



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

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**PROCESSO DE CÁLCULO PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA ESTACIONÁRIA
DO ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO SUJEITAS À AÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO**

BRUNA BACH POSSAMAI

Foz do Iguaçu
2022

**PROCESSO DE CÁLCULO PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA ESTACIONÁRIA DO
ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO
SUJEITAS À AÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO**

BRUNA BACH POSSAMAI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador (a): Profa. Dra. Edna Possan
Co-orientador (a): Prof. Dr. Emerson Felix

Foz do Iguaçu
2022

BRUNA BACH POSSAMAI

PROCESSO DE CÁLCULO PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA ESTACIONÁRIA DO ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À AÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Edna Possan
UNILA

Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam
UNILA

Prof. MsC. Eduardo Damin
UDC

Foz do Iguaçu, 29 de Dezembro de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Bruna Bach Possamai

Curso: Engenharia Civil de Infraestrutura

| Tipo de Documento | |
|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> graduação | <input type="checkbox"/> artigo |
| <input type="checkbox"/> especialização | <input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso |
| <input type="checkbox"/> mestrado | <input type="checkbox"/> monografia |
| <input type="checkbox"/> doutorado | <input type="checkbox"/> dissertação |
| | <input type="checkbox"/> tese |
| | <input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais |
| | <input type="checkbox"/> _____ |

Título do trabalho acadêmico: PROCESSO DE CÁLCULO PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA ESTACIONÁRIA DO ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À AÇÃO DO CO₂

Nome do orientador(a): Prof. Dr. Edna Possan

Data da Defesa: 29/12/2022

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente as seguintes pessoas:

Minha orientadora, Edna, por toda orientação e incentivo neste trabalho e pela grande mulher da Engenharia que ela é, tenho grande admiração e gratidão por ter aceito a função de orientador;

Ao meu co-orientador, Emerson, por todo apoio no desenvolvimento do trabalho, orientações e vídeo chamadas dedicados, sempre disposto a ajudar;

Aos meus pais, Dirlei e Nelson, que foram minha base sempre, me apoiaram em todas as fases da vida. Essa conquista é toda graças a vocês e por vocês;

Aos meus amigos, Marcielly e Rodrigo, por todo apoio e amizade em todos esses anos de graduação. Tenho muito carinho e orgulho de todo nosso processo;

A Universidade Federal da Integração Latino-Americana e a todos os professores que compõe o curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, em especial aqueles que sempre estiveram presentes ao longo do curso: Aref, Cesar, Ricardo, André, Noé, Ulises, Jiam, Scarlet e Julio Flores;

Ao pessoal da SECIC, pela oportunidade de estágio, dados fornecidos para a pesquisa e visita técnica à obra da UNILA, em especial ao Cleofas e a Paloma, pela disponibilidade e orientações, e a Livia, pelas conversas e conselhos;

A empresa que me deu oportunidade de trabalhar e todo pessoal da obra, em especial ao Osmar, Alexandre e Valcir, por todos os ensinamentos e conselhos agregados;

A todos familiares que me acompanharam, em especial aos meus avós Candinha, Ivete e Lauro, a minha madrinha Joseane, meu primo Renan e ao nosso cowboy, meu tio Cesar. Amos muito vocês;

A Mirian, Roxane e Camila, pela amizade e toda convivência diária nesse ano;

A todos amigos, colegas e aqueles que me acompanharam, que foram presentes em algum momento e me ajudaram de alguma forma nesses anos de graduação.

RESUMO

As demandas atuais sobre sustentabilidade do meio ambiente têm dado ênfase na durabilidade de estruturas. A avaliação da durabilidade envolve o entendimento dos mecanismos relacionados ao processo de degradação e sua modelagem, com a identificação das principais variáveis que afetam o problema para a previsão da vida útil. Neste contexto, no trabalho será apresentado um processo de cálculo para análise probabilística estacionária do Estado Limite de Durabilidade (ELD) de estruturas de concreto armado sujeita à ação de CO₂. Os procedimentos propostos foram avaliados por meio de um estudo de caso em elementos estruturais de concreto armado aparente da obra do campus da Universidade da Integração Latino-Americana (UNILA), analisados probabilisticamente via simulação de Monte Carlo. Foram verificadas as probabilidades de falha em um período de 50 anos, cujos resultados indicam que a estrutura em análise tem probabilidades variando entre $1,99 \times 10^{-8}$ (para o caso em que há uma maior resistência do concreto, em ambiente exposto à chuva) e 0,0074 (quanto tem-se uma menor resistência do concreto, em ambiente protegido da chuva) aos 50 anos. A elevada resistência à compressão do concreto empregado na estrutura, em média 43,64 e 59,92 MPa, conduz a pequenas velocidades de penetração do CO₂ na camada de cobrimento de concreto, conferindo baixa probabilidade de falha para o ELD durante a vida útil de projeto (VUP). O método proposto contribui para que critérios de definição do Estado Limite de Durabilidade sejam inclusos em normas brasileiras e estimados em fase projeto para previsão de vida útil, considerando as incertezas que envolvem o ingresso de agentes agressivos na matriz cimentante.

Palavras-chave: ELD; estudos probabilísticos; Monte Carlo; carbonatação.

RESUMEN

Las demandas actuales de sostenibilidad ambiental han puesto énfasis en la durabilidad de las estructuras. La evaluación de la durabilidad involucra la comprensión de los mecanismos relacionados con el proceso de degradación y su modelado, con la identificación de las principales variables que inciden en el problema para la predicción de la vida útil. En este contexto, el trabajo presentará un proceso de cálculo para el análisis probabilístico estacionario del Estado Límite de Durabilidad (ELD) de estructuras de hormigón armado sujetas a la acción del CO₂. Los procedimientos propuestos fueron evaluados a través de un estudio de caso sobre elementos estructurales de hormigón armado a la vista de la obra en el campus de la Universidad de la Integración Latinoamericana (UNILA), analizados probabilísticamente mediante simulación Monte Carlo. Las probabilidades de falla fueron verificadas en un periodo de 50 años, cuyos resultados indican que la estructura bajo análisis tiene probabilidades que oscilan entre 1.99×10^{-8} (para el caso donde exista mayor resistencia del concreto, en un ambiente expuesto a la lluvia) y 0,0074 (cuando existe una menor resistencia del hormigón, en un ambiente protegido de la lluvia) a los 50 años. La alta resistencia a la compresión del hormigón utilizado en la estructura, en promedio 43,64 y 59,92 MPa, conduce a bajas tasas de penetración de CO₂ en la capa de cubierta de hormigón, lo que confiere una baja probabilidad de falla del ELD durante la vida útil del proyecto (VUP). El método propuesto contribuye a los criterios para la definición del Estado Límite de Durabilidad que se incluirá en las normas brasileñas y se estimará en la fase de diseño para la predicción de la vida útil, considerando las incertidumbres relacionadas con la entrada de agentes agresivos en la matriz del cemento.

Palabras clave: ELD; estudios probabilísticos; Monte Carlo; carbonatación.

ABSTRACT

Current demands on environmental sustainability have placed emphasis on the durability of structures. The durability assessment involves understanding the mechanisms related to the degradation process and its modeling, with the identification of the main variables that affect the problem to service life predict. In this context, the work will present a calculus process for stationary probabilistic analysis of the Durability Limit State (DLS) of reinforced concrete structures subject to CO₂ action. The proposed procedures were evaluated through a case study on exposed reinforced concrete structural elements of the work on the campus of the University of Latin American Integration (UNILA), analyzed probabilistically via Monte Carlo simulation. The failure probabilities were verified over a period of 50 years, the results of which indicate that the structure under analysis has probabilities ranging between 1.99×10^{-8} (for the case where there is greater resistance of the concrete, in an environment exposed to rain) and 0.0074 (when there is a lower strength of concrete, in an environment protected from rain) at 50 years old. The high compressive strength of the concrete used in the structure, on average 43,64 and 59,92 MPa, leads to low CO₂ penetration rates in the concrete cover layer, conferring a low probability of failure for the DLS during the Service Life of the Project (SLP). The proposed method contributes to the criteria for defining the Durability Limit State to be included in Brazilian standards and estimated in the design phase for service life prediction, considering the uncertainties involving the entry of aggressive agents into the cement matrix.

Keywords: DLS; Probabilistic Studies; Monte Carlo; Carbonation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | 12 |
| Figura 2 – Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica | 18 |
| Figura 3 – Classificação da corrosão em função do agente agressivo | 19 |
| Figura 4 – Representação do avanço da frente de carbonatação | 20 |
| Figura 5 – Abordagem para vida útil de estruturas de concreto | 23 |
| Figura 6 – Domínios para função para o caso bidimensional | 24 |
| Figura 7 – Função amostragem por importância | 28 |
| Figura 8 – Fluxograma para descrição das variáveis aleatórias | 31 |
| Figura 9 – Fluxograma para busca de dados de entrada do modelo matemático | 32 |
| Figura 10 – Fluxograma do procedimento de Simulação de Monte Carlo | 33 |
| Figura 11 – Localização do campus UNILA | 36 |
| Figura 12 – Projeto campus UNILA | 37 |
| Figura 13 – Central de Concreto próxima as instalações provisórias do canteiro de obras | 37 |
| Figura 14 – Planta baixa do Edifício Central | 38 |
| Figura 15 – Elevação do Edifício Central | 39 |
| Figura 16 – Edifício Central em condições atuais | 40 |
| Figura 17 – Curvas de distribuição referentes a variável aleatória de resistência a compressão característica do concreto (f_{ck}) | 42 |
| Figura 18 – Curva de distribuição para variável aleatória de umidade relativa | 43 |
| Figura 19 – Índice de confiabilidade versus Número de amostras aos 50 anos, com $N = 50000$ | 44 |
| Figura 20 – Índice de confiabilidade versus Número de amostras aos 50 anos, com $N = 60000$ | 45 |
| Figura 21 – Probabilidade de falha em função do tempo | 45 |
| Figura 22 – Índice de confiabilidade em função do tempo | 46 |
| Figura 23 – Probabilidade de falha em relação ao f_{ck} | 47 |

LISTA DE QUADROS E TABELAS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Variáveis de interesse para ocorrência da carbonatação do concreto ... | 21 |
| Quadro 2 – Dados característicos dos elementos estruturais | 41 |
| Quadro 3 – Descrição das variáveis aleatórias para resistência característica do concreto aos 28 dias e espessura de cobrimento de concreto..... | 42 |
| Quadro 4 – Descrição das variáveis aleatórias para umidade relativa do ar e concentração de CO ₂ | 43 |
| Quadro 5 – Cenários simulados | 44 |
| | |
| Tabela 1 – Índice de confiabilidade mínimos para um período de 50 anos | 26 |
| Tabela 2 – Coeficientes do modelo Possan et. al (2021) em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição | 35 |
| Tabela 3 – Resistência a compressão do concreto mínima de projeto..... | 39 |
| Tabela 4 – Espessura de cobrimento mínima de projeto..... | 40 |
| Tabela 5 – Estimativa do ELD avaliado probabilisticamente | 46 |
| Tabela 6 – Estimativa do ELD avaliado deterministicamente | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 GERAL..... | 16 |
| 2.2 ESPECÍFICOS..... | 16 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO | 17 |
| 3.1.1 CORROSÃO DE ARMADURAS | 17 |
| 3.1.1.1 CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO | 20 |
| 3.2 VIDA ÚTIL..... | 22 |
| 3.3 ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE (ELD)..... | 24 |
| 3.4 ESTIMATIVA DA DEGRADAÇÃO | 25 |
| 3.5 MÉTODO DE MONTE CARLO | 26 |
| 3.5.1 AMOSTRAGEM POR IMPORTÂNCIA..... | 28 |
| 4 MÉTODO | 30 |
| 4.1 MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO ₂ | 34 |
| 4.1.1 MODELO DIFUSÃO DO CO ₂ NO CONCRETO..... | 34 |
| 4.2 FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE | 35 |
| 5 ESTUDO DE CASO..... | 36 |
| 5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OBRA..... | 36 |
| 5.2 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA EM ESTUDO..... | 38 |
| 5.2.1 DADOS DA ESTRUTURA EM ESTUDO | 40 |
| 5.2.2 DADOS DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO DA ESTRUTURA EM ESTUDO | 42 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 44 |
| 7 CONCLUSÃO..... | 49 |
| 8 AGRADECIMENTOS..... | 50 |
| REFERÊNCIAS | 51 |
| APÊNDICE | 54 |
| ANEXO A..... | 56 |
| ANEXO B | 57 |

1 INTRODUÇÃO

A preocupação atual com as mudanças climáticas discutidas internacionalmente no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e na Conferência das Partes (COP), dá origem em 2015 ao Acordo de Paris, tratado mundial que tem como objetivo principal conter o aquecimento global. Em paralelo, são criados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) durante a Conferência das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável para que sejam atingidos até o ano de 2030 (ver Figura 1).

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Nações Unidas Brasil (2022).

A indústria da construção civil tem relevante participação na economia global e é causa de significativos impactos ambientais durante todo ciclo de vida de uma construção, tornando-se responsável pelo cumprimento dos ODS, especialmente naqueles que se referem ao uso de recursos naturais, gastos energéticos, emissão de carbono e geração de resíduos (NUNES et al., 2014). Podem ser citados os ODS: objetivo 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura; objetivo 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis; objetivo 12: Consumo e produção responsáveis e o objetivo 13: Ação contra a mudança global do clima.

No ramo empresarial tem aumentado o número de empresas engajadas com as ESGs (em inglês, Environmental, Social and Governance) pois estas atividades estão propiciando aumento de valor no mercado financeiro (ALSAYEGH; ABDUL RAHMAN; HOMAYOUN, 2020). Ao adotar padrões e boas práticas que visam definir se a operação de uma empresa é socialmente consciente, sustentável e corretamente gerenciada, garante-se segurança e ética em termos de investimento, não estando susceptível à crise financeira, de imagem ou jurídica (BARRY, 2020).

Dessa forma, é possível que órgãos governamentais e empresas deem enfoque aos requisitos de sustentabilidade, de modo a garantir a redução de impactos ambientais além de estratégia e modelo de negócio.

Tratando-se do desenvolvimento sustentável na construção civil, aspectos de projeto voltados à durabilidade e à extensão da vida útil das estruturas de concreto armado são cada vez mais necessários devido às exigências de sustentabilidade e redução de custos com manutenção (DINIZ et al., 2019). De acordo com Alexandre (2018a), torna-se cada vez mais regular a demanda de uma vida útil estendida por parte dos proprietários de infraestrutura, e para isso, deve ser considerado mudanças nos ambientes de exposição, tecnologia dos materiais e modelos adequados para modelagem de vida útil.

Para Possan e Demoliner (2013), escolhas de projeto que visam ponderar os custos envolvidos em todo o ciclo de vida da estrutura, considerando os impactos ambientais, tendem a garantir a sustentabilidade através de estruturas com elevada vida útil, já que quanto maior a durabilidade, menos recursos são gastos com novas construções e reparos.

A norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575-1 (2021), engloba o conceito de sustentabilidade a durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental como requisitos do usuário. Uma estrutura para ser sustentável deve ser durável, de fácil manutenibilidade e de baixo impacto ambiental.

Coppola et al. (2022) tratam de possíveis estratégias para obtenção de estruturas de concreto sustentáveis e duráveis em diferentes ambientes agressivos, onde a realização do projeto de durabilidade, baseado no desempenho probabilístico, permitirá projetar cada elemento estrutural de forma a suportar condições locais de exposição durante a vida útil necessária.

Em estruturas de concreto armado, o entendimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos em meios porosos, permitiu através de modelos matemáticos expressar quantitativamente a ação destes mecanismos no tempo, garantindo o estudo da durabilidade e avaliação da vida útil, considerando as características do concreto e as condições de exposição (HELENE, 1997).

Para avaliar a durabilidade de uma estrutura ou elemento de concreto armado, faz-se necessário modelos de degradação do concreto e aço que preveem a degradação ao longo do tempo afim de mensurar sua vida útil. Por ser uma manifestação patológica preponderante em estruturas de concreto, a corrosão das armaduras detém modelos que irão representar a penetração dos agentes agressivos responsáveis pela despassivação da armadura (MOLIN et al., 2016).

Os projetos de durabilidade se limitam a vagas ou complexas especificações. Com uma abordagem prescritiva, ao seguir a especificação entende-se que a durabilidade será atingida, abrindo-se pouco espaço para inovação na fabricação e uso do concreto. Na prática atual, a resistência a compressão é considerada fator de durabilidade e garantia de conformidade com o projeto, quando os fatores de controle da taxa de deterioração dependem da qualidade do concreto de cobrimento e agressividade do meio ambiente (ALEXANDER; BEUSHAUSEN, 2019).

As especificações de durabilidade do concreto devem, portanto, basear-se na medição das propriedades de transporte do concreto da espessura de cobrimento (permeabilidade), onde critérios mínimos de desempenho são previstos a partir de modos de deterioração, com objetivo de se alcançar uma probabilidade aceitável de desempenho (ALEXANDER, 2018b).

Em acordo ao discutido, a modelagem da vida útil de estruturas novas ou existentes, deve estabelecer previsões para estimar danos inaceitáveis para um determinado ambiente e garantir que não se aproxime de um estado limite.

A norma internacional ISO 13823 (2008) instituiu o Estado Limite de Durabilidade (ELD) como sendo o início da degradação, o qual dependerá do ambiente em que a estrutura está inserida (umidade, temperatura, concentração de agentes agressivos), dos mecanismos de transporte pelo qual o agente agressivo é inserido na estrutura (permeabilidade, difusão) e ao processo de deterioração decorrente de uma ação ambiental (corrosão, retração).

No que diz respeito ao desempenho estrutural, já são estabelecidos pelas normas de cálculo critérios de Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU). No que tange a durabilidade, tem-se a necessidade de definição de critérios para o ELD, ainda não incluso nas normas brasileiras. Isso implica na definição de critérios mínimos da qualidade do concreto de cobrimento da armadura em projeto por meio de equações de estado limite de durabilidade, além da realização da manutenção periódica (POSSAN, 2010).

Com o estabelecimento do ELD, tornar-se-ia possível simular o desempenho da estrutura ainda em fase de projeto para selecionar materiais que melhor se adequam ao ambiente de exposição.

Neste sentido, o acórdão do Tribunal de Contas da União (TCU), Nº 2911/2020, referente a obra da Nova Ponte do Guaíba e Acesso, no Rio Grande do Sul, sugere que, em fase de projeto de obras de arte especiais, seja conduzida a avaliação dos custos do ciclo de vida, considerando custos de manutenção e operação durante a vida útil de projeto. O mesmo documento, aponta a necessidade da definição da vida útil de projeto compatível com o nível de importância da obra, citados nos achados 9.2.1 e 9.2.2. do acórdão.

Considerando a necessidade citada pelo acórdão do Tribunal de Contas da União (TCU), Nº 2911/2020 e a falta de diretrizes normativas para determinação do Estado Limite de Durabilidade, o presente trabalho tem por finalidade apresentar procedimentos para a modelagem da vida útil pela estimativa do Estado Limite de Durabilidade em obras de concreto armado aparente, de forma que o projeto estrutural possa atender as necessidades da indústria da construção civil do setor público e privado de forma segura e sustentável. As diretrizes e procedimentos propostos são avaliados por meio de um estudo de caso, onde elementos estruturais da obra do campus da Universidade da Integração Latino-Americana (UNILA), projeto de Oscar Niemeyer, foram analisados probabilisticamente via simulação de Monte Carlo.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Proposição de uma metodologia para determinação do Estado Limite de Durabilidade (ELD) de estruturas de concreto armado sujeitas à ação de CO₂, empregando processos probabilísticos por meio de simulações de Monte Carlo, para avaliação de vida útil de projeto (VUP).

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Aplicar estudos probabilísticos em elementos estruturais de concreto armado de uma estrutura real para definição da evolução da degradação do concreto considerando o ambiente de exposição.
- b) Avaliar a probabilidade de falha do Estado Limite de Durabilidade em elementos estruturais para determinação da vida útil de projeto.
- c) Propor uma metodologia simplificada para determinação da VUP empregando processo probabilísticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

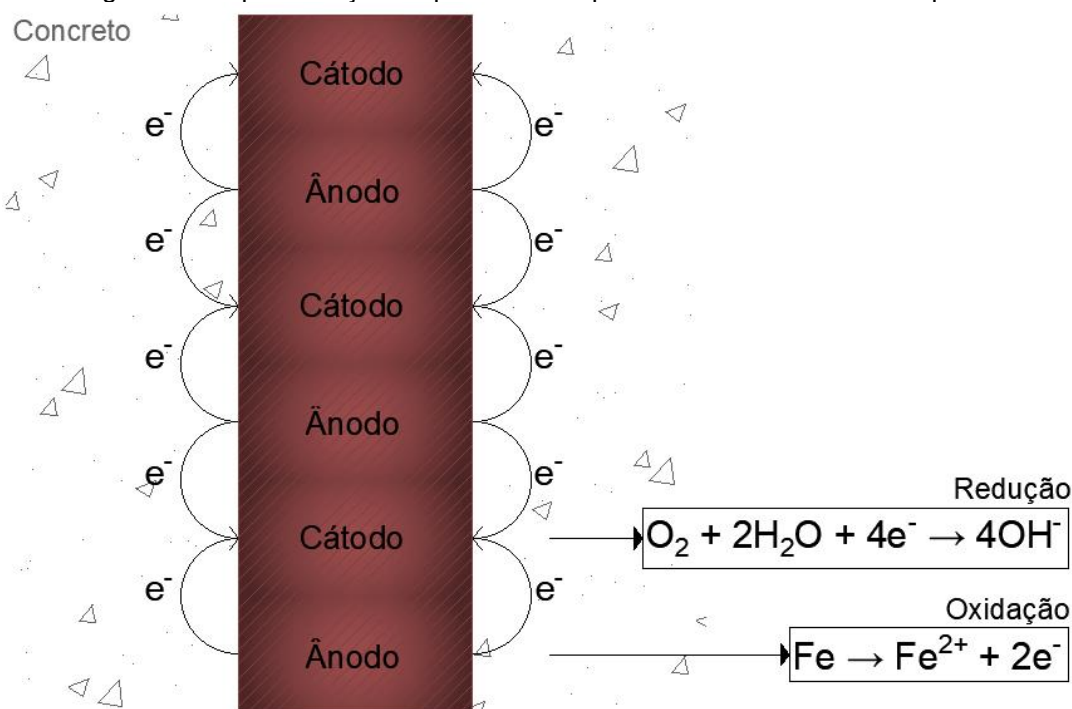
O concreto armado torna-se um material altamente difundido na construção civil pela sua grande aplicabilidade, moldabilidade e capacidade portante, porém quando exposto a ambientes agressivos fica susceptível a processos de deterioração físicos (fissuração, gelo-degelo, erosão, abrasão, retração), químicos (corrosão da armadura, ataque de sulfatos e ácidos, reação álcali-agregado) e biológicos (CEB, 1997). De acordo com Helene (2003) é crescente o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas relacionados com problemas de corrosão de armaduras que resultam no envelhecimento precoce de construções existentes.

