em Estado Plano de Tensões e 3D, foram obtidos resultados que se aproximam dos observados em campo, quanto à posição das fissuras nos blocos e quanto à temperatura desenvolvida no seu interior, comparada às temperaturas observadas nos termômetros. O modelo, já verificado em trabalhos anteriores, foi validado, pois conseguiu prever as temperaturas e a tendência a fissurar dos blocos, o que indica ser um programa confiável para projetar estruturas e antecipar fissurações indesejadas em estruturas massivas de concreto. Concluiu-se ainda, que as fissuras têm origem térmica, podendo receber também contribuição mecânica, mas não exclusivamente.

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

A STUDY OF THERMAL CRACKING IN THE BUTTRESSES BLOCKS IN ITAIPU
DAM: THERMOCHEMICAL-MECHANICAL NUMERICAL ANALYSIS

Gabriella Pinto Valentim

February/2020

Advisor: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Department: Civil Engineering

The Itaipu hydropower plant is a world leader in clean and renewable energy. One of the main structures is the right bank dam, which is composed of buttress blocks. It was built in 1978 and in 1980 the first cracks were already observed. The thermo-mechanical mechanical model, which predicts an increase in temperature inside the concrete mass due to the hydration of the cement, explains the thermal stresses in massive structures, such as these dam blocks. In order to validate this model and verify if those cracks in Itaipu buttresses are thermal cracks, the block was modeled in DamThe software in Plane Stress State, and in 3D, simulating the D38 block. A sensitivity analysis was also carried out with specific heat and thermal conductivity parameters. An alternative hypothesis that the cracks may have an exclusively mechanical origin was also checked. Both Plane Stress State and 3D simulation achieved results that are close to those observed in the field regarding the position of cracks in the blocks and the temperature developed inside the blocks, compared to the temperatures observed in the thermometers. The model, already verified in previous works, was validated, as it was able to predict the temperatures and the tendency to crack. This indicates that it is a reliable program for designing structures and anticipating undesirable cracks in massive concrete structures. It was also noticed that the cracks have a thermal origin and may have a mechanical contribution, but not exclusively.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Contextualização.....	1
1.2.	Motivação e Objetivos do trabalho	4
1.3.	Apresentação da dissertação	5
2.	ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO E MODELAGEM DO CONCRETO	7
2.1.	Modelagem do material	7
2.2.	Hidratação do cimento	8
2.3.	Tensões de origem térmica	14
2.4.	Fluência.....	17
3.	ESTUDOS DE CASOS DE FISSURAÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS MASSIVAS DE CONCRETO	19
3.1.	Barragem de Corbara, Itália.....	19
3.2.	Barragem de Alcântara, Espanha.....	19
3.3.	Barragem de Ancipa, Sicília, Itália.....	20
3.4.	Barragem do Lago Hodge, Califórnia, EUA	20
3.5.	Barragem de Olef, Alemanha	20
3.6.	Barragem de Gioveretto, Itália.....	21
3.7.	Barragem de Fedaia, Itália	21
3.8.	Barragem Upper Still Water, Salt Lake City, EUA	21
3.9.	Memorial aos Judeus Mortos na Europa, Berlim, Alemanha	22
3.10.	Vertedouro de Pequena Central Hidrelétrica, América do Sul	23
4.	UHE ITAIPU.....	24
4.1.	Descrição do empreendimento.....	24
4.2.	Aspectos gerais da construção	26
4.3.	Construção dos blocos de contraforte	28
4.4.	Fissuração nos blocos de contraforte	29
4.5.	Medidas tomadas após a fissuração	30
4.6.	Análises de MEF anteriores	32
5.	METODOLOGIA.....	33
5.1.	Programa DamThe	33
5.2.	Índice de fissuração	33
5.3.	Metodologia para obtenção dos parâmetros de fluência pelo modelo de SERCOMBE [15].....	34

6.	SIMULAÇÃO DE UM BLOCO DE CONTRAFORTE GENÉRICO DA UHE ITAIPU – ANÁLISE ESTADO PLANO DE TENSÕES	40
6.1.	Dados utilizados.....	40
6.2.	Malha e modelagem.....	44
6.3.	Resultados obtidos	46
6.3.1.	Evolução da temperatura	46
6.3.2.	Comparação entre temperatura e índice de fissuração longo do tempo ...	47
6.3.3.	Índice de fissuração	50
7.	SIMULAÇÃO DO BLOCO DE CONTRAFORTE D38 – ANÁLISE 3D.....	52
7.1.	Dados utilizados.....	52
7.2.	Malha e modelagem.....	57
7.3.	Resultados obtidos	62
7.3.1.	Simulações 1, 2 e 3.....	62
7.3.2.	Simulação 4	69
7.3.3.	Simulação 5	70
7.3.4.	Simulações 6, 7, 8 e 9	71
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
8.1.	Conclusões	74
8.2.	Comentários finais	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Turbina de Itaipu – Fonte: MARCHETTI, A. [2]	1
Figura 2. Esquemas barragem de contraforte	2
Figura 3. Exemplos estruturas massivas de concreto Fonte: SFIKAS <i>et al.</i> [8]....	3
Figura 4. O concreto como meio poroso - Fonte: ULM. e COUSSY [13, 14].....	7
Figura 5. Fases do concreto – Fonte: adaptado de RICHARDSON [18]	8
Figura 6. Influência da temperatura inicial na cinética da reação - Fonte: SILVOSO [17]	10
Figura 7. Processo de microdifusão da água pelos poros – Fonte: FERREIRA [22].....	11
Figura 8. Gráfico da temperatura adiabática e derivada da temperatura – Fonte: SILVOSO [17]	12
Figura 9. Gráfico do grau de hidratação – Fonte: SILVOSO [17]	13
Figura 10. Gráfico da afinidade normalizada - adaptado de SILVOSO [17]	13
Figura 11. Viga biengastada	15
Figura 12. Aquecimento e resfriamento do concreto da viga	16
Figura 13. Blocos de concreto – Memorial aos Judeus mortos na Europa – Berlim - Fonte: FAIRBAIRN, E. M. R . (Acervo pessoal)	23
Figura 14. Produção anual de energia – Fonte: Itaipu.gov [1]	25
Figura 15. Planta Geral UHE Itaipu – Fonte: ANDRIOLO e BETIOLI [32]	25
Figura 16. Blocos de contraforte da barragem lateral direita - vista de jusante – Fonte: Autoria própria	28

Figura 17. Construção dos blocos de contraforte – Fonte: ANDRIOLO e BETIOLI [32]	29
Figura 18. Localização das fissuras num bloco de contraforte típico – Fonte: BETIOLI et al.[33]	30
Figura 19. Junta de contração entre a cabeça e o contraforte – Fonte: ROSSO e PIASENTIN [9]	31
Figura 20. Curvas de função de fluência do concreto A-210-f de Itaipu	35
Figura 21. Derivadas da função de fluência do concreto A-210-f de Itaipu.....	35
Figura 22. Componente de fluência a curto prazo eixo semi-log do concreto A-210-f.....	37
Figura 23. Comparação das funções de fluência obtidas pelo modelo e obtidas experimentalmente para o concreto A-210-f de Itaipu	38
Figura 24. Localização dos concretos adotados nos blocos de contraforte	40
Figura 25. Evolução das propriedades mecânicas com o grau de hidratação – Fonte : FAIRBAIRN et al.[18]	42
Figura 26. Modelo simplificado da evolução de propriedades mecânicas com o grau de hidratação	42
Figura 27. Temperatura dos ensaios adiabáticos dos concretos A-140 e B-210	43
Figura 28. Modelagem do bloco de contraforte de Itaipu	44
Figura 29. Condição de convecção da fatia do bloco de contraforte	45
Figura 30. Condição de restrição no eixo Y	45
Figura 31. Localização dos pontos de observação da evolução de temperatura	46
Figura 32. Evolução da temperatura dos pontos seleccionados	47

Figura 33. Resultados aos 38 dias.....	48
Figura 34. Resultados aos 85 dias.....	48
Figura 35. Resultados aos 145 dias.....	49
Figura 36. Resultados aos 365 dias.....	49
Figura 37. Resultados aos 730 dias.....	50
Figura 38. Comparação do padrão de fissuração – Fonte: adaptado de BETIOLI et al. [33].....	50
Figura 39. Posição dos termômetros do bloco D38 – Fonte: Itaipu [39].....	52
Figura 40. Bloco desenhado em AutoCad em 3D	54
Figura 41. Temperaturas dos ensaios adiabáticos dos concretos A-140 A-210 .	56
Figura 42. Gráfico da temperatura ambiente x Tempo. Fonte: Itaipu (Dados em planilha)	57
Figura 43. Malha de elementos tetraédricos – Bloco D38.....	58
Figura 44. Compatibilidade de nós entre o Bloco e a rocha	58
Figura 45. Condição de contorno da rocha engastada em x, y e z.....	59
Figura 46. Superfícies com convecção	59
Figura 47. Elementos fissurados na simulação 1	62
Figura 48. Mapeamento de fissuras – Bloco D38 – Face direita - Fonte: MENEZES e AKIO [48]	63
Figura 49. Mapeamento de fissuras – Bloco D38 – Face esquerda - Fonte: MENEZES e AKIO [49]	64
Figura 50. Elementos fissurados na simulação 1 aos 350 dias	65

Figura 51. Simulação 1 – D38 - Temperatura interna x Tempo	65
Figura 52. Simulação 1 – D38 - Temperatura interna x Tempo com Temperatura ambiente.....	66
Figura 53. Índice de fissuração da simulação 2 no D38	67
Figura 54. Gráfico comparativo da temperatura ambiente e TS-D-004	68
Figura 55. Índice de fissuração - simulação 3 bloco D38.....	68
Figura 56. Gráfico simulação 3 – D38 – Temperatura interna x tempo	69
Figura 57. Campo do índice de fissuração – Simulação 4 – Bloco D38	70
Figura 58. Campo do índice de fissuração simulação 5 – Bloco D38.....	70
Figura 59. Comparação das variações dos valores do calor específico com os valores de referência	72
Figura 60. Comparação das variações dos valores da condutividade térmica específico com os valores de referência	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cronologia dos principais eventos de concretagem da UHE Itaipu ...	27
Tabela 2. Valores obtidos nas curvas de J^{ve}	38
Tabela 3. Propriedades dos tipos de concreto A-140f e B-210f	41
Tabela 4. Parâmetros da Função de Hill concretos B210 e A140	43
Tabela 5. Cronograma de concretagem bloco D38.....	53
Tabela 6. Propriedades dos concretos utilizados no bloco D38	55
Tabela 7. Parâmetros da Função de Hill	56
Tabela 8. Simulações realizadas no bloco D38	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A engenharia, nos últimos anos, tem sido desafiada a proporcionar soluções inovadoras, no que tange à segurança das estruturas, mas também à segurança ambiental. A sustentabilidade se vê como condição necessária para o desenvolvimento de uma nação. O aumento da demanda global por energia, ao longo dos anos, tem como reflexo direto as danosas emissões de gases de efeito estufa, oriundos da queima de combustíveis fósseis. Para abrandar o problema, têm sido estipuladas metas em escala mundial, visando gerar grandes porcentagens da energia, por meio de fontes de energia limpa e renovável. 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.

A energia elétrica é produzida a partir de um desnível existente, o qual, na medida em que é vencido pela queda d'água, movimenta as turbinas, transformando a energia potencial em mecânica. Essa energia é captada por um gerador que a transforma em energia elétrica [1]. Na Figura 1 é mostrada uma das 20 turbinas que opera em Itaipu, cada uma com potencial nominal de 700 MW.



Figura 1. Turbina de Itaipu – Fonte: MARCHETTI, A. [2]

As usinas hidrelétricas são compostas, basicamente, por barragem, casa de força, vertedouro e sistema de captação e adução de água, os quais funcionam em conjunto e de maneira integrada. A barragem interrompe o curso normal do rio e o desvia para um determinado local, formando grandes reservatórios, que estocam a água e permitem a formação de grandes quedas. Essas produzem força, que é utilizada para movimentar turbinas e acionar o gerador elétrico [3].

As barragens podem ser de terra, enrocamento e concreto. Segundo COSTA [4] e ANA [5], essas podem ainda ser dos tipos: gravidade, que são maciças, têm pouca armação e o peso próprio é o que garante a estabilidade da estrutura; em arco, que as pressões hidrostáticas são transferidas para as ombreiras; concreto compactado a rolo – CCR, em que o concreto é espalhado por esteira e depois compactado e por fim as barragens de contraforte, objeto de estudo dessa dissertação, uma vez que a UHE Itaipu apresenta estruturas desse tipo.

As barragens de contraforte visam economizar concreto e reduzir efeitos da subpressão. São compostas de pilares (contrafortes) e cortinas, arcos ou abóbodas múltiplas, capazes de resistir à pressão hidrostática. Pode-se também incluir as barragens de gravidade aliviada como barragens de contraforte como barragens de cabeça maciça [6]. A Figura 2 mostra alguns esquemas importantes desse tipo de estrutura.

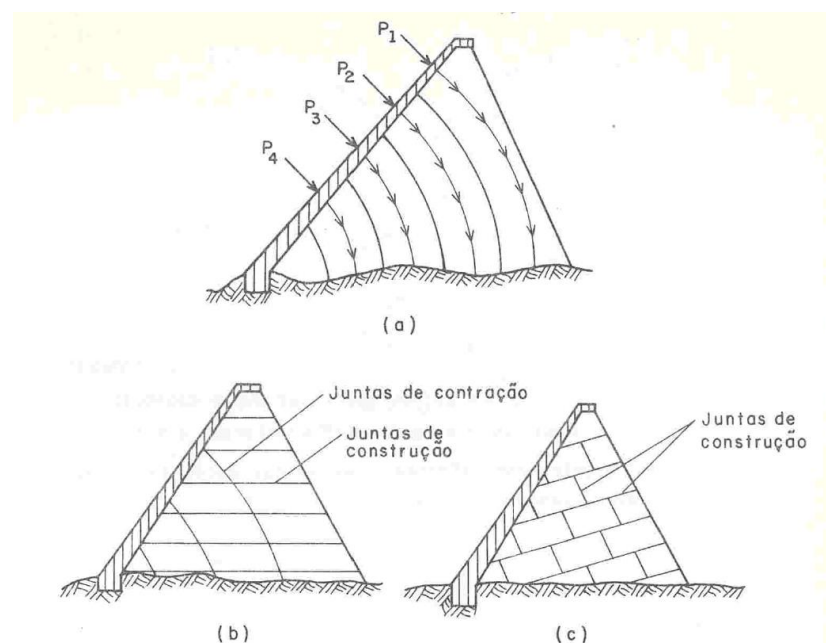


Figura 2. Esquemas barragem de contraforte
(a)Distribuição de pressões hidrostáticas(b)Solução de alguns projetistas para juntas de contração (c)Solução alternativa com junta de construção inclinada. Fonte: MASON [6]

FAIRBAIRN e AZENHA [7] definem estruturas massivas como aquelas para as quais os efeitos dos materiais cimentícios nas primeiras idades, como a geração de calor e a retração autógena, podem levar à fissuração. Alguns exemplos dessas estruturas são: barragens de concreto, lajes, muros de contenção, pontes e pilares e vertedouros, como mostrado na Figura 3.

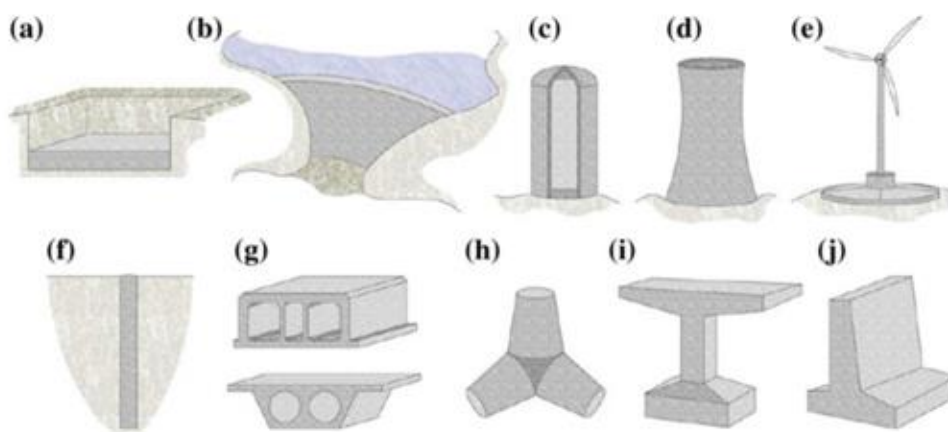


Figura 3. Exemplos de estruturas massivas de concreto a)lajes de fundação; b) barragens de concreto; c) silos / estruturas de contenção; (d) torres de resfriamento; (e) fundações de turbinas eólicas; (f) estacas; (g) segmentos pré-moldados; (h) blocos de tetrapodes; (i) mesoestruturas de obras-de-arte especiais; e (j) muros de contenção.

Fonte: SFIKAS *et al.*[8]

A fissuração térmica de estruturas massivas é um problema observado com certa frequência e pode ser analisado através da modelagem da estrutura usando, por exemplo, um software de Método dos Elementos Finitos. A simulação pode prever as tensões térmicas que poderiam se tornar maiores que a resistência à tração, causando fissuração. Nesse sentido, é importante modelar a estrutura previamente à construção (objeto desse trabalho), além de adotar medidas preventivas para evitar fissurações.

ROSSO e PIASENTIN [9] 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. Exemplificando-as: 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.

1.2. Motivação e Objetivos do trabalho

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a fissuração térmica que aconteceu durante a construção dos blocos de contraforte da UHE Itaipu. No ano de 2019, foi publicado o *State of the Art Report* do Comitê Técnico da RILEM 254-CMS, denominado *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures* [7]. Esse e outros casos em que existe fissuração que poderia ter sido prevenido foram apresentados ao comitê como exemplos típicos de fissuração térmica como trabalho pós STAR. Essa foi a principal motivação do presente estudo.

A fissuração acontece quando a tensão de tração alcança a resistência à tração do material, que é função do grau de hidratação. O cálculo dessas tensões foi feito em um programa de elementos finitos, denominado DamThe, implementado em linguagem FORTRAN, desenvolvido pelo PEC/COPPE/UFRJ [10, 11]. Esse programa utiliza das formulações dos acoplamentos termo-químico-mecânicos da modelagem do concreto de COUSSY [12] e ULM e COUSSY [13, 14]. O programa já foi validado para outras estruturas em diversos trabalhos do grupo de pesquisa do PEC/COPPE/UFRJ. Possui código aberto e tem nele implementado diversos modelos mecânicos como variação do módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração e também modelo de fluência. O modelo de fluência adotado é o de SERCOMBE *et al.* [15]. Sobre esse modelo, COLIMODIO [16] diz “O grupo de pesquisa do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, lidou nos últimos com o modelo de fluência proposto por SERCOMBE *et al.*[15], mostrando, tal experiência, que o referido modelo é de difícil compreensão e que os parâmetros de entrada são de complicada obtenção, além de ser difícil entender as premissas e hipóteses consideradas em tal modelo. Apesar disso, tal modelo foi utilizado diante da necessidade de, de alguma forma, considerar as deformações de fluência nos problemas estudados”. No trabalho de COLIMODIO [16], foi proposto outro modelo de fluência baseado nas unidades de Kelvin-Voigt, mas está implementado em outro software, também desenvolvido pelo PEC/COPPE/UFRJ, destinado ao cálculo de tensões em bainhas de poços de petróleo. Assim, o DamThe permaneceu com o modelo de fluência de SERCOMBE *et al.*[15], apesar das limitações e dificuldades desse modelo.

O Objetivo Geral deste trabalho é aplicar o modelo que descreve o comportamento das estruturas de concreto nas primeiras idades no caso da barragem de Itaipu e validá-lo para estruturas de contraforte, já que em outros trabalhos do grupo de

pesquisa, o software já foi verificado e validado para outros tipos de estrutura. Os objetivos específicos são: verificar se a fissuração foi predominantemente de origem térmica; comparar os resultados obtidos na simulação com os observados em campo através dos termômetros; fazer uma análise superficial de sensibilidade dos parâmetros utilizados.

Para cumprir os objetivos do trabalho, no desenvolvimento do estudo foram utilizados quatro programas computacionais. Um programa gerador de malha de uso comercial, o Trelis, o programa de elementos finitos desenvolvido pelo laboratório, o Damthe, o programa de visualização de resultados, também de uso comercial, além do software AutoCad, utilizado para desenhar a geometria da simulação EPT e 3D dos blocos de contraforte e exportar para o gerador de malhas.

1.3. Apresentação da dissertação

O presente trabalho está organizado em 8 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 cumpridos.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre hidratação do cimento Portland, modelagem do material heterogêneo concreto e suas formulações de acoplamento termo-químico-mecânico e modelo de fluência utilizado.

No terceiro capítulo é apresentada uma breve revisão da literatura técnica sobre fissurações térmicas em estruturas massivas de concreto, principalmente em barragens.

No quarto capítulo são abordados os diversos aspectos que envolveram a construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu, de quais estruturas ela é constituída e como se deu a construção dos blocos de contraforte. Também trata da verificação e estudos das primeiras fissurações, ainda durante a construção.

No quinto capítulo é apresentada a metodologia utilizada, explicando como o programa DamThe funciona, e destacando o principal *output* analisado: o índice de fissuração. Também nesse capítulo, é mostrado o passo a passo feito na obtenção dos parâmetros do modelo de fluência adotado.

O sexto capítulo versa sobre a modelagem de um bloco de contraforte em Estado Plano de Tensões. Os dados empregados nessa modelagem foram os que estavam

disponíveis no acervo público sobre os concretos e os blocos de Itaipu. Obtiveram-se resultados de temperatura e índice de fissuração, os quais foram comparados com os valores relatados nesses relatórios públicos.

No sétimo capítulo aborda-se a modelagem do bloco de contraforte D38 em 3D. Os dados empregados nessa modelagem foram obtidos nos arquivos internos com autorização de Itaipu Binacional. As curvas de temperatura resultantes dessa simulação foram comparadas com as curvas obtidas pelos termômetros localizados neste mesmo bloco. O mapa de índice de fissuração também foi comparado com o observado em campo. Uma análise superficial de sensibilidade do calor específico e da condutividade térmica também é apresentada nesse capítulo. Essa análise consiste em variar o parâmetro e observar como o resultado é afetado.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, contendo conclusões alcançadas e recomendações, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nessa pesquisa.

2. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO E MODELAGEM DO CONCRETO

2.1. Modelagem do material

O concreto é um meio poroso quimicamente reativo, de acordo com COUSSY [12]. Logo, consubstancia-se em um esqueleto que pode se encher de água e, nas primeiras idades, suas propriedades estão se modificando a todo tempo, como ilustrado na Figura 4.

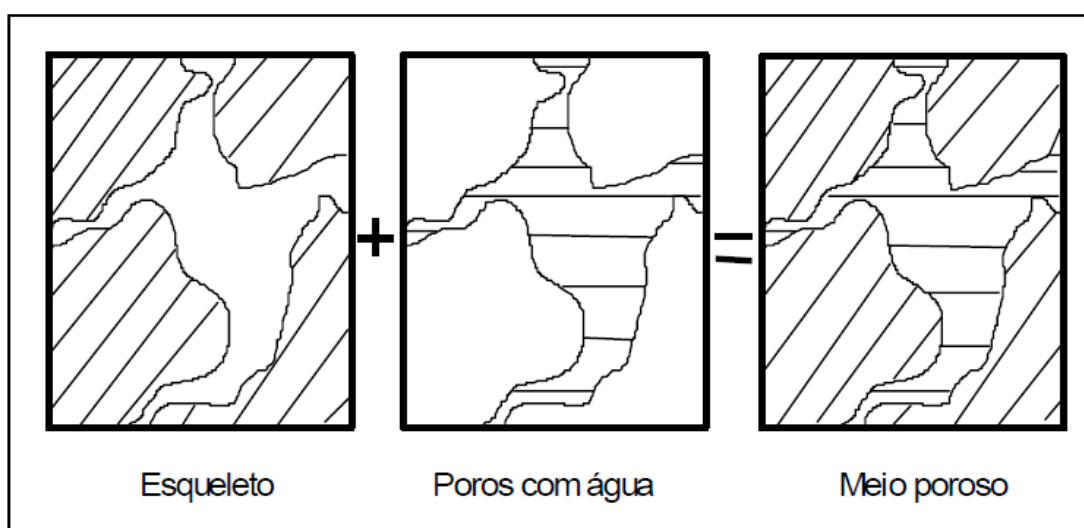


Figura 4. O concreto como meio poroso - Fonte: ULM. e COUSSY [13, 14]

O esqueleto é composto por hidratos e cimento anidro, e sua massa é aumentada à medida que a água livre presente nos poros vai reagindo com o cimento anidro. É desta maneira que a resistência e a rigidez aumentam proporcionalmente à evolução da hidratação, quando mensurados a nível macroscópico. Em nível microscópico, as propriedades não se alteram [17].

A respeito dessas diferenças, com relação ao nível em que se observa o concreto, o mesmo pode ser dito sobre sua heterogeneidade. O concreto é composto por agregados e a pasta de cimento. Contudo, em elementos estruturais não é possível distinguir essas fases. Ao passo em que se aumenta a potência do instrumento de observação, aumenta-se também o nível de heterogeneidade do concreto, conforme mostrado na Figura 5 .

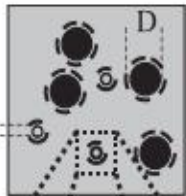
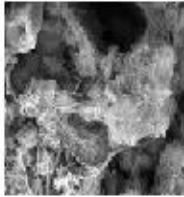
IV			Concreto homogêneo
III			Pasta homogênea e agregado graúdo
II			C-S-H homogêneo, grãos de cimento, CH, aluminatos e poros
I			Dois tipos de C-S-H

Figura 5. Fases do concreto – Fonte: adaptado de RICHARDSON [18]

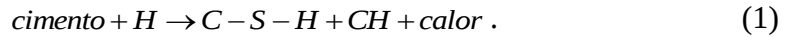
Assim, o concreto pode ser entendido como um sistema composto pela superposição de um esqueleto sólido e de uma solução intersticial contínua dentro de um sistema poroso associado [17].