3.1.1 CORROSÃO DE ARMADURAS

São admitidas três fases do estado do aço imerso no concreto: imunidade, passivação e corrosão. O metal não se corrói enquanto permanecer na zona de imunidade, para qualquer valor de pH. Na zona de passivação, o metal é envolto por uma camada de óxidos e hidróxidos que impedirá o progresso da corrosão, onde a elevada alcalinidade do concreto, decorrente da formação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) no processo de hidratação do cimento, garante sua formação e manutenção. O ingresso de agentes agressivos no concreto promove o surgimento de mecanismos de deterioração, onde o pH e o potencial eletroquímico, na presença de água e oxigênio, darão condições para destruição da camada passivadora fazendo com que o aço fique sujeito a corrosão (CARMONA, 2005).

A corrosão que ocorre nas armaduras de aço envolvidas pelo concreto é de caráter eletroquímico, ocorrida preferencialmente em meio aquoso e caracterizada por uma reação de oxidação, uma de redução e pela circulação de íons através do eletrólito (ver Figura 2). Dessa forma, duas zonas são formadas sobre a superfície do metal, na zona anódica (região corroída) ocorrem reações de oxidação do metal, com perda de massa e liberação de elétrons que migram para a zona catódica para produzir uma reação de redução, que dependerá da presença de oxigênio e do pH da interface metal-eletrólito, gerando produtos de corrosão que possuem características expansivas, responsáveis pela deterioração do concreto (ANDRADE PERDRIX, 1992).

Figura 2 – Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica



Fonte: Ribeiro, Cunha e Helene (2015).

De acordo com Helene (1993), as condições necessárias para ocorrência das reações de corrosão no interior do concreto são:

- Existência de eletrólito: meio ao qual são desenvolvidas as pilhas de corrosão, por onde serão conduzidos os íons através de correntes de natureza iônica e onde haverá a dissolução de oxigênio;
- Existência da diferença de potencial (ddp): a ddp ocorrerá entre dois pontos aleatórios da armadura e poderá ser desencadeada pela diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão do concreto ou do aço, impurezas no metal ou pela presença de agentes agressivos;
- Existência de oxigênio: regulador de todas as reações de corrosão;
- Existência de agentes agressivos: aceleram o processo corrosivo devido a um aumento significativo da condutividade elétrica do eletrólito, acentuando a ddp.

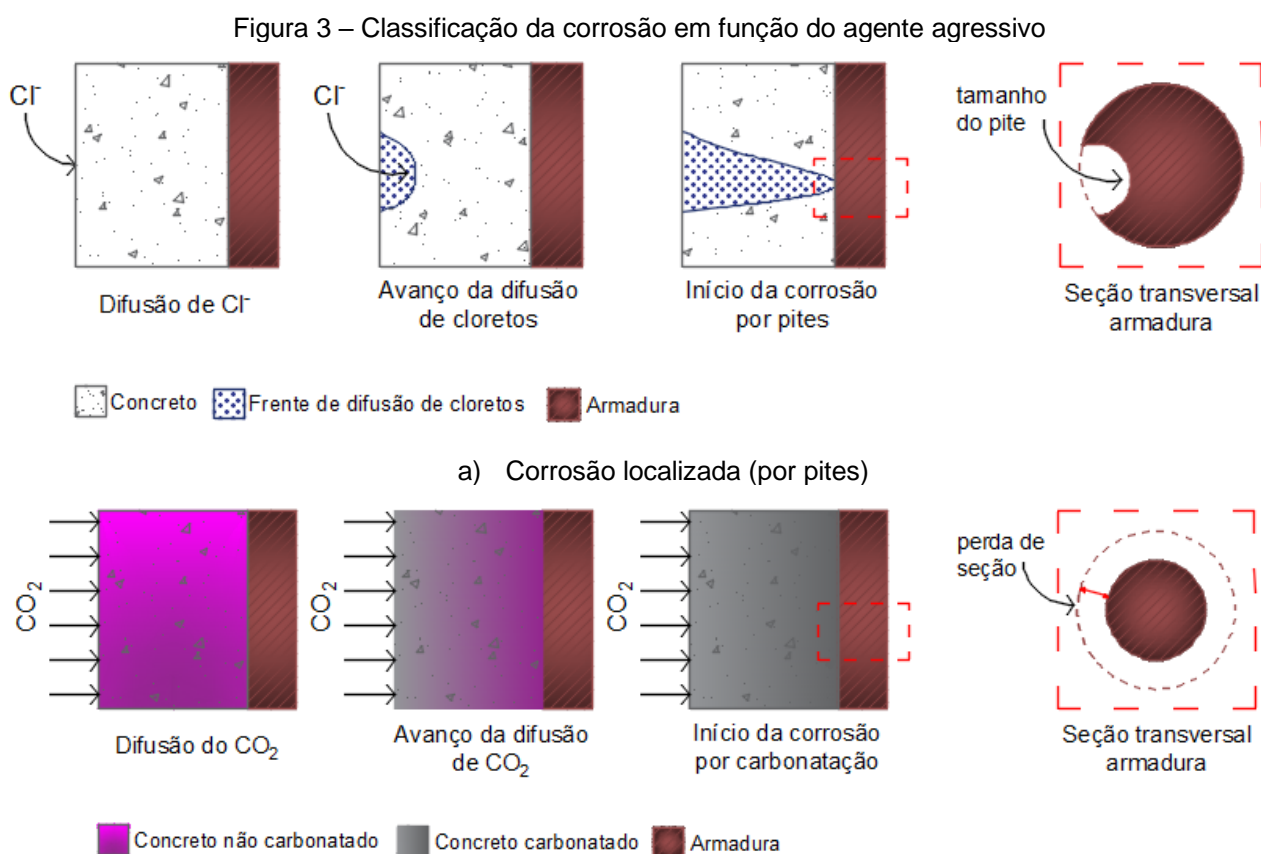
Conforme exposto, a despassivação do aço será desencadeada preponderantemente pela acidificação do concreto em torno do aço por carbonatação ou, quando por ação de íons de cloreto, resultam na destruição da película passivadora do aço, dando início a corrosão. A camada de cobertura de concreto, portanto, é uma barreira física essencial para a proteção do aço contra ações do meio ambiente de exposição e assegura a vida útil da estrutura (BATISTA FERREIRA, 2013).

Em ambientes urbanos, a concentração de dióxido de carbono (CO_2), intensificado em

locais de maior movimentação de veículos como túneis, garagens e próximos às vias de transporte, o torna o principal agente agressivo responsável pelo processo de despassivação das armaduras. Por conseguinte, em ambientes próximos ao mar, a quantidade de íons de cloreto presente contribui predominantemente para ocorrência de corrosão em armaduras (BRANDÃO, 1998).

Quando iniciada pela despassivação da armadura por CO_2 , a corrosão é classificada como corrosão uniforme, atingindo uniformemente toda a armadura. Já a corrosão iniciada pela difusão de íons cloreto, a mesma é classificada por pites, desenvolvendo-se pontualmente em regiões localizadas da armadura (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015). Segundo Val et. al (1998) a corrosão localizada é potencialmente mais perigosa, considerando o estado limite último, quando comparada a corrosão uniforme.

Na Figura 3 é possível visualizar o desenvolvimento da corrosão de acordo com o agente agressivo.



b) Corrosão uniforme (por carbonatação)
Fonte: Felix (2018).

A corrosão das armaduras por fenômenos eletroquímicos pode oferecer risco de colapso ao produzir a desagregação do concreto de cobertura e perda de aderência pela

redução da seção resistente da armadura. Esses fenômenos são decorrentes dos produtos de corrosão da armadura que se expandem na direção radial da barra ao mesmo tempo em que o metal é consumido. Essa expansão é capaz de exercer pressões de 32 MPa sobre o concreto (GENTIL, 2017).

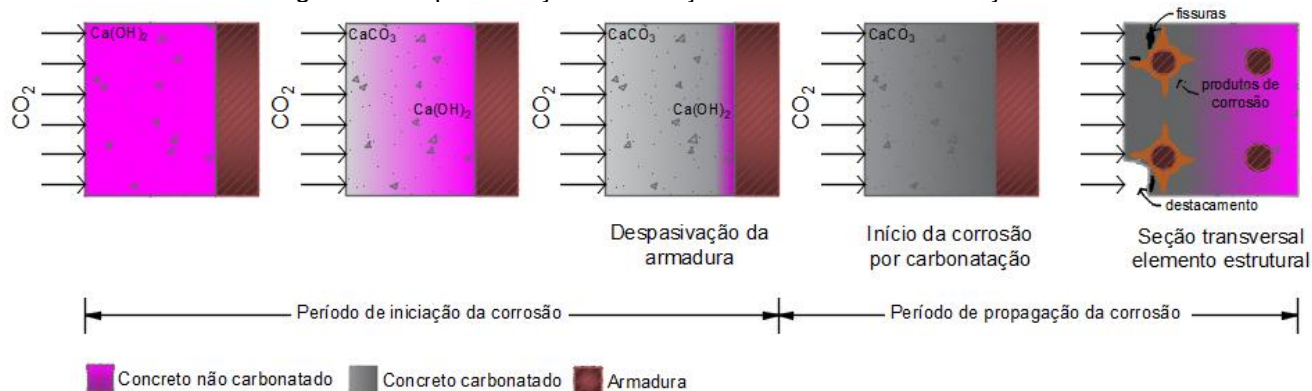
3.1.1.1 CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO

A alcalinidade do concreto que garante ao aço uma película passivadora é dada pela presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), de sódio (NaOH) e de potássio (KOH) no concreto endurecido. O gás carbônico (CO_2) presente no ambiente aliado a umidade do ambiente, ao penetrar no concreto, reage com os hidróxidos resultando na redução do pH do concreto (POSSAN, 2004). Essas reações podem ser vistas na Equação 1 e 2.



A carbonatação ocorre a partir da superfície e avança progressivamente para o interior do concreto formando frentes de carbonatação (ver Figura 4). As reações ocorrem em fase aquosa, tendo em vista que o dióxido de carbono na sua forma gasosa não é reativo. A velocidade em que ocorre a carbonatação é intensificada de acordo a concentração de CO_2 e em relações de a/c (água/cimento) elevadas, uma vez que elevadas relações a/c conferem uma maior porosidade ao concreto, facilitando a penetração de agentes agressivos no concreto (NEVILLE, 2016).

Figura 4 – Representação do avanço da frente de carbonatação



Fonte: Adaptado de Possan (2010).

As frentes de carbonatação separam duas zonas de pH distintas, uma com pH próximo a 13, sem ingresso do CO_2 no concreto, e outra próximo a 8, correspondente ao concreto já

carbonatado. Ao atingir a profundidade que equivale ao cobrimento da armadura, inicia-se então o processo de despassivação do aço (QUINTAS; CUNHA; HELENE, 2001).

No Quadro 1 são apresentados os principais fatores que afetam na profundidade de carbonatação.

Quadro 1 – Variáveis de interesse para ocorrência da carbonatação do concreto

| Fator | Influência | Fatores determinantes |
|------------------------------------|--|---|
| Concentração de CO ₂ | Quanto maior a concentração de CO ₂ , maior será a velocidade de carbonatação; Baixa relevância para teores até 0,1%. | Poluição do ar; Em centros urbanos: teor entre 0,03% e 1,2%. |
| Umidade relativa do ar | Fator condicionante para quantidade de água contida nos poros do concreto. Poros saturados exigem que o CO ₂ penetre por difusão, diminuindo a velocidade de penetração em até 10.000 vezes, enquanto a baixa umidade impede a reação de carbonatação; A frente de carbonatação avançam mais rapidamente em os poros estão apenas parcialmente preenchidos com água, devido à existência simultânea da água e da possibilidade de difusão de CO ₂ . | Umidade relativa do ar; Microclima; Teor ótimo entre 50 e 70%. |
| Exposição à chuva | Atua na quantidade de água para difusão de CO ₂ . | Projeto da estrutura, vento, chuvas dirigidas, dimensões do elemento estrutural; Em ordem crescente carbonatação é maior, em ambientes: internos; externos protegidos da chuva; e externos desprotegidos da chuva. |
| Permeabilidade | Relaciona-se a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido; Diretamente proporcional à velocidade de carbonatação. | Depende do diâmetro e conectividade dos poros que indiretamente é função do tipo de cimento e adições utilizadas, relação a/c, condições de execução e cura. |
| Cura | O grau de hidratação do cimento está relacionado ao tempo de cura; Quanto maior o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, minimizando a porosidade, permeabilidade e retração do concreto. | Tempo (duração) e tipo de cura. |
| Temperatura | Maior relevância durante o período de propagação, na taxa de corrosão e exerce influência no processo de cura. | Clima. |
| Relação a/c e resistência concreto | Parâmetros determinantes para a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido; Quanto maior a relação a/c, menor será a resistência, maior será a porosidade e a permeabilidade do concreto, facilitando a penetração de CO ₂ para o interior do material. | Quantidade de água da mistura; tipo de cimento, tempo e duração da cura; Diâmetro e conectividade dos poros. |
| Adições minerais no cimento | Adições pozolânicas contribuem com a redução da porosidade do concreto, porém atuam na | Concretos com resistências à compressão inferiores a 40 MPa, as |

| Fator | Influência | Fatores determinantes |
|--------------------------------------|---|--|
| | redução do pH ao consumir o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , propiciando a difusão do CO_2 de forma acelerada; Caso de cimentos CP III e CP IV. | adições aumentam a frente de propagação da carbonatação em razão do efeito da reserva alcalina se preponderar sobre a densificação da porosidade. |
| Quantidade de produtos carbonatáveis | Disponibilidade de carbonatos para consumo da reação. O consumo de cimento no concreto influi na permeabilidade e na capacidade de fixação do CO_2 através da reserva alcalina que o cimento confere ao concreto endurecido, devido à quantidade de hidróxidos de cálcio, sódio e potássio na solução dos poros, além do silicato de cálcio hidratado e do aluminato de cálcio hidratado. | Quanto maior a quantidade, menor a velocidade de carbonatação, isso depende da presença de adições, do consumo de cimento, da composição química do cimento (tipo de cimento). |
| Pintura | Proteção superficial que atua consideravelmente na redução da velocidade de difusão do CO_2 (NEVES; BRANCO; DE BRITO, 2010). | Tipo de tinta, quantidade de demãos. |

Fonte: Adaptado de Possan (2010).

3.2 VIDA ÚTIL

As estratégias de durabilidade adotadas que garantirão a vida útil da estrutura dependerão do tipo e concentração de agente agressivo, das condições de exposição da estrutura (microclima circundante, temperatura, proteção à chuva), da fissuração da matriz cimentícia, da qualidade do concreto (resistência mecânica, relação a/c), espessura de cobrimento e cura, o que influenciará na capacidade em resistir a penetração de agentes agressivos, além de ações de manutenção (POSSAN, 2010). A previsão da vida útil, portanto, avalia a taxa de deterioração de uma estrutura a depender do agente agressivo.

A norma brasileira de desempenho, NBR 155757 (2021, p. 17), define a vida útil como sendo:

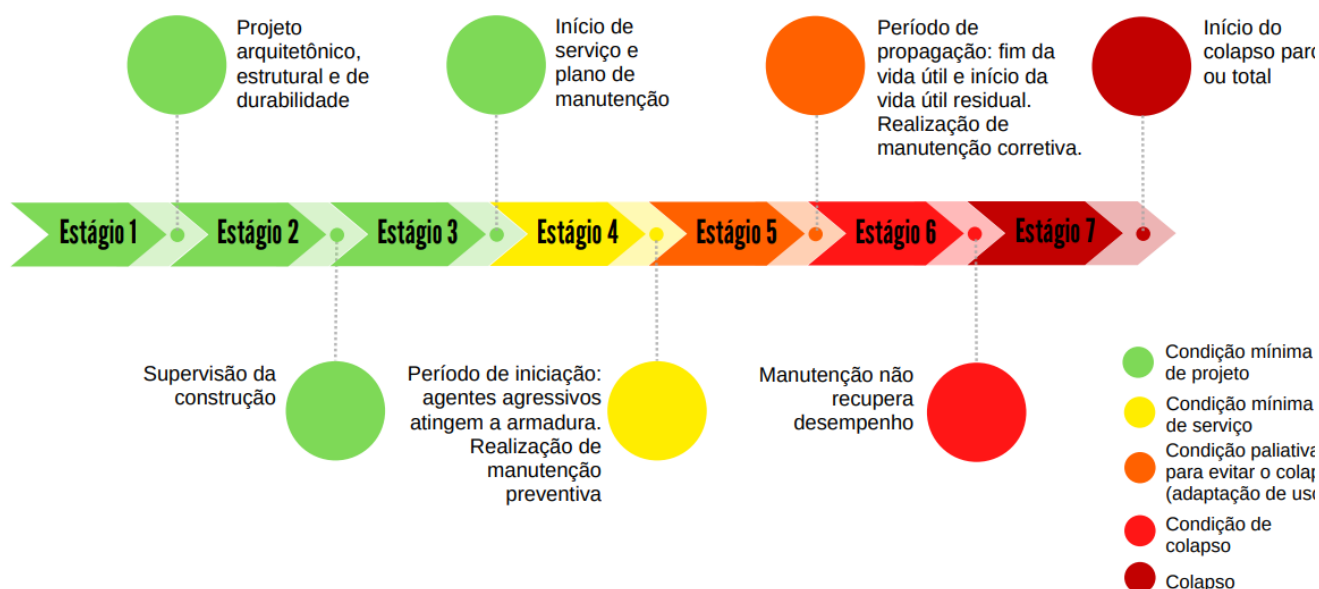
“período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos nesta norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (a vida útil não pode ser confundida com prazo de garantia legal ou contratual)”.

Tuutti (1982), propôs o conceito de vida útil considerando o comportamento de estruturas de concreto armado ao longo do tempo. O modelo divide em dois períodos a degradação da estrutura: período de iniciação e período de propagação da corrosão. O período de iniciação corresponde ao intervalo de tempo necessário para que os agentes

agressivos penetrem no concreto de cobertura e atinjam a armadura, causando a despassivação, o período de propagação será estabelecido pelo início da corrosão.

Castro-Borges e Helene (2018) traz a abordagem de vida útil fazendo um comparativo à vida útil de um ser humano (ver Figura 5), ampliando o conceito de vida útil (VU) e considerando além da deterioração do material.

Figura 5 – Abordagem para vida útil de estruturas de concreto



Fonte: Adaptado de Castro-Borges e Helene (2018).

O primeiro estágio é o de planejamento, onde são realizadas as primeiras considerações sobre a vida útil da estrutura e tem por finalidade a concepção do projeto executivo. O segundo estágio é o período de construção da estrutura, considerando especificações de projeto e controle de qualidade. O produto do segundo estágio é a nova estrutura final. O terceiro estágio corresponde à entrega do empreendimento ao cliente final, marcado pelo início de seu uso, quando a estrutura é colocada em serviço (CASTRO-BORGES; HELENE, 2018).

O quarto estágio é estabelecido quando os agentes agressivos atingem a armadura, definido pelo período de iniciação, momento em que o Estado Limite de Durabilidade é alcançado, onde a estrutura pode ou não receber manutenção preventiva para evitar danos futuros. O quinto estágio refere-se ao período de propagação, definido por vida útil residual, podendo por ações de manutenções corretivas, garantir o uso da estrutura. O sexto estágio é estabelecido quando ações preventivas ou corretivas não asseguram mais as condições de utilidade original, podendo ainda se houver mudança de uso da estrutura. O último estágio corresponde ao início do colapso parcial ou total (CASTRO-BORGES; HELENE, 2018).

3.3 ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE (ELD)

Na execução de um projeto estrutural a geometria dos elementos estruturais é definida a partir de valores característicos das ações atuantes na estrutura, sendo em seguida, obtidos os esforços e deslocamentos dos elementos estruturais. A capacidade resistente à uma solicitação é avaliada a partir do comportamento do material frente a diferentes estados limites: Estado Limite de Serviço e Estado Limite Último.