ACKER [19] descreve o momento do início do endurecimento do concreto da seguinte forma: “O aparecimento do primeiro caminho contínuo atravessando o conjunto constitui o patamar de percolação, que é o primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente ligados, unindo uma face do volume à face oposta”. É a partir do patamar de percolação que o concreto deixa de ser uma suspensão e passa a ser um esqueleto sólido que apresenta poros cheios de água em sua estrutura.

2.2. Hidratação do cimento

Na matriz cimentícia ocorre a hidratação dos grãos de clínquer, formando Silicatos de Cálcio Hidratado (C-S-H), Portlandita (Hidróxido de Cálcio), além de gerar calor. A hidratação do cimento é altamente exotérmica e também termoativada, o que

significa que a evolução da temperatura influencia a cinética da hidratação. A hidratação do cimento é mostrada de maneira simplificada na Equação 1 abaixo:



O que confere resistência ao esqueleto é a formação de C-S-H, produto da reação de hidratação, que pode ser de alta densidade (mais próximo do grão anidro de clínquer), ou baixa densidade (mais distante).

O conceito de grau de hidratação é definido por SILVA [20] como o avanço das reações de hidratação e varia de 0 a 1. Pode ser determinado para um dado instante como a relação entre a massa de cimento hidratado, sobre a massa total de cimento (Equação 2), ou a massa de cimento anidro sobre a massa total (Equação 3), ou a quantidade de água ligada no tempo t sobre a quantidade de água ligada no tempo t_{∞} (Equação 4), ou, por último, a relação entre a quantidade de calor liberada no tempo t , sobre a quantidade de calor no tempo t_{∞} (Equação 5).

$$\xi(t) = \frac{\text{massa} \cdot \text{cimento} \cdot \text{hidratado}}{\text{massa} \cdot \text{cimento} \cdot \text{total}}, \xi \in [0,1] \quad (2)$$

$$\xi(t) = 1 - \frac{\text{massa} \cdot \text{cimento} \cdot \text{anidro}}{\text{massa} \cdot \text{cimento} \cdot \text{total}}, \xi \in [0,1] \quad (3)$$

$$\xi(t) = \frac{W_n(t)}{W_n(t_{\infty})}, \xi \in [0,1] \quad (4)$$

$$\xi(t) = \frac{Q(t)}{Q(t_{\infty})}, \xi \in [0,1] \quad (5)$$

A reação de hidratação libera aproximadamente 150 a 400 J/g de cimento [19]. A reação também é termoativada, o que significa que, à medida que a reação progride e o calor é liberado, eleva-se a temperatura do sistema e a velocidade da reação também aumenta. A termoativação provoca ainda outra consequência interessante: se a temperatura inicial da mistura for maior, sua velocidade também será maior, apesar de atingir a mesma variação final de temperatura que as mesmas misturas com menores temperaturas iniciais, pois teria a mesma energia potencial química convertida em liberação de calor, como mostrado na Figura 6.

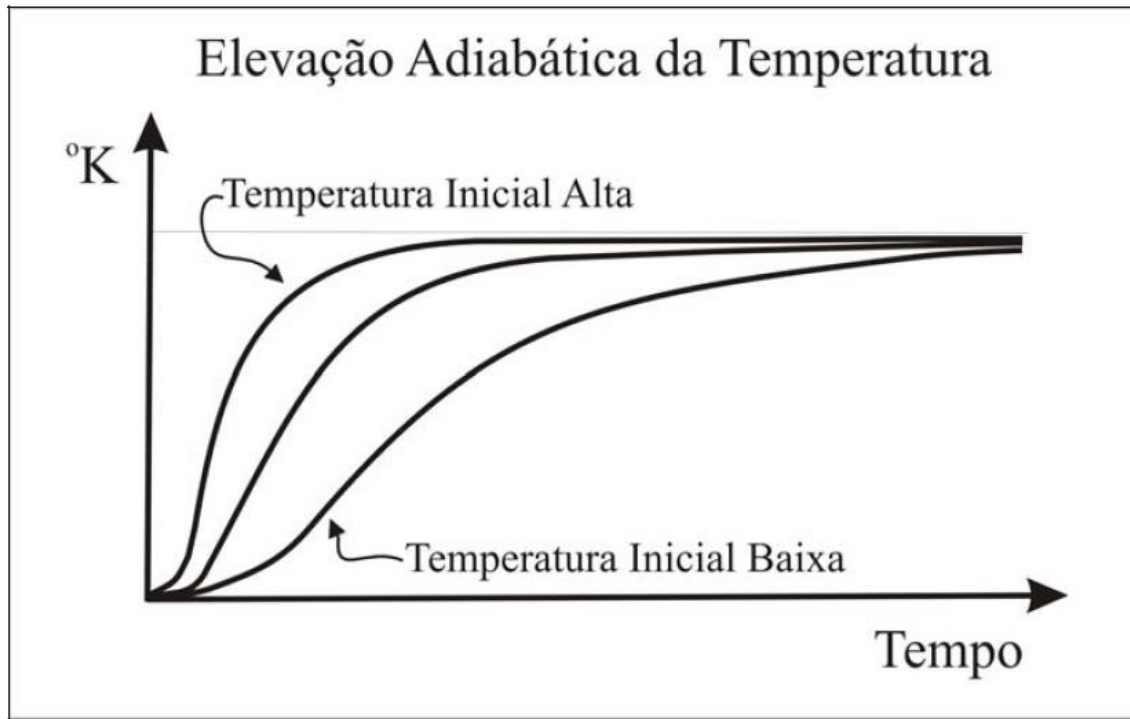


Figura 6. Influência da temperatura inicial na cinética da reação - Fonte: SILVOSO [17]

A microdifusão da água é controlada pelo desequilíbrio termodinâmico entre a água livre e a água combinada no esqueleto sólido (Figura 7). Esse fenômeno de afinidade química também é amplificado pela termoativação. O modelo de ULM e COUSSY [10,11] utiliza a Lei de Arrhenius para modelar este processo e quantificar a cinética da reação dando a taxa de variação do grau de hidratação, como mostrado na Equação 6:

$$\frac{d\xi}{dt} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Sendo que E_a = energia de ativação, tomada como 4000K [21]; R = constante universal dos gases; $\tilde{A}$ = afinidade normalizada.

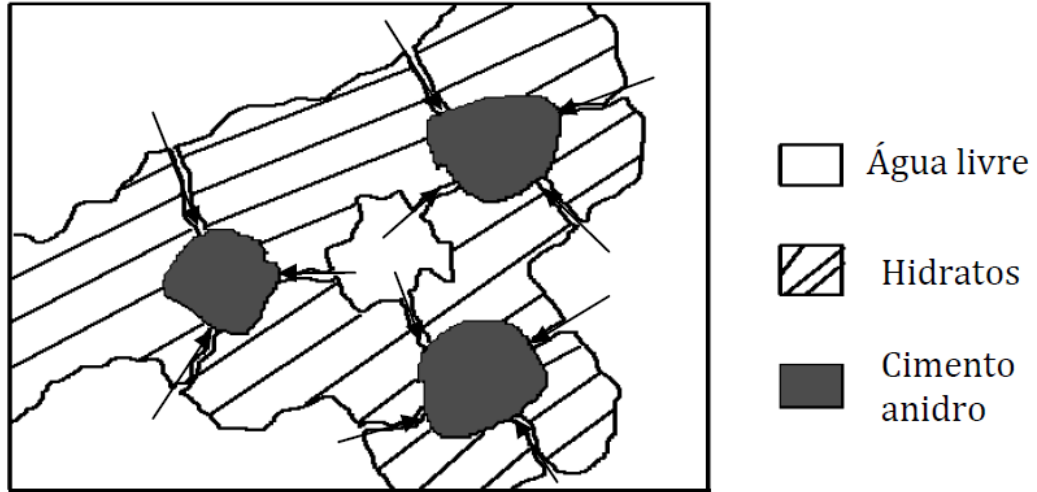


Figura 7. Processo de microdifusão da água pelos poros – Fonte: FERREIRA [22]

A afinidade é uma grandeza intrínseca do material e independe das condições de contorno a que a amostra se submete. Essa grandeza pode ser obtida por ensaios de calorimetria adiabática [13, 14]. Nesses ensaios não há fonte externa de calor, e a natureza exotérmica da reação de hidratação é a única responsável pelo aumento da temperatura no sistema. Tal fenômeno pode ser descrito pela formulação da equação transiente de calor apresentada na Equação 7:

$$C_{\varepsilon} \cdot \frac{dT}{dt} = Q^0 + L \cdot \frac{d\xi}{dt} + K \nabla^2 T \quad (7)$$

Em que C_{ε} = capacidade térmica; T = temperatura; t = tempo; Q_0 = taxa de transferência de calor vindo do exterior; L = constante do material, que é sempre positiva devido a natureza exotérmica da reação de hidratação; ξ = grau de hidratação; K é a condutividade térmica.

Partindo do princípio de que, em condição adiabática, os termos $K \nabla^2 T$ referente à troca por condução e Q_0 referente à fonte de calor externo são nulos, a equação anterior se resume à Equação 8:

$$\frac{dT^{ad}}{dt} = \frac{L}{C_{\varepsilon}} \frac{d\xi}{dt} \quad (8)$$

Integrando a expressão acima, tem-se a Equação 9:

$$\xi(t) = \frac{T^{ad}(t) - T_0^{ad}}{T_{\infty}^{ad} - T_0^{ad}} \quad (9)$$

Sendo $L/C_{\varepsilon} = T_{\infty}^{ad} - T_0^{ad}$, $T^{ad}(t)$ temperatura no tempo t , T_0^{ad} a temperatura inicial da mistura e T_{∞}^{ad} a máxima temperatura desenvolvida no ensaio de calorimetria adiabática.

Dessa forma, é possível obter o grau de hidratação direto do histórico de temperatura da amostra. Na Figura 8 é apresentado o gráfico mostrando as curvas da temperatura e sua derivada em um ensaio adiabático, na Figura 9 é mostrado o grau de hidratação, calculado a partir dessa curva e a Figura 10 a afinidade normalizada, aplicando a Equação 6.

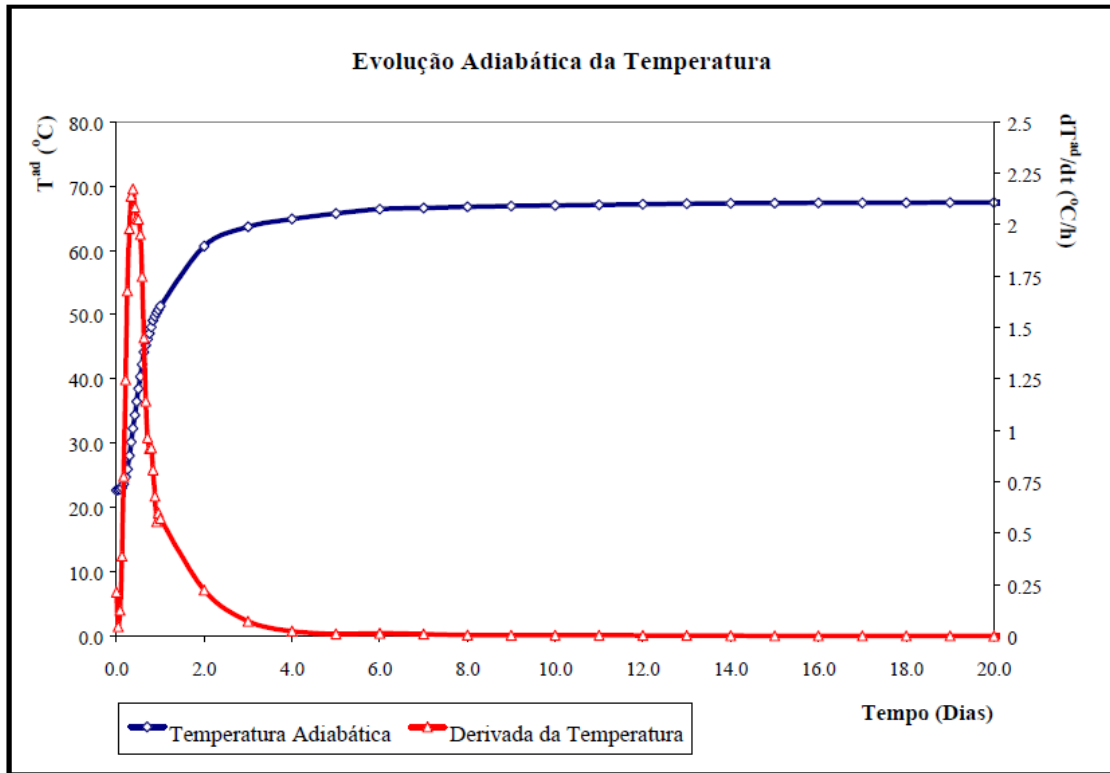


Figura 8. Gráfico da temperatura adiabática e derivada da temperatura – Fonte: SILVOSO [17]

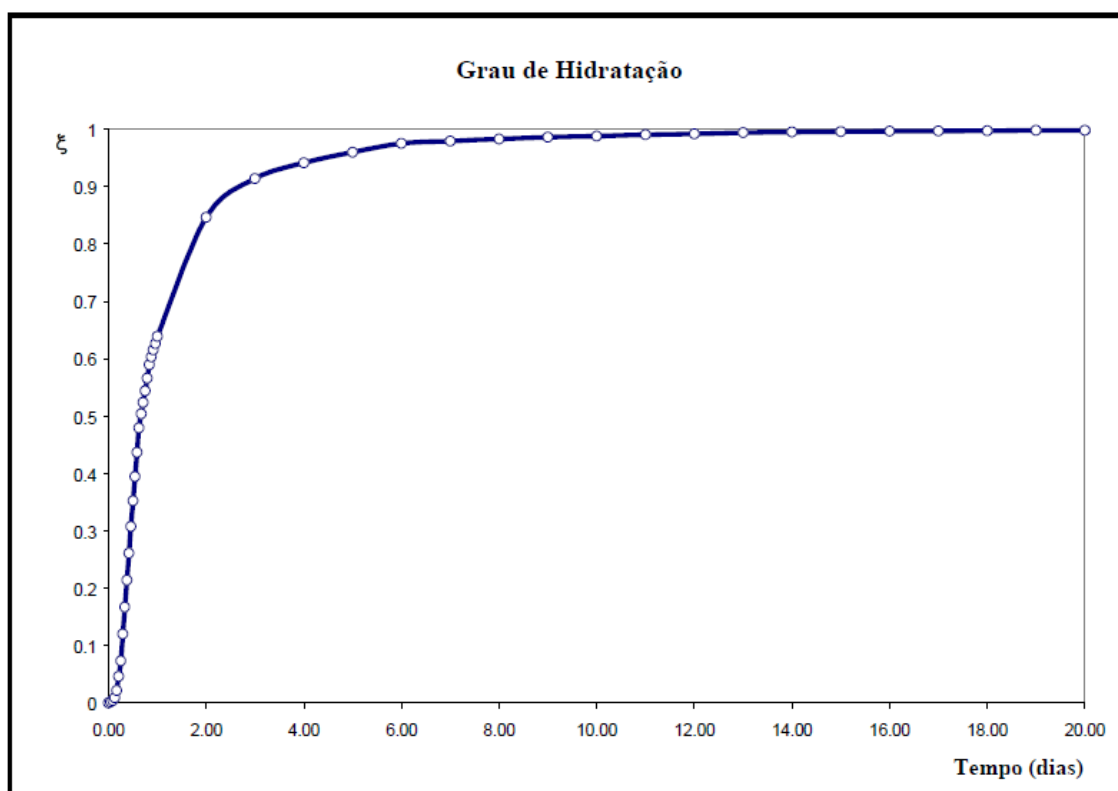


Figura 9. Gráfico do grau de hidratação – Fonte: SILVOSO [17]

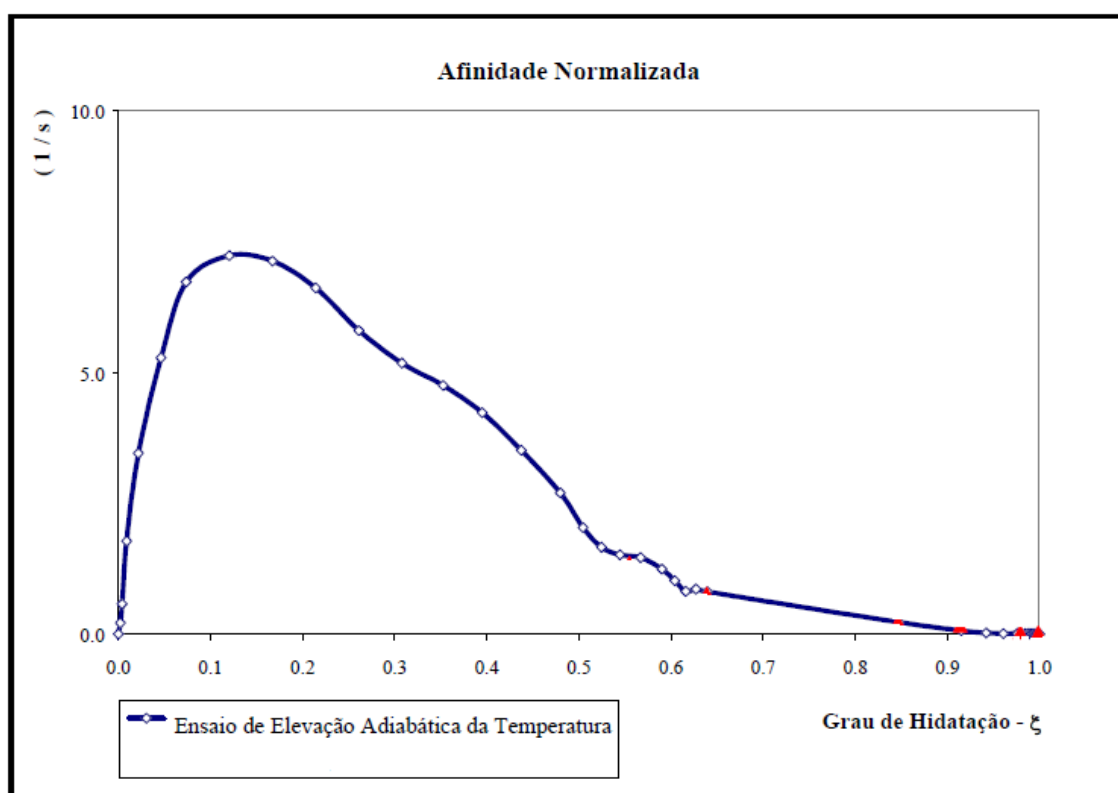


Figura 10. Gráfico da afinidade normalizada - adaptado de SILVOSO [17]

Nota-se que a curva do grau de hidratação (Figura 9) é proporcional à da elevação adiabática (Figura 8) e a curva da afinidade (Figura 10) tem a forma de sino. Ou seja, a velocidade da reação é maior no começo, pois há maior quantidade de água livre disponível e maior facilidade de penetração pelos microporos para hidratar os grãos anidros. Conforme a hidratação avança, a velocidade vai reduzindo.

Na formulação apresentada na Equação 7 do acoplamento termoquímico de ULM e COUSSY [13, 14], 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.

A condutividade é a capacidade do concreto de conduzir calor em nível macroscópico. O calor específico é a quantidade de energia necessária para aumentar em 1 unidade de massa 1 unidade de temperatura. A capacidade térmica, ou calor específico volumétrico, é o calor específico multiplicado pela massa específica. Nesse estudo, tais parâmetros foram usados como dados de entrada nas análises, além de ter sido feita uma simples análise de sensibilidade com eles.

2.3. Tensões de origem térmica

No cálculo das tensões, o acoplamento termo-químico-mecânico é apresentado na Equação 10, combinando o modelo de acoplamento termo-químico-mecânico de ULM e COUSSY [13,14].

$$d\sigma = C(\xi) : (d\epsilon - d\epsilon^t - d\epsilon^f - d\epsilon^{ve} - d\epsilon^{s,a} - d\epsilon^{s,d} - d\epsilon^p - d\epsilon^{cr} - d\epsilon^{AAR} - d\epsilon^{DEF} - \dots) \quad (10)$$

Sendo $C(\xi)$ = tensor de rigidez elástica como função do grau de hidratação; $d\epsilon$ = tensor de deformações elásticas; $d\epsilon^t$ = tensor de deformações térmicas; $d\epsilon^f$ = tensor de deformações de fluência a longo prazo; $d\epsilon^{ve}$ = tensor de deformações de fluência a curto prazo; $d\epsilon^{s,a}$ = tensor de deformações de retração autógena; $d\epsilon^{s,d}$ = tensor de deformações por retração por secagem; $d\epsilon^p$ = tensor de deformações plásticas; $d\epsilon^{cr}$ =

tensor de deformações de fissura; $d\epsilon^{AAR}$ = tensor de deformações por reações de álcali-agregado; $d\epsilon^{DEF}$ = tensor de deformações de formação de etringita tardia.

Nesse trabalho, apenas serão levadas em consideração as deformações advindas da fluência de curto e longo prazo, e da retração térmica. Outros trabalhos do PEC/COPPE/UFRJ como SILVOSO [17], FERREIRA [22], FRAGA [23], LOPES [24] e RITA [25] apresentam pesquisas com emprego dessas outras deformações.

Há dois tipos principais de gradientes térmicos que podem acontecer em estruturas massivas de concreto. Um deles é relativo ao espaço, de modo que, em um determinado instante, pode haver diferença de temperatura entre dois pontos da estrutura, que, se restritas nessa direção, pode provocar o surgimento de tensões. Exemplos disso são os poços de petróleo, que têm altíssima temperatura em seu interior e possuem restrição estrutural por serem anelares, e, por isso, devem ser calculados de forma apropriada para o concreto resistir a essas tensões de origem térmica pelo gradiente espacial.

O outro é relativo ao tempo. O exemplo a seguir, de uma viga biengastada (Figura 11), ilustra o que acontece nesse caso.

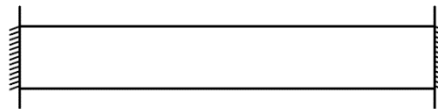


Figura 11. Viga biengastada

Supondo que esta viga está com um processo de hidratação em andamento e sofra um aquecimento a uma temperatura T_1 e depois resfrie e volte à mesma temperatura, como mostra a Figura 12. A viga tem sua temperatura aumentada até o tempo t_1 e o resfriamento acontece de t_1 a t_2 .

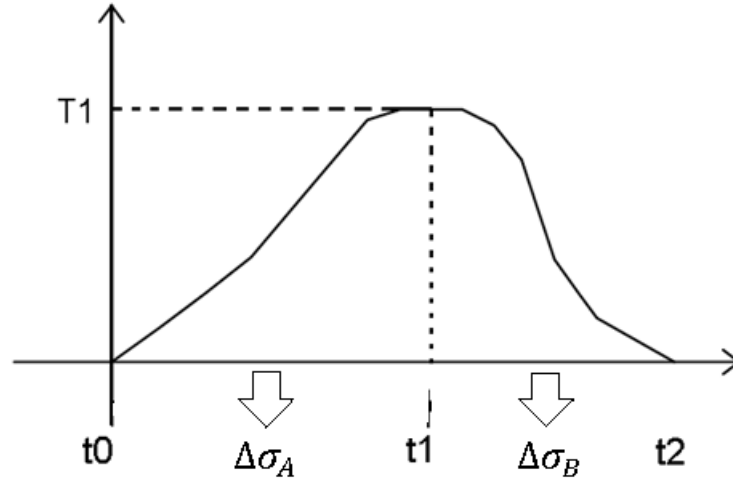


Figura 12. Aquecimento e resfriamento do concreto da viga

A Equação 11 fornece a tensão na estrutura:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (11)$$

Não há protensão no exemplo e a variação de tensão é dada pela Equação 12:

$$\Delta\sigma = E(\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^0) \quad (12)$$

Sendo $\Delta\varepsilon^0$ o tensor de deformações inelásticas e $\Delta\varepsilon$ o tensor de deformações mensuráveis. Como no exemplo a viga é biengastada, as deformações mensuráveis são nulas, e o único componente das deformações inelásticas é o térmico, assim, para o primeiro trecho, a variação de tensão é dada na Equação 13:

$$\Delta\sigma_A = E_A(0 - CDT \cdot \Delta T_A) = -E_A \cdot CDT \cdot \Delta T \quad (13)$$

Sendo CDT, o coeficiente de dilatação térmica e $\Delta T_A = T_1 - T_0$. No segundo trecho, a formulação é semelhante, mas o $\Delta T_B = -\Delta T_A = -\Delta T$ como na Equação 14:

$$\Delta\sigma_B = E_B \cdot CDT \cdot \Delta T \quad (14)$$

Somando os dois trechos tem-se o que é mostrado na Equação 15:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_A + \Delta\sigma_B = (E_B - E_A) \cdot CDT \cdot \Delta T = \sigma \quad (15)$$

Se não houvesse evolução das propriedades mecânicas, essa variação de tensão seria nula, mas como o módulo de elasticidade evolui proporcionalmente com a

hidratação, então $E_B \setminus E_A$. Logo, há uma resultante positiva. Se essa tensão resultante superar a resistência à tração para aquele grau de hidratação, $f_t(\xi)$, a viga vai fissurar.

Esse exemplo simples mostra o que acontece em estruturas massivas que possuem restrições estruturais.

2.4. Fluência

O modelo de fluência que será abordada nesse trabalho é o de SERCOMBE *et al.* [15]. A modelagem proposta por COUSSY [12] e ULM e COUSSY [13, 14] de que o concreto é um meio poroso reativo também é pressuposto desse modelo. O autor apresenta em seu trabalho detalhamentos sobre a formulação termodinâmica por trás do modelo, que, consiste em dividir a fluência em fluência a curto prazo (ε^{ve}) e fluência a longo prazo (ε^f), como mostrado nas Equações 16 e 17 a seguir.

$$J = \varepsilon / \sigma_0 \quad (16)$$

$$dJ = dJ^{ve} + dJ^f \quad (17)$$

Sendo dJ^{ve} o incremental de fluência curto prazo e dJ^f o incremental de fluência longo prazo.