Em um projeto de durabilidade, valores mínimos aceitáveis para o desempenho ou máximos aceitáveis para a degradação, são caracterizados por Estados Limite de Durabilidade (FERREIRA, 2000). Quando ocorre a despassivação da armadura atinge-se a vida útil de projeto ou, segundo a ISO 13823 (2008), o Estado Limite de Durabilidade é alcançado, e deste momento em diante dá-se início ao processo de degradação do material.

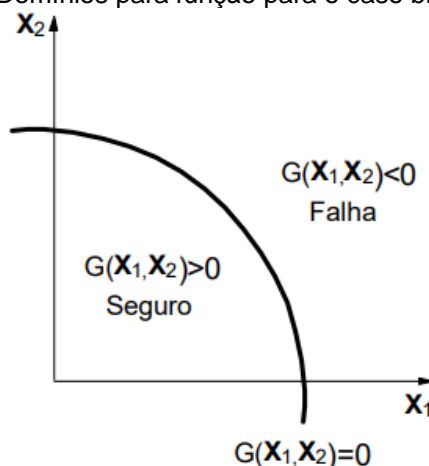
Na análise de confiabilidade, um determinado evento é representado através de uma expressão matemática, chamada de função de estado limite, que representa uma fronteira entre os estados de falha ou de segurança de um evento. A representação do estado limite se dá através da função usualmente chamada de $G(X)$ (ver Equação 4), que envolve as variáveis aleatórias de interesse contidas no vetor X , representado pela Equação 3 (BARBOSA, 2004):

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad \text{Equação 3}$$

$$G(X) = G(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{Equação 4}$$

A avaliação da função consiste na definição da região de falha, quando $G(X) < 0$, e para $G(X) > 0$, quando não há ocorrência de falha, na região de segurança. O conceito da função de estado limite pode ser ilustrado na Figura 6 para o caso bidimensional.

Figura 6 – Domínios para função para o caso bidimensional



Fonte: Barbosa (2004).

O estado limite de durabilidade associado à despassivação da armadura por carbonatação ou por íons cloreto, será estabelecido pela função $G(t)$ (ver Equação 5), que representará a profundidade de penetração de agentes agressivos, onde a falha é instituída quando $G(t) \leq 0$, instante onde a profundidade de penetração dos agentes agressivos x_c é igual ou superior à espessura de cobertura do concreto y_c .

$$G(t) = y_c - x_c \quad \text{Equação 5}$$

3.4 ESTIMATIVA DA DEGRADAÇÃO

A estimativa de vida útil fundamenta-se na estimativa de evolução da degradação, podendo ser aplicada a estruturas existentes, quando deseja-se estimar quantos anos são necessários para que a estrutura atinja o estado limite desejado ou, para novas estruturas com o intuito de selecionar variáveis de projeto que melhor se adequam ao ambiente de exposição da estrutura. A estimativa da degradação é conduzida com base em um modelo matemático mediante processos probabilísticos, semiprobabilísticos ou determinísticos, independente do modelo adotado. O que diferirá entre os processos é a consideração da variabilidade dos fatores de influência ou não. Nos dois primeiros casos faz-se necessário o conhecimento da média (μ), do desvio padrão (σ) ou coeficiente de variação (CV) e da distribuição de probabilidade das variáveis (POSSAN, 2010).

Na análise probabilística da degradação das estruturas de concreto, tem-se o intuito determinar o efeito da dispersão dos parâmetros de influência referentes ao concreto, às condições ambientais e de exposição da estrutura, no seu comportamento de durabilidade (desempenho) ao longo do tempo. O processo estocástico baseado na teoria de confiabilidade, permite quantificar as incertezas e o efeito destas na segurança e no desempenho das estruturas, onde a confiabilidade está atrelada a um determinado nível de desempenho, o qual, mesmo com a ocorrência de falha (índice de confiabilidade alcançado), a estrutura não oferece riscos, estando ainda segura. Neste caso, se o índice de confiabilidade for atingido para o estado limite de durabilidade, ou seja, se ocorrer a despassivação da armadura, a estrutura permanece segura, pois os estados limites de utilização e últimos ainda não foram atingidos (POSSAN, 2010).

Uma das formas de se avaliar a confiabilidade pela teoria da confiabilidade é determinar o índice de confiabilidade β e a correspondente probabilidade de falha p_f (ANG; TANG, 1984), no que se refere aos Estados Limites de Durabilidade, Estados Limites de Serviço e Estados Limites Últimos.

O índice de confiabilidade β relaciona-se com a probabilidade de falha de modo que, à medida em que o índice de confiabilidade de uma estrutura aumenta, menor será a probabilidade de falha em relação a este estado limite. Segundo Ang e Tang (1984), a relação entre β e p_f é dada pelas Equações 6 e 7, sendo Φ a função de densidade de probabilidade normal:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad \text{Equação 6}$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \quad \text{Equação 7}$$

Na Tabela 1 são apresentados os estados limites definidos em normas e códigos internacionais e as respectivas probabilidades de falha associada aos índices de confiabilidade.

Tabela 1 – Índice de confiabilidade mínimos para um período de 50 anos

| Estados limites | EUROCODE (2001) | | Lifcon (2003) | | JCSS (2001) | | ISO 13823 (2008) | |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|----------------------------|------------------|----------------|
| | β | p_f | β | p_f | β | p_f | β | p_f |
| Estado Limite Último (ELU) | 3,30 a 4,30 | $\sim 10^{-4}$ a 10^{-5} | 3,6 | $\sim 10^{-4}$ | 3,30 A 4,30 | $\sim 10^{-4}$ a 10^{-5} | 3,70 | $\sim 10^{-4}$ |
| Estado Limite de Serviço (ELS) | 1,50 | $\sim 0,07$ | 2,00 | $\sim 10^{-2}$ | 1,50 | $\sim 0,07$ | 1,30 a 2,40 | 0,01 a 0,10 |
| Estado Limite de Durabilidade (ELD) | - | - | - | - | - | - | 0,80 a 1,60 | 0,05 a 0,20 |

Fonte: Possan, 2010.

3.5 MÉTODO DE MONTE CARLO

A utilização do método de Monte Carlo implica em ter uma amostra de números gerados aleatoriamente que serão base para o processo de simulação a fim de prever ou estudar o desempenho de resposta de estruturas de concreto armado por meio da função de estado limite (ver Equação 4). Neste processo, para cada variável aleatória de entrada da função de estado limite, a consideração das incertezas do processo exige o conhecimento dos valores médios (μ), do desvio padrão (σ) ou coeficiente de variação (CV) e distribuição de probabilidade característica, definida pela função de distribuição de probabilidade (f.d.p.), compiladas da literatura ou de dados reais da estrutura analisada (POSSAN, 2010).

A primeira etapa da simulação de Monte Carlo para obtenção da confiabilidade consiste na geração de i números pseudo-aleatórios uniformes u_1, u_2, \dots, u_i entre 0 e 1. De acordo com Barbosa (2004), considerando uma variável aleatória X_n com uma função de distribuição de probabilidade $f_x(x)$, para gerar valores amostrais x_i para a variável aleatória, tem-se a

Equação 8.

$$X_n = f_x(x_i) \quad \text{Equação 8}$$

O valor amostral x_i pode ser calculado pela expressão na Equação 9.

$$x_i = f_x^{-1}(u_i) \quad \text{Equação 9}$$

onde f_x^{-1} é a função inversa de f_x .

Neste sentido, são gerados N amostras distintas, criadas aleatoriamente, para que sejam avaliadas N vezes pela função de falha, o que implica a geração de N componentes do vetor X_i de cada variável criadas de acordo com sua distribuição de probabilidade f_x .

A probabilidade de falha pode ser expressa, utilizando o método de Monte Carlo, partindo da integral que a define, mostrada na Equação 10.

$$p_f = \int_{G \leq 0} F_X(X) dX = \int_{G \leq 0} I(X)F_X(X) dX \quad \text{Equação 10}$$

sendo F_X a função acumulada que engloba todas as funções de distribuição de cada variável e $I(X)$ o estimador, baseado na função de estado limite, é calculado por meio da Equação 11, sendo seu valor 0 ou 1. O valor 0 refere-se ao caso em que não há falha e, 1, para quando não a falha.

$$I(X) = \begin{cases} 1, & G(X) \leq 0 \\ 0, & G(X) > 0 \end{cases} \quad \text{Equação 11}$$

A Equação 10 pode ser reescrita como a Equação 12.

$$p_f = \sum_{n=1}^N I[G(X_n) \leq 0] \frac{1}{N} \quad \text{Equação 12}$$

A probabilidade de falha passa a ser determinada pela Equação 13.

$$p_f = \frac{\text{n}^\circ \text{ de simulações em que } G(X) \leq 0}{N} \quad \text{Equação 13}$$

A variância e o coeficiente de variação para valores pequenos da probabilidade de falha são expressos pelas Equações 14 e 15.

$$\text{Var}(p_f) = p_f \frac{(1 - p_f)}{N} \cong \frac{p_f}{N} \quad \text{Equação 14}$$

$$CV(p_f) = \frac{\sqrt{\text{Var}(p_f)}}{p_f} \quad \text{Equação 15}$$

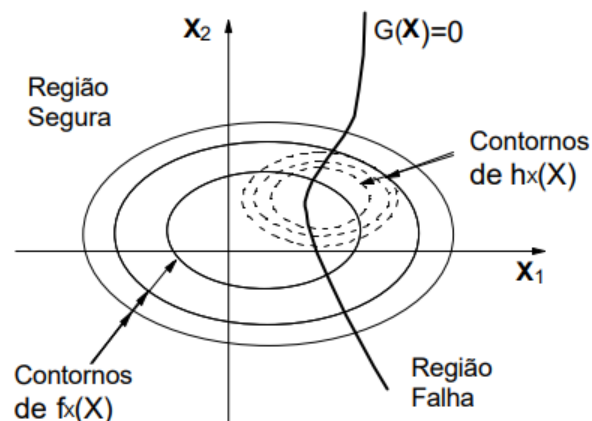
Devido ao valor de p_f ser pequeno para estruturas usuais, geralmente da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} , e como a sua variância é expressa de forma inversamente proporcional ao número total de simulações, o valor de N deve ser elevado para que se possa obter aproximações aceitáveis de p_f (BARBOSA, 2004).

Em uma análise de convergência referente à variabilidade do índice de confiabilidade com o número de amostras empregado nas simulações (β versus N), o valor de N pode ser estimado quando se tem a estabilização do índice de confiabilidade.

3.5.1 AMOSTRAGEM POR IMPORTÂNCIA

A amostragem por importância é uma técnica utilizada para redução da variância de p_f , de modo a aumentar o número de simulações bem sucedidas, modificando o vetor das variáveis aleatórias. O objetivo é utilizar outra função densidade de probabilidade $h_X(X)$ que aumente a probabilidade de conter amostras dentro da região de falha, conforme pode ser ilustrado na Figura 7 para o caso de duas variáveis aleatórias.

Figura 7 – Função amostragem por importância



Fonte: Barbosa (2004).

Partindo da Equação 10, aplica-se uma nova função densidade de probabilidade $h_X(X)$ obtendo-se a integral mostrada na Equação 16.

$$p_f = \int_{G(X) \leq 0} I[G(X) \leq 0] \frac{f(X)}{h(X)} h(X) dX \quad \text{Equação 16}$$

Definida a $h_x(X)$, são geradas N amostras desta e calculadas para cada amostra X_n o valor da função de falha $G(X)$. A probabilidade de falha será então obtida utilizando a Equação 17.

$$p_f = \sum_{n=1}^N \frac{S_n}{N} \quad \text{Equação 17}$$

onde S_n corresponde ao fator de escala definido na Equação 18.

$$S_n = \begin{cases} 0, & G(X) > 0 \\ \frac{F(X_n)}{h(X_n)}, & G(X) \leq 0 \end{cases} \quad \text{Equação 18}$$

4 MÉTODO

O método proposto nesse trabalho baseia-se na teoria da confiabilidade para estimativa do Estado Limite de Durabilidade (ELD), considerando as incertezas que envolvem o fenômeno da carbonatação no concreto. É importante destacar que o método implementado avalia a previsão de vida útil da estrutura até o momento em que ocorre a despassivação da armadura, definido pelo período de iniciação da corrosão, tendo em vista o ingresso do CO₂ pela difusão do agente na matriz cimentante, sem que seja considerado a presença de fissuras que facilitarão a ação do CO₂.

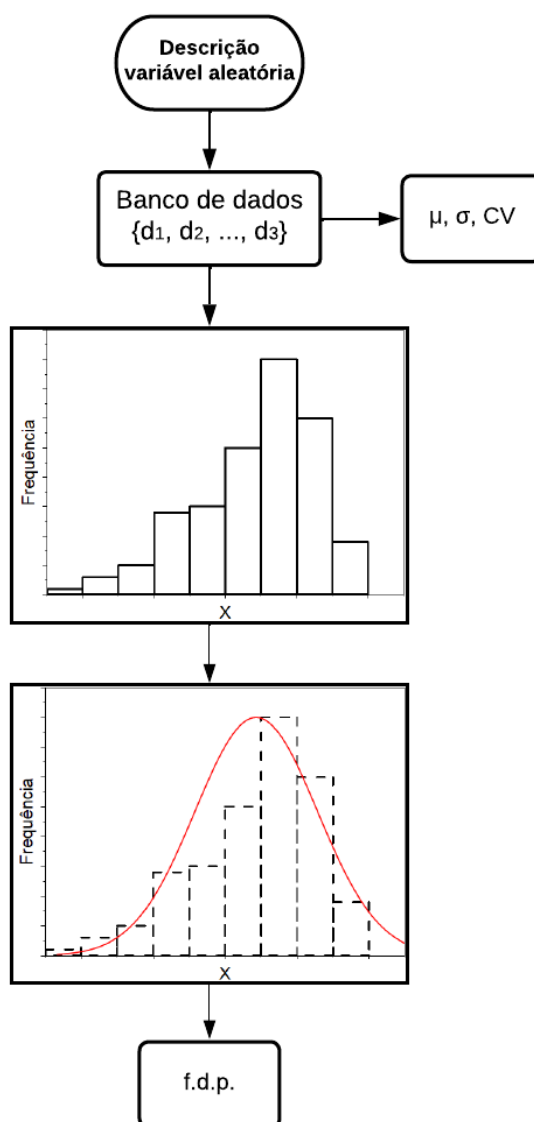
O método é indicado para estruturas de concreto armado aparente, localizadas em regiões urbanas, onde são preponderantes os mecanismos de degradação desencadeados pela presença do CO₂. Há casos em que há atuação do efeito sinérgico do CO₂ e do Cl⁻ o que torna ainda mais complexa a determinação da vida útil, não sendo tratado neste trabalho.

Com base no agente agressivo definido, é adotado um modelo matemático que descreva a difusão do CO₂ no concreto de cobrimento em função do tempo. Neste trabalho foi empregado o método analítico apresentado por Possan et al. (2021). Na literatura podem ser encontrados outros modelos que representem os fenômenos de carbonatação, porém o modelo elegido foi selecionado em razão da baixa complexidade de resolução e fácil obtenção de dados de aplicação.

Como parte da proposta, a consideração da natureza aleatória dos parâmetros que governam o processo de carbonatação, as variáveis de entrada do problema devem ser definidas sobre uma abordagem probabilística. Neste trabalho foram adotadas as variáveis aleatórias referentes ao cobrimento nominal das armaduras, resistência à compressão do concreto (f_{ck}), umidade relativa (UR) e teor de CO₂ presentes na atmosfera.

Na etapa seguinte à definição do modelo matemático, faz-se necessário a descrição das variáveis de entrada que serão aleatórias com base em seus valores médios (μ), o desvio padrão (σ) ou coeficiente de variação (CV) e suas respectivas funções de distribuição, podendo esta ser normal, lognormal, exponencial, entre outras. Através de um banco de dados são obtidos os parâmetros de μ , σ , CV e, pela análise dos histogramas, é definida a curva de distribuição probabilística que melhor se ajusta à variável de análise (ver Figura 8). Quanto maior o banco de dados, melhor serão descritas a aleatoriedade das variáveis. A partir da base de dados, as análises subsequentes podem ser realizadas em Microsoft Excel ou softwares destinados a análise de dados e estatística, como o Origin.

Figura 8 – Fluxograma para descrição das variáveis aleatórias



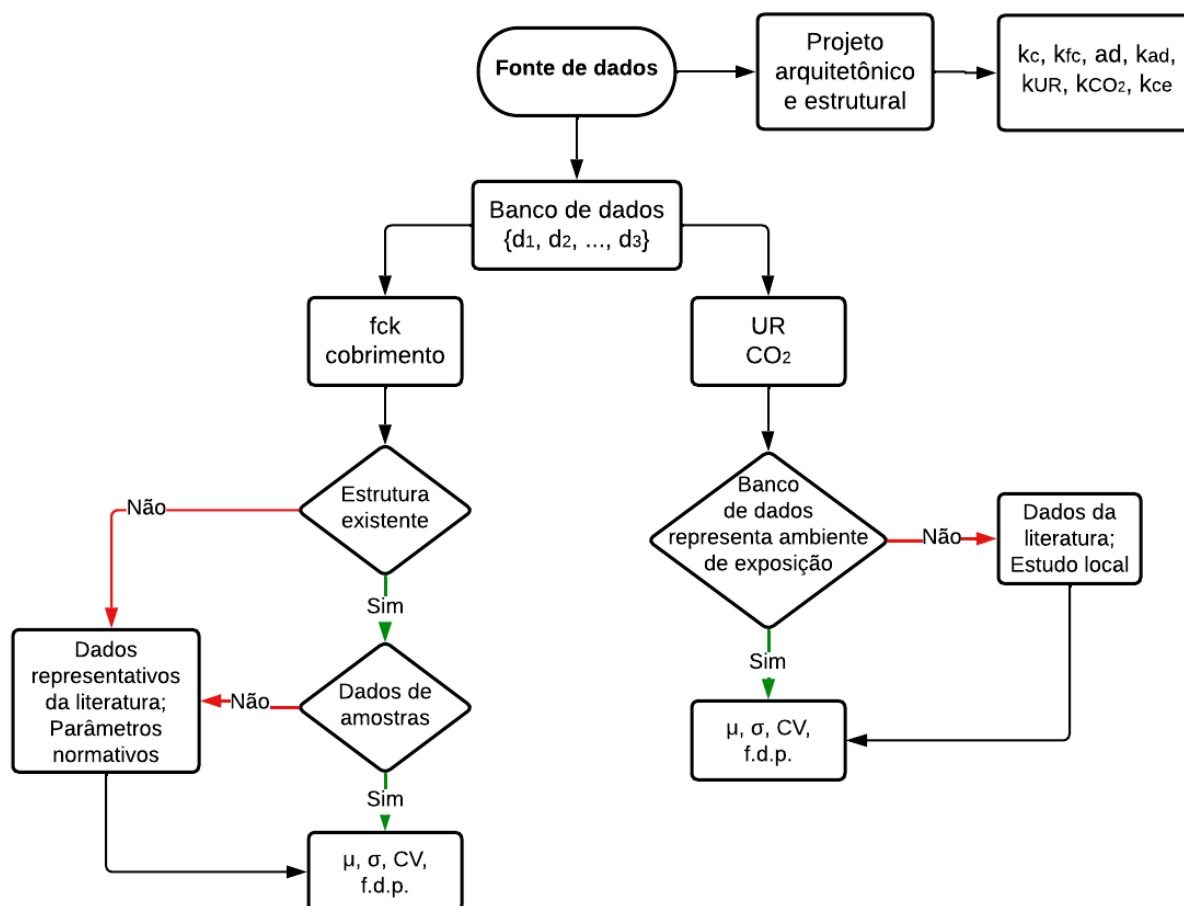
Fonte: Autora (2022).

A fonte para a base de dados correspondentes a variabilidade da variável (μ , σ , CV , f.d.p.) podem ser coletados por meio de experimentos naturais ou acelerados, por conhecimento de experts, por parâmetros normativos, obtidos através da literatura ou, por dados reais da estrutura. Quando o estudo é realizado em fase de projeto, podem ser obtidos os dados da literatura que sejam representativos ao objeto de estudo. Quando o estudo é aplicado em obras existentes, os dados podem ser obtidos através da estrutura real por meio de amostras ou estudos conduzidos localmente, quando os dados forem inexistentes ou de difícil obtenção, a adoção de dados representativos da literatura.

Tem-se ainda os parâmetros que são inerentes ao modelo matemático adotado com relação ao tipo de cimento, adições minerais e condições de exposição à chuva que definirão os coeficientes k_c , k_{fc} , k_{ad} , k_{UR} e ad , podendo estes serem obtidos através do projeto

estrutural e da localização do elemento estrutural no projeto arquitetônico.

Figura 9 – Fluxograma para busca de dados de entrada do modelo matemático



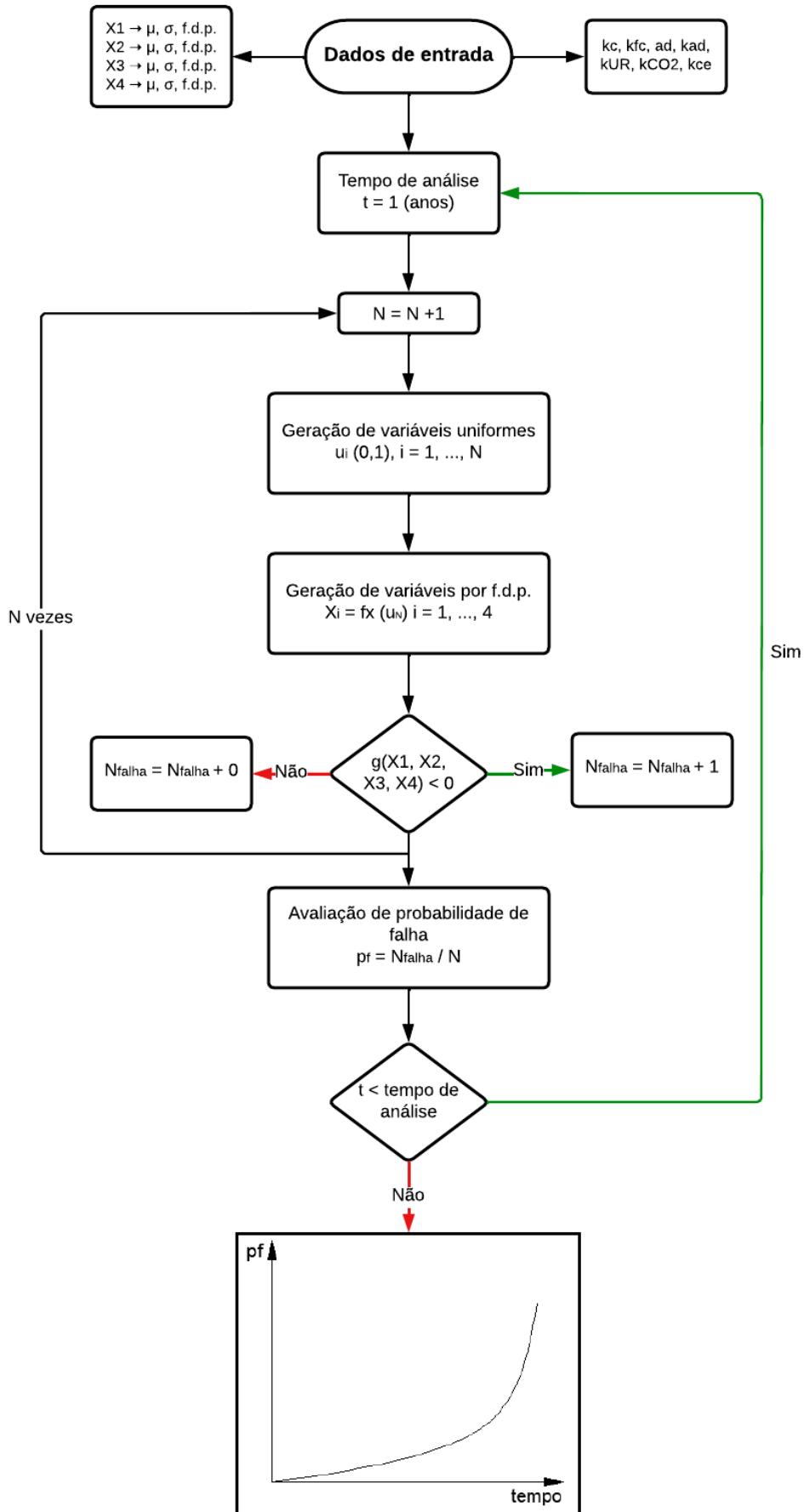
Fonte: Autora (2022).

Definidas as variáveis de entrada do modelo matemático adotado, a etapa seguinte compreende a geração de N amostras em função das distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias, por meio da técnica de amostragem por importância. A quantidade de amostras que representam uma boa confiabilidade, é obtida com base em uma análise prévia de convergência.

Na última etapa, as N amostras geradas, isto é, diversos elementos estruturais característicos as funções de distribuição de probabilidade, serão submetidas a simulação da degradação a partir da função de estado limite, com o intuito de determinar a probabilidade de falha, ou seja, a probabilidade de despassivação do aço em função do tempo de vida útil da estrutura, sendo a vida útil de projeto (VUP) mínima considerado pela norma brasileira NBR 15575 de 50 anos, para elementos estruturais de concreto armado.

Na Figura 10 é apresentada a rotina para simulação com uso da técnica de Monte Carlo. As simulações exigem uso de software de programação, a depender da preferência do programador, como por exemplo os softwares Matlab, Mathematica, entre outros.

Figura 10 – Fluxograma do procedimento de Simulação de Monte Carlo



Fonte: Autora (2022).

4.1 MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO₂

Neste trabalho será empregada uma formulação analítica para representação da difusão de CO₂ no concreto baseado no modelo de Possan et al. (2021).

4.1.1 MODELO DIFUSÃO DO CO₂ NO CONCRETO

Considerando ambiente urbano, para determinação da profundidade de carbonatação tem-se o modelo de Possan et al. (2021), conforme Equação 19.

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} (UR - 0,68)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad \text{Equação 19}$$

Onde,

y = profundidade de carbonatação média do concreto [mm];

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto [MPa];

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 2);

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

t = idade do concreto [anos];

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

ad = teor de adição no concreto (em % em relação à massa de cimento);

UR = umidade relativa média [%*0,01];

k_{UR} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

CO_2 = teor de CO₂ da atmosfera [%];

k_{CO_2} = fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 2);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (Tabela 2).

Tabela 2 – Coeficientes do modelo Possan et. al (2021) em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição

| Tipos de Cimento | a) | | | b) | |
|------------------|-----------------------------|----------|----------|----------------------|----------|
| | Características do concreto | | | Condições Ambientais | |
| | Cimento | f_c | Adição | CO ₂ | UR |
| | k_c | k_{fc} | k_{ad} | k_{CO_2} | k_{UR} |
| CP I | 19,80 | 1,70 | 0,24 | 18,00 | 1300 |
| CP II E | 22,48 | 1,50 | 0,32 | 15,50 | 1300 |
| CP II F | 21,68 | 1,50 | 0,24 | 18,00 | 1100 |
| CP II Z | 23,66 | 1,50 | 0,32 | 15,50 | 1300 |
| CP III | 30,50 | 1,70 | 0,32 | 15,50 | 1300 |
| CP IV | 33,57 | 1,70 | 0,32 | 15,50 | 1000 |
| CP V ARI | 19,80 | 1,70 | 0,24 | 18,00 | 1300 |

| Condições de exposição da estrutura | |
|--|----------|
| Proteção à chuva | k_{ce} |
| Ambiente interno Protegido da chuva | 1,30 |
| Ambiente externo Protegido da chuva | 1,00 |
| Ambiente externo Desprotegido da chuva | 0,65 |

Fonte: Possan et. al (2021).

4.2 FUNÇÃO DE ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE

Aplicando a equação de estado limite a ser analisada referente à probabilidade de iniciação da corrosão devido à carbonatação do concreto, conforme a Equação 20, teremos:

$$G(X) = X_3 - \left\{ k_c \left(\frac{20}{X_1} \right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + X_1} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot X_4^{\frac{1}{2}}}{60 + X_1} \right) - \left(\frac{k_{UR} (0,01 * X_2 - 0,68)^2}{100 + X_1} \right) \right] \right] \cdot k_{ce} \right\} \quad \text{Equação 20}$$

Onde o X representa o vetor de variáveis aleatórias, sendo:

X_1 = resistência à compressão (MPa);

X_2 = umidade relativa (%);

X_3 = cobrimento (mm);

X_4 = teor de CO₂ (%).

A falha ocorrerá quando $G(X) \leq 0$, quando a profundidade de difusão dos agentes agressivos for igual ou superior ao cobrimento da armadura e o ELD é atingido. Para $G(X) > 0$, quando não houver falha.

5 ESTUDO DE CASO

Os dados para o estudo de caso foram obtidos através dos projetos arquitetônico e estrutural, memoriais descritivos, relatórios de controle tecnológicos e fotos, disponibilizados pela Secretaria de Implantação do Campus (SECIC) e site da UNILA, além de visita técnica à obra.

5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OBRA

O presente estudo de caso é aplicado a obra interrompida do Campus da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), mais especificamente no Edifício Central, localizada no perímetro da área de segurança da Usina Hidrelétrica de Itaipu (ver Figura 11), na cidade de Foz do Iguaçu, PR.

Figura 11 – Localização do campus UNILA



De autoria do Arquiteto Oscar Niemeyer, o projeto foi doado à UNILA em fase de implantação entre 2009 e 2010 pela Itaipu Binacional. O projeto do campus universitário incluía nove edificações principais: Recepção, Edifício Central, Prédio de Aulas, Diretório, Restaurante, Biblioteca, Teatro, Laboratórios e Sala de Conselho (ver Figura 12). Continha também estruturas auxiliares em ambiente subterrâneo, como Central de Utilidades e Galeria Técnica, além de estacionamentos, acessos e passarela, totalizando cerca de 145 mil m².

A obra teve início em 2011 e foi paralisada em 2014 por solicitação do consórcio responsável pela execução estando ainda na primeira fase da construção. A primeira etapa

da construção previa execução do Edifício Central, Prédio de Aulas, Restaurante, central de utilidades, galeria de utilidades, estacionamentos e acessos parciais.

Figura 12 – Projeto campus UNILA



Fonte: Arquivos UNILA (2009).

As estruturas em geral foram executadas em sistema construtivo misto, concreto armado e protendido, com lajes nervuradas. As resistências características do concreto (f_{ck}) em projeto é de 35 MPa e 50 MPa para os pilares do Edifício Central. Todo concreto aplicado era produzido em uma central de concreto localizada no próprio canteiro de obras (ver Figura 13).

Figura 13 – Central de Concreto próxima as instalações provisórias do canteiro de obras



Fonte: Arquivo UNILA (2011).

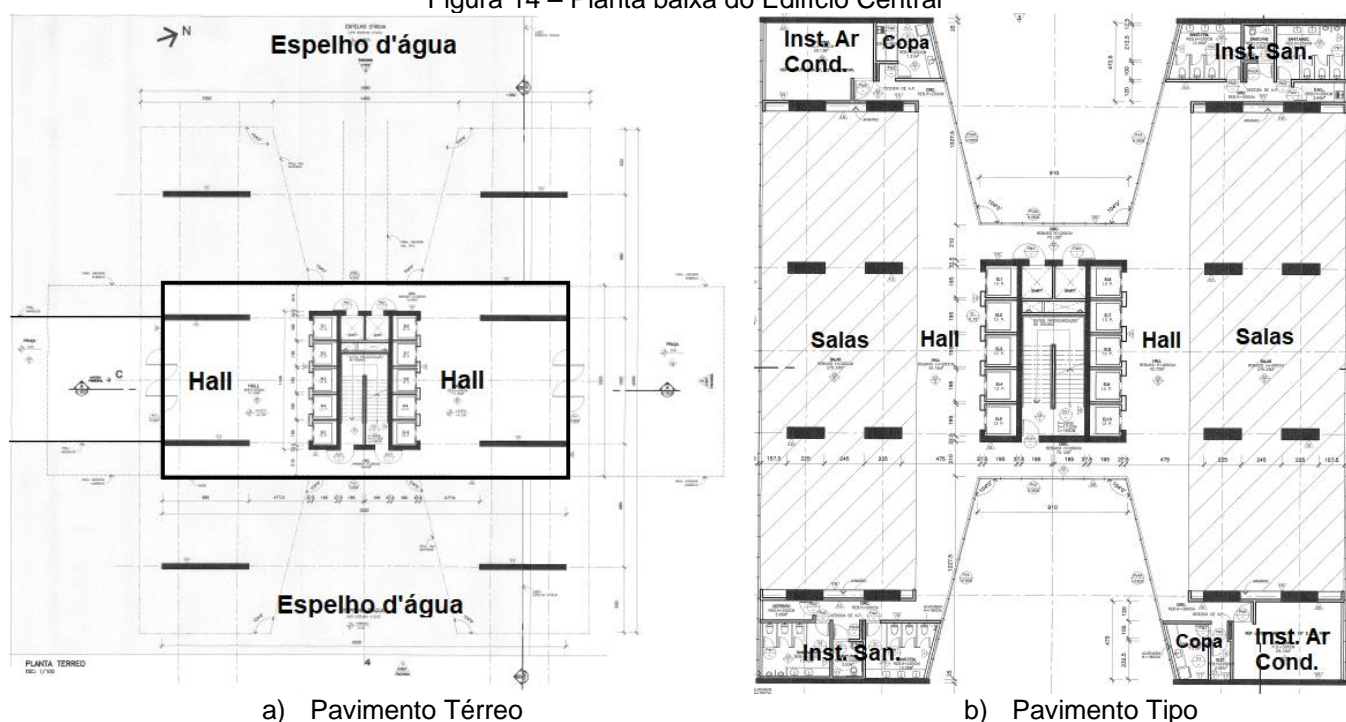
Entre 2016 e 2017 foram realizadas ações de manutenção preventivas afim de minimizar ações deletérias do conjunto estrutural edificado que incluíam a realização e serviços de limpeza e remoção de lama, impermeabilização, execução de serviços de drenagem como construção de poços de drenagem, proteção das armaduras expostas e preservação das instalações provisórias do canteiro de obras e isolamento de áreas para segurança. Mais detalhes sobre as ações de manutenção preventivas podem ser vistas no estudo de Possan et al. (2018).

5.2 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA EM ESTUDO

O Edifício Central possui área de 27.926,0, m² em formato H, com dimensões de 36 m x 40 m. O projeto do prédio dispõe de subsolo, vinte e três pavimentos e cobertura (ver Figura 15), com altura total de 111,35 m.

A estrutura do Edifício é sustentada por duas linhas de quatro pilares-parede localizados entre as sapatas e a laje do 1º pavimento, além do núcleo central composto por paredes em concreto armado. A partir da laje do 1º pavimento os pilares-parede sofrem uma transição para quatro linhas de quatro pilares (ver Figura 14). Cada pavimento é estruturado com painéis em laje nervurada do tipo ATEX 150, quatro vigas protendidas em uma direção e oito vigas perpendiculares a estas, além das vigas de bordo nos dois sentidos.

Figura 14 – Planta baixa do Edifício Central

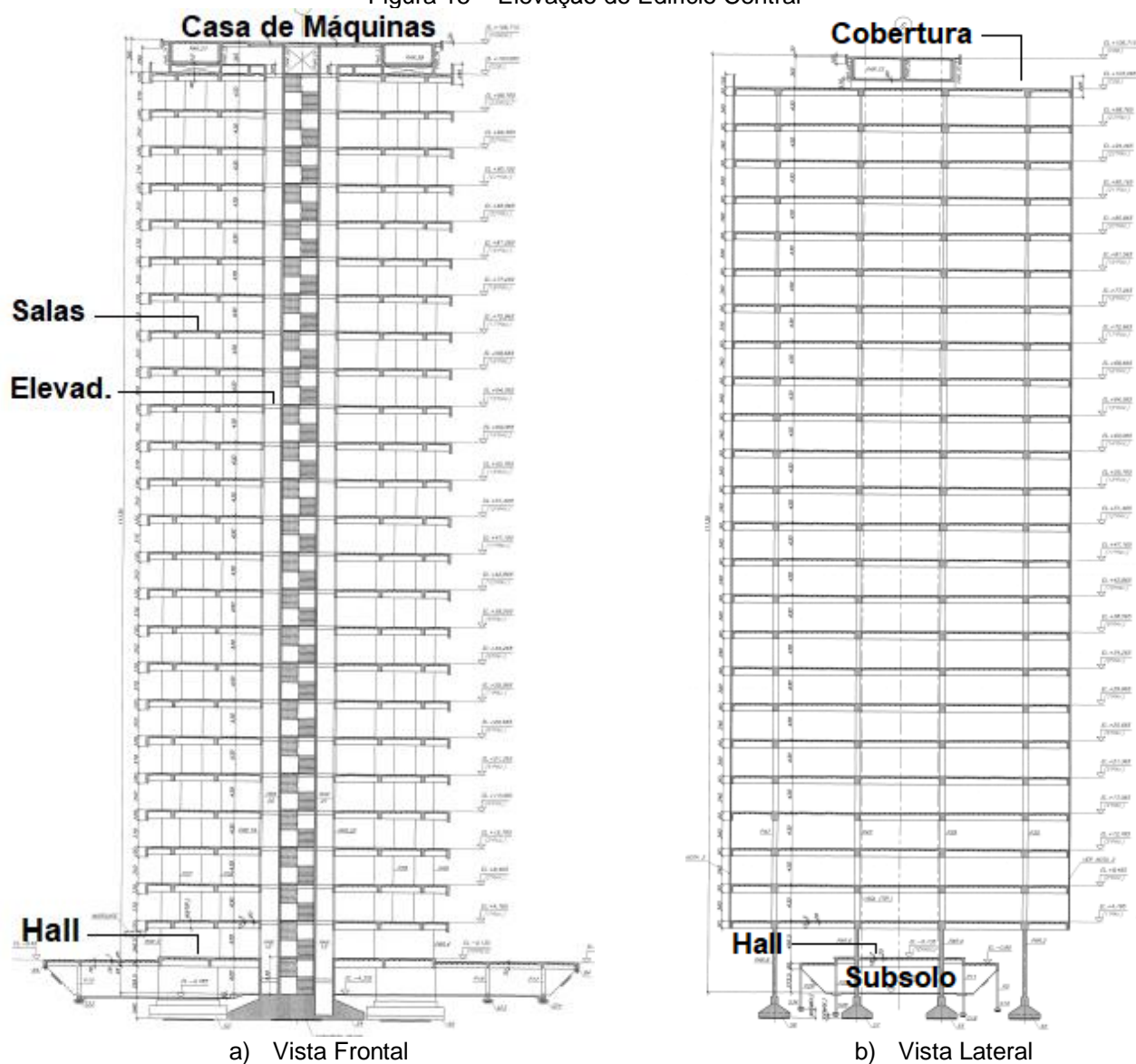


a) Pavimento Térreo

b) Pavimento Tipo

Fonte: Arquivo UNILA (2011).

Figura 15 – Elevação do Edifício Central



Fonte: Arquivo UNILA (2011).

As resistências características do concreto adotadas seguem o padrão conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistência a compressão do concreto mínima de projeto

| Elemento estrutural | Resistência característica do concreto a compressão (f_{ck}) |
|---|---|
| Blocos e cintas | $f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$ |
| Pilares-parede e pilares principais até o 11º pavimento | $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$, com adição de no mínimo 8% de sílica ativa |
| Demais pilares, lajes, vigas e paredes | $f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$, com adição de no mínimo % de sílica ativa |

Fonte: Especificação Técnica das Estruturas de Concreto – ITAIPU (2010).

Os cobrimentos mínimos adotados em projeto, garantidos empregando-se afastadores, são indicados na Tabela 4.

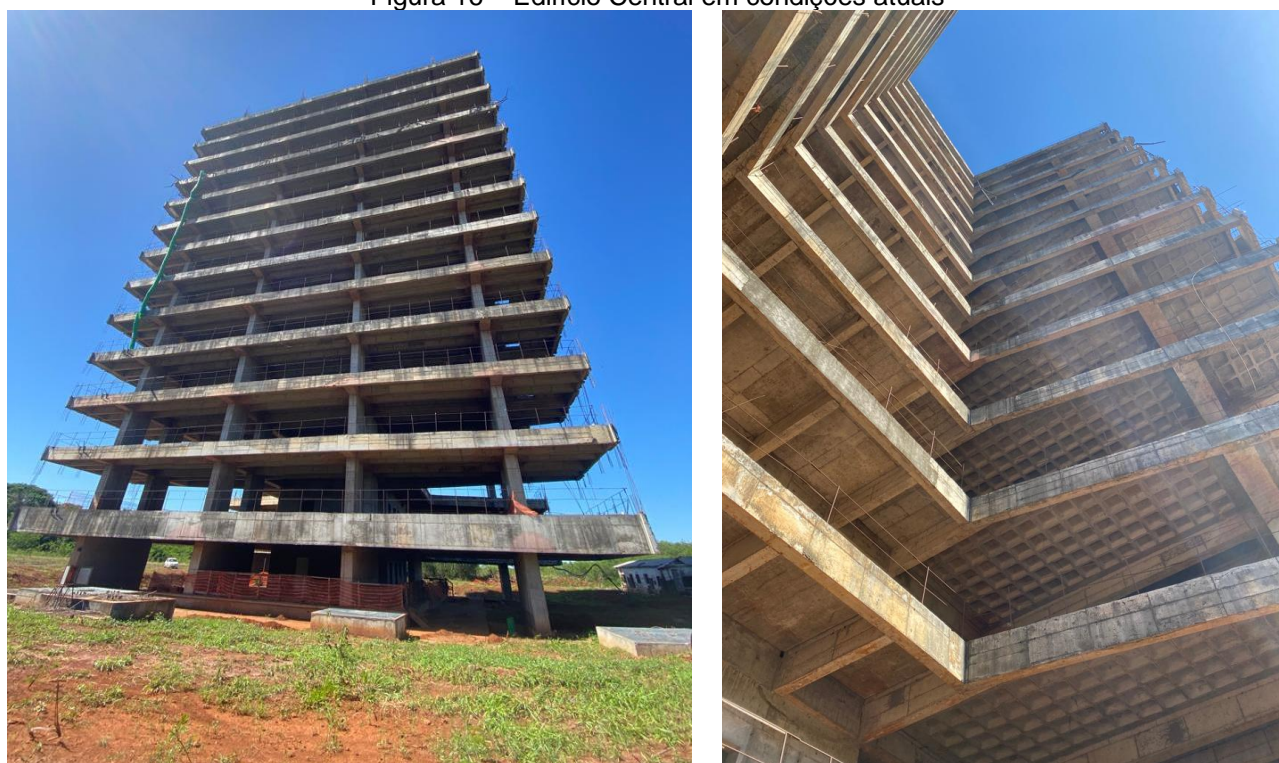
Tabela 4 – Espessura de cobrimento mínima de projeto

| Elemento estrutural | Cobrimento em concreto aparente (mm) |
|---------------------|--------------------------------------|
| Pilar | 25 |
| Parede (b > 6a) | 20 |
| Viga | 25 |
| Laje | 15 |

Fonte: Especificação Técnica das Estruturas de Concreto – ITAIPU (2010).