A componente de curto prazo deriva da evolução do processo de microdifusão, e sua magnitude depende do estado de hidratação do material. A cinética também depende do estado de hidratação do tempo característico $\tau = \tau(\xi)$, que não é constante. BAZANT *et al.* [26] apresenta um modelo viscoelástico através da Equação 18:

$$\tau(\xi) \frac{dJ^{ve}}{dt} = \frac{1}{\kappa f(\xi)^2} - J^{ve} \quad (18)$$

Sendo $f(\xi)$ uma função de crescimento do grau de hidratação e $\kappa = \partial A_w / \partial w$ com A_w sendo a força termodinâmica associada a difusão da água e w a massa de água. O valor assintótico final é atingido quando $J^{ve} = J_{\infty}^{ve}$, quando na Equação 19:

$$J_{\infty}^{ve} = \frac{1}{\kappa f(\xi)^2} \quad (19)$$

Este processo chega fim quando sua derivada se anula ($\dot{J}^{ve} = 0$). $J_{\infty}^{ve}(\xi)$ define a influência do processo de hidratação na magnitude da fluência a curto prazo. $J_{\infty}^{ve}(\xi)$ e o tempo característico $\tau(\xi)$ são as duas funções que governam a fluência a curto prazo.

A componente de longo prazo provém do deslocamento proveniente da quebra de ligação na zona de adsorção (microprotensões) causado por cargas externas [26]. Essa microprotensão é dada pela Equação 20:

$$S = S_0(\xi) - H \cdot \gamma \quad (20)$$

Sendo S_0 a força de microprotensão para um dado estado de hidratação do material ξ ; H uma constante semelhante a módulo de *hardening/softening* em plasticidade; γ o deslizamento viscoso.

A seguinte relação que representa a taxa de evolução do fluxo viscoso é dada pela Equação 21:

$$\frac{dJ^f}{dt} = \frac{1}{\eta_f(S)} \quad (21)$$

Sendo $\eta_f(S)$ a viscosidade em função do microprotensão S , e esta dada pela Equação 22:

$$\frac{1}{\eta_f} = \frac{1}{\eta_{f,0}} \exp \left[-\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\bar{T}} \right) \right] \quad (22)$$

Com U/R uma relação de energia de ativação diferente daquela utilizada na hidratação. Pode ser tomada por 2700K [26]. E o termo $1/\eta_{f,0}$ é dado para quando $T = \bar{T}$, o que reflete a natureza termoativada da fluência a longo prazo, sendo $\bar{T}$ a temperatura de referência em que foram realizados os ensaios.

3. ESTUDOS DE CASOS DE FISSURAÇÕES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS MASSIVAS DE CONCRETO

3.1. Barragem de Corbara, Itália

Constituída de blocos de contraforte, a barragem de Corbara foi finalizada em 1968. Finas fissuras apareceram nos dois lados do contraforte já no final da construção e 4 das 18 fissuras observadas, transpassavam-no lado a lado (de montante para jusante). Injeções foram executadas para remediar a situação na época.

Em 1972, 4 anos depois do enchimento do reservatório, as fissuras existentes se estenderam em comprimento e mais fissuras finas surgiram. Então o reservatório foi esvaziado para 70% da profundidade máxima.

Por análises de elementos finitos, os pesquisadores concluíram que nos blocos fissurados houve uma tendência de concentração de tensões de tração nas extremidades das fissuras; o aumento da fricção com o enchimento do reservatório alivia essas tensões de tração; se uma fissura se estende até a face de jusante do bloco, ocorrem tensões de tração de 2,5 a 3,0 MPa perto da base da fissura, indicando falha progressiva da parte a jusante do contraforte.

Em 1973, ensaios com modelos geomecânico-estruturais de um bloco típico dessa barragem foram feitos por ISMES (*Experimental Institute for Models and Structures*). Tais ensaios confirmaram os resultados antes apresentados pelas análises prévias de MEF. Com adicional sobrecarga, mostrou-se que, com 2,5 vezes a pressão hidrostática, deformações plásticas seriam observadas nas extremidades superiores das fissuras. As principais razões para fissuração foram: grande calor de hidratação e subsequente resfriamento desproporcional [27].

3.2. Barragem de Alcântara, Espanha

A barragem de Alcântara, na Espanha, possui 130 m de altura do tipo gravidade aliviada e foi finalizada em 1969. É constituída de 19 blocos não monolíticos, uma vez que há uma junta de contração entre a cabeça e o apoio. Poucas fissuras foram observadas e medidas de controle bastante rígidas foram aplicadas. Apesar disso, uma delas não foi notada nem monitorada e apresentou comportamento vertical e abertura de 4 a 7 mm, em noites frias ou dias quentes. Essa fissura cortou a face de montante de um dos blocos de ponta a ponta até a base, de 12 a 14 m de altura.

Diversas medidas foram adotadas para estabilizar essa fissura, entre elas, injeção de resina epóxi, e os resultados foram satisfatórios. Extraíram-se testemunhos horizontais em diversas alturas, os quais provaram que a resina penetrou não somente a fissura principal, mas também outras bem menores, revelando que a abertura foi fechada perfeitamente [27].

3.3. Barragem de Ancipa, Sicília, Itália

A Barragem de Ancipa, na Sicília, Itália, é uma barragem de gravidade aliviada, construída de 1949 a 1952. Os blocos foram construídos com 2 juntas de contração parcialmente curvilíneas. Todos os 9 blocos da barragem sofreram fissuração, sendo que, foram mais significativas nos mais altos. A abertura máxima foi de 2 mm, as fissuras eram verticais e transpassavam o contraforte. Elas se estabilizaram após um certo tempo, mantendo deste modo, o reservatório 5 m abaixo da profundidade normal.

As causas da fissuração são atribuídas à retração do concreto diante das altas amplitudes térmicas e baixa umidade. Recalque da fundação também é uma hipótese.

Análises do ISMES (*Experimental Institute for Models and Structures*) indicam que a barragem é segura e a única medida utilizada para remediar essa patologia foi a vedação das fissuras com asfalto [27].

3.4. Barragem do Lago Hodge, Califórnia, EUA

A Barragem do Lago Hodge, Califórnia, EUA, é uma barragem de arcos múltiplos que foi construída em 1917 e possui 41 m de altura. As primeiras fissuras foram observadas em 1921 e abriam no inverno e fechavam no verão. Não foi possível correlacionar a abertura das fissuras com o nível do reservatório, mas as observações mostravam que a abertura das fissuras estava aumentando continuamente, variando de 6 a 9 mm. Em 1936, os contrafortes foram reforçados com barras de aço e concreto armado [27].

3.5. Barragem de Olef, Alemanha

Barragem de contraforte que foi construída entre 1955 e 1958 e possui 54 m de altura. No total são 16 blocos feitos de concreto simples e os blocos mais altos possuem uma junta de contração entre a cabeça e o contraforte.

As primeiras fissuras apareceram em 1958 no contraforte antes mesmo do reservatório encher. Elas vieram em consequência dos efeitos da temperatura e da retração autógena no contraforte e também devido às restrições impostas ao contraforte. As fissuras foram causadas pelo resfriamento após o calor gerado pela hidratação do cimento. Para remediar essa situação, foi construída uma parede de concreto armado ao longo das partes fissuradas e uma parede entre os contrafortes [27].

3.6. Barragem de Gioveretto, Itália

Essa barragem de 81 m é de blocos de contraforte e foi construída de 1952 a 1956. Os blocos foram construídos de forma monolítica, ou seja, sem juntas de contração.

Por volta de 100 fissuras foram detectadas em todos os 17 blocos e 73 delas transpassavam o contraforte. As fissuras eram majoritariamente subverticais, e localizadas na parte inferior do contraforte. Em 1979 as juntas ainda estavam se estendendo em um ritmo de 1 m por ano. A causa da fissuração se atribui aos ciclos de temperatura e recalque das fundações. As fissuras eram monitoradas regularmente e a medida corretiva tomada foi a vedação das fissuras e extensiva injeção nas fundações. A barragem é considerada segura pelas autoridades [27].

3.7. Barragem de Fedaia, Itália

Barragem de contraforte construída de 1952 a 1956 com 56 m de altura com blocos monolíticos. Fissuras subverticais foram encontradas em 10 dos 18 blocos e todas elas se iniciaram na fundação e são apenas superficiais. A principal razão para a fissuração foi atribuída à retração do concreto durante o período de resfriamento, em virtude da diferença nas propriedades expansivas da rocha e do concreto. Foi feito monitoramento, mas nenhuma medida corretiva foi aplicada [27].

3.8. Barragem Upper Still Water, Salt Lake City, EUA

Barragem de gravidade com 90 m de altura, construída de 1986 a 1987. Os blocos foram construídos sem juntas de contração e nenhuma medida de pós-refrigeração foi utilizada.

A máxima temperatura medida in situ foi de 36°C, o que superou em 8°C a temperatura esperada. Nos 5 meses seguintes, o inverno gelado esfriou a crista até 5°C,

o que causou um gradiente de 31°C. Como consequência, a fissura se formou na crista e progrediu tanto para a face de montante quanto de jusante. Na primavera, 23 fissuras já haviam sido detectadas, com abertura máxima de 3 mm. Apenas uma se destoou e atingiu 6mm de abertura. Posteriormente, algumas alcançaram a fundação dos blocos.

Houve vazamento pela maior fissura no primeiro enchimento do reservatório e por isso, foi utilizada injeções de resina de poliuretano hidrofílico para vedar a fissura, além de terem sido feitos outros furos na galeria para reduzir a pressão d'água. Tais medidas foram eficazes na redução da vazão de água pela fissura, mas depois um programa extenso de controle, monitoramento e reparo foi implementado [28].

3.9. Memorial aos Judeus Mortos na Europa, Berlim, Alemanha

O memorial é composto por 2711 blocos de concreto que representam os 6 milhões de Judeus Mortos. Os blocos, ocos e pré-fabricados, foram fixados sobre fundações superficiais [29]. Encontraram-se fissuras finas em 400 blocos, como mostrado na Figura 13. A principal causa atribuída foi a ampla variação térmica 2 anos após a construção, mas também há especulações de que as fissuras sejam provenientes das vibrações de construções adjacentes e até mesmo do trem [30].



Figura 13. Blocos de concreto – Memorial aos Judeus mortos na Europa – Berlim -

Fonte: FAIRBAIRN, E. M. R . (Acervo pessoal)

3.10. Vertedouro de Pequena Central Hidrelétrica, América do Sul

Vertedouro de uma pequena central hidrelétrica (PCH). Análise em MEF constatou que a causa das fissuras foram os gradientes térmicos originados pelo calor de hidratação do cimento. Não havia dados suficientes para a modelagem, o que é bastante comum, no entanto, os autores estimaram tais valores pendentes tendo como base materiais similares. FUNASHI e KUPERMAN [31] concluíram que as fissuras poderiam ser evitadas alterando a dosagem do concreto de modo a diminuir o conteúdo de cimento, além de reduzir a temperatura de lançamento do concreto.

4. UHE ITAIPU

4.1. Descrição do empreendimento

O aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu é um empreendimento binacional, que resultou da decisão tomada pelos Governos do Brasil e do Paraguai, na “Ata de Iguaçu”, de 22 de junho de 1966, de estudar e aproveitar conjuntamente o potencial hidráulico do trecho do Rio Paraná, que pertence aos dois países e se estende do Salto das Sete Quedas até a foz do Rio Iguaçu. Foram estudadas dez possibilidades de instalação da barragem e outras cinquenta alternativas de aproveitamento, mas optou-se pela construção de uma barragem única próxima ao extremo jusante, no local denominado Itaipu. Desta maneira, aproveitou-se todo o potencial disponível no trecho em um único projeto. Em 17 de Maio de 1974, instalava-se, na área de Itaipu, a entidade binacional Brasileiro-Paraguaia encarregada de construir e explorar o aproveitamento hidrelétrico de Itaipu, nos termos do Tratado de abril de 1973. A decisão de executar o projeto foi regulamentada no Tratado de Itaipu, assinado entre o Brasil e o Paraguai em 26 de abril de 1973. Em 17 de maio de 1974, criou-se a Itaipu Binacional, empresa responsável pela construção e operação do empreendimento. A energia produzida na Usina de Itaipu seria dividida em partes iguais entre os dois países, sendo reservado a cada um deles o direito de preferência de comprar a parte de energia destinada ao outro que por ele não fosse utilizada para seu próprio consumo. Os trabalhos preliminares de implantação da obra tiveram início logo após a constituição da Itaipu Binacional, e o início efetivo da construção do Projeto, em meados de 1975 [32].

Itaipu Binacional é líder mundial em produção de energia limpa e renovável, uma vez que já produziu mais de 100 milhões de MWh de produção anual e mais de 2.6 bilhões de MWh desde que começou a operar em 1984 [1].

A Usina possui 20 unidades geradoras, cada uma delas capaz de produzir 700MW de energia. Totalizando, a hidrelétrica tem 14000MW de potência instalada e provê aproximadamente 15% da energia consumida no Brasil e 90% da energia consumida no Paraguai. Na Figura 14 é apresentada a produção anual de energia dos últimos anos da UHE Itaipu. Ressalta-se o ano de 2016, que bateu recorde mundial de produção anual, com 103.098 GWh de produção [1].

PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA - GWh

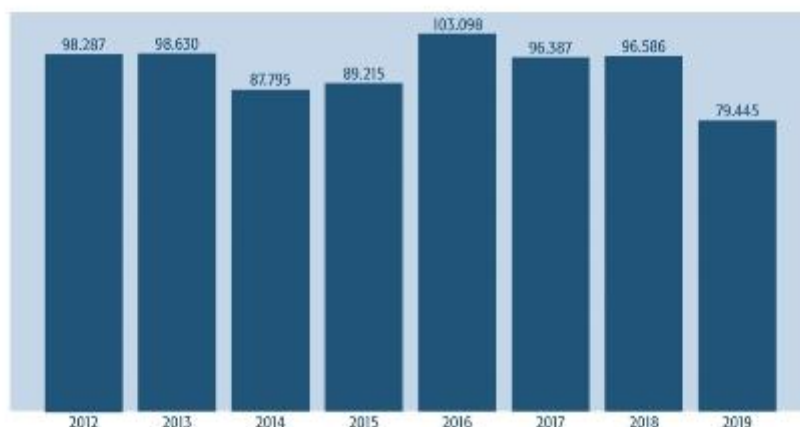
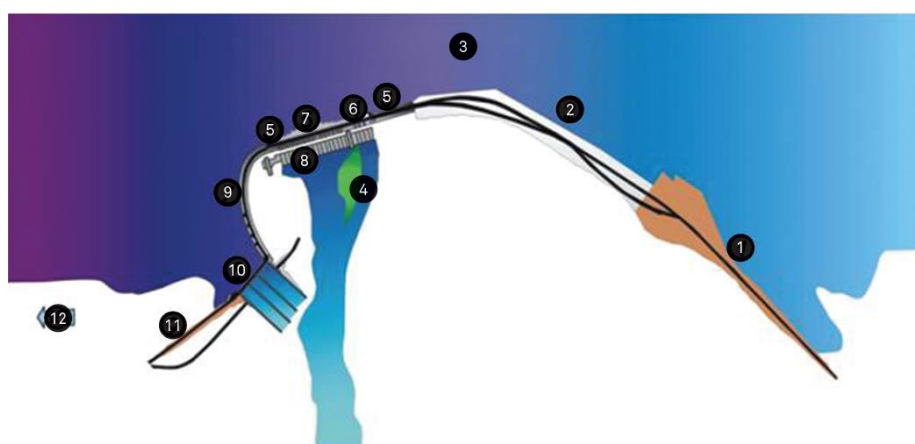


Figura 14. Produção anual de energia– Fonte: Itaipu.gov [1]

O reservatório de Itaipu inunda uma área de 1350 km² e é o sétimo maior do Brasil, mas apresenta o melhor índice de aproveitamento da água para produzir energia entre os grandes reservatórios brasileiros [1].

O barramento são as estruturas que servem para conter a água e obter um desnível de 120 m, o que permite a operação das turbinas. O barramento se constitui de estruturas de barragens de terra, enrocamento e de concreto. No total, são 7.919 m de comprimento, altura máxima de 196 m e cota de coroamento a 225 m. A planta geral do empreendimento é apresentada na Figura 15.

Planta Geral



1 Barragem de terra esquerda	5 Barragens de ligação	9 Barragem lateral direita
2 Barragem de enrocamento com núcleo de argila	6 Estrutura de desvio	10 Vertedouro
3 Nível do reservatório El. 220 m	7 Barragem principal	11 Barragem de terra direita
4 Nível do canal de fuga El. 105 m	8 Casa de força e áreas de montagem	12 Dique de Hernandarias

Figura 15. Planta Geral UHE Itaipu – Fonte: ANDRIOLO e BETIOLI [32]

4.2. Aspectos gerais da construção

Durante sua construção, foram consumidos 12,3 milhões de metros cúbicos de concreto. A concretagem foi muito rápida para a dimensão da obra, que equivale em termos de quantidade de concreto em aproximadamente 210 estádios do Maracanã [1], ou 7.000 prédios de 10 andares

O volume concretado em um dia chegou a 15.000 m³ e em um mês, 340.000 m³. Para garantir adequada e contínua oferta dessas altíssimas demandas, foram instalados 4 centrais de britagem, 2 em cada margem, para produzir agregados e 6 centrais de concreto, com uma capacidade de produção de 180 m³/h. Além disso, o canteiro industrial também estava equipado com 2 moinhos de clínquer, caso as produtoras brasileiras e paraguaias não dessem conta de atender à demanda de 500 mil toneladas de cimento/ano, o que felizmente não aconteceu [32]. Na Tabela 1 são apresentados alguns eventos principais que envolveram volume vultoso de concreto e a média de concretagem adotada nessas etapas do processo construtivo.

Tabela 1. Cronologia dos principais eventos de concretagem da UHE Itaipu

Período	Objetivo	Serviços
out/1977 a out/1978	Construção de estrutura de controle de desvio até a elevação mínima que permita a abertura do canal de desvio	Cerca de 750.000 m ³ de concreto com média de 60.000 m ³ ao mês com máximo de 110.000 m ³
out/1978 a out/1979	Abertura do canal de desvio e início da construção no leito do rio	Cerca de 3,15 milhões de m ³ de concreto, com média de 185.000 m ³ /mês
out/1979 a out/1982	Concretagem intensa na Barragem Principal e na Casa de Força (localizadas no leito do rio) e no Vertedouro e Barragem Lateral Direita (à margem direita)	Média mensal de 225.000 m ³ /mês com máximo de 300.000 m ³ /mês de um subtotal 4,90 milhões de m ³
ago/1982 a ago/1984	Concentração de concretagem na Barragem Principal e na área de montagem central, Casa de Força e Vertedouro. Serviços na subestação da margem direita e remoção da ensecadeira de montante e tamponamento das adufas de controle no canal de desvio	Concretagem de um volume aproximado de 1,18 milhões de m ³ , com média mensal reduzindo de 180.000 m ³ para 30.000 m ³ /mês
jul/1984 a jul/1989	Concretagem dos blocos adjacentes à barragem de enrocamento, das unidades da casa de força localizadas no canal de desvio e fechamento da estrutura da Barragem Principal	Cerca de 650.000 m ³ de concreto com média de 25.000 m ³ /mês

Fonte: ANDRIOLO e BERTIOLI [32]

4.3. Construção dos blocos de contraforte

A barragem lateral direita e as barragens de ligação dos lados direito e esquerdo são de blocos de contraforte. A Figura 16 mostra os blocos de contraforte da barragem lateral direita.



Figura 16. Blocos de contraforte da barragem lateral direita - vista de jusante – Fonte: Autoria própria

A Barragem Lateral Direita começou a ser construída em Novembro de 1978, com os blocos D27 a D30. A altura das 3 primeiras camadas eram de 0,70 m, 1,50 m e 1,75 m e depois camadas de 2,50 m de altura. As primeiras 5 camadas deveriam ser concretadas com concreto B-210-f, ou similar de mesma resistência e as demais com A-140-f, ou similar [9]. Essa nomenclatura faz referência ao diâmetro máximo do agregado (A – 152 mm, B – 76 mm, C – 38 mm, D – 19 mm, C – 13 mm), mínima resistência requerida à compressão f_{ck} em kgf/cm², e idade do concreto em dias - f [32].

O ritmo de concretagem era de aproximadamente 1 camada a cada 7 a 10 dias, tempo de desforma de 7 dias. A média da temperatura ambiente era de aproximadamente 22°C [32].

A temperatura de lançamento do concreto na formas foi especificada em 7°C, para tanto foram instaladas 3 centrais de refrigeração. Diversas técnicas de pré-refrigeração foram adotadas: os agregados foram resfriados por aspersão de água a 2,5°C nas correias, água da mistura a 5°C, insuflação de ar frio a -17°C, gelo em escama a -10°C. Nenhuma técnica de pós-refrigeração foi adotada [32]. Na Figura 17 são mostradas algumas etapas da construção dos blocos de contraforte.



Figura 17. Construção dos blocos de contraforte – Fonte: ANDRIOLO e BETIOLI [32]

4.4. Fissuração nos blocos de contraforte

As primeiras fissuras foram notadas por inspeção visual em agosto de 1980 nos primeiros blocos concretados. Havia fissuras em 34 dos 47 blocos construídos além de cota de 190 m na margem direita. Havia também fissuras nas barragens de ligação do lado direito e esquerdo [33].

Estavam localizadas principalmente nos contrafortes e, às vezes, nas cabeças dos blocos de contraforte. Elas eram verticais, começavam na fundação e estavam localizadas nos terços à montante ou jusante da base, como se pode ver na Figura 18.

Tinham abertura média de 0,3 a 0,9 mm e as mais significativas tinham de 10 a 20 m de comprimento. Algumas transpassavam os blocos, embora nenhuma conseguiu separar completamente a cabeça do contraforte [33].

Na época, foi desenvolvido um programa de investigação e controle, que incluiu mapeamento das fissuras, extração de testemunhos de sondagem, ensaios de perda d'água e testes de cisalhamento, instalação de termômetros e monitoramento da abertura das fissuras, de acordo com BETIOLI *et al.* [33].

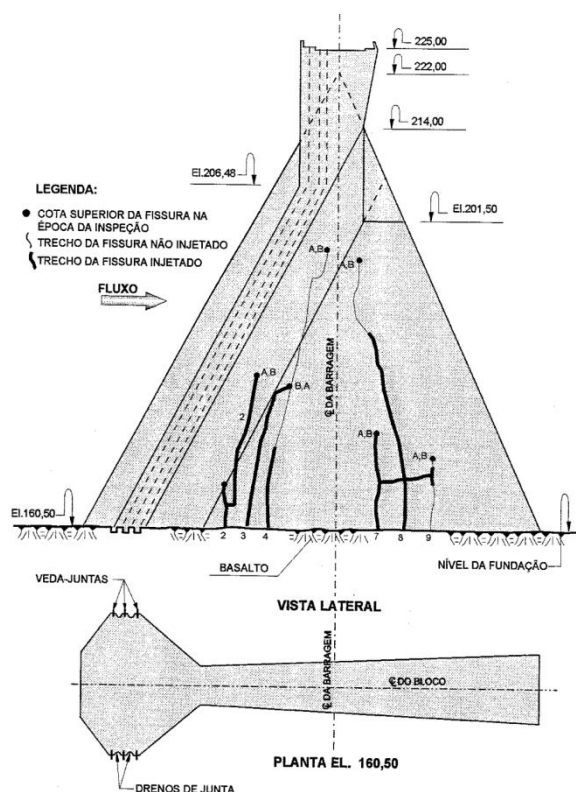


Figura 18. Localização das fissuras num bloco de contraforte típico – Fonte: BETIOLI *et al.*[33]

4.5. Medidas tomadas após a fissuração

Foi injetada resina epóxi nas fissuras e os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que se restaurou a monoliticidade dos blocos, a estrutura não apresentou mais riscos e o comportamento estrutural ficou semelhante ao dos blocos não fissurados [33].

Em outubro de 1980, quando se iniciou esse programa de recuperação, havia blocos totalmente concretados, parcialmente concretados e os que ainda não haviam sido construídos. Nos novos blocos, algumas mudanças de caráter estrutural foram feitas no projeto, para se evitar a formação dessas patologias. Dentre essas medidas

podem-se destacar: adoção de junta de contração paralela a face de montante, localizada entre a cabeça e o contraforte (Figura 19); utilização de um concreto com f_{ck} intermediário (B-180-f) nas primeiras 5 camadas, pois esse possui menor teor de cimento, logo alcançará menor temperatura; mudança na altura das 3 primeiras camadas para 0,75 m, 0,75 m e 1,00 m [9], que eram 0,70m, 1,50m e 1,75m.

Para os blocos construídos a uma altura inferior a 20 m, também foi possível inserir a junta de contração entre a cabeça e o contraforte. Adotou-se também o concreto B-180-f nas 2 camadas seguintes e A-140-f nas restantes. A espessura dessas camadas eram de 0,75 m, 0,75 m, 1,00 m e as próximas de 2,50 m [9].

Tais medidas foram suficientes para evitar novas fissuras. A medida mais importante, certamente, foi a adoção da junta de contração, uma vez que essa promove um alívio nas restrições da estrutura, permitindo que ela se desloque nesse espaço, evitando o surgimento de tensões internas que possam vir a fissurar a estrutura.