A construção interrompida em 2014 foi executada até o 13º pavimento. As obras de proteção da estrutura do Edifício Central em específico, incluíram a retirada de material assoreado no subsolo, limpeza e proteção das armaduras expostas, com aplicação manual de nata de cimento e instalação de duas bombas de esgotamento, com acionamento automático e permanente funcionamento, para evitar inundação no subsolo (POSSAN et al., 2018).

Figura 16 – Edifício Central em condições atuais



a) Estrutura Edifício Central

b) Vista Edifício Central

Fonte: Autora (2022).

5.2.1 DADOS DA ESTRUTURA EM ESTUDO

Foram selecionados cinco elementos estruturais, incluso um pilar-parede, dois pilares principais e duas vigas, conforme dados compilados do Quadro 2. O tipo de cimento adotado é igual para todos os elementos, sendo utilizado o cimento CP IV 32.

Quadro 2 – Dados característicos dos elementos estruturais

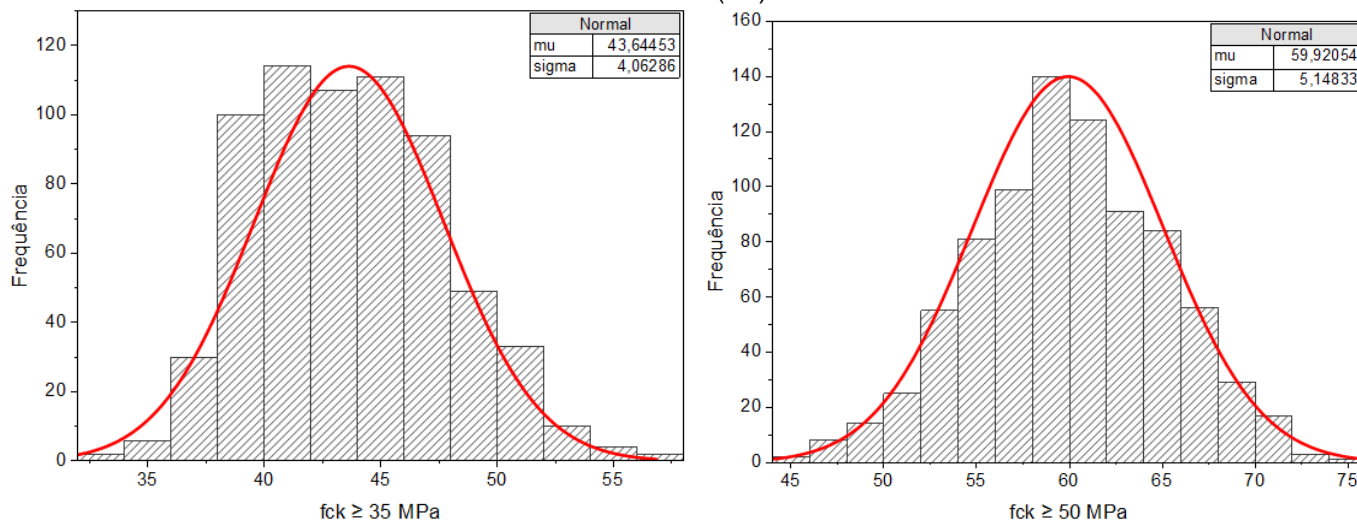
| Elemento Estrutural | Nomenclatura | Localização | Dimensões (cm) | fck de projeto (MPa) | Cobrimento (cm) | Adições | Relação a/c | Exposição a chuva |
|---------------------|--------------|--------------------------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------------|--|
| Pilar-parede | PAR1 | Térreo (Anexo A) | 70 x 690 | 50 | 2 | 8% sílica ativa | 0,59 | Ambiente externo desprotegido da chuva |
| Pilar | P25 | Tipo - 1 ao 10 (Anexo B) | 70 x 220 | 50 | 2,5 | 8% sílica ativa | 0,59 | Ambiente externo protegido da chuva |
| Pilar | P37 | Tipo - 11 ao 13 (Anexo B) | 60 x 220 | 35 | 2,5 | 7% sílica ativa | 0,5 | Ambiente externo protegido da chuva |
| Viga | V 16 | Térreo (Anexo A) | 25 x 100 | 35 | 2,5 | 7% sílica ativa | 0,5 | Ambiente externo protegido da chuva |
| Viga | V 15 | Tipo – viga de borda (Anexo B) | 25 x 90 | 35 | 2,5 | 7% sílica ativa | 0,5 | Ambiente externo desprotegido da chuva |

Fonte: Autora (2022).

Para caracterização da variável aleatória de resistência do concreto à compressão, foram coletados dados a partir de relatórios de controle tecnológico do concreto de 2012 à 2014, referente às resistências características obtidas pelo rompimento de corpos de prova aos 28 dias. Ao total eram amostrados seis corpos de prova, dois para rompimento aos 7 dias, dois aos 28 dias e dois se houvesse necessidade de contraprova.

Com o intuito de obter uma quantidade de valores representativos da variabilidade da variável aleatória, foram selecionados valores de resistência do concreto aos 28 dias, avaliados através de dois corpos de prova, de diferentes lotes, para as duas resistências características de projeto: 35 e 50 MPa. Dessa forma, foram selecionados 330 lotes para fck \geq 35 MPa e 410 para fck \geq 50 MPa. As curvas de distribuição e histogramas, atribuídos após análise à uma função de distribuição probabilística do tipo Normal, que podem ser visualizadas na Figura 17.

Figura 17 – Curvas de distribuição referentes a variável aleatória de resistência a compressão característica do concreto (fck).



a) Curva de distribuição para fck ≥ 35 MPa

b) Curva de distribuição para fck ≥ 50 MPa

Fonte: Autora (2022).

Com relação a variável aleatória do cobrimento, os dados médios adotados foram empregados com base nos dados especificados em projeto, considerando uma variação de 10% da espessura e função de distribuição Normal, levando em conta um controle de qualidade adequado na fase de execução e com base nos dados apresentados no trabalho de Couto (2017).

A descrição para as variáveis aleatórias de resistência do concreto e espessura de cobrimento são descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Descrição das variáveis aleatórias para resistência característica do concreto aos 28 dias e espessura de cobrimento de concreto

| Elemento | Variável | Média | Desvio padrão | Distribuição | Fonte dos dados |
|-------------------|----------------------------|--------------------|---------------|---------------------|--|
| P37, V15, V16 | Resistência concreto (MPa) | 43,64 | 4,063 | Normal | Relatório de controle tecnológico do concreto 2012 à 2014 |
| PAR1, P25 | | 59,92 | 5,148 | Normal | |
| PAR1 | Cobrimento (mm) | 20,00 ¹ | 2,00 | Normal ² | ¹ Especificação técnica das estruturas de concreto; ² Couto (2017) |
| P25, P37, V15 V16 | | 25,00 ¹ | 2,50 | Normal ² | |

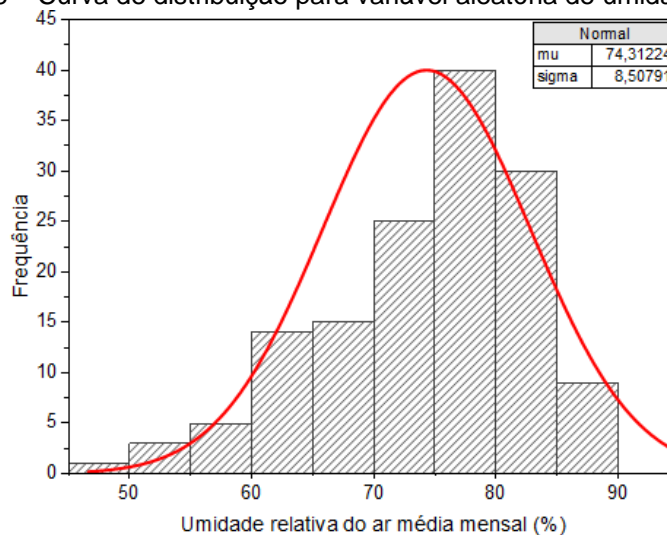
Fonte: Autora (2022).

5.2.2 DADOS DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO DA ESTRUTURA EM ESTUDO

Os dados referentes ao ambiente de exposição correspondem a umidade relativa e teor de CO₂ presente na atmosfera. Os dados climáticos de umidade relativa foram coletados para um período de 12 anos, compreendidos entre 2010 e 2022, extraídos do banco de dados

meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram obtidos dados diários da estação A846 localizada em Foz do Iguaçu e calculadas as médias mensais para cada ano de análise. A partir dos dados mensais de cada ano foram obtidas a média, desvio padrão e a função de distribuição, definida como sendo Normal (ver Figura 18).

Figura 18 – Curva de distribuição para variável aleatória de umidade relativa



Fonte: Autora (2022).

Foram considerados os dados para caracterização da variável aleatória referente à concentração de CO₂ do país de acordo com o órgão “CO₂ levels”, em razão da ausência de dados para a cidade de Foz do Iguaçu, PR. No Quadro 4 são apresentados dados das variáveis aleatórias para o ambiente de exposição ao qual a estrutura está sujeita.

Quadro 4 – Descrição das variáveis aleatórias para umidade relativa do ar e concentração de CO₂

| Elemento | Variável | Média | Desvio padrão | Distribuição | Fonte dos dados |
|------------------------------|---------------------|--------|---------------|--------------|------------------------|
| PAR1; P25, 37; V15, 16 | UR (%) | 74,31 | 8.508 | Normal | BDMEP |
| | CO ₂ (%) | 0,0410 | 0,0043 | Normal | CO ₂ levels |

Fonte: Autora (2022).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a metodologia proposta, são apresentados os resultados das simulações avaliadas para o estudo de caso aplicado em elementos estruturais do Edifício Central da obra do campus da UNILA, com o intuito de determinar a probabilidade de ocorrência de falha durante a vida útil de projeto de 50 anos para estimativa do Estado Limite de Durabilidade.

Os cenários são definidos com base nas variáveis de entrada uniformes, disposto conforme o Quadro 9.

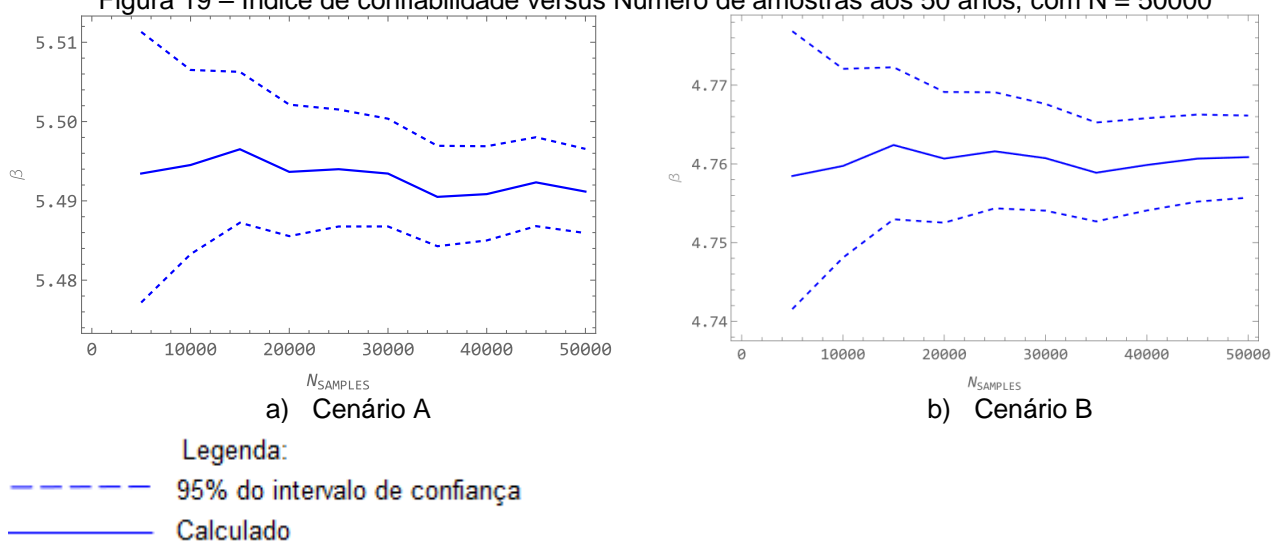
Quadro 5 – Cenários simulados

| Cenário | Elemento estrutural | fck_{μ} (MPa) | Cob. (mm) | ad (%) | kce |
|---------|---------------------|-------------------|-----------|--------|------|
| A | PAR1 | 59,92 | 20 | 8 | 0,65 |
| B | P25 | 59,92 | 25 | 8 | 1 |
| C | P37; V16 | 43,6 | 25 | 7 | 1 |
| D | V15 | 43,6 | 25 | 7 | 0,65 |

Fonte: Autora (2022).

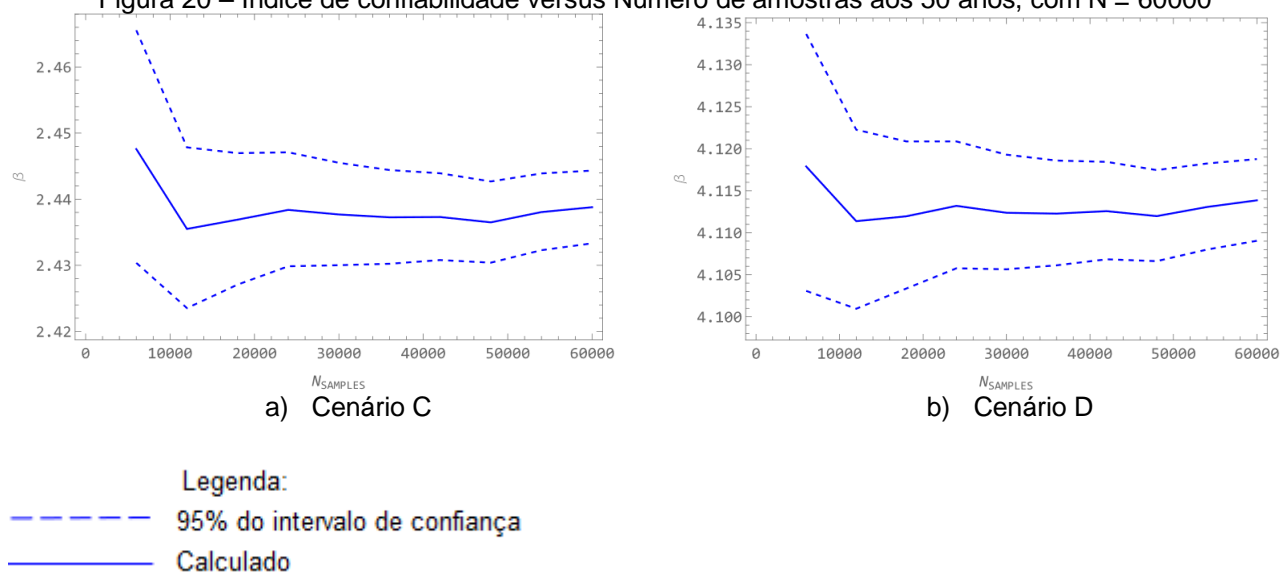
Foram conduzidas análises de convergência empregando um número de amostras de $N = 50000$. A Figura 19 e 20 demonstra a estabilização do índice de confiabilidade a medida em que aumenta o número de simulações, variando β em um intervalo de 0,01, configurando o valor atribuído de N suficiente para garantir uma boa confiabilidade.

Figura 19 – Índice de confiabilidade versus Número de amostras aos 50 anos, com $N = 50000$



Fonte: Autora (2022)

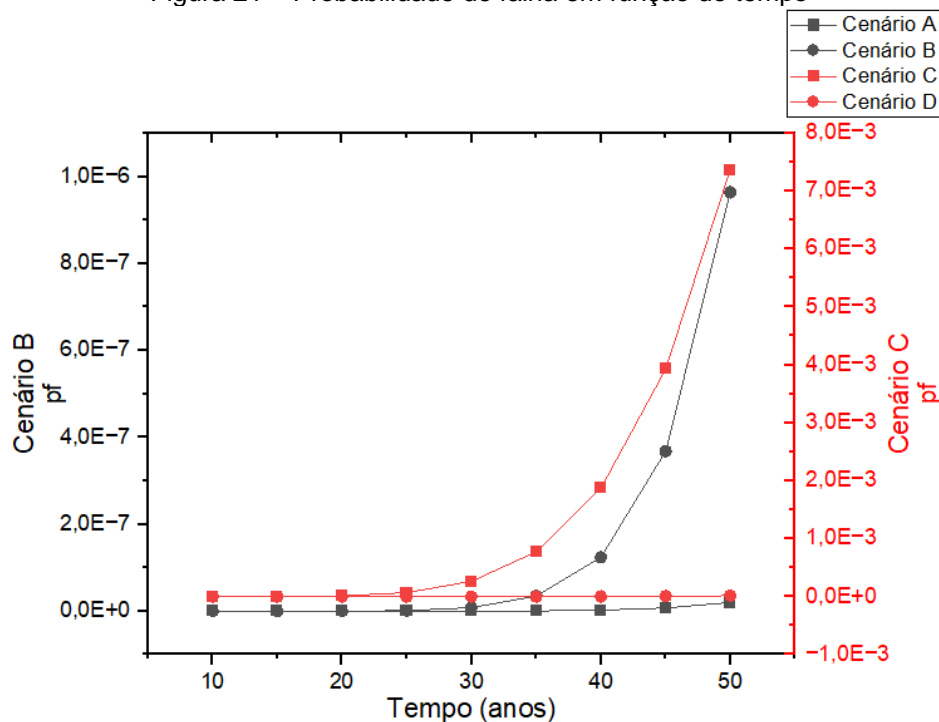
Figura 20 – Índice de confiabilidade versus Número de amostras aos 50 anos, com N = 60000



Fonte: Autora (2022).

Após definido o número de amostras submetidas ao processo simulação de Monte Carlo, foram obtidas as estimativas de probabilidade de despassivação da armadura até os 50 anos. Na Figura 21 é apresentado o gráfico das probabilidades de falha em duas escalas ao longo dos 50 anos de VUP, irrelevantes comparado aos valores limites da norma ISO 13823 (2008), de 0,05 a 0,20.

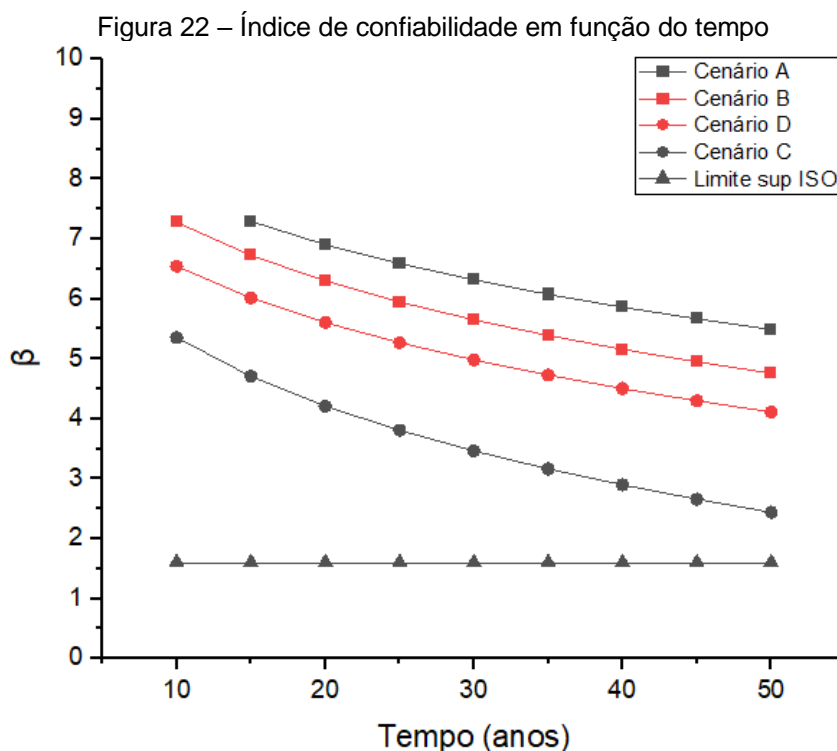
Figura 21 – Probabilidade de falha em função do tempo



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 22 são apresentados os índices de confiabilidade obtidos para cada

probabilidade de falha, demonstrando que conforme aumenta a probabilidade de uma estrutura falhar, menor será seu índice de confiabilidade. Tendo em vista as baixas probabilidades de falha, as estruturas em estudo detêm elevados índices de confiabilidade. A norma ISO 13823 (2008) atribui os valores limites de β aos 50 anos entre 0,80 e 1,60, certificando-se de que os elementos estruturais em estudo estejam seguros de atingir o ELD durante a VUP.



Fonte: Autora (2022).

Considerando os parâmetros normativos, o tempo em que seria atingida a probabilidade de falha conforme a ISO 13823 (2008), entre 0,05 a 0,20, é ilustrado na Tabela 5 para cada cenário.