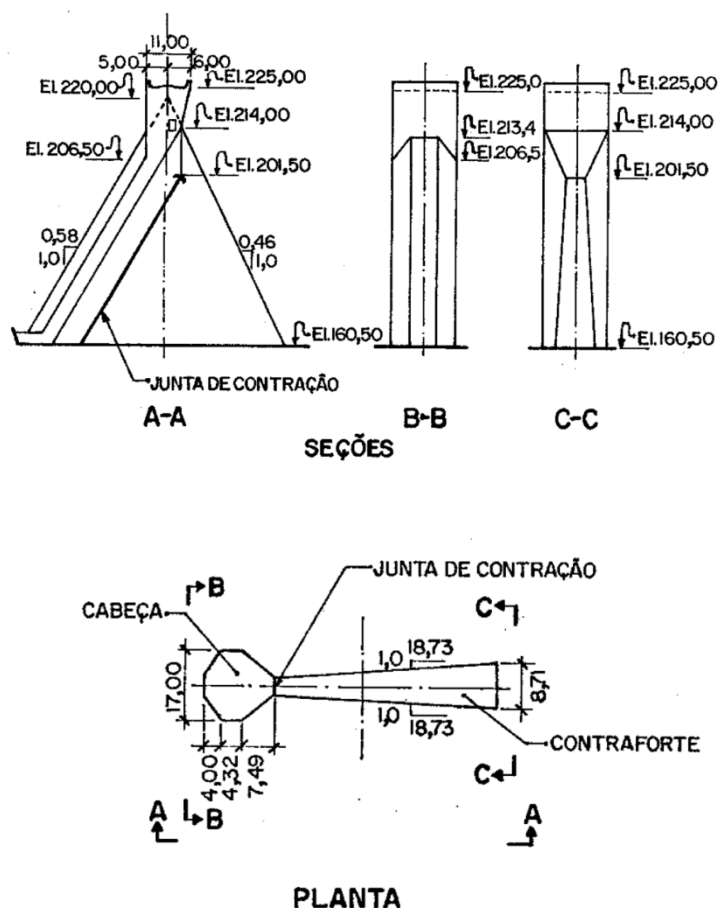


Figura 19. Junta de contração entre a cabeça e o contraforte – Fonte: ROSSO e PIASENTIN [9]

4.6. Análises de MEF anteriores

Simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) foram feitas em 1977, previamente à construção dos blocos de contraforte. Nesse estudo concluiu-se que a máxima tensão principal seria inferior à resistência à tração do concreto, o que não causaria fissuras na estrutura e não haveria necessidade de se adotar a junta nessa fase de projeto.

ROSSO e PIASENTIN [9] posteriormente compararam os dados obtidos pela instrumentação dos blocos e o resultado dessas simulações prévias. Ao fim, concluíram que a máxima temperatura medida foi de 36°C na cabeça e 34°C no contraforte aos 90 dias, enquanto esses estudos previam valores máximos de 28°C na cabeça e 26°C no contraforte. Também foi observado que a temperatura ambiente utilizada nas simulações de projeto foi menor que a real, assim como o módulo de elasticidade do concreto. ROSSO e PIASENTIN [9] também especulam outra possível causa para o surgimento dessas fissuras, não relacionada aos efeitos térmicos da hidratação. Os autores afirmam que, como os blocos foram construídos sem junta de contração, o peso da cabeça pode ter sido descarregado precocemente sobre o contraforte, que possui concreto bem jovem, sem grande resistência à tração, suficiente para resistir as tensões de cisalhamento dessa sobrecarga, além de que o contraforte possui dimensões bem reduzidas quando comparado à cabeça do bloco.

Outro estudo de MEF feito pela ENGEVIX-GCAP [34] após a fissuração revelou que a principal causa foi a excessiva queda de temperatura nas primeiras idades, principalmente no contraforte. Nas simulações prévias, os blocos foram simulados com apenas o concreto A-140-f, que possui baixo teor de cimento. Na realidade, nas primeiras camadas, foi adotado o concreto B-210-f, com maior teor de cimento, o que significa um maior calor de hidratação e, conseqüentemente, maior elevação adiabática.

5. METODOLOGIA

5.1. Programa DamThe

A construção da barragem de contraforte foi simulada utilizando o programa de Elementos Finitos DamThe, implementado em linguagem Fortran, desenvolvido pelo PEC/COPPE/UFRJ [10, 11].

Esse programa contém um modelo numérico de alto desempenho para a simulação dos acoplamentos termo-químico-mecânicos do concreto nas primeiras idades e pode ser usado para simular grandes construções, como, por exemplo, barragens e já foi verificado por diversos trabalhos dentro do ambiente do PEC/COPPE/UFRJ [10, 11, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25]. O modelo acopla, dentro da termodinâmica, diversos fenômenos que intervêm na reação de hidratação do cimento, como a exotermia da reação, a termoativação e a dependência das propriedades mecânicas e térmicas no avanço da reação de hidratação [22].

Possui 2 módulos, um térmico e um mecânico. O térmico permite o cálculo transiente da distribuição de temperaturas e hidratação no interior de estruturas massivas de concreto durante o endurecimento do material, considerando a exotermia e termoativação da reação de hidratação. Assim, a quantidade de calor gerada em um dado tempo depende da evolução da reação de hidratação, que depende do histórico de temperatura da massa de concreto. O módulo mecânico representa o acoplamento termoquímico-mecânico, em que a partir do que foi fornecido no módulo anterior, pode-se determinar o histórico de tensões, deslocamentos e potencial de fissuração do concreto, considerando a retração de origem térmica e a evolução das propriedades do material. O programa também permite a construção por camadas, considerando variações de geometria e condições de contorno, com o tempo decorrido desde o início da simulação. Além disso, também é levado em consideração o peso próprio da estrutura no decorrer de sua construção [23].

5.2. Índice de fissuração

O principal resultado obtido nas simulações, além do campo de temperatura nos blocos de contraforte, foi o índice de fissuração. Esse representa uma tendência à fissuração por tração em um certo ponto, num determinado instante de tempo na simulação. Como se pode ver na Equação 23 abaixo:

$$I_{cr}(x, y, z, t) = \frac{\langle \sigma_1(x, y, z, t) \rangle^+}{f_t(\xi(x, y, z, t))} \quad (23)$$

Sendo $I_{cr}(x, y, z, t)$ = índice de fissuração; $f_t(\xi)$ = resistência a tração como função do grau de hidratação; σ_1 = máxima tensão principal de tração.

É válido ressaltar que, no programa, o índice de fissuração é calculado dentro do limite elástico do material, mesmo se o índice superar o valor de 1, o que significa que a tensão superou a resistência à tração e aquele ponto deveria ir para o comportamento plástico do material. O programa não computa comportamento de pós-fissuração com modelos de fissuração e, neste trabalho, a plasticidade também não será aplicada. Assim, o máximo valor que o índice chegará é 1, o que significa que se em algum momento aquele elemento fissurou. É usado um artifício para acumular esse índice, porque é possível que, em um passo de tempo posterior, a tensão diminua e aquele elemento apresente índice de fissuração menor que um, ou seja, a fissura estaria regredindo, o que, de acordo com o modelos adotados nesse trabalho, não deveria acontecer.

5.3. Metodologia para obtenção dos parâmetros de fluência pelo modelo de SERCOMBE [15]

Na seção 2.4 foi exibido o modelo de fluência de SERCOMBE *et al.* [15] e a metodologia utilizada na obtenção dos parâmetros empregados nesse modelo será apresentada a seguir.

O primeiro passo realizado foi traçar as funções de fluência J obtidas experimentalmente em ensaios de fluência, sendo o eixo das ordenadas multiplicado por 10^{-6} . Depois, aplicou-se a formulação do Bureau of Reclamation apud PACELLI [35] como na Equação 24. A Figura 20 apresenta as curvas de fluência no plano semi-log.

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + Fk(t') \cdot \ln(1 + t - t') \quad (24)$$

Sendo $J(t, t')$ = a função de fluência; $Fk(t')$ = coeficiente de fluência para o tempo de carregamento t' ; $E(t')$ = módulo de elasticidade no tempo de carregamento t' .

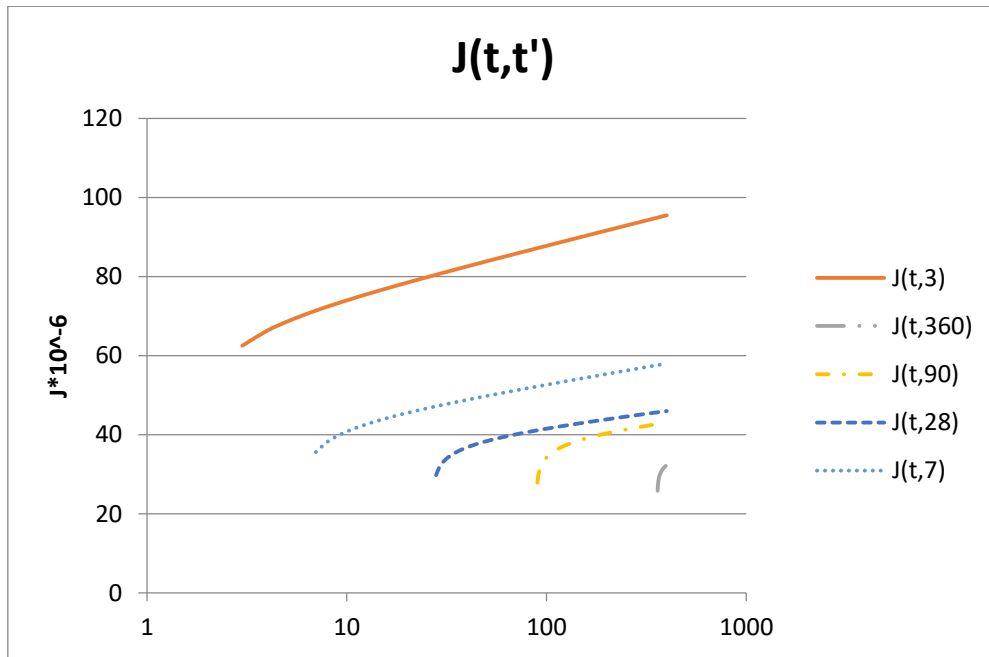


Figura 20. Curvas de função de fluência do concreto A-210-f de Itaipu

O segundo passo foi calcular as derivadas dessas curvas de forma numérica, como mostrado na Equação 25 e traça-las em eixo log-log como na Figura 21.

$$\frac{dJ(t,t')}{dt} \approx \frac{J(t,t') - J(t + \Delta t, t')}{\Delta t \rightarrow 0} \quad (25)$$

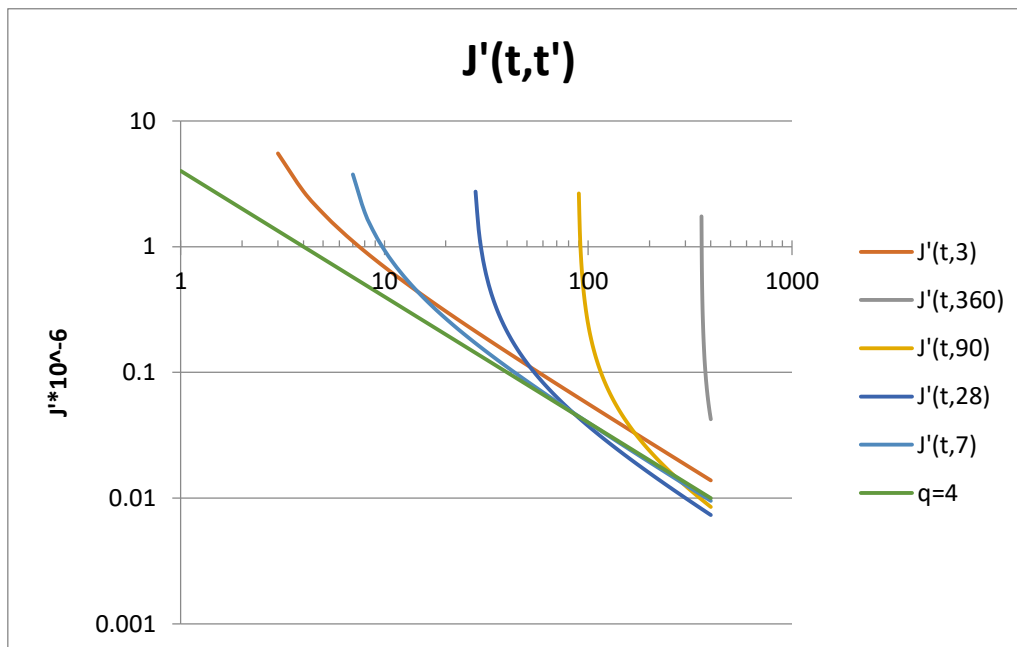


Figura 21. Derivadas da função de fluência do concreto A-210-f de Itaipu

Teoricamente, todas as curvas deveriam se juntar independentemente do tempo de carregamento, o que justifica a distinção em termos de cinética entre fluência a longo

prazo e curto prazo. Assim, pode ser estimada a taxa de fluência a longo prazo, como a inclinação da reta que tangencia essas derivadas pela Equação 26:

$$\frac{dJ^f}{dt} \approx \frac{q}{t} \quad (26)$$

Nota-se pela Figura 21 que na prática as curvas não se juntam numa reta exatamente. O que se fez foi pegar uma reta que passe por um valor médio entre elas, no exemplo, tem-se a reta, com o valor de $q = 4$.

Integrando a equação anterior e aplicando a constante t' , como na Equação 27:

$$J^f = q \cdot \ln \frac{t}{t'} \quad (27)$$

A força de microprotensão S é dada pela Equação 20:

$$S = S_0(\xi) - H \cdot \gamma \quad (20)$$

Sendo H um parâmetro constante similar ao módulo de *hardening/softening* em plasticidade. Experimentalmente, ele é obtido por esta relação expressa na Equação 28:

$$H = \frac{1}{q} \quad (28)$$

Sendo este q , a inclinação da reta que tangencia as derivadas da função de fluência, na Equação 26. O parâmetro S_0 , que é a força de protensão para um dado estado de hidratação ξ_0 , é calculado no curso da simulação numérica.

O objetivo agora foi obter a parcela J^{ve} de fluência a curto prazo, dada pela Equação 29.

$$J = J_0 + J^f + J^{ve} \leftrightarrow J^{ve} = J - J^f - \frac{1}{E(t=t')} \quad (29)$$

Ou seja, a parcela de fluência a curto prazo, é dada pela subtração da fluência longo prazo da fluência e também descontando a deformação instantânea elástica J_0 . Como pode-se ver na Figura 22.

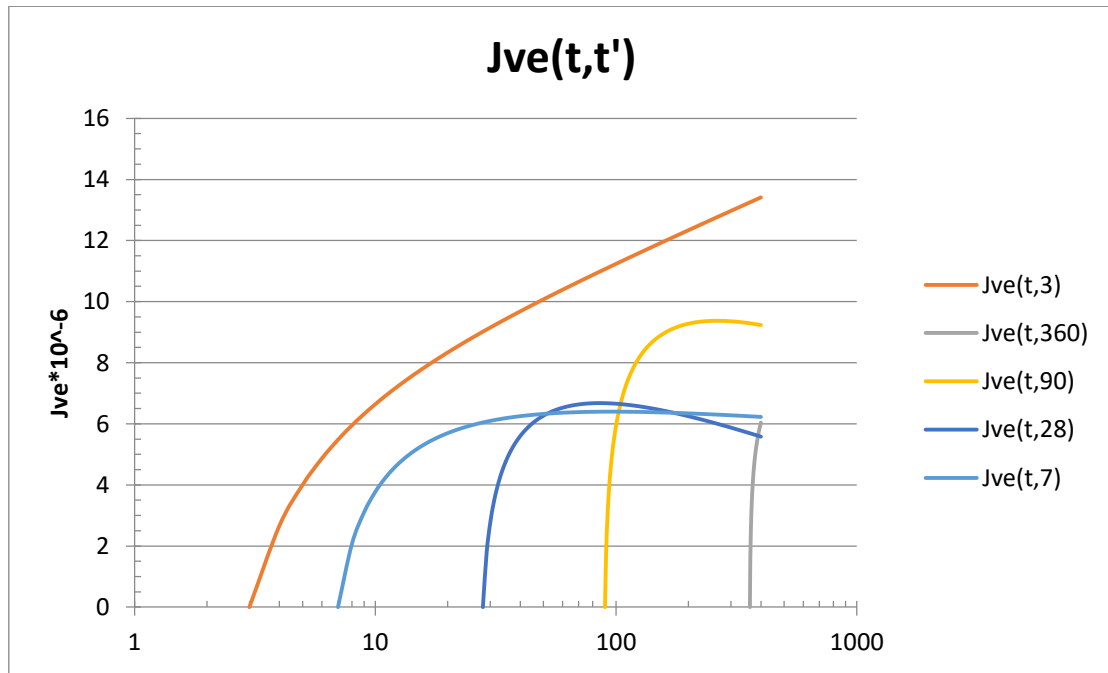


Figura 22. Componente de fluência a curto prazo eixo semi-log do concreto A-210-f

Para cada curva $J^{ve}(t,t')$, há um valor de $\tau_{w,\infty}$ e J_{∞}^{ve} . Na teoria deve se obter este último quando sua derivada se torna nula, mas por exemplo, na curva $J_{ve}(t,3)$, não foi possível obter esse resultado, então tomou-se simplesmente o maior valor no campo visível. Para as outras curvas, foi possível obter um valor assintótico.

Para se obter o valor de $\tau_{w,\infty}$, toma-se 63% de J_{∞}^{ve} , verifica-se o tempo em que tal valor foi verificado, e subtrai-se esse tempo do tempo de carregamento, como na Equação 30:

$$J(t - t' = \tau_{w,\infty}) = 0.63 \cdot J_{\infty}^{ve} \quad (30)$$

A Tabela 2 a seguir mostra como foram obtidos esse valores. O valor final adotado na modelagem para esse concreto A-210-f de Itaipu foi uma média entre o maior e o menor de cada: $\tau_{w,\infty} = 8.5$ dias e $J_{\infty}^{ve} = 9.75$.

Tabela 2. Valores obtidos nas curvas de J^{ve}

t'	J_{∞}^{ve}	$63\% J_{\infty}^{ve}$	τ_w
3	13.5	8.505	17
7	6	3.78	3
28	6.5	4.095	3
90	9.25	5.8275	10
360	6	3.78	0

Verificou-se se os parâmetros obtidos se encaixam nas curvas de fluência experimentais. A Equação 31 modela a fluência a curto prazo.

$$J^{ve} = J_{\infty}^{ve} \left[1 - \exp \left(- \frac{t - t'}{\tau_{w,\infty}} \right) \right] \quad (31)$$

Aplicando a Equação 31 e Equação 26 na Equação 27, tem-se como voltar a função J, como mostrado na Figura 23 com os respectivos coeficientes de determinação R^2 .

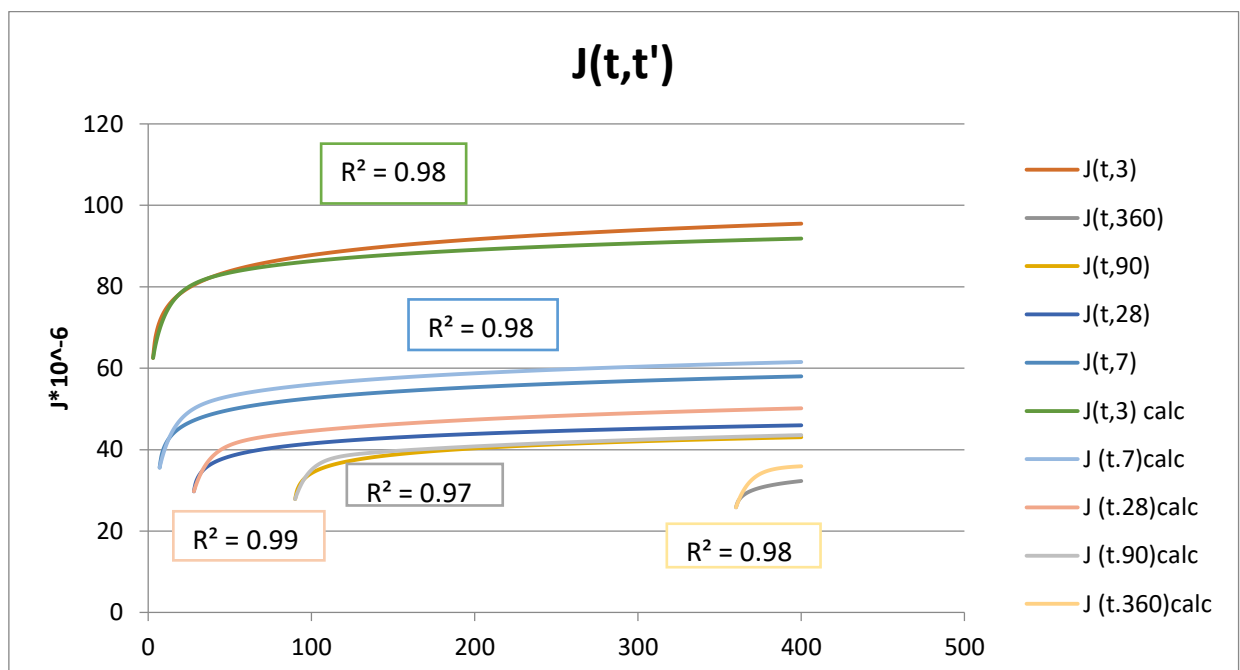


Figura 23. Comparação das funções de fluência obtidas pelo modelo e obtidas experimentalmente para o concreto A-210-f de Itaipu

Apesar dos coeficientes de correlação serem bem próximos de 1, e as curvas obtidas através dos parâmetros se ajustarem bem às curvas experimentais, nota-se que esse procedimento que acabou de ser descrito para obtenção dos parâmetros não é acurado.

6. SIMULAÇÃO DE UM BLOCO DE CONTRAFORTE GENÉRICO DA UHE ITAIPU – ANÁLISE ESTADO PLANO DE TENSÕES

6.1. Dados utilizados

Essa simulação em Estado Plano de Tensões foi feita com dados públicos disponíveis tanto na obra de ANDRIOLO e BETIOLI [32], quanto nos trabalhos de ROSSO e PIASENTIN [9] e BETIOLI *et al.*[33] do XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Tanto, o bloco modelado é genérico, assim como o mapa de fissuração apresentado.

De acordo com ROSSO e PIASENTIN [9], as primeiras 5 camadas foram construídas com o tipo de concreto B-210f e, em seguida, A-140f. O B-210f tem mais teor de cimento que o A-140f. Na Figura 24 é mostrada a disposição desses concretos e na Tabela 3 é apresentado um resumo de algumas características desses 2 concretos. Tais dados foram extraídos de ANDRIOLO e BETIOLI [32].

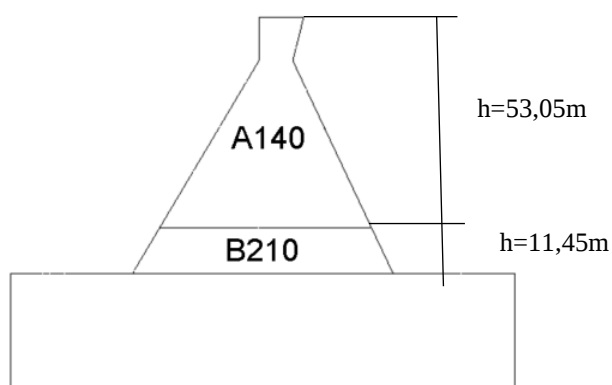


Figura 24. Localização dos concretos adotados nos blocos de contraforte

Tabela 3. Propriedades dos tipos de concreto A-140f e B-210f

Propriedade	B-210f	A-140f
Cimento (kg/m ³)	169	108
Cinza Volante (kg/m ³)	20	13
Água (kg/m ³)	108	85
a/c	0,54	0,67
Dmax (mm)	76	152
Resistência a compressão de projeto em 360 dias (MPa) $f_{ck,360}$	21	14
Condutividade térmica (W/m.K)	1,97	2,05
Calor específico (J/kg.K)	895,98	895,98
Coefficiente de expansão térmica	8×10^{-6}	8×10^{-6}
Massa específica (kg/m ³)	2605	2658
Módulo de Young (GPa)	43,69	44,77
Resistência a tração pelo ensaio brasileiro (MPa)	2,84	2,22
Coefficiente de Poisson	0,22	0,22

A evolução do Módulo de Elasticidade, da resistência à tração e da resistência à compressão com o grau de hidratação tem comportamento conforme a Figura 25.

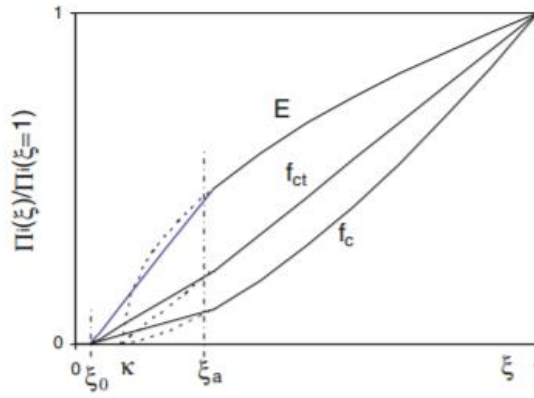


Figura 25. Evolução das propriedades mecânicas com o grau de hidratação – Fonte : FAIRBAIRN *et al.*[21]

Uma formulação simplificada pode considerar uma evolução linear das propriedades, conforme mostrado na Figura 26.

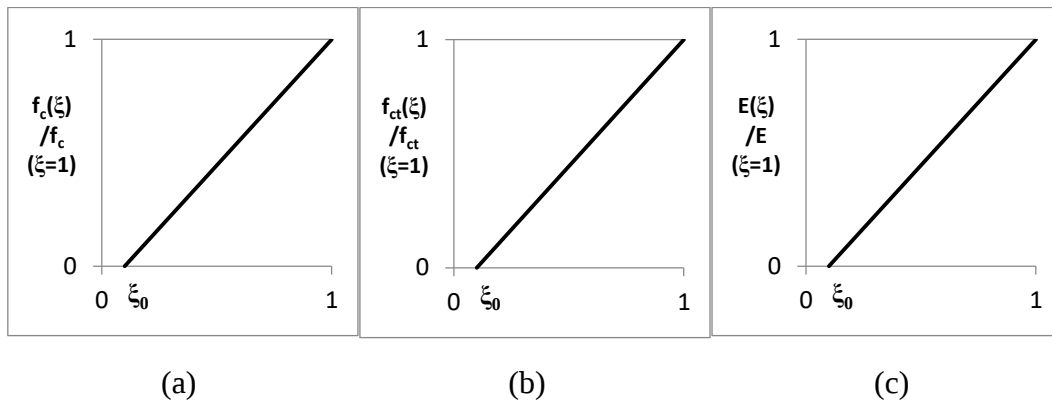


Figura 26. Modelo simplificado da evolução de propriedades mecânicas com o grau de hidratação a)Evolução da resistência à tração; b) Evolução da resistência à compressão; c) Evolução do Módulo de Elasticidade.

É válido ressaltar que tais propriedades mecânicas só começam a se desenvolver a partir do momento em que a mistura deixa de ser uma suspensão e passa a ter comportamento de um sólido [20]. Este tempo é chamado patamar de percolação ou tempo zero. No gráfico, o patamar de percolação é representado por ξ_0 , referente ao grau de hidratação correspondente a este tempo. No presente trabalho, este valor foi adotado como 0,1 em todas as simulações realizadas nesta e na próxima etapa.

DE FARIA [36] e FONSECA [37] proveram os dados para se traçar a curva adiabática desses tipos de concreto. Os dados foram ajustados em uma Função Hill, que como mostrado no trabalho de DE FARIA [36], prevê um ajuste adequado para curvas adiabáticas. Tal formulação é mostrada na Equação 32:

$$\Delta T^{ad}(t) = \Delta T_{\max} \cdot \frac{t^n}{k^n + t^n} \quad (32)$$

Em que $\Delta T_{\max}$ = máxima elevação de temperatura obtida no ensaio; t = tempo; k e n = parâmetros de ajuste.

Os parâmetros de ajuste utilizados nas curvas dos concretos são dados na Tabela 4 e a curva de elevação adiabática na Figura 27.

Tabela 4. Parâmetros da Função de Hill concretos B210 e A140

Parâmetro	B-210f	A-140f
ΔT^{ad}	25,6 °C	18,83 °C
T^{ini}	20,09 °C	7,21 °C
k	1,56767	1,82721
n	1,22362	1,11321

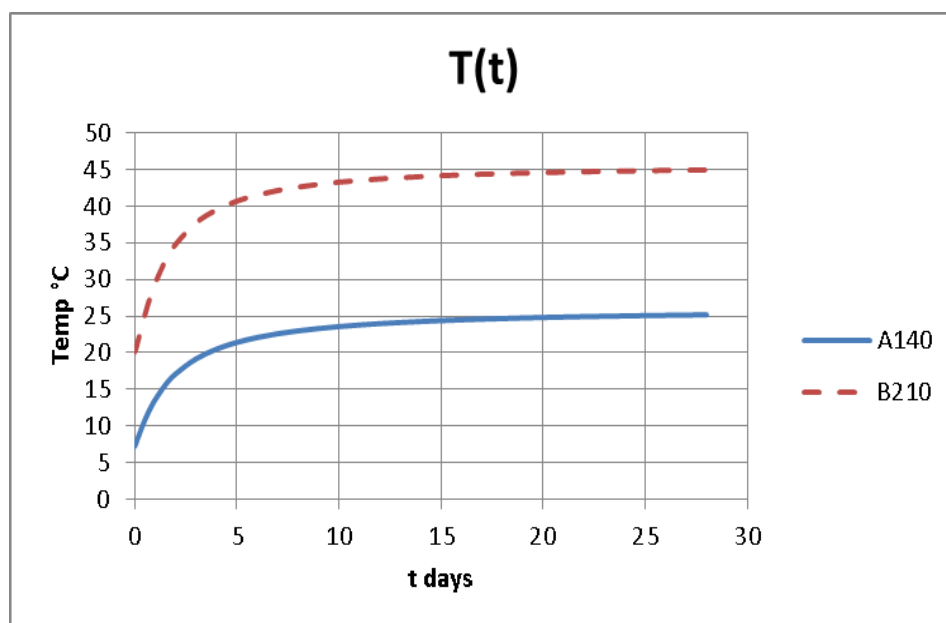


Figura 27. Temperatura dos ensaios adiabáticos dos concretos A-140 e B-210

É importante salientar que na Figura 27, o concreto B-210-f foi lançado a 20°C em condições de ensaio, com objetivo de prever a elevação adiabática. Na realidade as camadas lançadas com esse concreto foram lançadas a 7°C, como previa o projeto.

O valor da temperatura ambiente foi um valor constante de 22°C, de acordo com ROSSO e PIASENTIN [9].

O valor da troca de calor com o ambiente que o programa requer, na verdade, já engloba a convecção e a radiação térmica [38]. O valor atribuído nessa e em todas as simulações desse trabalho foi de 10 W/m².K. FRAGA [23] apresenta que na literatura esses valores costumam variar entre 5 e 23 W/m².K e toma esse mesmo valor de 10W/m².K como referência. É válido ressaltar que este parâmetro é difícil mensurar, pois depende de diversos fatores relacionados ao ambiente externo e à geometria da estrutura.

6.2. Malha e modelagem

A modelagem foi feita em 3D, com a espessura mínima de 20 cm correspondente a um elemento tetraédrico. A ‘fatia’ do bloco está assentada sobre uma rocha basáltica, com propriedade típicas. As primeiras 5 camadas são do concreto tipo B-210-f e as outras do A-140-f, como mostrado na Figura 28.

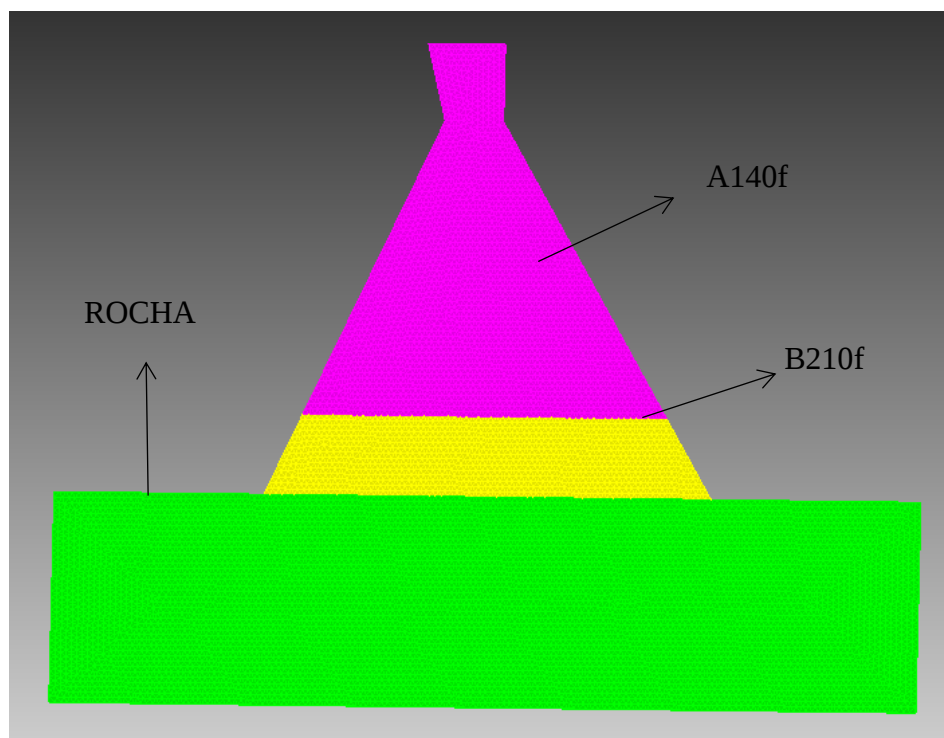


Figura 28. Modelagem do bloco de contraforte de Itaipu

Foi simulada uma situação de Estado Plano de Tensão, uma vez que esta ‘fatia’ do bloco estaria localizada no interior da massa de concreto, ou seja, estaria sujeita a condições adiabáticas, exceto no contorno. Há também restrições no mesmo plano em que há condição adiabática (plano saindo do papel), como pode ser visualizado na Figura 29 e Figura 30.

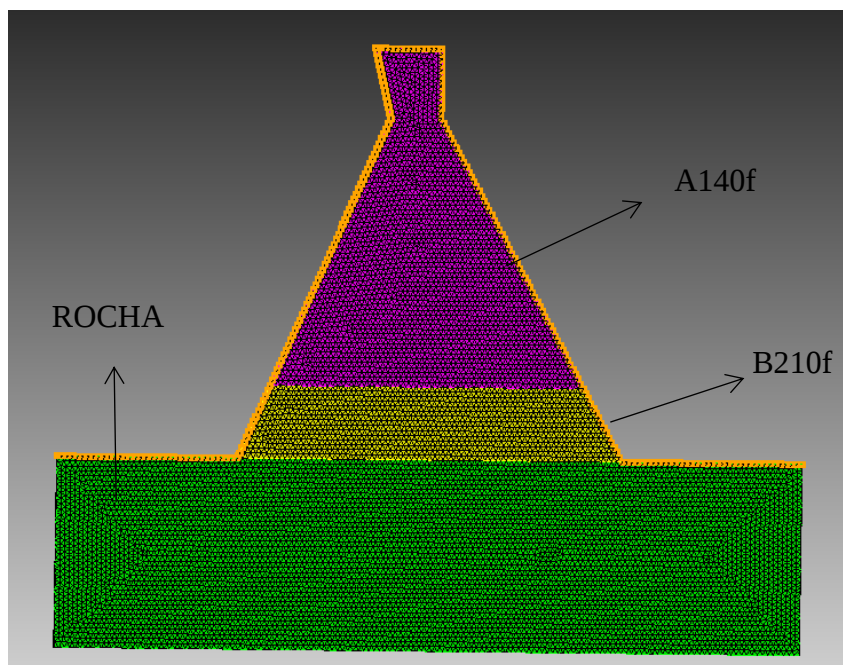


Figura 29. Condição de convecção da fatia do bloco de contraforte (em amarelo)

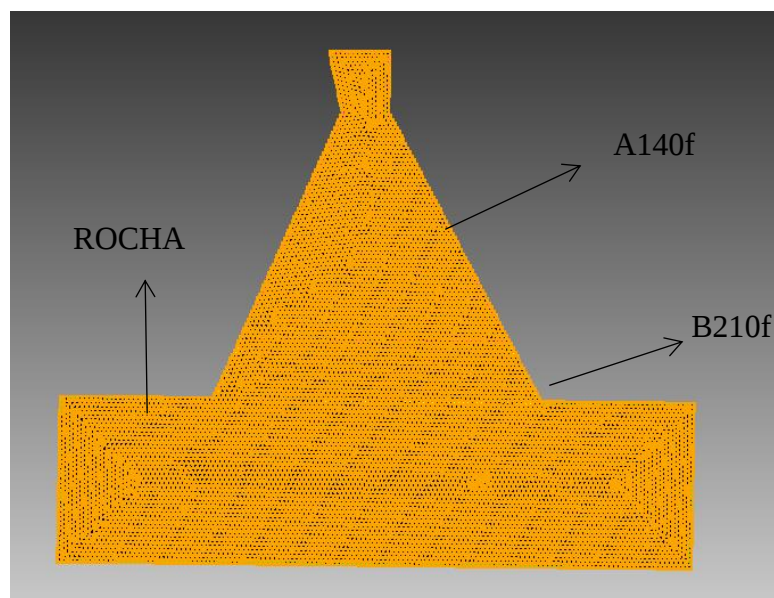


Figura 30. Condição de restrição no eixo Y (saindo do papel)

Foi utilizado o software Trelis para gerar a malha e esta foi composta de 17.735 nós e 51.879 elementos tetraédricos. A simulação foi sequencial e foi feita para um período de 2 anos com passos de tempo de 15 em 15 minutos. Foram extraídos resultados de evolução de temperatura e índice de fissuração.

6.3. Resultados obtidos

6.3.1. Evolução da temperatura

Alguns pontos da estrutura foram selecionados para se avaliar a evolução da temperatura com o tempo durante a simulação, levando-se em consideração a construção em camadas. O ponto n° 12370 foi escolhido por estar bem no centro da base do bloco e localizado em uma região que contém o concreto B-210-f. O ponto n° 15473 foi escolhido por estar próximo da transição dos dois tipos de concreto, o ponto n° 16666 e n° 13599 por estarem na região central da zona do concreto A-140-f. E o ponto n° 15486 por estar próximo à superfície. A localização desses pontos se encontra na Figura 31 e a evolução de temperatura na Figura 32.

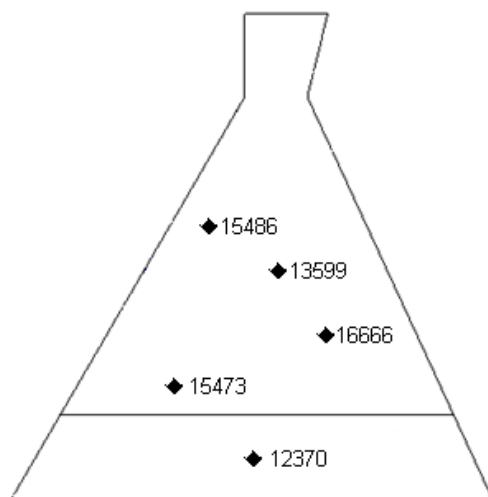


Figura 31. Localização dos pontos de observação da evolução de temperatura

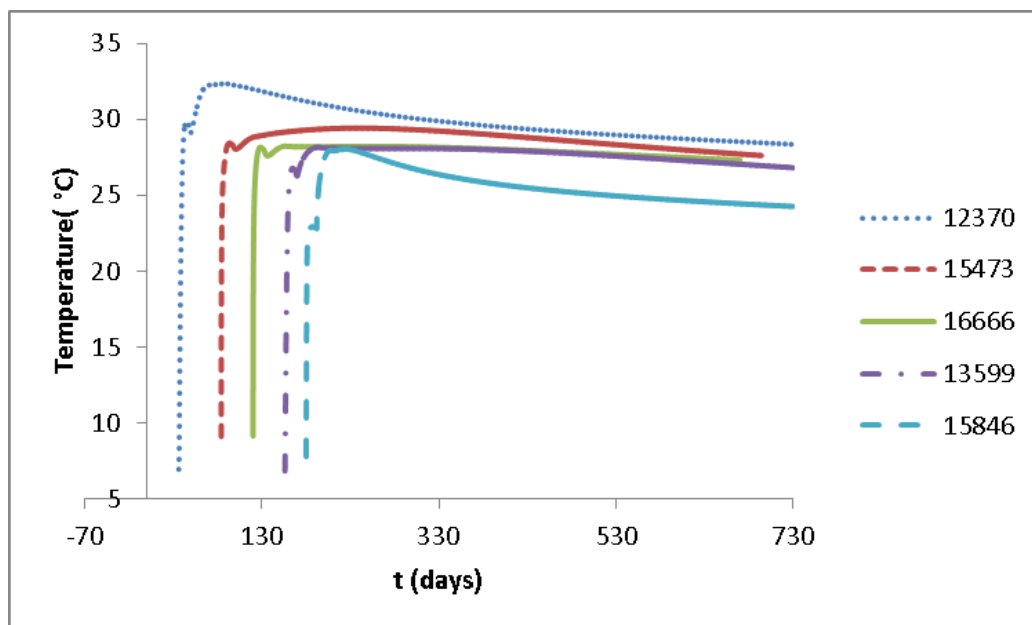


Figura 32. Evolução da temperatura dos pontos selecionados

É válido ressaltar que o ponto que atinge a temperatura máxima de 33,1 ° C está no meio das camadas inferiores, que foram construídas com o concreto B-210f. Este tipo de concreto tem mais conteúdo de cimento do que o das camadas superiores. As outras curvas têm picos menores de temperatura porque são feitas de concreto tipo A-140f.

6.3.2. Comparação entre temperatura e índice de fissuração ao longo do tempo

Juntamente com a elevação da temperatura, alguns elementos fissurados surgiam na estrutura. Algumas etapas de tempo importantes são mostradas na Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37, comparando o campo de temperatura e o desenvolvimento das fissuras através do índice de fissuração. Os dias apresentados foram escolhidos com base em marcos importantes, como: quando apareceu o primeiro elemento fissurado, quando houve o ponto de inflexão da temperatura, e também à medida que vão aparecendo novos elementos fissurados, que mostram o caminho que a fissura tenderia a aparecer.

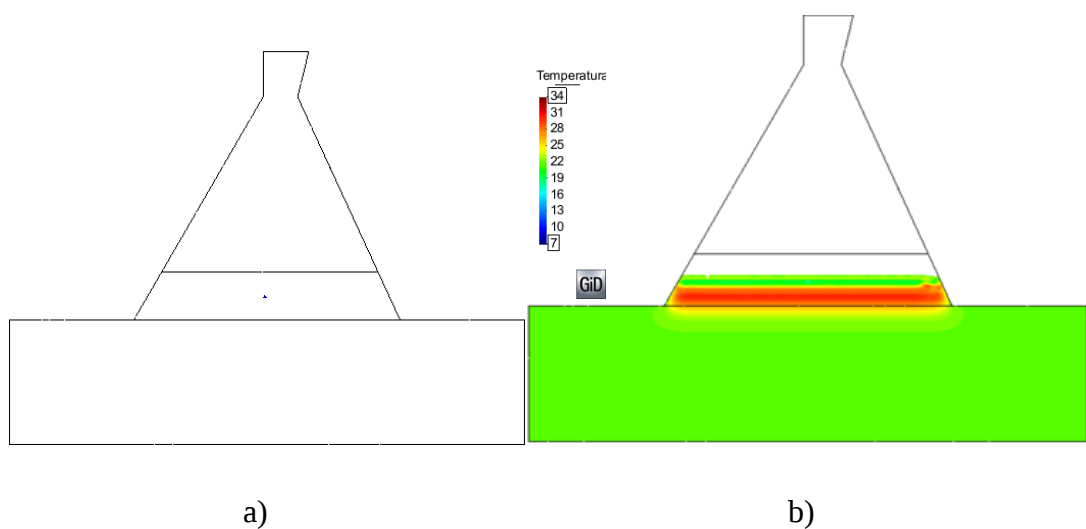


Figura 33. Resultados aos 38 dias: Temperatura Mínima = 18.599°C ; Temperatura Máxima = 30.17°C
a)Mapeamento do índice de fissuração b) Mapeamento térmico da evolução de temperatura

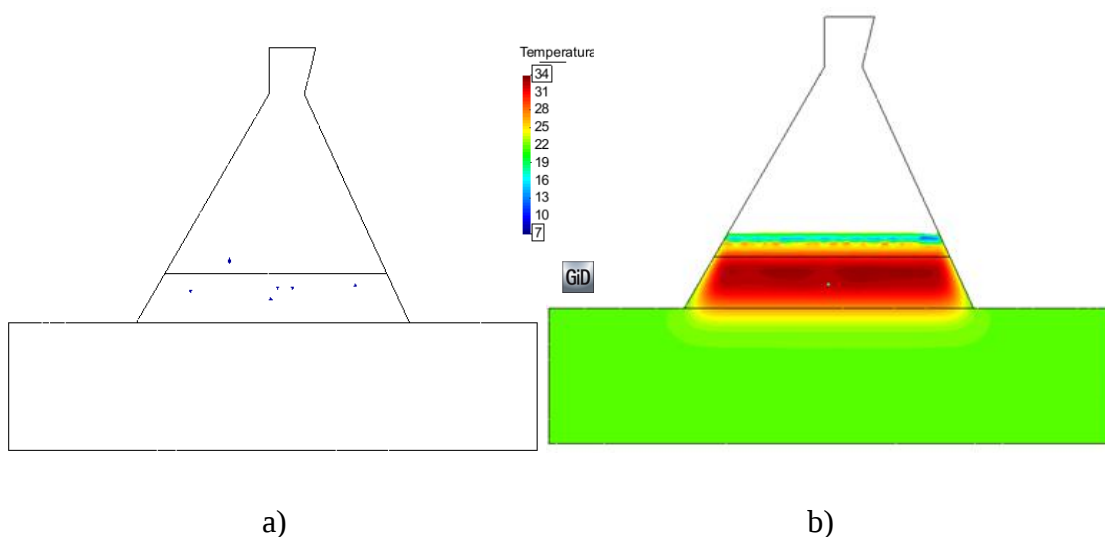
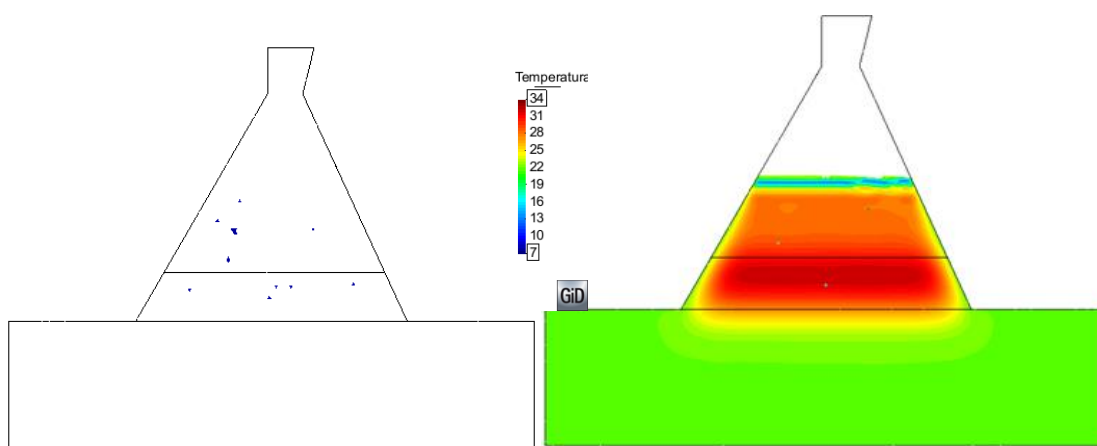


Figura 34. Resultados aos 85 dias: Temperatura Mínima = 12.552°C ; Temperatura Máxima = 33.121°C
a)Mapeamento do índice de fissuração b) Mapeamento térmico da evolução de temperatura

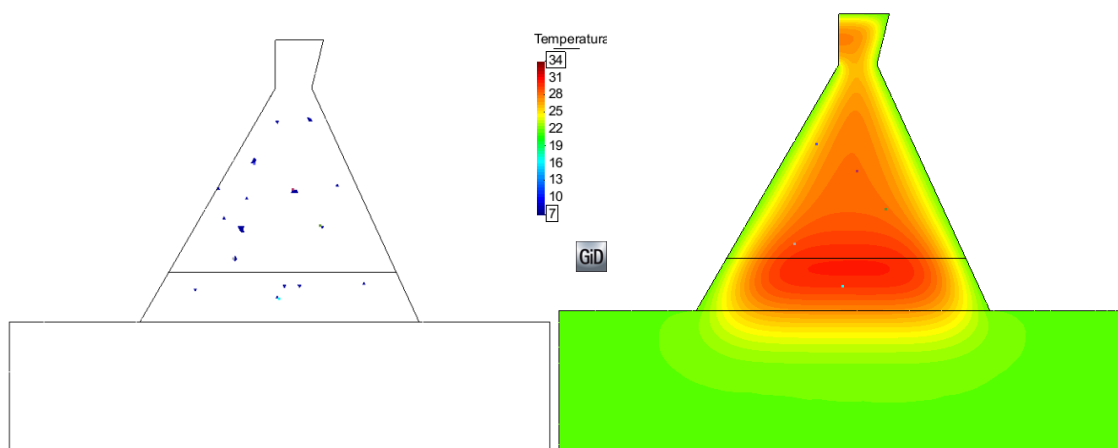


a)

b)

Figura 35. Resultados aos 145 dias: Temperatura Mínima = 12.613°C ; Temperatura Máxima = 32.219°C

a) Mapeamento do índice de fissuração b) Mapeamento térmico da evolução de temperatura



a)

b)

Figura 36. Resultados aos 365 dias: Temperatura Mínima = 21.922°C ; Temperatura Máxima = 30.198°C

a) Mapeamento do índice de fissuração b) Mapeamento térmico da evolução de temperatura

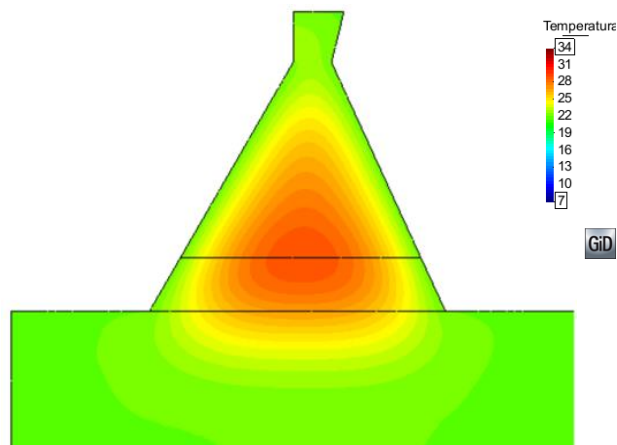


Figura 37. Resultados aos 730 dias: Temperatura Mínima = 21.869°C ; Temperatura Máxima = 28.941°C

O número de elementos fissurados em 365 e 730 dias permaneceu o mesmo e representa 3.85% dos elementos ativos nestas etapas. A temperatura máxima atingida aos 85 dias na simulação foi de 33.121°C, o que também foi constatado no relatório de ROSSO e PIASENTIN [9].

6.3.3. Índice de fissuração

O padrão de fissuração verificado na modelagem é semelhante ao observado *in loco*. A comparação entre esses padrões é apresentada na Figura 38.

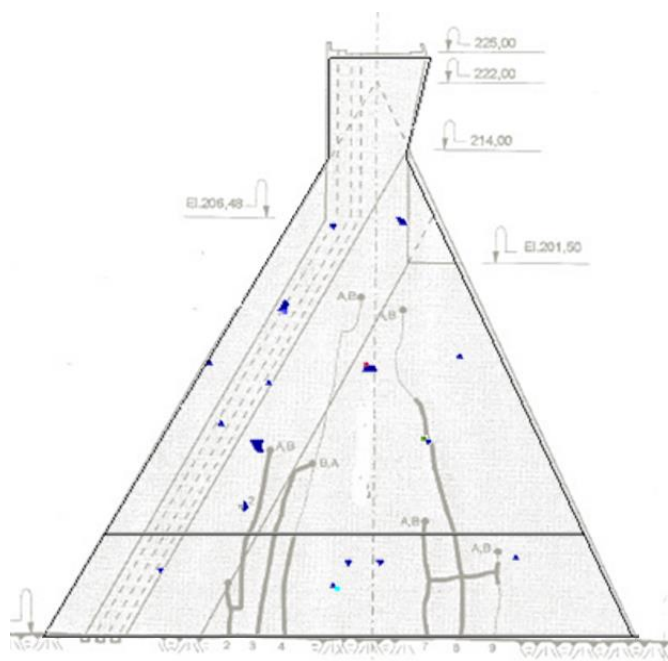


Figura 38. Comparação do padrão de fissuração – Fonte: adaptado de BETIOLI *et al.*

O resultado da modelagem mostrou um caminho vertical formado por elementos fissurados através do bloco, principalmente quando se observa a evolução dos elementos fissurados levando-se em consideração a construção por camadas. Tal comportamento é similar ao das fissuras presentes nos blocos, que também eram, em sua maior parte, verticais. É válido ressaltar que o índice de fissuração mostra apenas uma tendência de fissurar, não a evolução da fissura, uma vez que, no modelo, a estrutura trabalha apenas na região elástica e não há modelos de fissuração implementados no programa DamThe.