Tabela 5 – Estimativa do ELD avaliado probabilisticamente

| Cenário | Vida útil (anos) | β | Pf |
|---------|------------------|---------|--------|
| A | 350 | 1.5270 | 0.0633 |
| B | 250 | 1.3384 | 0.0904 |
| C | 75 | 1.5651 | 0.0588 |
| D | 175 | 1.5965 | 0.0552 |

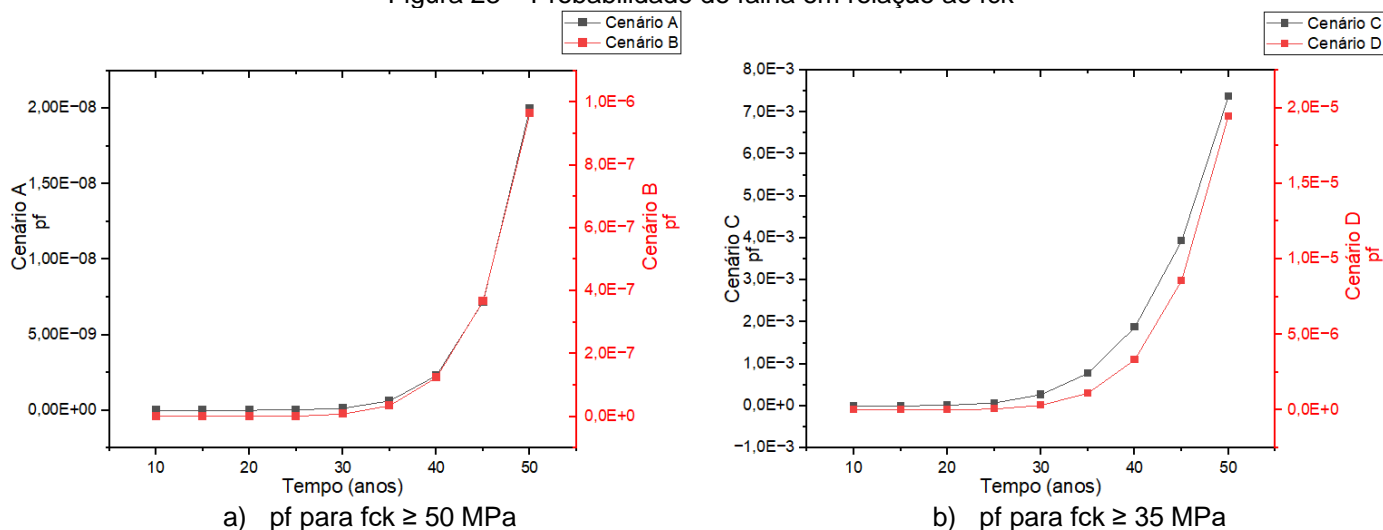
Fonte: Autora (2022).

Avaliando a influência das variáveis mais significativas no comportamento dos elementos da estrutura em análise, pode-se observar no que se refere a resistência à compressão do concreto, as probabilidades de atingir ELD para os concretos de 59,94 MPa

de média, são inferiores se comparados aos de 43,64 MPa, mesmo nos casos em que há menor espessura do cobrimento (ver Figura 23), tendo em vista a menor porosidade que é atribuída à concretos com altas resistências.

Ho e Lewis (1987) em seu estudo constataam que quanto maior a resistência à compressão do concreto, menor será a profundidade de carbonatação, tendo em vista a menor porosidade que é garantida ao concreto.

Figura 23 – Probabilidade de falha em relação ao fck



Fonte: Autora (2022).

Em relação a exposição a chuva, quando analisados os cenários A e B e, C e D, para ambientes externos protegidos da chuva configura-se maiores probabilidades de falha quando comparado com ambientes externos desprotegidos da chuva, o que está diretamente relacionado com a quantidade de água nos poros que estando em excesso diminui a velocidade de penetração do CO₂.

De acordo com Schiessl (1988), o concreto tende a umedecer rapidamente, enquanto que secam lentamente, o que explica a redução da difusão do CO₂ em concretos em ambiente externo ao permanecerem mais tempo úmidos. Couto (2017) apresenta em seu trabalho resultados concordantes, com relação a proteção à chuva, ao simular diferentes cenários utilizando três modelos distintos para a previsão da profundidade da carbonatação.

Portanto, em uma escala da maior probabilidade de falha para menor, teremos os cenários:

- C – fck em média 43,64 MPa em ambiente externo protegido da chuva;
- D – fck em média 43,64 MPa em ambiente externo desprotegido da chuva;
- B – fck em média 59,92 MPa em ambiente externo protegido da chuva;
- A – fck em média 59,92 MPa em ambiente externo desprotegido da chuva.

Na Tabela 6 são estabelecidas as previsões de vida útil para cada cenário, quando o ELD é avaliado deterministicamente.

Tabela 6 – Estimativa do ELD avaliado deterministicamente

| Cenário | Vida útil (anos) | β | Pf | y (mm) Eq. 19 | Cob. (mm) |
|----------------|-------------------------|---------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| A | 604.77 | 0.1763 | 0.4300 | 20.00024 | 20 |
| B | 399.24 | 0.2327 | 0.4080 | 25.00027 | 25 |
| C | 136.00 | 0.2895 | 0.3861 | 25.00040 | 25 |
| D | 321.89 | 0.3496 | 0.3633 | 25.00043 | 25 |

Fonte: Autora (2022).

7 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi proposto procedimentos para estimativa do Estados Limite de Durabilidade de estruturas de concreto armado aparente sujeitas a ação de CO₂, considerando uma abordagem probabilística através do uso da técnica de simulação de Monte Carlo.

A metodologia proposta envolvendo análises probabilísticas da ocorrência de despassivação da armadura, quando aplicado a um estudo de caso, obteve resultados semelhantes quando confrontados com conceitos da literatura em relação a influência das variabilidades dos parâmetros que envolvem a modelagem da carbonatação.

As curvas de probabilidade de falha avaliadas para os diferentes cenários do estudo de caso, têm o seu comportamento preponderantemente descrito pela resistência a compressão do concreto e pela condição de exposição a chuva.

A estimativa do Estado Limite de Durabilidade através da análise de probabilidade de falha ao longo do tempo tem importância na previsão de vida útil ao considerar as variabilidades do ambiente de exposição e da evolução de degradação da estrutura por ação de agentes agressivos.

Para trabalhos futuros recomenda-se a proposição de procedimentos para estimativa dos Estados Limite de Serviço e Estado Limite Último considerando o uso semelhante das formulações na avaliação probabilística da evolução da corrosão da armadura por carbonatação, a partir do período de iniciação.

8 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao meu coorientador, Emerson Felix, que disponibilizou a rotina de programação para simulação dos dados.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, M. Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação. **Revista ALCONPAT**, p. 224–245, 2018a.
- ALEXANDER, M.; BEUSHAUSEN, H. **Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique**. **Cement and Concrete Research** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2019.
- ALEXANDER, M. G. Durability and service life prediction for concrete structures – developments and challenges. **MATEC Web of Conferences**, v. 149, p. 01006, 2018b.
- ALSAYEGH, M. F.; ABDUL RAHMAN, R.; HOMAYOUN, S. Corporate Economic, Environmental, and Social Sustainability Performance Transformation through ESG Disclosure. **Sustainability**, v. 12, n. 9, 11 maio 2020.
- ANDRADE PERDRIX, M. DEL C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. 1. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1992.
- ANG, A. H.-S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability**. 1. ed. John Wiley & Sons, 1984. v. 2
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: 2021.
- BARBOSA, A. H. **Análise de confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais**. Dissertação Mestrado—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.
- BARRY, S. The risk-based approach to water management, and major challenges in the mining industry - ESG and the economics and ethics. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 120, n. 11, 2020.
- BATISTA FERREIRA, M. **Estudo da Carbonatação Natural de Concretos com Diferentes Adições Mineraias após 10 anos de Exposição**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2013.
- BRANDÃO, A. M. DA S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Dissertação Mestrado—São Carlos: Universidade de São Paulo, 1998.
- BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 2911/2020. Plenário. Relator: Ministro Aroldo Cedraz. Sessão de 28/10/2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 out. 2020.
- DINIZ, S. M. C. et al. Durability Design Criteria for Concrete Structures: An Overview of Existing Codes, Guidelines, and Specifications. Em: **Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure**. 1. ed. London: 2019. p. 113–155.
- CARMONA, T. G. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em**

Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação. Dissertação Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo PCC, 2005.

CASTRO-BORGES, P.; HELENE, P. Uma abordagem conceitual holística para a vida útil das estruturas de concreto: divisão em diferentes estágios de tempo. **Revista ALCONPAT**, p. 280–287, 2018.

COPPOLA, L. et al. The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures: A Review on Different Approaches. 2022.

COUTO, R. A. **Avaliação Probabilística da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Sujeitas à Carbonatação.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB). **Durable concrete structures design guide.** ISBN: 978-0-7277-3549-2. Telford, 1997.

CO2 levels Data Base from 2 Degrees Institute (2020). CO2 mundial concentration. Disponível em: < <https://www.co2levels.org/#sources>>. Acesso em: Outubro de 2022

FELIX, E. F. **Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão.** Dissertação de Mestrado—São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

FERREIRA, R. M. **Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão.** Dissertação de mestrado—Guimarães: Escola de Engenharia Universidade do Minho, 2000.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: Itc, 2017.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese – São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

HELENE, P. Introdução da Durabilidade no Projeto de Estruturas de Concreto. **Ambient.Costr.**, v. 1, p. 45–57, 1997.

HELENE, P. **A NOVA NB 1/2003 (NBR 6118) E A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.** [s.l.] National Academy Press, 2003. Disponível em: <www.rehabilitar.pcc.usp.br/PresidentedoIBRACON/InstitutoBrasileirodoConcretowww.ibracon.org.br>.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. **CARBONATION OF CONCRETE AND ITS PREDICTION CEMENT and CONCRETE RESEARCH.** 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). General Principles on the Design of Structures for Durability. ISO 13823. Geneva: ISO/TC, 2008.

MOLIN, D. C. C. D. et al. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. Em: **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade.** Editora Scienza, 2016. p. 223–270.

NEVES, R. D.; BRANCO, F.; DE BRITO, J. **Desempenho de diferentes tintas na protecção do betão face à acção do dióxido de carbono**. Lisboa, Portugal: Trabalho apresentado em Encontro Nacional de Conservação e Reabilitação de Estruturas (Reabilitar 2010), 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NUNES DE R -, J. S. et al. **Desenvolvimento Sustentável no Setor da construção civil**. São Cristovão: VI Simpósio de Engenharia de Produção, fev. 2014. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/8012/2/DesenvolvimentoSustentavelConstrucaoCivil.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2022

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

POSSAN, E. et al. **Proteção de estrutura interrompida como preservação da degradação: um estudo de caso**. 2018.

POSSAN, E. et al. Model to Estimate Concrete Carbonation Depth and Service Life Prediction. Em: **Building Pathology and Rehabilitation Hygrothermal Behaviour and Building Pathologies**. 2021. v. 14p. 67–97. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50998-9_4

POSSAN, E.; ALBERTO DEMOLINER, C. Desempenho, durabilidade e vida útil das Edificações: Abordagem geral. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p. 1–14, 2013.

QUINTAS, A. C.; CUNHA, D.; HELENE, P. R. L. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP DESPASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS DE CONCRETO POR AÇÃO DA CARBONATAÇÃO. 2001.

RIBEIRO, D.; CUNHA, M.; HELENE, P. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. São Paulo: Elsevier Brasil, 2015. 272 p. ISBN 9788535275483. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=W9NeAwAAQBAJ>>.

TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 30p.

VAL, D. V; STEWART, M. G.; MELCHERS, R. E. Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. Em: **Engineering Structures**. 1998. v. 20p. 1010–1019.

APÊNDICE

PROCESSO DE CÁLCULO PARA ANÁLISE PROBABILÍSTICA ESTACIONÁRIA DO ESTADO LIMITE DE DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À AÇÃO DO CO₂

Bruna Bach Possamai
Edna Possan
Emerson Felix

Seguem os procedimentos para estimativa do Estado Limite de Durabilidade de estruturas de concreto armado aparente sujeitas a ação de CO₂ considerando uma abordagem probabilística através do uso de simulação de Monte Carlo.

1. Definição do agente agressivo ao qual a estrutura estará exposta ao longo de sua vida útil: CO₂.
2. Definição do modelo que representará a difusão do agente agressivo no concreto: Possan et al. (2021).

Modelo aplicado para condução do estudo no período de iniciação da corrosão por carbonatação, considerando o ingresso do CO₂ através da difusão do agente na matriz cimentante, sem que seja considerado a presença de fissuras.

3. Levantamento de dados através:
 - a) Do projeto: arquitetônico, estrutural;
 - b) Da estrutura real: controle tecnológico, amostragem, estudo local;
 - c) Da literatura: experimentos naturais ou acelerados, conhecimento de experts, parâmetros normativos;
 - d) De banco de dados meteorológicos;

Nesta etapa, são obtidos os dados de acordo com a geometria da estrutura e as condições de contorno, em relação ao ambiente de exposição.

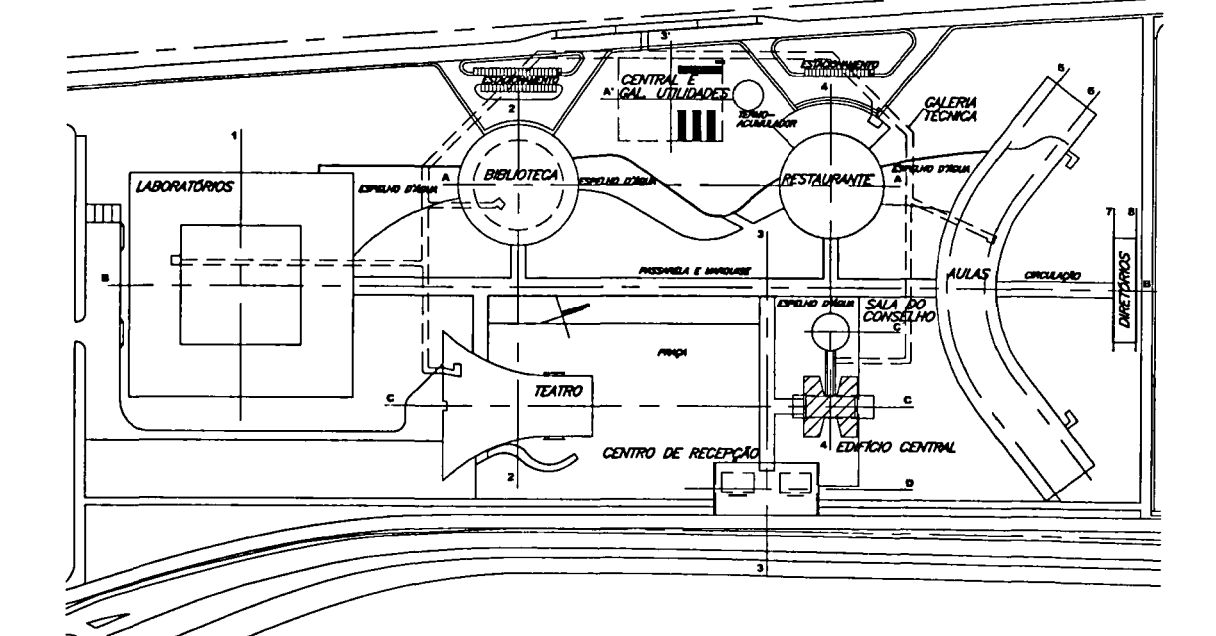
O estudo aplicado em estruturas existentes, quando deseja-se estimar quantos anos são necessários para que a estrutura atinja o estado limite desejado, tem como ideal dados coletados da estrutural real. O estudo conduzido em estruturas novas, em fase de projeto, tem o intuito de selecionar variáveis de projeto que melhor se adequam ao ambiente de exposição da estrutura, de acordo com parâmetros normativos ou da literatura.