Apesar dessa análise em Estado Plano de Tensões ter apresentado bons resultados, não simula o efeito da diferença de geometria entre a cabeça e o contraforte, o que é importante para se verificar a possibilidade alternativa de essas fissuras terem origem mecânica. Além disso, não se modelou aqui nesta seção um bloco específico, mas sim um genérico, baseado em relatos de obras públicas. Também não se teve acesso à um histórico de temperatura ambiente, nem de um termômetro interno ao bloco para que os resultados de temperatura desenvolvida fossem comparados. Logo, se fez necessária uma nova análise, com maior riqueza de informações e características geométricas dos blocos de contraforte.

7. SIMULAÇÃO DO BLOCO DE CONTRAFORTE D38 – ANÁLISE 3D

Em uma visita técnica na UHE Itaipu, foram coletados dados importantes para a modelagem em 3D do bloco de contraforte de diversos relatórios internos da empresa. Foi escolhido o bloco D38, localizado na Barragem Lateral Direita, pelo fato de ele ser um bloco bem instrumentado, com 3 termômetros superficiais (TS-D-002, TS-D-003 e TS-D-004) e 1 termômetro interno (TI-D-001), como mostrado na Figura 39.

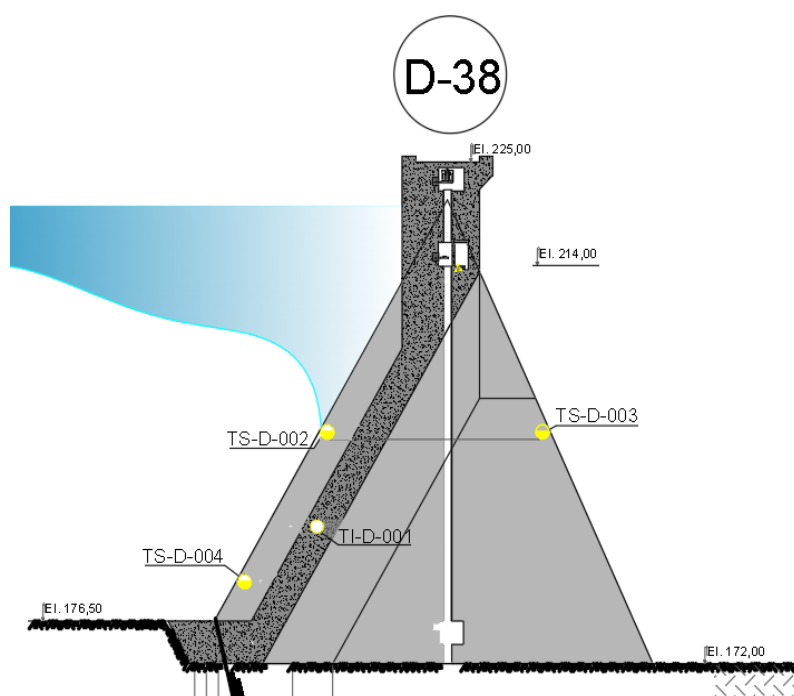


Figura 39. Posição dos termômetros do bloco D38 – Fonte: Itaipu [39]

7.1. Dados utilizados

De acordo com o documento sobre o acompanhamento das frentes de concretagem [40], a construção desse bloco se iniciou em Fevereiro de 1979 e finalizou em Setembro de 1979, totalizando 32 semanas de construção e uma média de 9 dias por camada. Na Tabela 5 está sintetizado o cronograma de construção desse bloco. Na última coluna, foi colocado o concreto que foi predominante utilizado naquela camada, uma vez que vários concretos eram adotados na mesma camada para preencher as partes, mas havia sempre a predominância de um tipo. Para simplificar a modelagem, a partir da 5ª camada, foi adotado apenas o concreto do tipo A-140-f, pois, mesmo que outros tipos de concreto tenham sido empregados nesse estágio, eles eram similares e com mesma resistência característica que o A-140-f, só diferenciando a dimensão máxima do agregado ($D_{máx}$).

Tabela 5. Cronograma de concretagem bloco D38

CAMADAS (m)	LIM INF (m)	LIM SUP (m)	ESPESSURA (m)	MÊS 1979	CONCRETO
172	171	172.75	1.75	fevereiro	A-210-F
174	172.75	174.25	1.5	fevereiro	A-210-F
176	174.25	176.5	2.25	março	A-210-F
179	176.5	179	2.5	março	A-210-F
181	179	181.5	2.5	março	A-140-F
184	181.5	184.5	3	abril	A-140-F
186	184.5	186.5	2	abril	A-140-F
189	186.5	189	2.5	abril	A-140-F
191	189	191.5	2.5	maio	A-140-F
194	191.5	194	2.5	maio	A-140-F
196	194	196.5	2.5	maio	A-140-F
199	196.5	199	2.5	junho	A-140-F
201	199	201.5	2.5	junho	A-140-F
204	201.5	204	2.5	junho	A-140-F
206	204	206.5	2.5	junho	A-140-F
209	206.5	209	2.5	julho	A-140-F
211	209	211.5	2.5	julho	A-140-F
214	211.5	214	2.5	julho	B-140-F
216	214	216.5	2.5	agosto	C-140-F
219	216.5	219	2.5	agosto	A-140-F
221	219	221.5	2.5	agosto	A-140-F
224	221.5	224	2.5	setembro	A-140-F
225	224	225	1	setembro	B-140-F

Fonte: Itaipu [40]

As dimensões da estrutura foram obtidas pelas plantas de forma do bloco D38 [41] e pela planta da disposição geral e características gerais dos blocos da barragem lateral direita [42]. O bloco foi então desenhado em 3D no AutoCad, com altura máxima de 54 metros, sendo as 4 primeiras camadas do concreto tipo A-210-f e as demais com A-140-f, como mostra a Figura 40.

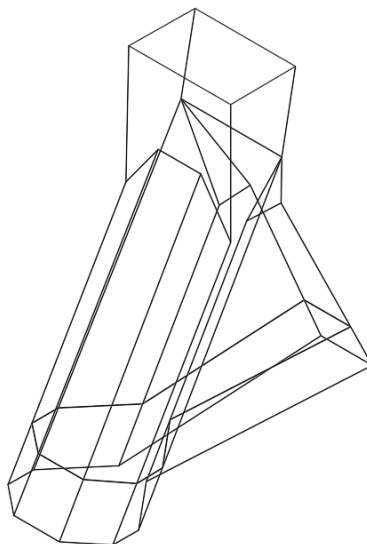


Figura 40. Bloco desenhado em AutoCad em 3D

Na Tabela 6 são sintetizadas as principais propriedades dos materiais que foram utilizadas na modelagem. Tais informações foram obtidas por coleta de dados em diversos Relatórios Internos de Itaipu [43, 44, 45, 46]

Tabela 6. Propriedades dos concretos utilizados no bloco D38

Propriedade	A-210f	A-140f
Cimento (kg/m ³)	162	108
Cinza Volante (kg/m ³)	19	13
Água (kg/m ³)	86	85
a/c	0.45	0.67
Dmax (mm)	152	152
Resistência a compressão de projeto em 360 dias (MPa) $f_{ck,360}$	21	14
Condutividade térmica (W/m.K)	1,6987	2,05
Calor específico (J/kg.K)	1029,95	1021,58
Coefficiente de expansão térmica	9×10^{-6}	9×10^{-6}
Massa específica (kg/m ³)	2622	2622
Módulo de Young (GPa)	41,76	44.70
Resistência a tração pelo ensaio brasileiro (MPa)	2,96	2.03
Coefficiente de Poisson	0,198	0.21
J_{∞}^{ve}	$9,75 \times 10^{-12}$	$14,25 \times 10^{-12}$
$\tau_{w,\infty}$ (dias)	8,5	10
H_V	0,25	0,14
$\bar{T}$ (°C)	20	20

Fonte: Itaipu [32, 43, 44, 45, 46]

Os parâmetros de ajuste utilizados nas curvas dos concretos são dados na Tabela 7 e a curva adiabática na Figura 41.

Tabela 7. Parâmetros da Função de Hill

Parâmetro	A-210f	A-140f
ΔT^{ad}	25,4 °C	16,54 °C
T^{ini}	7,87 °C	7.18 °C
k	2,598325	2,193955
n	1,528765	1,075983

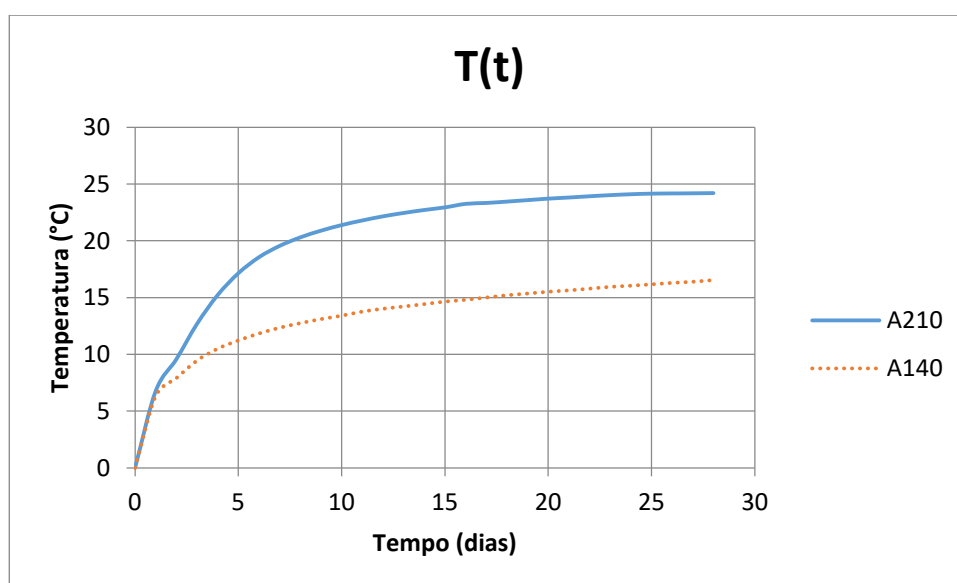


Figura 41. Temperaturas dos ensaios adiabáticos dos concretos A-140 e A-210

O bloco foi modelado como sendo engastado em uma rocha basáltica, para isso foram consultadas as propriedades da fundação também nessa coleta de dados [47].

A série histórica de temperatura também foi coletada nos arquivos de Itaipu e inserida no DamThe, como mostrada na Figura 42. A resposta do termômetro superficial, usado como temperatura ambiente em uma das simulações, também foi coletado nos arquivos de Itaipu, assim como do termômetro interno com a finalidade de comparação de resultados.

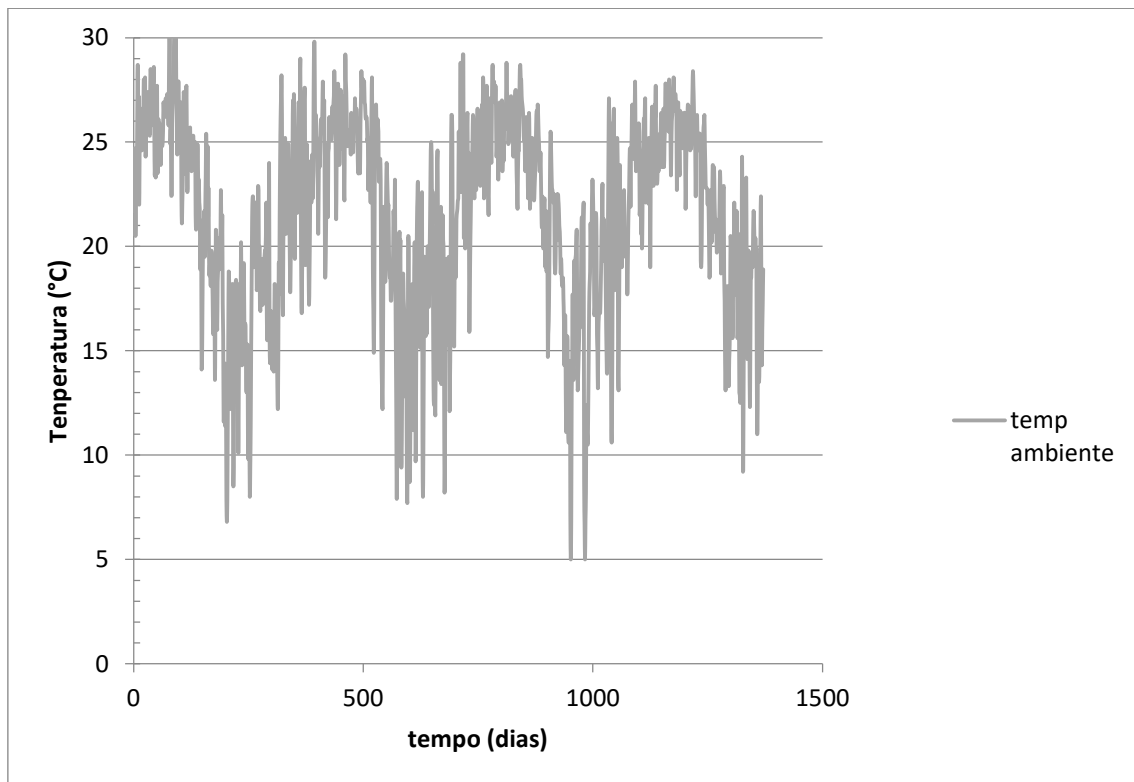


Figura 42. Gráfico da temperatura ambiente x Tempo. Fonte: Itaipu (Dados em planilha)

7.2. Malha e modelagem

A partir do desenho elaborado em AutoCad, fez-se uma exportação para o software Trelis, em que foi gerada uma malha com 77722 nós e 429372 elementos tetraédricos, como mostrado na Figura 43. O bloco está engastado na rocha, por compatibilidade (função *merge*), como mostrado na Figura 44 e as laterais com restrições em x, y para dar noção de continuidade e o fundo está todo engastado, como mostrado na Figura 45. As condições de convecção foram atribuídas a todas as superfícies externas do bloco e à superfície superior da rocha, que está em contato com o ambiente, como mostrado na Figura 46.

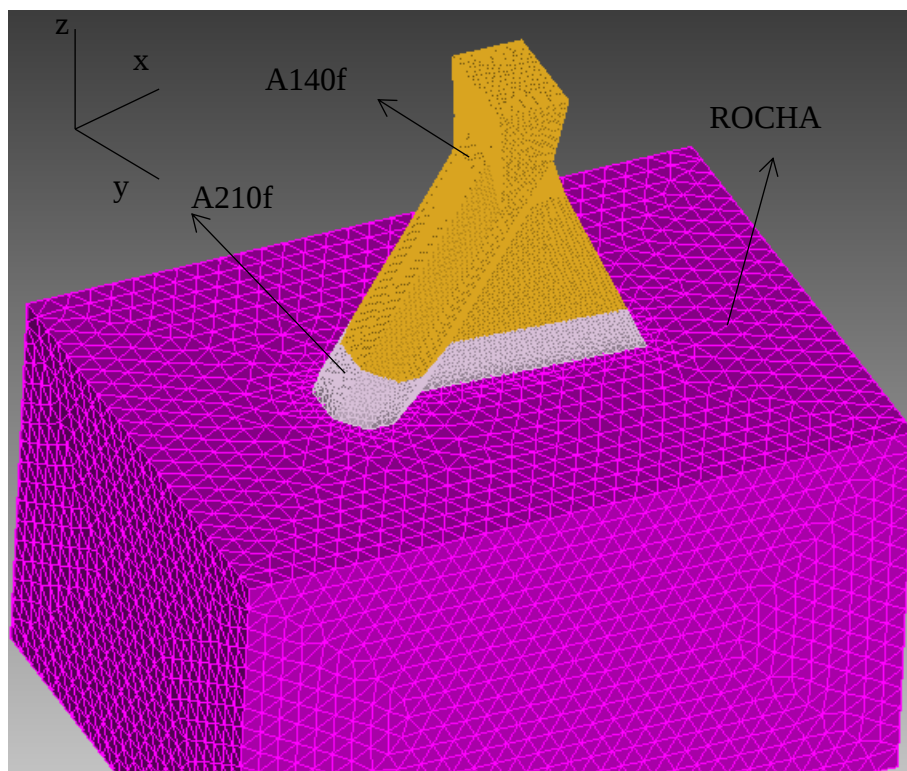


Figura 43. Malha de elementos tetraédricos – Bloco D38

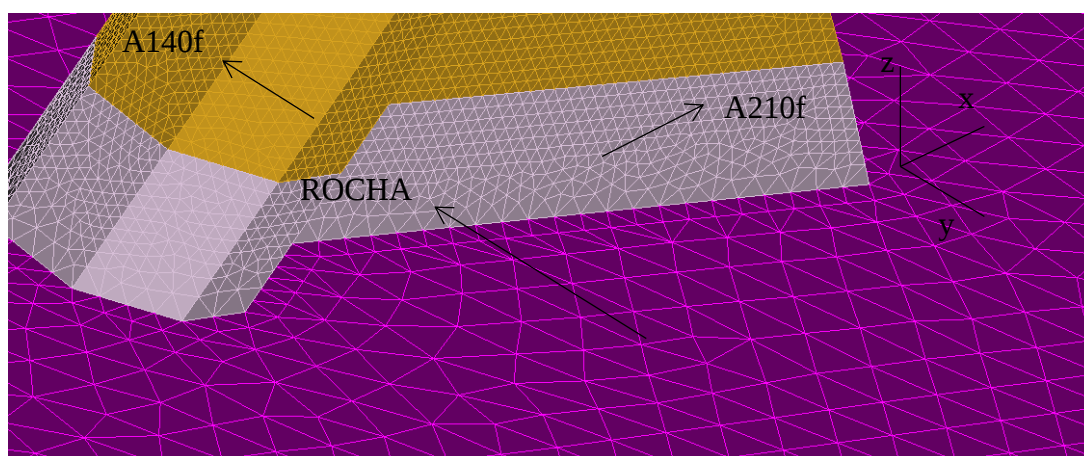


Figura 44. Compatibilidade de nós entre o Bloco e a rocha

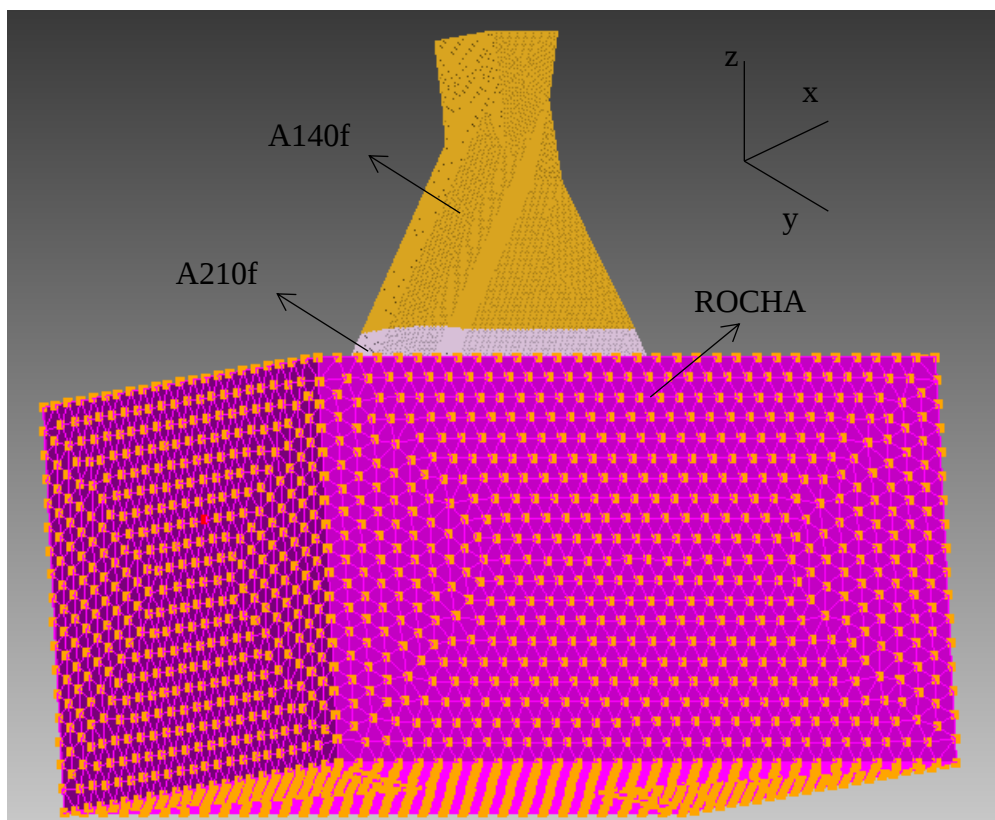


Figura 45. Condição de contorno da rocha engastada em x, y e z

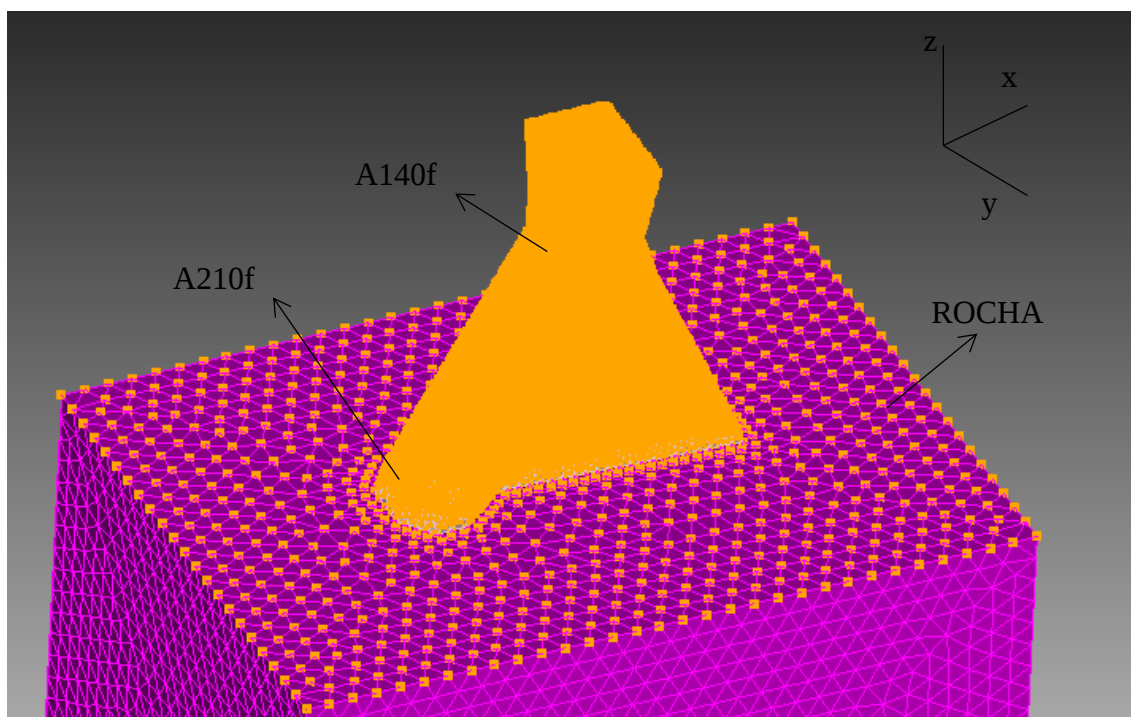


Figura 46. Superfícies com convecção

Os passos de tempo foram divididos em 4 etapas. Na primeira etapa, foram 90 passos de tempo de 86400 segundos, ou seja, 90 passos de 1 dia. Nesse período, o bloco não tinha sido lançado, apenas a rocha. Isto foi necessário porque a rocha é um material

inerte e era necessário atribuir uma temperatura inicial de lançamento, que foi uma média desses 90 dias (21,5 °C), da Figura 42. Deste modo, deu-se esse tempo para que o material se adequasse à temperatura ambiente. O segundo bloco era de 6.240 passos de 3.600 segundos, ou seja, 6.240 passos de 1h, ou seja, 260 dias. Foi necessário um passo de tempo bem pequeno para se observar os fenômenos que aconteciam no decorrer da construção do bloco, que durou 217 dias. O terceiro bloco foi de 800 passos de 21.600 segundos, ou seja, 200 dias. O quarto e último bloco foram 820 passos de 86400 segundos, ou seja, 820 dias. No final, foram simulados 1370 dias desde 90 dias antes do começo da construção do bloco D38 (08/02/1979), o que resulta em uma data anterior ao enchimento do reservatório (13/10/1982).

Diversas simulações foram feitas para testar hipóteses e fazer uma análise de sensibilidade do modelo. Foram escolhidas 9 para serem reportadas nesse trabalho, por apresentarem conclusões interessantes acerca do emprego do modelo e da análise sensibilidade dos parâmetros.

A simulação 1 é aquela que emprega exatamente os dados coletados, material com fluência e temperatura ambiente variando conforme histórico da época. Esta simulação foi usada como referência para as demais na análise de sensibilidade.

Na simulação 2, foi considerada uma temperatura ambiente constante de 21,5°C, que é a média do período, para verificar a influência das variações sazonais.

Na simulação 3, utilizou-se histórico de temperatura do termômetro superficial TS-D-004 para se estabelecer uma condição de temperatura ambiente na vizinhança do bloco, não em uma estação meteorológica, como é o caso do histórico de temperatura ambiente que se tem acesso. Esse termômetro foi escolhido frente aos outros porque apresentava maior estabilidade de temperaturas.

Na simulação 4, foi empregado um concreto inerte para verificar se haveria possibilidade do concreto fissurar no contraforte, apenas pela ação do peso próprio da estrutura.

Na simulação 5, o concreto foi empregado como material elástico, ou seja, a ação da fluência foi retirada, para verificar o quanto esse fenômeno aliviou as tensões de tração na estrutura.

Na simulação 6, aumentou-se o calor específico em 500 J/kg.K e na simulação 7, reduziu-se 500 J/kg.K do valor de referência para verificar se se obteria uma melhor verossimilhança.

Na simulação 8, aumentou-se a condutividade térmica em 0.5 W/m.K, e na simulação 9 reduziu-se 0.5 W/m.K do valor de referência para ver a sensibilidade do resultado.

Os resultados extraídos das diversas simulações foram temperatura e índice de fissuração. Todas as simulações foram sequenciais e o que foi feito em cada uma delas está sintetizado na Tabela 8.

Tabela 8. Simulações realizadas no bloco D38

Simulação 1	Parâmetros coletados em relatórios internos de Itaipu – Simulação e parâmetros de referência
Simulação 2	Simulação com temperatura ambiente constante de 21,5°
Simulação 3	Simulação usando como temperatura ambiente, os valores extraídos do termômetro superficial TS-D-004
Simulação 4	Simulação com concreto inerte para isolar o efeito mecânico
Simulação 5	Simulação com concreto elástico para retirar o efeito da fluência
Simulação 6	Simulação em que se aumentou o calor específico em 500 J/kg.K do valor de referência
Simulação 7	Simulação em que se diminuiu o calor específico em 500 J/kg.K do valor de referência
Simulação 8	Simulação em que se aumentou a condutividade térmica em 0,5 W/m.K do valor de referência
Simulação 9	Simulação em que se diminuiu a condutividade térmica em 0,5 W/m.K do valor de referência

7.3. Resultados obtidos

7.3.1. Simulações 1, 2 e 3

A simulação 1 é aquela feita com os dados coletados em Itaipu, com temperatura variável e com modelo de fluência de SERCOMBE *et al.* [15]. Na Figura 47 é mostrado o índice de fissuração para esta simulação, sendo que os triângulos representam os elementos que fissuraram em algum momento durante a simulação.

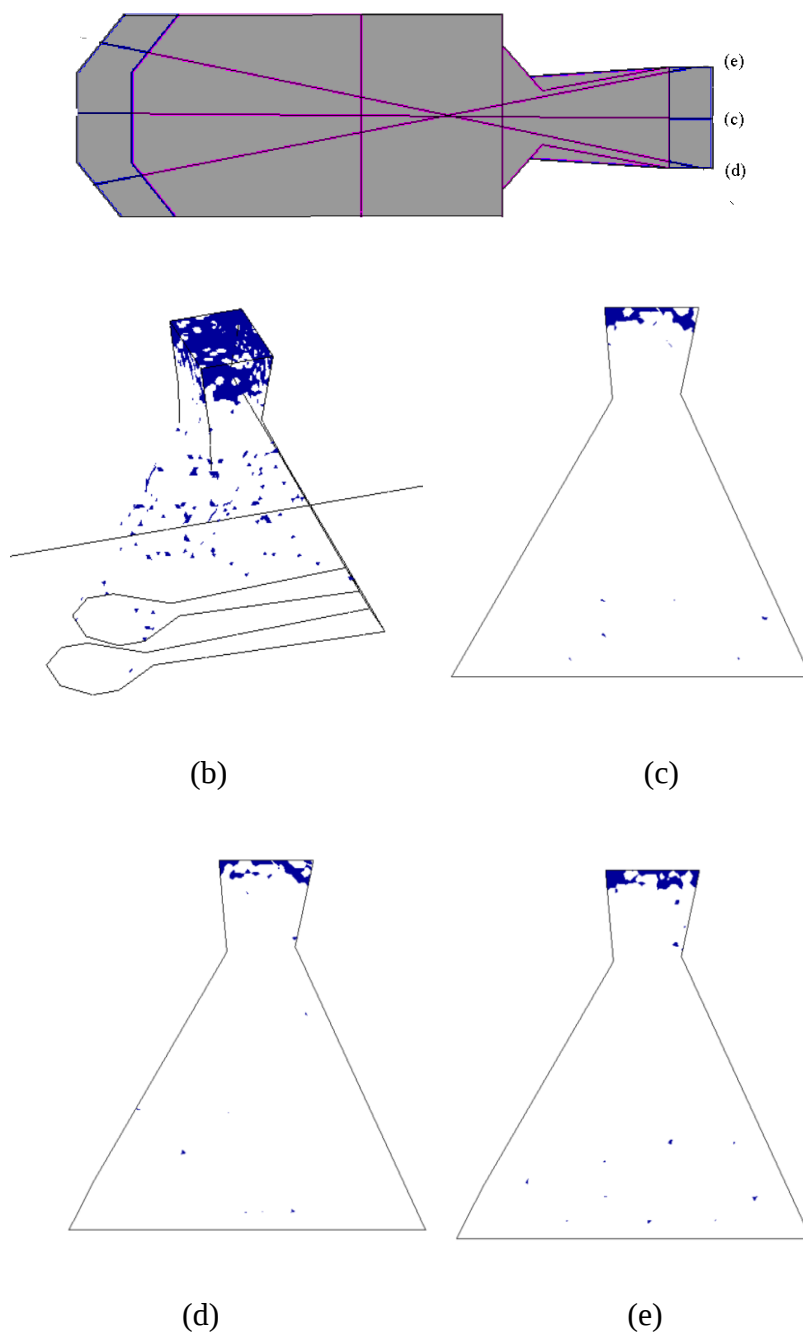


Figura 47. Elementos fissurados na simulação 1 (a) Planta Baixa (b) Vista das superfícies externas (c) Corte central (d) Corte a 20cm paralelo ao contraforte do lado direito (e) Corte a 20cm paralelo ao contraforte do lado esquerdo

Nota-se que, do lado direito, há poucos elementos fissurados na região da cabeça, já do lado esquerdo, há alguns elementos fissurados no contraforte. Alguns desses elementos se estendem para dentro da barragem, como pode se visualizar no corte central. A superfície que apresenta bastantes elementos fissurados mostra que esta sofre com as variações sazonais, mas se nota que essas fissuras são apenas superficiais, pois 20 cm adentro, já não é mais possível visualizá-las. Se aconteceram, provavelmente não eram nem visíveis e fecharam rapidamente com a hidratação do cimento. A Figura 48 e a Figura 49 mostram o mapeamento das fissuras nas faces direita e esquerda respectivamente.

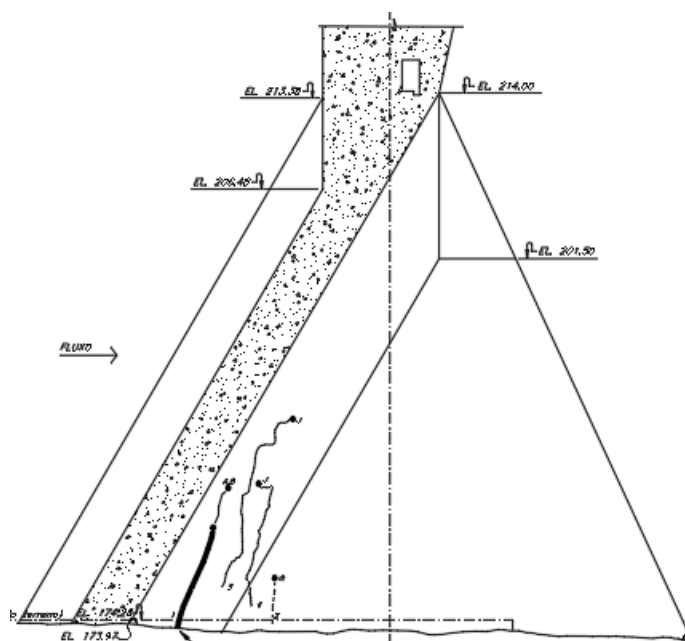


Figura 48. Mapeamento de fissuras – Bloco D38 – Face direita - Fonte: MENEZES e AKIO [48]

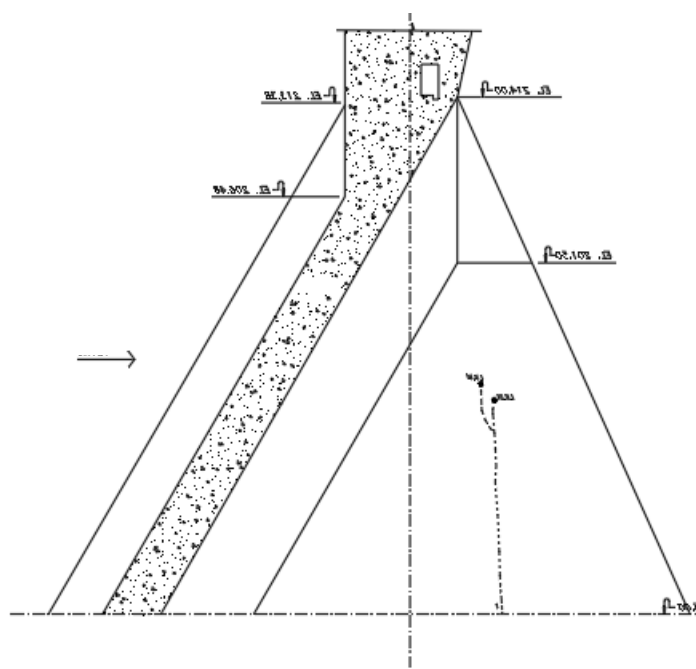


Figura 49. Mapeamento de fissuras – Bloco D38 – Face esquerda - Fonte: MENEZES e AKIO [49]

De fato, houve fissuras na cabeça no lado direito e no contraforte no lado esquerdo assim como mostrado na simulação. No resultado, a crista do bloco teve uma fissuração significativa, que aconteceu principalmente após os 400 dias, como se pode notar na Figura 50, com o bloco aos 350 dias. Essas fissuras também não penetraram fundo no interior do bloco. No mapeamento das fissuras *in loco*, esse comportamento patológico não foi observado. Isso pode ser explicado pelo fato de que acima do bloco, há na verdade uma laje de concreto que permite o trânsito de veículos sobre a crista da barragem inteira. Essa estrutura e a sobrecarga estática e dinâmica dos veículos não foram aplicadas nessa e em nenhuma das simulações deste trabalho. Visualizando a laje *in loco*, ela está bastante fissurada devido a variações sazonais e ao trânsito de veículos, entre outros. Porém, é importante ressaltar que o bloco está intacto e as fissurações na pista não causam nenhum prejuízo para a estrutura. O que a simulação está revelando é um dos fenômenos que acontece com a laje de rolamento, que é a ação da temperatura. Como, na realidade, o bloco está protegido pela laje, a fissuração apresentada na simulação não deve ser preocupante.

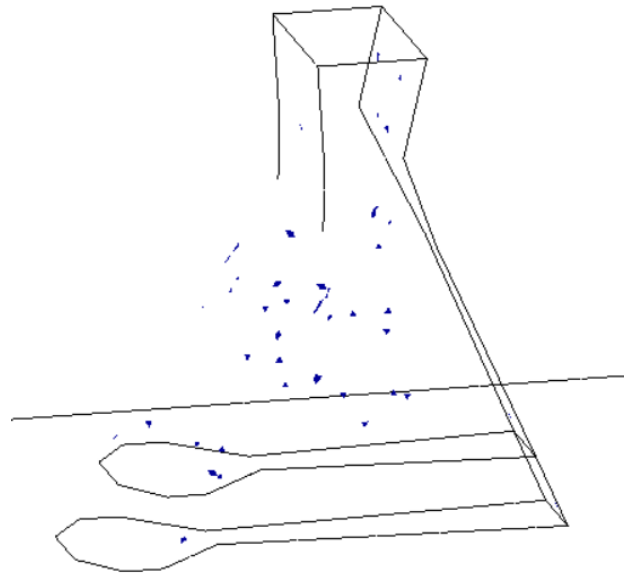


Figura 50. Elementos fissurados na simulação 1 aos 350 dias

Na Figura 51 é ilustrada a comparação da temperatura interna obtida pela simulação e a temperatura do termômetro interno TI-D-001. Na Figura 52, adicionou-se a temperatura ambiente para fins de comparação.

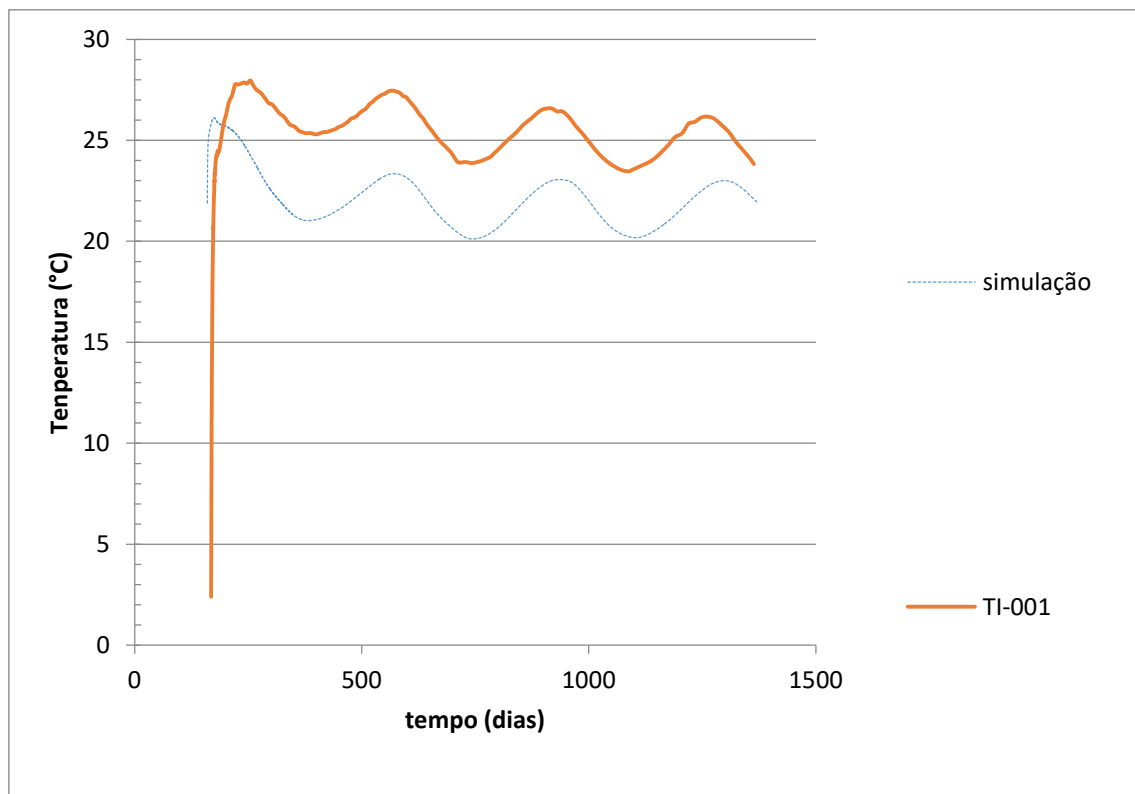


Figura 51. Simulação 1 – D38 - Temperatura interna x Tempo

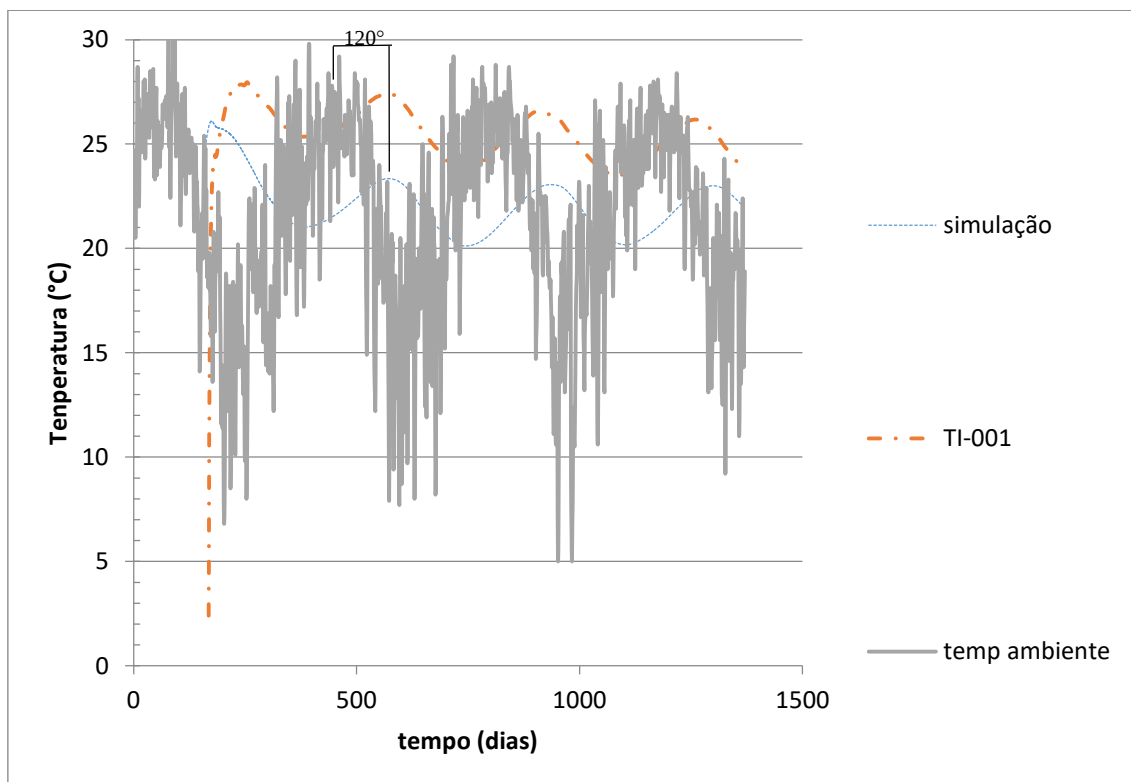


Figura 52. Simulação 1 – D38 - Temperatura interna x Tempo com Temperatura ambiente

Na Figura 51 é mostrado que houve uma diferença de 3°C entre a curva da temperatura obtida pela simulação e o histórico de temperaturas extraído do termômetro interno. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que essa temperatura ambiente foi extraída de uma estação. É plausível afirmar que nos arredores do canteiro de obras a temperatura estivesse 3°C superior. Apesar disso, as ondas que representam a temperatura interna da massa de concreto e a temperatura do termômetro interno têm a mesma cinética: mesma amplitude, mesma fase e período de onda. Só estão deslocadas deste valor de 3°C no eixo vertical. Já pela Figura 52, nota-se que a temperatura interna está defasada em 120° com a temperatura ambiente. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que leva algum tempo para que a temperatura ambiente influencie a temperatura interna do bloco, pois os primeiros elementos a serem expostos são os externos, que vão transmitindo por condução essa temperatura ambiente para o interior do bloco, o que não é algo instantâneo.

Na simulação 2 foi modificada apenas a condição da temperatura ambiente, que agora é dada como constante, no valor de 21,5°C. A Figura 53 mostra o índice de fissuração para esta situação.

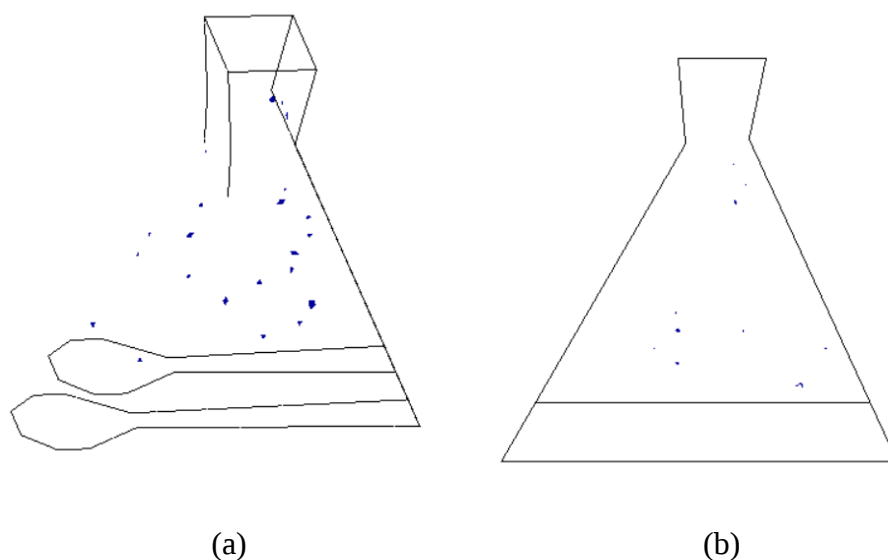


Figura 53. Índice de fissuração da simulação 2 no D38 (a) fissuração na superfície (b) fissuração no corte central

Com essa simulação, cancelando o efeito da variação sazonal causada no concreto, pode-se notar que não houve fissuração nem na crista nem em quantidade significativa na superfície, o que prova que, de fato, tais fissurações tiveram essa causa. Mesmo com a anulação do efeito sazonal, ainda houve elementos fissurados no corte central e alguns na superfície, o que mostra que a geração de calor interno devido à hidratação do cimento ainda provoca tensões térmicas no bloco.

Na simulação 3, a temperatura ambiente foi substituída pela temperatura do termômetro TS-D-004. A Figura 54 mostra uma comparação entre essas temperaturas. Nota-se que as temperaturas do termômetro são bem superiores às coletadas na estação. Por este motivo, foram adotadas nessa simulação 3 como temperatura ambiente, pois como é um termômetro superficial e está pouco embutido no concreto, ele deve registrar de forma satisfatória a temperatura ambiente nos arredores, apesar de também refletir um pouco da temperatura interna gerada pela hidratação do concreto.

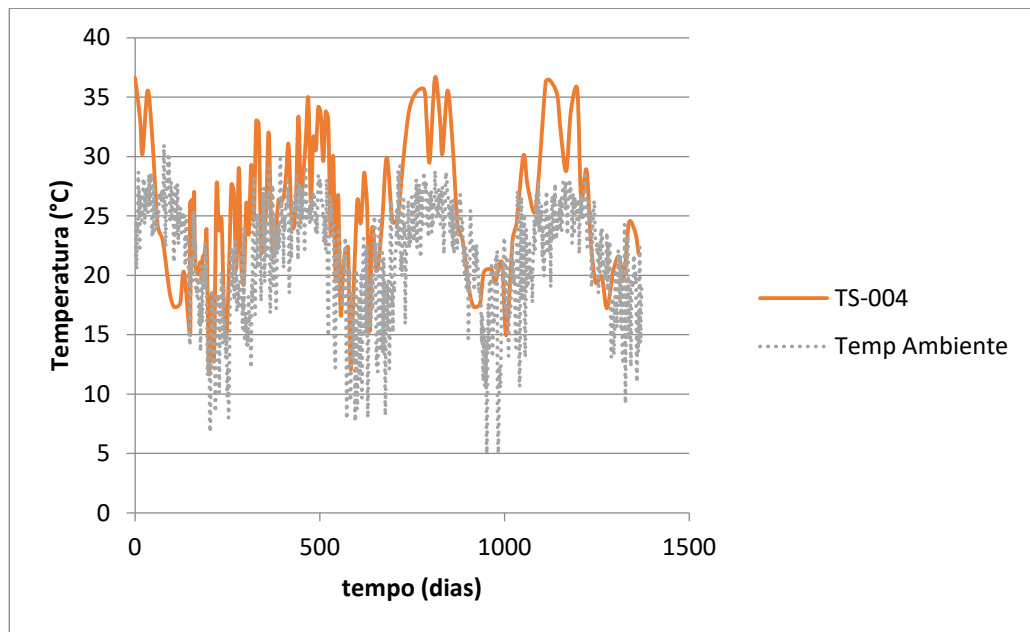


Figura 54. Gráfico comparativo da temperatura ambiente e TS-D-004

A Figura 55 mostra o índice de fissuração para a simulação 3 e a Figura 56, o gráfico da comparação da temperatura obtida pela simulação com a temperatura do termômetro interno TI-D-001.