4. Obtenção de parâmetros: k_c , k_{fc} , k_{ad} , k_{UR} e ad , em função do tipo de cimento, adições

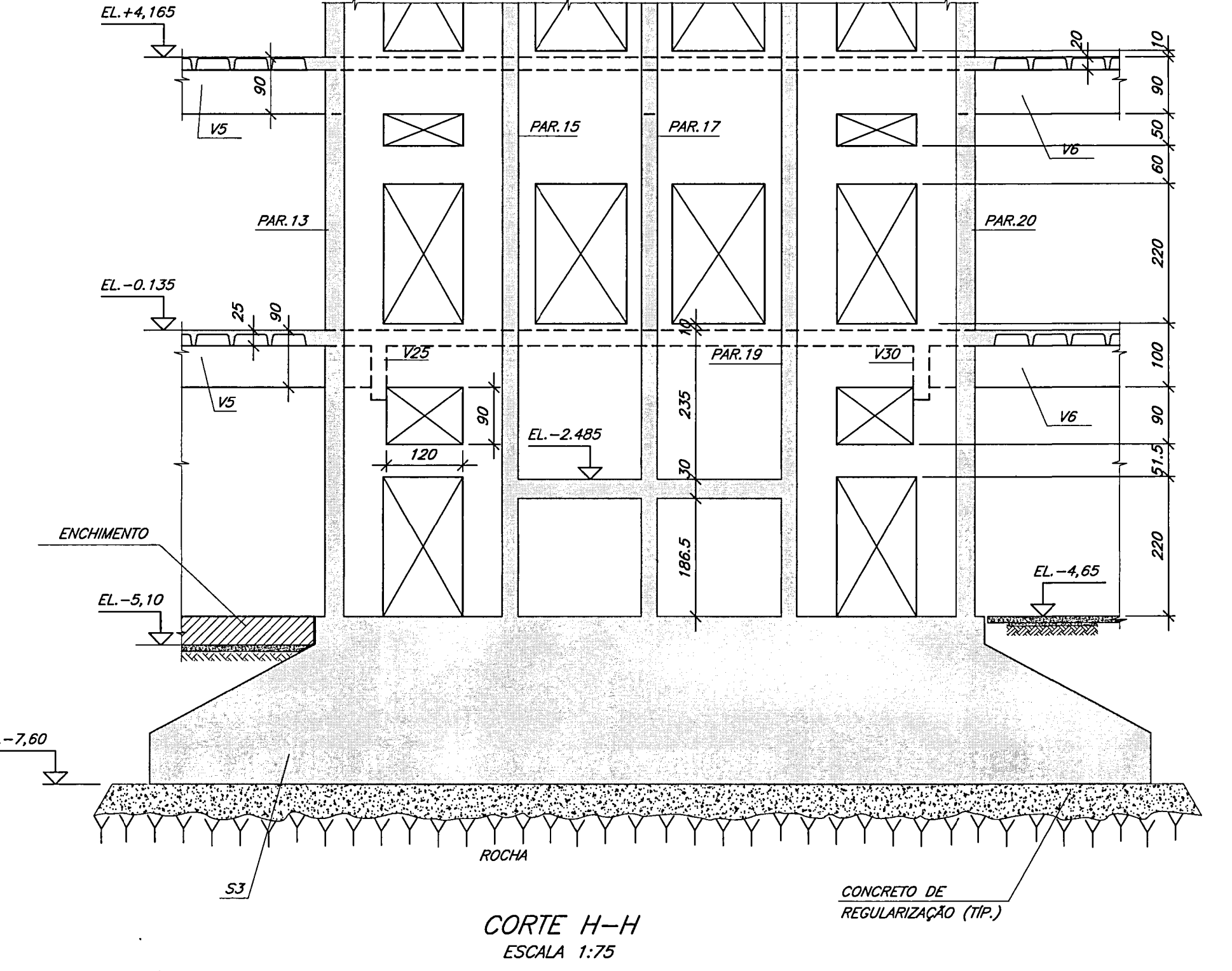
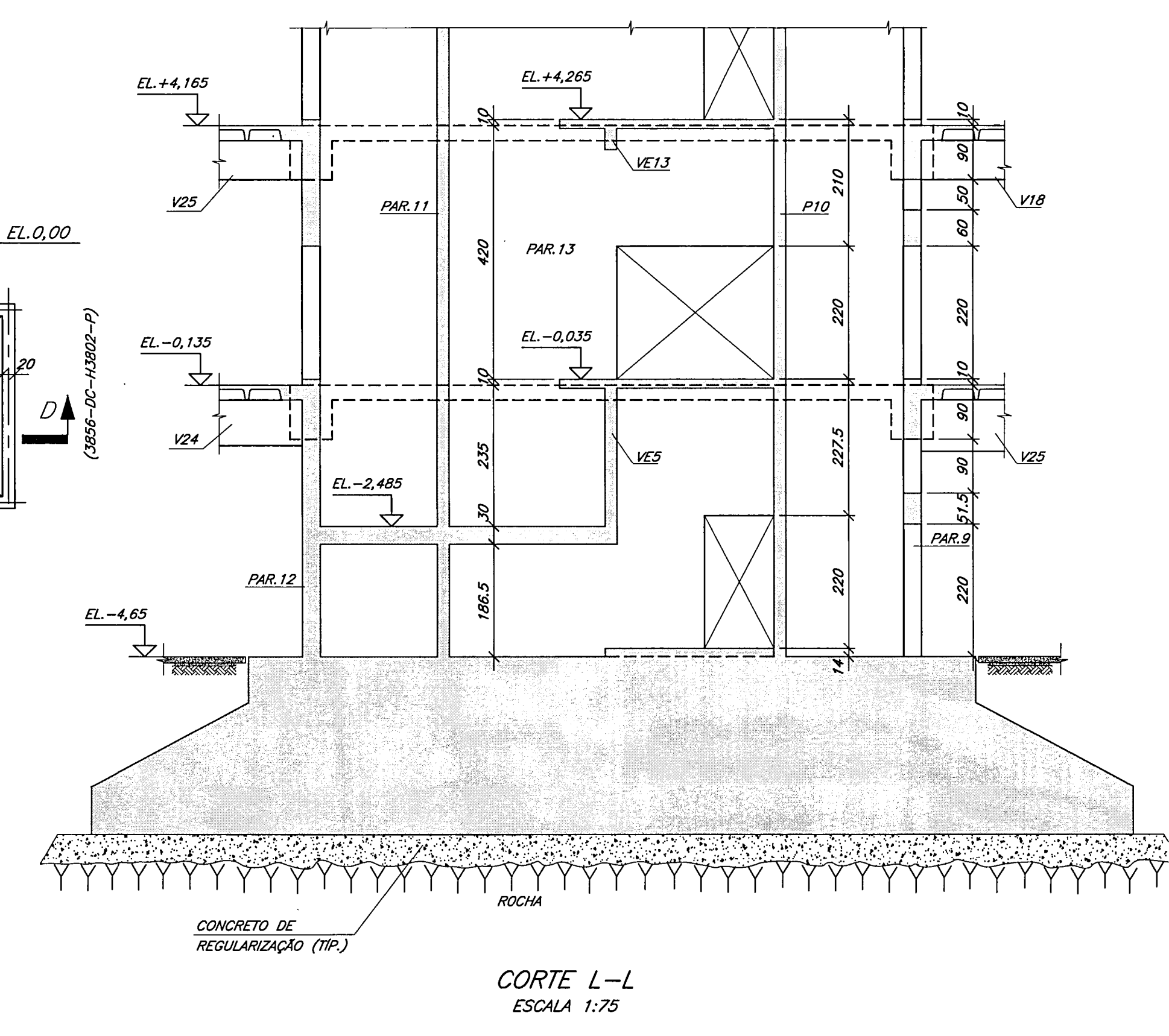
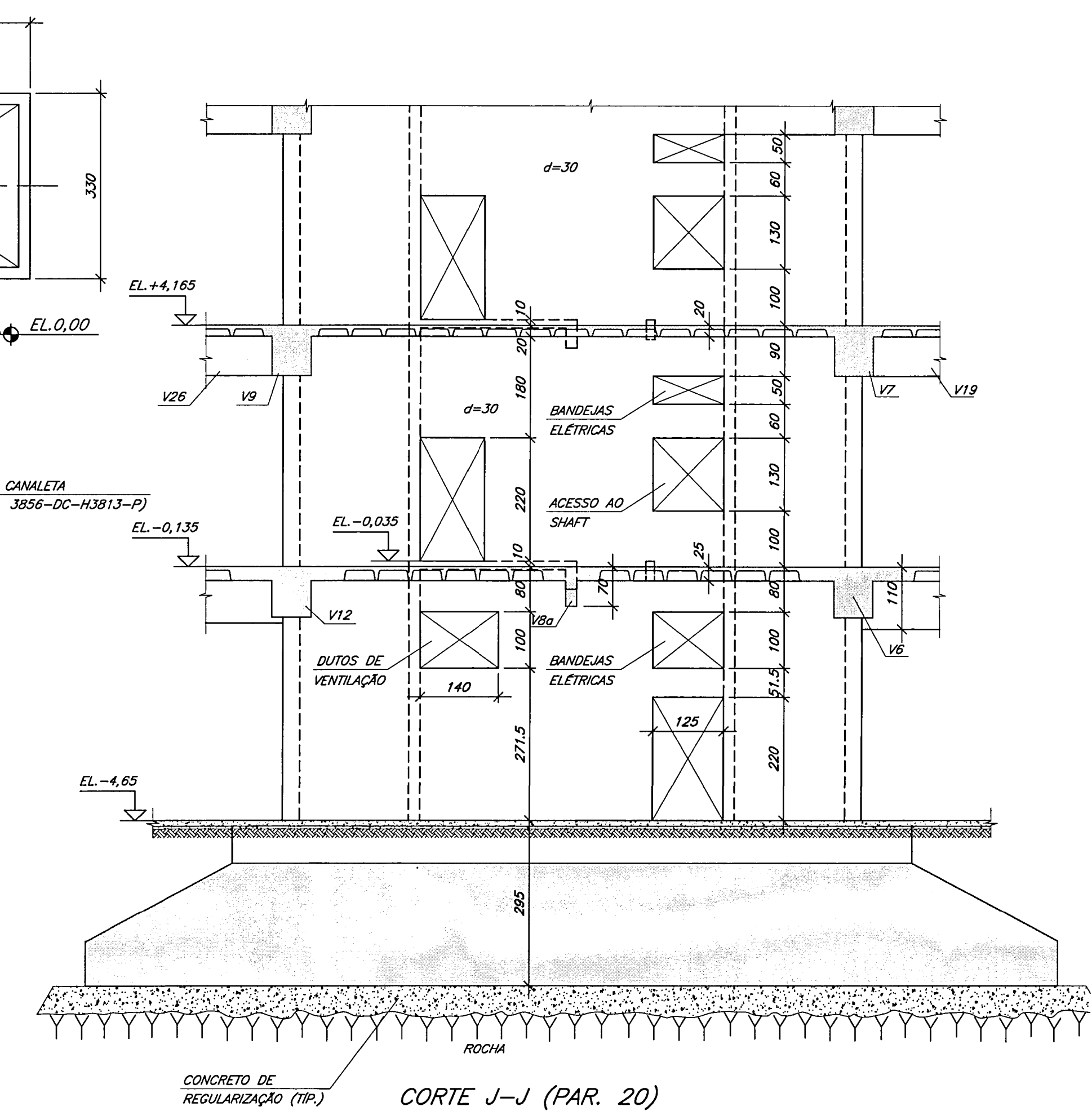
- minerais e condições de exposição à chuva;
5. Descrição variáveis aleatórias: f_{ck} , cobertura, UR e teor CO_2 .
 - a) Análise histogramas;
 - b) Obtenção de μ , σ ou CV e função de distribuição de probabilidade;
 6. Simulação temporal da probabilidade de falha via Monte Carlo:
 - a) Análise de convergência para definição do valor de N;
 - b) Geração de N amostras por amostragem por importância;
 - c) Aplicação da função de estado limite;
 - d) Cálculo da probabilidade de falha;
 7. Estimativa do ELD: obtenção do tempo de análise para $G(X) \cong 0$;
 8. Resultados:
 - a) Previsão de vida útil em que a estrutura atingirá o ELD;
 - b) Análise da probabilidade de despassivação da armadura imersa no concreto durante VUP;
 - c) Condução de análises paramétricas em função das variáveis de projeto.

ANEXO A

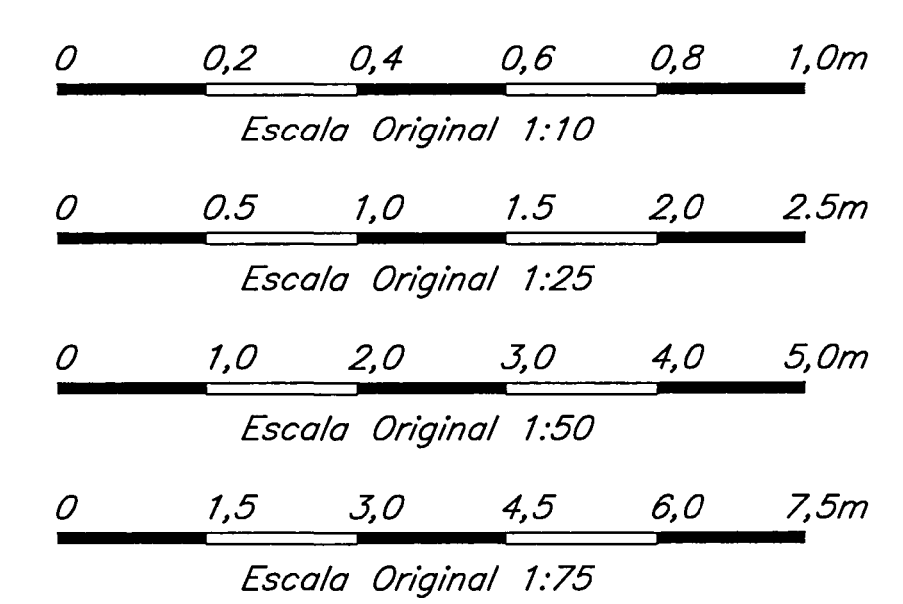
ULA-F-3803



- NOTAS**
- DIMENSÕES EM CENTÍMETRO E ELEVACIONES EM METRO, EXCETO ONDE HOUVER INDICAÇÃO CONTRÁRIA.
 - CONCRETO:
 - fck 30MPa PARA PAREDES 1 a 20 E PILARES 41 E 42 COM ADIÇÃO DE NO MÍNIMO 8% DE SILICA ATIVA.
 - DEMAIS MEMBROS ESTRUTURAIS, fck ≥ 35MPa, COM ADIÇÃO DE NO MÍNIMO 7% DE SILICA ATIVA.
 - ADICIONAR FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTOS AO CONCRETO DAS PAREDES 1 a 20 e Vigas V5, V6, V11 e V12, NA PROPORÇÃO DE 1,8kg/m³ DE MODO A AUMENTAR A RESISTÊNCIA AO FOGO.
 - O NÍVEL +0,00 DE REFERÊNCIA DESTA OBRA EQUIVALE AO NÍVEL +177,30 DA BASE TOPOGRÁFICA FORNECIDA POR ITAIPU.
 - PERFIL DE ELASTÔMERO NUCLEADO DE JEENE OU EQUIVALENTE.
 - LAJES NEVRURADAS DOS TIPOS ATEX 600 E ATEX 180, OU EQUIVALENTE.



- DESENHOS COMPLEMENTARES**
- PROJETO EXECUTIVO DE ARQUITETURA: 3856-DC-H1802-P
- PROJETO EXECUTIVO DE ESTRUTURA
- 1-PRÉDIO CENTRAL - FORMA - FUNDAÇÃO 3856-DC-H3801-P
 - 2-SUBSOLO CENTRAL - FORMA - SUBSOLO 3856-DC-H3802-P



| PRD. | MTG. | VERIF. | JCC | APROV. | JCS | DATA |
|------|---------------|------------|----------|------------|----------|----------|
| 3 | REVISÃO GERAL | JCS/MTC | 16/11/11 | JCS/MTC | 15/11/11 | 15/11/11 |
| 2 | REVISÃO GERAL | JCS/MTC | 18/12/11 | JCS/MTC | 18/12/11 | 18/12/11 |
| 1 | REVISÃO GERAL | JCS/MTC | 21/03/11 | JCS/MTC | 21/03/11 | 21/03/11 |
| N | DESCRIÇÃO | ASSINATURA | DATA | ASSINATURA | DATA | |
| | REVISÕES | PROJETISTA | | PROJETISTA | | |
| | VISTO | VERIF. | JCC | APROV. | JCS | 30/10/10 |

Casuarina Consultoria Ltda

ITAIPUBINACIONAL

UNILA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

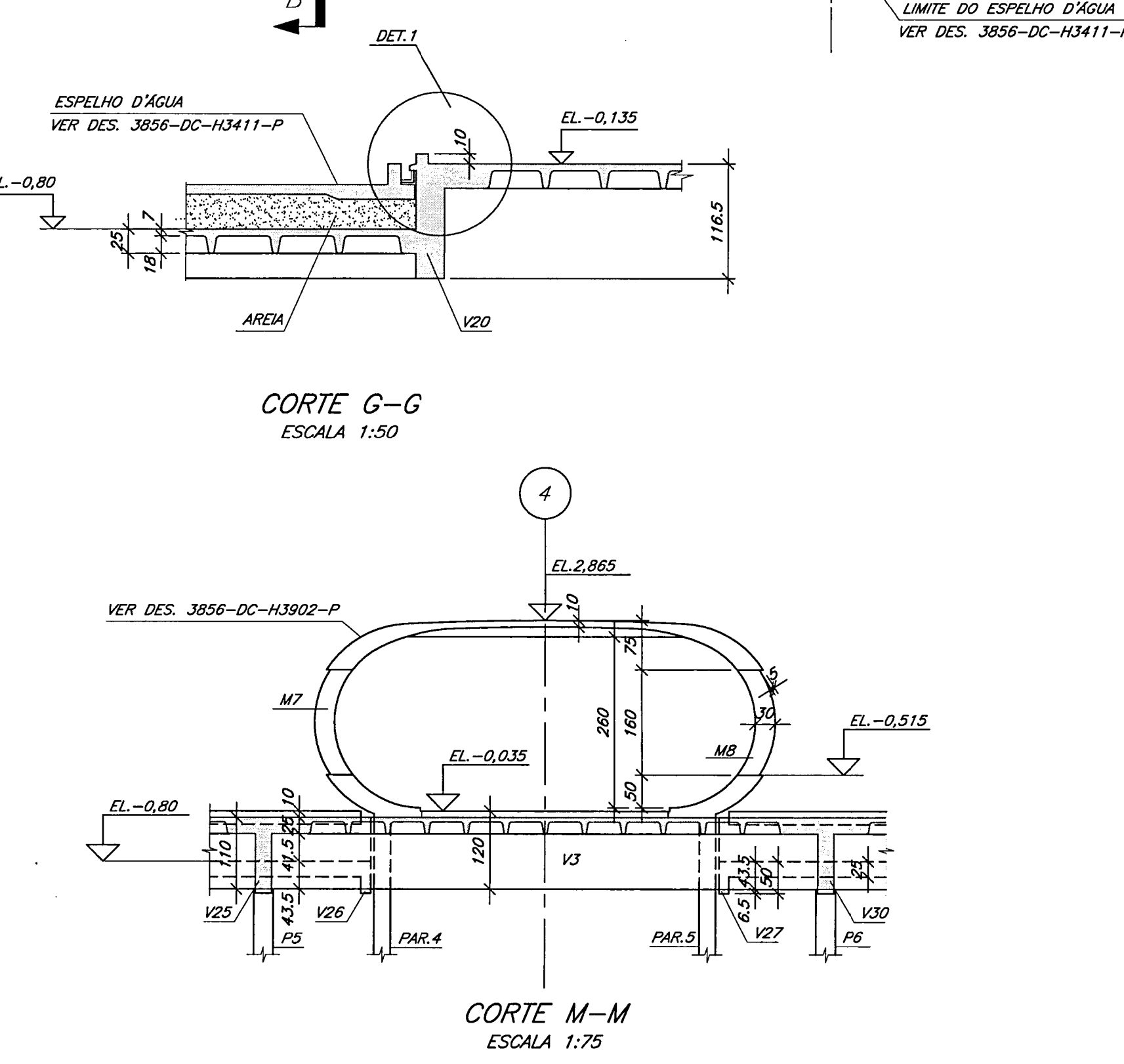
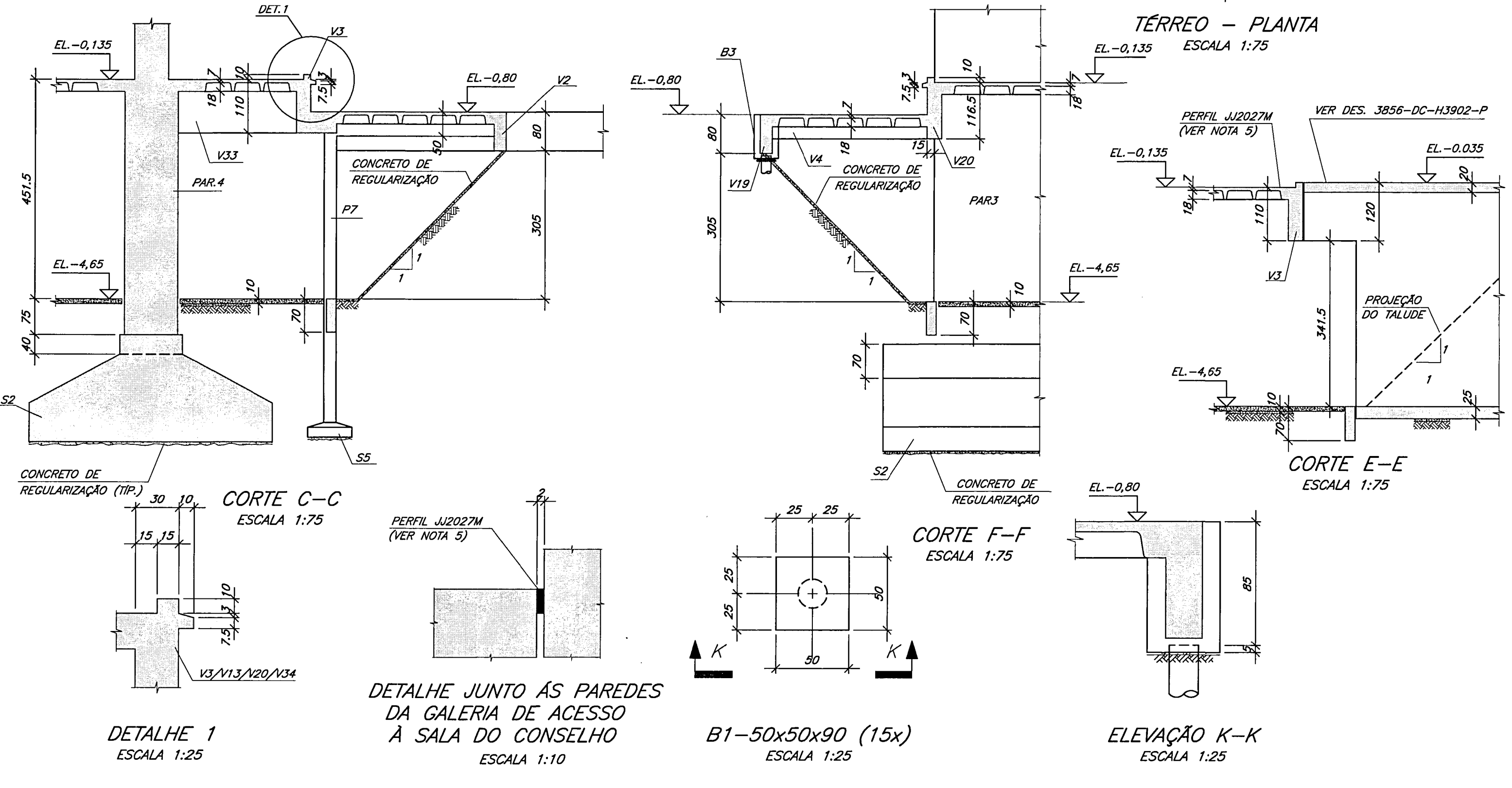
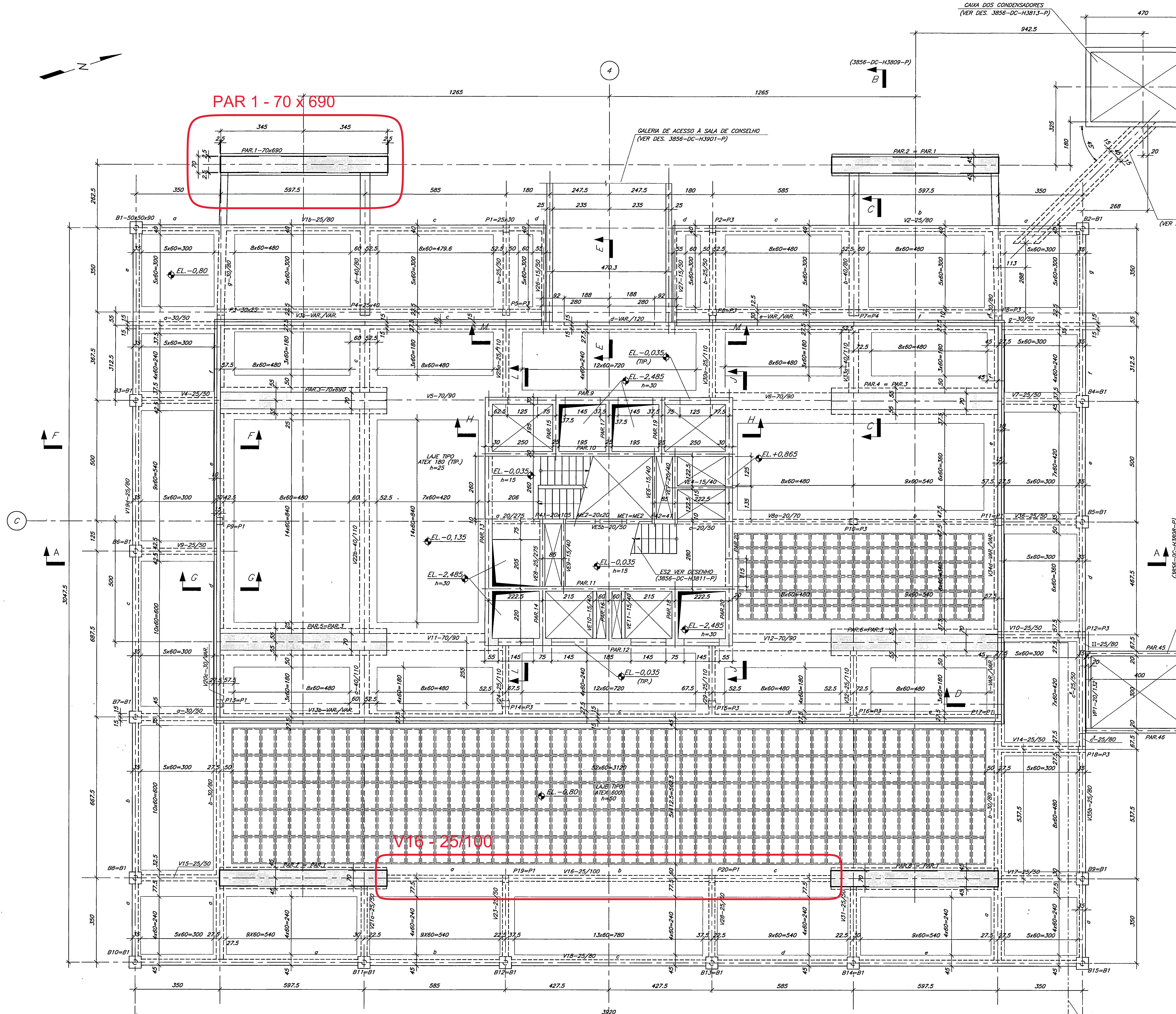
PROJETO EXECUTIVO DE ESTRUTURA