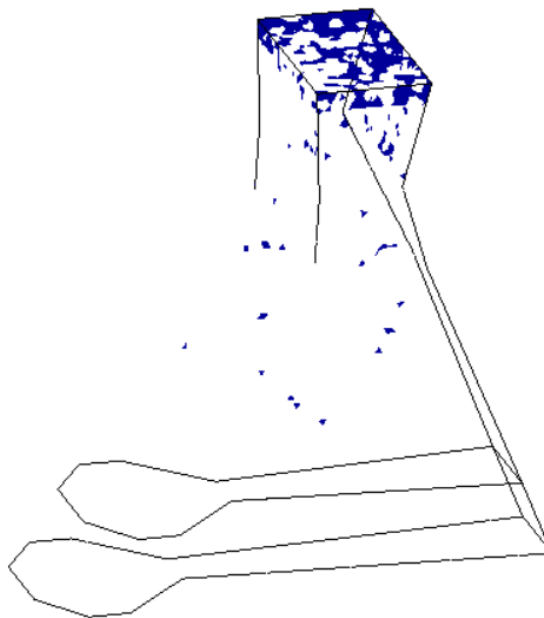


Figura 55. Índice de fissuração - simulação 3 bloco D38

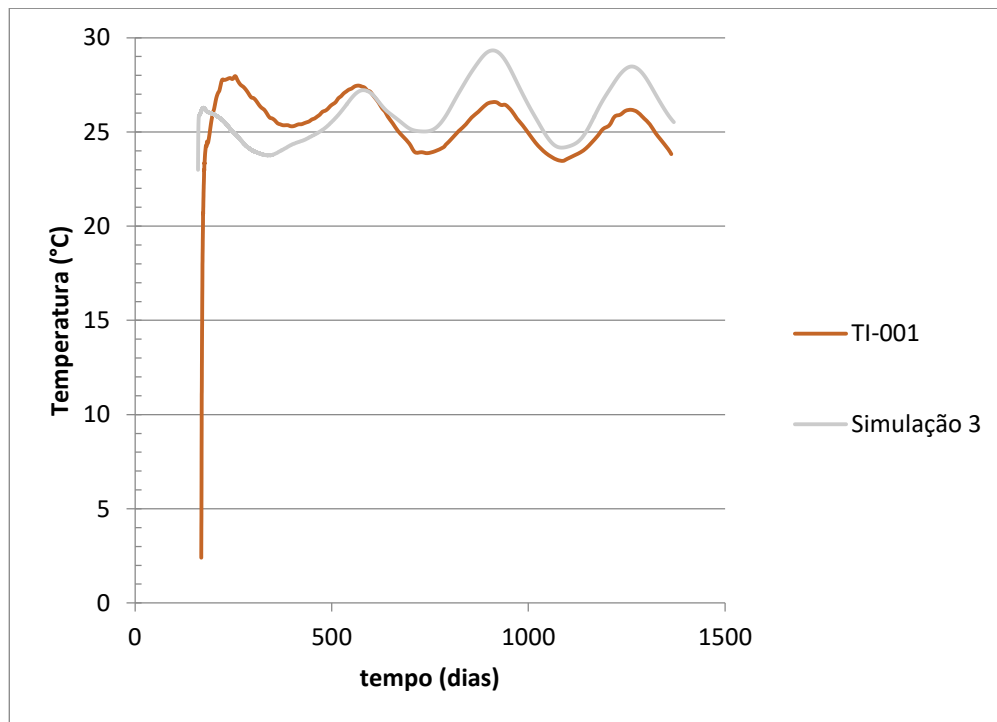


Figura 56. Gráfico simulação 3 – D38 – Temperatura interna x tempo

Comparando a Figura 55 da simulação 3 com a Figura 47 da simulação 1, nota-se que aquela fissurou menos que essa, inclusive na crista. O comportamento interno permaneceu semelhante ao da primeira simulação. Já a Figura 56, mostra que a substituição da temperatura ambiente pela temperatura do termômetro superficial fez a curva da simulação se deslocar em direção à curva do termômetro, reduzindo a diferença de 3°C entre a temperatura obtida na simulação de referência e o valor real do termômetro interno (Figura 51). Tal fato demonstra um comportamento mais próximo da realidade.

7.3.2. Simulação 4

Ainda sobre a questão das fissuras do bloco D38, ROSSO e PIASENTIN [9] afirmam o seguinte “outra possível causa teria sido a dinâmica de construção dos blocos, pelo fato de terem sido construídos sem junta de contração, fazendo com que o peso da cabeça descarregasse sobre o contraforte, cujas dimensões são bem mais reduzidas, e cujo concreto não havia adquirido ainda resistência suficiente ao cisalhamento”. Para testar essa hipótese, a simulação 4 foi feita retirando possibilidade de tensões de origem térmica, ou seja, toda tensão presente resulta do peso próprio da estrutura. A Figura 57 mostra o campo do índice de fissuração.

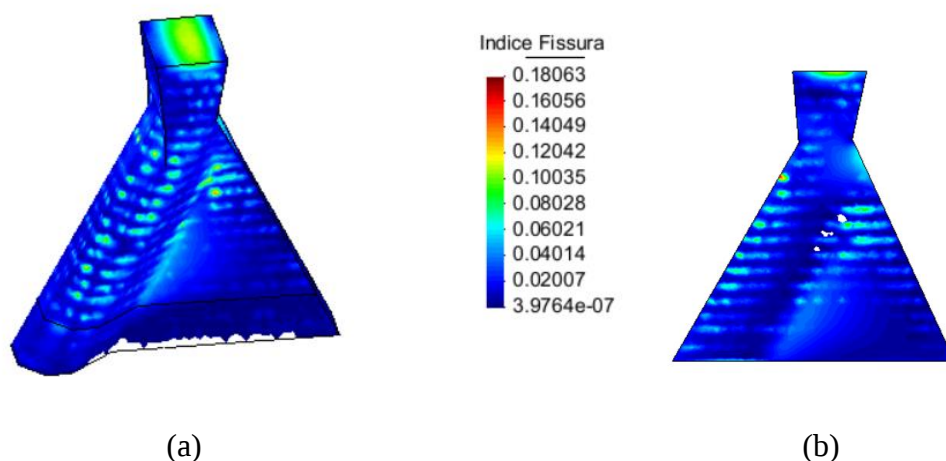


Figura 57. Campo do índice de fissuração – Simulação 4 – Bloco D38

Observando a Figura acima, percebe-se que, ao final dos 1.370 dias da simulação, as tensões foram de fato bem baixas. Relembrando que o índice de fissuração é dado pela razão entre a máxima tensão principal positiva e a resistência à tração, pode-se ver que as tensões de tração não chegaram nem à metade da resistência à tração. Com isso, pode-se afirmar que as fissurações que ocorreram foram predominantemente de origem térmica, uma vez que, retirando esse efeito, a influência do peso próprio foi muito pequena.

7.3.3. Simulação 5

A simulação foi feita com o objetivo de verificar o quanto o fenômeno da fluência estaria aliviando as tensões na massa de concreto. Para isso, os concretos foram colocados no programa como se fossem materiais perfeitamente elásticos. A Figura 58 mostra o índice de fissuração observado nessa situação.

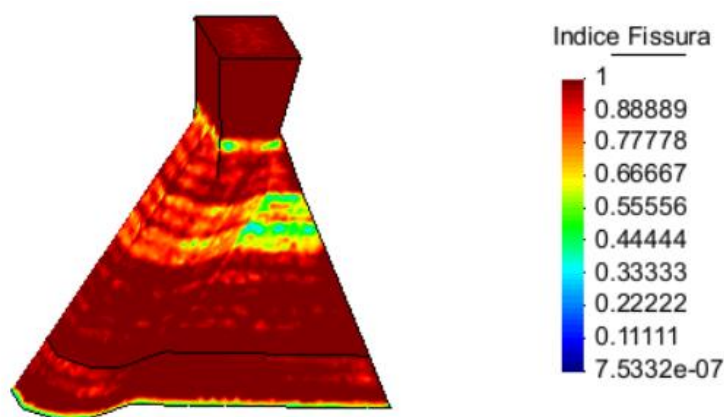


Figura 58. Campo do índice de fissuração simulação 5 – Bloco D38

A Figura mostra que o bloco fissuraria de forma generalizada de não fosse a fluência para aliviar as tensões, uma vez que o índice é 1 ou próximo de 1 em grande parte da estrutura. Comparando essa Figura com a Figura 47 da simulação 1, vê-se que a diferença é notável e que a fluência interferiu de maneira significativa.

7.3.4. Simulações 6, 7, 8 e 9

Essas simulações são análises de sensibilidade das propriedades térmicas do calor específico (simulações 6 e 7) e da condutividade térmica (simulações 7 e 8). Foram feitos esses testes com o intuito de verificar quão distorcido ficaria o resultado, caso algum valor de parâmetro não pudesse ser obtido e tivesse que ser estimado ou estipulado de alguma forma.

Na simulação 6, o valor do calor específico foi acrescido em relação ao valor de referência (da simulação 1) em 500 J/kg.K. Já na simulação 7, houve uma redução de 500 J/kg.K do valor de referência. Este valor representa um aumento ou redução de aproximadamente 50% do valor inicial. Na simulação 8, isto ocorreu com a condutividade térmica, que foi acrescida em 0.5 W/m.K e na simulação 9, diminuída em 0,5 W/m.K. Este valor representa um aumento ou redução de aproximadamente 30% do valor inicial. A Figura 59 e a Figura 60 a seguir mostram os gráficos comparativos dessa variação no calor específico e na condutividade térmica, respectivamente.

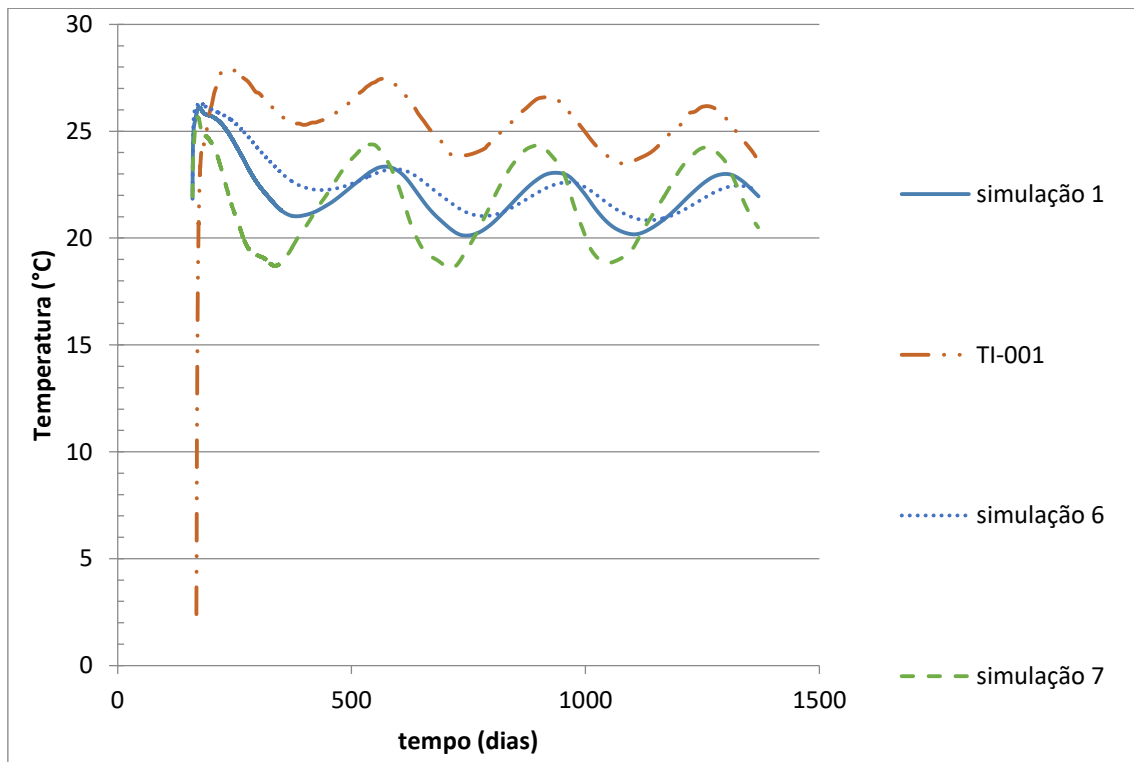


Figura 59. Comparação das variações dos valores do calor específico com os valores de referência

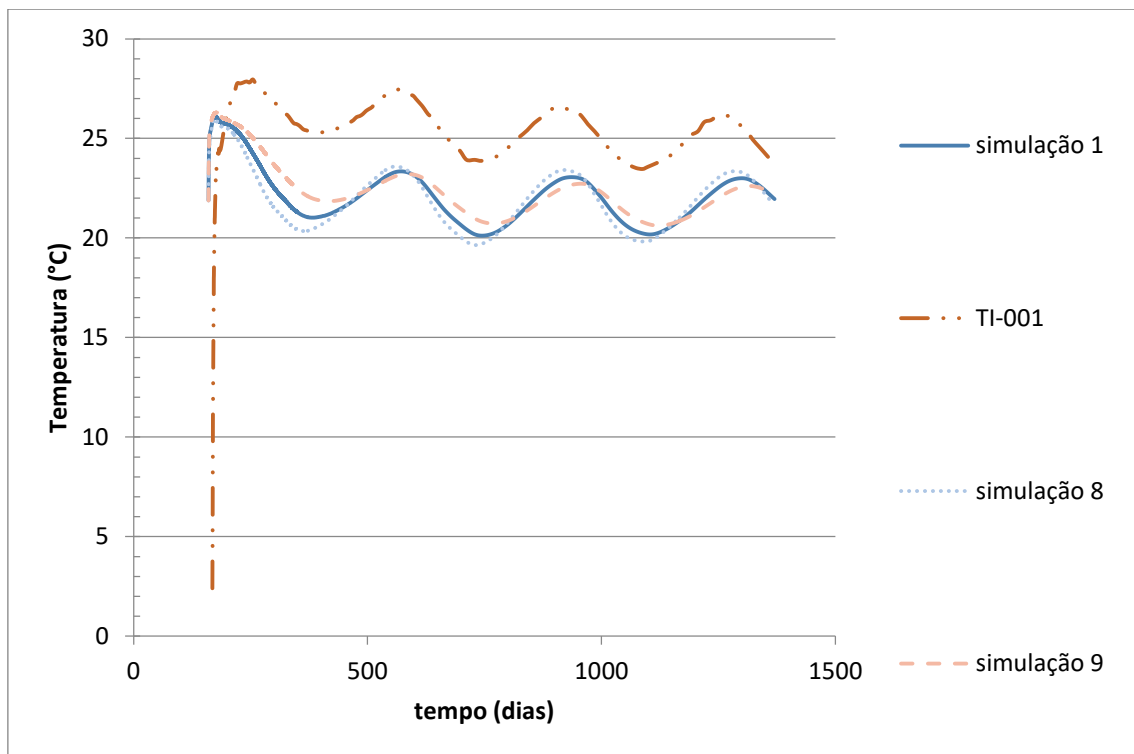


Figura 60. Comparação das variações dos valores da condutividade térmica específico com os valores de referência

A Figura 59, a que ilustra a análise de sensibilidade do calor específico, mostra que o aumento do calor específico em relação à simulação de referência diminui a amplitude da onda, além de defasá-la ligeiramente para a direita. Já a diminuição causa o efeito contrário, aumenta a amplitude da onda, além de defasá-la para a esquerda. Na prática, isso significa que ao se elevar o calor específico, menores amplitudes térmicas são verificadas no interior da massa de concreto, pois seria necessária mais energia para aumentar a temperatura da massa de concreto.

Já na Figura 60 com a análise da variação da condutividade térmica observa-se que não houve grandes variações nem na amplitude nem na fase da onda que representa a temperatura interna da massa de concreto do bloco, pois, em um ambiente quase adiabático, há pouco efeito da condutividade entre elementos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Conclusões

O software DamThe já foi verificado por uma série de trabalhos do PEC/COPPE/UFRJ [10, 11, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25] e, neste trabalho, conseguiu-se validar o modelo do programa para estruturas de bloco de contraforte, uma vez que os resultados obtidos na modelagem e nas diversas simulações do bloco de contraforte da Barragem de Itaipu, podem ser considerados satisfatórios. Com isso, pode-se afirmar que o software DamThe consegue modelar os fenômenos que acontecem nas primeiras idades na massa de concreto, reproduzindo resultados verossímeis e mostrando possíveis fissurações.

Na análise do item 6, que simula um Estado Plano de Tensões, pode-se notar que os dados eram ligeiramente diferentes dos apresentados no item 7, pois os primeiros foram obtidos através da leitura de documentos de caráter público e são mais generalistas. Logo, não foi possível modelar um bloco específico, mas os resultados foram interessantes e deram uma boa noção de que de fato a origem da fissuração era térmica.

Já na análise do item 7, da simulação em 3D, os dados foram coletados dentro da própria empresa Itaipu Binacional e foi possível escolher um bloco específico para modelar, o D38. Foram feitas mais de 60 simulações como teste para escolher as que apresentassem resultados robustos, sendo 9 delas apresentadas aqui.

Na simulação 4, em que simula apenas o efeito do peso próprio da estrutura, verifica-se que essas fissuras são predominantemente de origem térmica, o que é corroborado por todas as demais simulações realizadas, inclusive a simulação em Estado Plano de Tensões. Nas simulações em que foi considerada a evolução da hidratação do cimento e a consequente liberação do calor, percebeu-se os caminhos de elementos fissurados nas mesmas regiões observadas em campo.

Nas simulações 6, 7, 8 e 9 é apresentada uma simples análise de sensibilidade dos parâmetros de calor específico e de condutividade térmica. Conclui-se que o calor específico é mais sensível a mudanças e estas provocam aumento ou diminuição na amplitude térmica na massa de concreto.

É válido ressaltar que nesse estudo visou-se estudar o caso da fissuração do bloco de contraforte da barragem de Itaipu e validar o modelo que prevê fissurações em estruturas massivas de concreto. O estudo foi relevante, pois já é possível observar o resultado físico no bloco. Logo os resultados gerados pelo modelo e pelo sistema puderam ser comparados e, assim, o modelo implementado no DamThe foi validado. Assim, pode-se afirmar que o software Damthe pode ser usado com segurança para prever fissurações em estruturas na fase de projeto, evitando patologias futuras e gastos com reparo ou recuperação estrutural.

8.2. Comentários finais

No processo de obtenção de dados e execução das diversas simulações, alguns empecilhos foram notados e muitos deles resolvidos por simplificação e pesquisa bibliográfica e outros ficam como sugestões para trabalhos na mesma linha de pesquisa. Um exemplo foi o uso do coeficiente de troca de calor com o ambiente, que é particular de cada situação, mas neste trabalho e em muitos realizados no PEC/COPPE/UFRJ, foi empregado um valor de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, obtendo sempre bons resultados.

Outro empecilho foi o modelo de fluência adotado. Uma vez que a metodologia de obtenção dos parâmetros de ajuste é complicada e imprecisa, além de ser de difícil compreensão. No PEC/COPPE/UFRJ já existe outro modelo de fluência apresentado por COLIMODIO [16], que é baseado nas unidades de Kelvin-Voigt, implementado em um software diferente. Sugere-se que tal modelo seja implementado ao DamThe.

Durante o processo, questionou-se também se os blocos adjacentes teriam alguma influência na transferência de calor e nas restrições mecânicas impostas ao bloco simulado. Na realidade, há uma troca de calor entre os blocos, e na direção do próximo bloco há essa restrição de deslocamentos. Porém, é difícil executar tais fenômenos na análise, pois seria necessário conhecer o cronograma de construção de todos os blocos da redondeza, o processo de concretagem e as condições de contorno de cada um deles. Assim, a simplificação feita na simulação de apenas um bloco é razoável para o entendimento do que aconteceu nesse bloco, pois os resultados da simulação mostraram condições semelhantes *in loco*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sítio eletrônico de **ITAIPU BINACIONAL**, 2020. Disponível em: < <https://www.itaipu.gov.br/> > Acesso em: 01 de dez. de 2019.
- [2] MARCHETTI, A. **Página do Facebook de Itaipu Binacional**, 2009. Disponível em:<<https://www.facebook.com/ItaipuBinacionalOficial/posts/2488087064544052>> Acesso em: 01 de dez. de 2019.
- [3] 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.
- [4] COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1 ed. Oficina de Textos, 2012.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Curso de Segurança de Barragens DAEE**, 2017.. Disponível em: < <http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/destaque-superior/boas-praticas/curso-de-seguranca-de-barragens-dae-1/aula-3-segur-barragem-2016tipo.pdf>> Acesso em: 01 de dez. de 2019.
- [6] MASON, J. **Estruturas de aproveitamentos hidrelétricos**. Rio de Janeiro, Campus, 1988.
- [7] 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
- [8] SFIKAS, I., INGHAM, J., MACDONALD, J.B.M . “Using Finite elemento analysis to assess the termal behaviour of concrete structures.”, **The Concrete Society: Concrete Magazine**, 50-52, Fev, 2017.
- [9] 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.
- [10] FAIRBAIRN, E. M. R., SILVOSO, M. M., KOENDERS, E. A. B., et al. “Thermo-Chemo-Mechanical Cracking Assessment for Early-Age Mass Concrete Structures.” **Concrete International**, 34, 30-35, 2012.
- [11] FAIRBAIRN, E. M. R., SILVOSO, M. M., RIBEIRO, F. L. B., et al. “Determining the adiabatic temperature rise of concrete by inverse analysis: case study

of a spillway gate pier.” **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 21:3, 272-288, 2017.

[12] COUSSY, O., **Mechanics of Porous Continua**. Chichester: Wiley. 1995.

[13] ULM, F. J., COUSSY, O., “Modeling of thermochemo mechanical couplings of concrete at early ages.” **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, pp. 785–794, 1995.

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

[15] SERCOMBE, J., HELLMICH, C, ULM, F. J., *et al.* “Modeling of early-age creep of shotcrete. I: Model and model parameters.” **Journal of Engineering Mechanics ASCE** 126:284–291, 2000.

[16] COLIMODIO, V. S. **Modelos Numéricos para fluência do concreto: revisitando a cadeia de Kelvin**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

[17] 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.

[18] RICHARDSON, I. G., “The nature of C-S-H in hardened cements” **Cement and concrete research**. 29, 1131-1147, 1999

[19] ACKER, P. “Comportement mécanique du béton”. In: **Rapport de Recherche LCPC, apports de l’approche physico-chimique**, N° 152, 1988.

[20] 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.

[21] FAIRBAIRN, E. M. R., FERREIRA, I.A, CORDEIRO, G.C., *et al.*”Numerical Simulation of dam construction using low-CO₂-emission concrete. **Materials and Structures**, 43: 1061-1074, 2010.

[22] FERREIRA, I. A. **Solução em paralelo de um modelo termo-químico-mecânico para concreto jovem**. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

- [23] FRAGA, I.A. **Análise de Sensibilidade do modelo termoquímico para estruturas de concreto massa**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [24] LOPES, L.E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto**. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [25] RITA, M.R. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto massa em ambiente paralelo**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [26] BAZANT, Z. HAUGGARD, A., BAWEJA, S., *et al.*, “Microprestress solidification theory for concrete creep I: Aging and drying effects”. **Journal of Engineering Mechanics ASCE** 123 (11), 1188-1194, 1997.
- [27] IECO-ELC COORDINATOR, ENGEVIX-GCAP, PROMON-GCAP. **Final Reports on Cracks in Stems ob Butresses Dam Blocks – Remedial Treatment**. Itaipu Hydroelectric Development. Relatório N° 4004.50.004.I.R0B. Paraná, Maio, 1981.
- [28] RICHARDSON, A.T., “Performance of Upper Stillwater dam.” In: **Proceedings of Internacional Symposium on Roller-compacted concrete**. Beijing, China, Nov, 1991.
- [29] ELIAS, H., Standing Stones as Jewish Memorial. **Architects’ Journal**. 02 de jun. de 2005. Disponível em: < <https://www.architectsjournal.co.uk/home/standing-stones-as-a-jewish-memorial/133730.article>>. Acesso em: 18 de jan. de 2020.
- [30] WARD. V. J. Widespread Cracking Found in Berlin’s Holocaust Memorial. **SPIEGEL Internacional**. 08 de ago. de 2007. Disponível em: <<https://www.spiegel.de/international/germany/monument-in-danger-widespread-cracking-found-in-berlin-s-holocaust-memorial-a-498887.html>> Acesso em: 18 de jan. de 2020.
- [31] FUNASHI, E. I. J., KUPERMAN, S.C., “Study of termal cracking in the spillway of a small hydropower plant”. **Seminário Nacional de Grandes Barragens CBDB**, 2010.

- [32] ANDRIOLO, F. R., BETIOLI, I. **Obras de concreto de Itaipu. Desenvolvimento, controle, qualidade, durabilidade...40 anos depois.** São Carlos - Editora Cubo: São Carlos, 2015.
- [33] BETIOLI, I., SÁ, S. N., FIORINI, A. S. “Critérios de acompanhamento e controle da fissuração dos blocos de contraforte da barragem de Itaipu”. In: **XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB.** Tema III, 1997.
- [34] ENGEVIX - GCAP / PROMON-GCAP. **Blocos de contrafortes simples. Análise estrutural e estudo da fissuração com emprego do método dos elementos finitos.** Relatório N° 4004.50.6000.E.R0A/4004.50.6000.P.R0A Construction reports: Paraná, Dec., 1980.
- [35] PACELLI, W. A., **Concretos e propriedades.**_____. 2007.
- [36] DE FARIA, E. F. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados.** Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [37] FONSECA, D. D. **Predição da elevação adiabática da temperatura do concreto através de modelos baseados em dados.** Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [38] KUSUDA, T. “Fundamentals of building heat transfer” **Journal of Research of the National Bureau of Standards.** V.82 n. 2, 1977.
- [39] ITAIPU BINACIONAL. **Barragem lateral direita - instrumentação - Blocos D38 – Temperaturas.** Desenho N° 4096DI05094P.
- [40] ITAIPU BINACIONAL **Acompanhamento das frentes de concretagem (afc) - lançamento - de 09-01-1978 até 03-07-1980 - barragem lateral direita - bloco D38.** Relatório N° 40046015546P.
- [41] IECO-ELC COORDINATOR, ENGEVIX S.A, ALTO PARANA. ITAIPU BINACIONAL. **Presa Lateral Derecha Formas Bloque D-38.** Desenho N° 4094DC05041E, 1978.
- [42] IECO-ELC COORDINATOR, ENGEVIX S.A, ALTO PARANA. ITAIPU BINACIONAL. **Presa Lateral Derecha Disposicion General y Caracteristicas Geometricas.** Desenho N° 4090DC05009E, 1978.

- [43] ITAIPU BINACIONAL. **Análise dos parâmetros de resistência dos concretos massa da estruturas principais de Itaipu.** Relatório N° RC 06/79, 1979.
- [44] ITAIPU BINACIONAL. **Resistência a tração de concretos da obra de Itaipu.** Relatório N° RC 33/79, 1979.
- [45] ITAIPU BINACIONAL. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de Itaipu.** Relatório N° RC 37/81, 1981.
- [46] ITAIPU BINACIONAL. **Considerações básicas da fluência do concreto.** Relatório N° RC 31/82, 1982.
- [47] ITAIPU BINACIONAL. **Presla lateral derecha. Estudio de fisuracion. Bloques de contrafuertes simples. Bloques con tres fissuras.** Relatório 40901005030E.
- [48] MENEZES, J., AKIO, R. K. Trecho D Bloco D 38/ Face Direita Seção Mapeamento de Fissuras. **ITAIPU BINACIONAL.** Desenho N° 4094DI15548P, 2019.
- [49] MENEZES, J., AKIO, R. K. Trecho D Bloco D 38/ Face Esquerda Seção Mapeamento de Fissuras. **ITAIPU BINACIONAL.** Desenho N° 4094DI15548P, 2019.