PRÉDIO CENTRAL

FORMA

TÉRREO

ITAIPU BINACIONAL VISTO: CPN / JAA. DATA: 21/03/11 3856-DC-H3803-P R3



DETALHE 1 ESCALA 1:25

DETALHE JUNTO ÀS PAREDES DA GALERIA DE ACESSO À SALA DO CONSELHO ESCALA 1:10

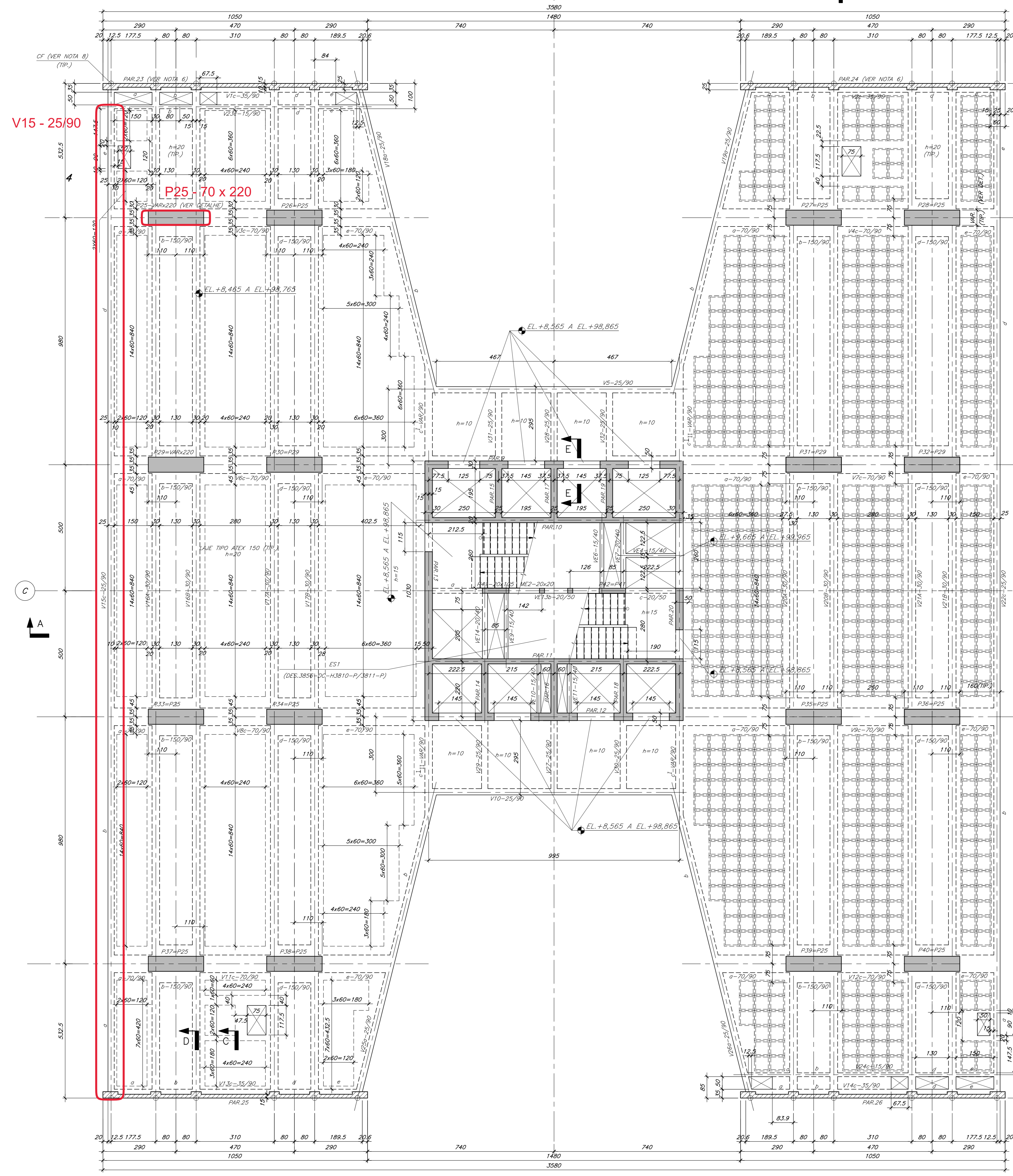
B1-50x50x90 (15x) ESCALA 1:25

ELEVACION K-K ESCALA 1:25

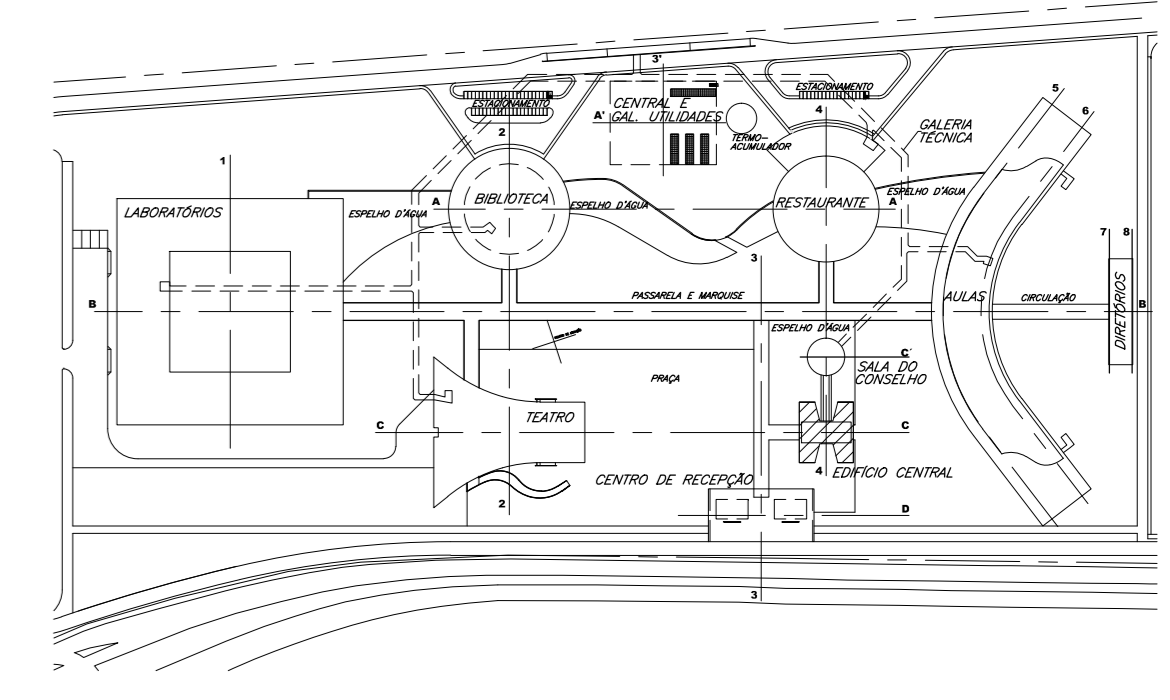
CORTE M-M ESCALA 1:75

ANEXO B

(DES.3856-DC-H3809-P)



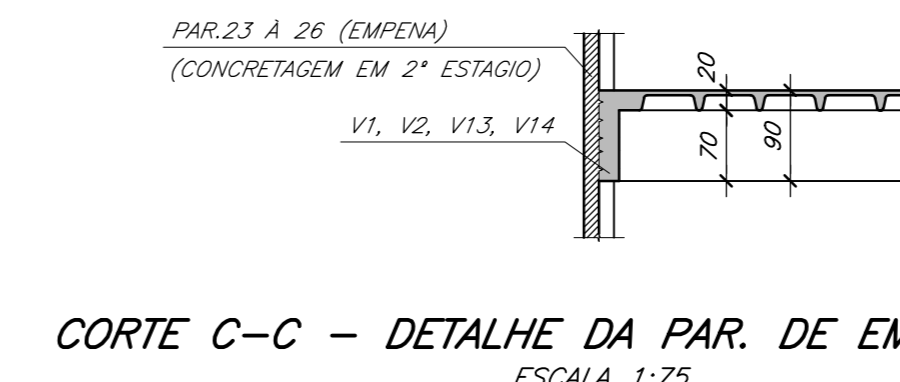
| PAVIMENTO | PISO |
|-----------|--------------|
| SUBSÓLO | EL. -4,435 |
| TERRÇO | EL. -0,135 |
| 1* | EL. +4,165 |
| 2* | EL. +8,465 |
| 3* | EL. +12,765 |
| 4* | EL. +17,065 |
| 5* | EL. +21,365 |
| 6* | EL. +25,665 |
| 7* | EL. +29,965 |
| 8* | EL. +34,265 |
| 9* | EL. +38,565 |
| 10* | EL. +42,865 |
| 11* | EL. +47,165 |
| 12* | EL. +51,465 |
| 13* | EL. +55,765 |
| 14* | EL. +60,065 |
| 15* | EL. +64,365 |
| 16* | EL. +68,665 |
| 17* | EL. +72,965 |
| 18* | EL. +77,265 |
| 19* | EL. +81,565 |
| 20* | EL. +85,865 |
| 21* | EL. +90,165 |
| 22* | EL. +94,465 |
| 23* | EL. +98,765 |
| COBERTURA | EL. +103,065 |



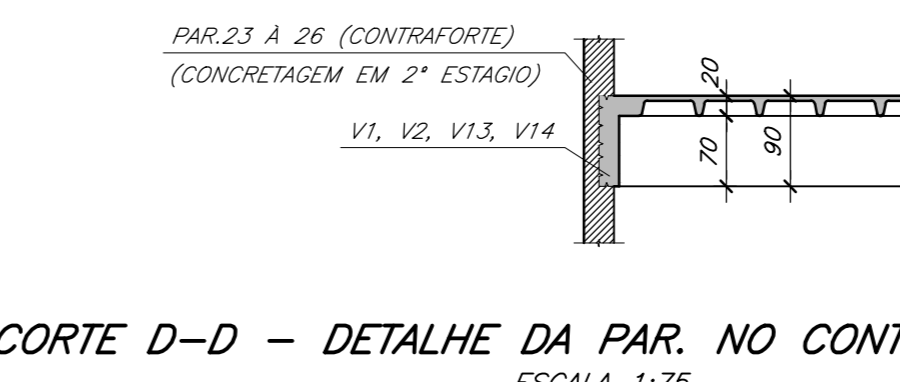
PLANTA CHAVE SEM ESCALA

NOTAS

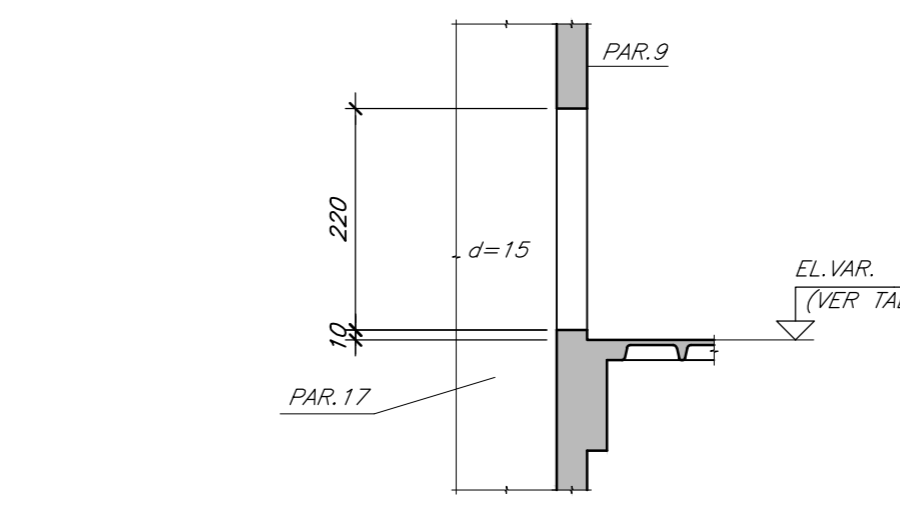
- 1-DIMENSÕES EM CENTÍMETRO E ELEVÇÕES EM METRO, EXCETO ONDE INDICADO.
- 2-CONCRETO:
 - a) O CONCRETO DE MAIOR RESISTENCIA DOS PILARES PRINCIPAIS DEVERÁ OCUPAR TODA ALTURA DOS MESMOS ATÉ A EL.+47,165, CONFORME INDICADO NAS ÁREAS HACHURADAS NO DESENHO 3808, OU SEJA, A REGIÃO DAS VIGAS QUE FOREM COINCIDENTES COM OS PILARES DEVERÁ TER O MESMO f_{ck} DOS PILARES (>50MPa).
 - b) PARA DEMAIS ELEVÇÕES E MEMBROS ESTRUTURAIS, CONCRETO f_{ck} 35MPa, COM ADIÇÃO DE NO MÍNIMO 7% DE SILICA ATIVA.
 - c) ITEM C DA PLANTA 3804.
- 3-PARA LOCAÇÃO DOS EIXOS DO PRÉDIO, VER DESENHO DE IMPLANTAÇÃO DA ARQUITETURA.
- 4-MANTER A CURA ÚMIDA SOBRE AS LAJES POR, PELO MENOS, 7 DIAS APÓS A CONCRETAGEM.
- 5-PERFIS DE ELASTÔMERO NUCLEADO DA JEENE OU SIMILAR.
- 6-AS PAREDES DAS EMPENAS ENTRE DOIS PAVIMENTOS CONSECUTIVOS SOMENTE DEVERÃO SER EXECUTADAS QUANDO ESTES PAVIMENTOS ESTIVEREM LIVRES DOS ESCORAMENTOS DOS PISOS SEQUINTEIS, ASSIM AS PAREDES ENTRE O 1º E O 2º PAVIMENTO SOMENTE DEVERÃO SER CONCRETADAS QUANDO OS SERVIÇOS DE PROTENSÃO DO 3º PAVIMENTO ESTIVEREM CONCLUÍDOS E O SEU ESCORAMENTO REMOVIDO.
- 7-LAJES NERVURADAS DO TIPO ATEX 150 OU EQUIVALENTE.
- 8-ADOTAR CONTRA-FLECHA DE 4,0 cm NO ENCONTRO DAS VIGAS V16A/B, V17A/B, V20A/B, V21A/B E DAS VIGAS DE FACHADA (V15, V17, V19, V22, V25, V26) COM AS PAREDES PAR.23 A PAR.26, NOS 6 PONTOS DE CADA PAREDE CONFORME INDICADO EM PLANTA.



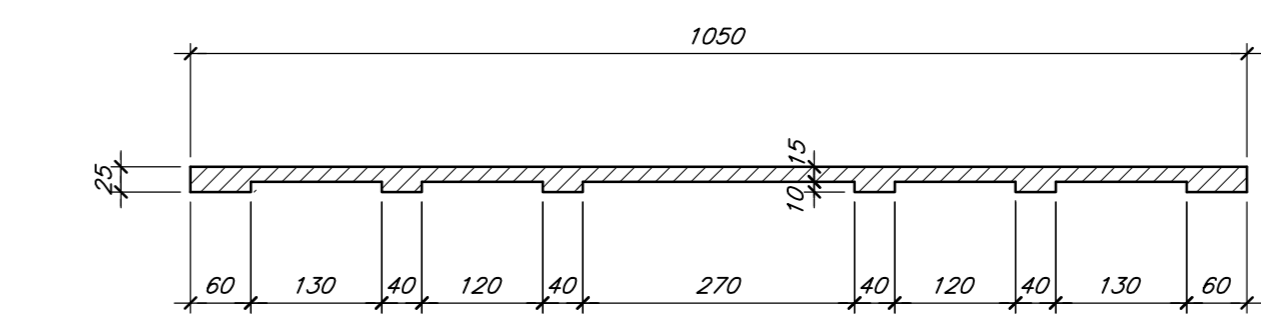
CORTE C-C - DETALHE DA PAR. DE EMPENA (TIP.) ESCALA 1:75



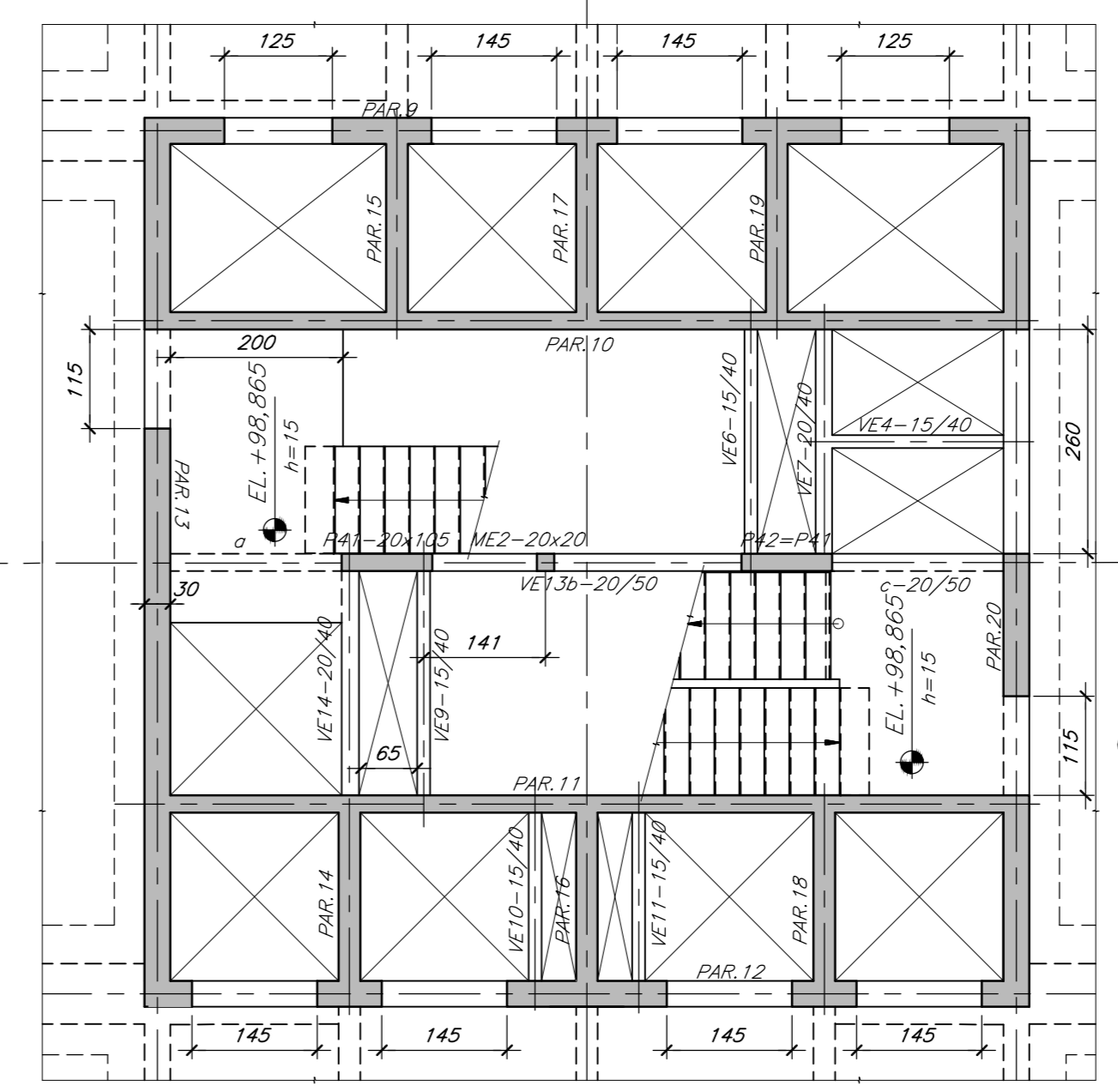
CORTE D-D - DETALHE DA PAR. NO CONTRAFORTE (TIP.) ESCALA 1:75



CORTE E-E ESCALA 1:75

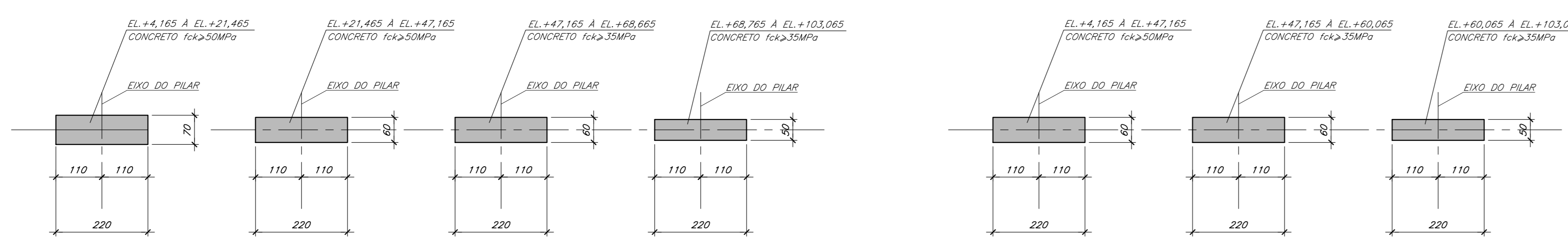


DETALHE DAS PAREDES 23 A 26 ESCALA 1:75



DETALHE 23º PAV - ESCADA ESCALA 1:75

PAVIMENTO TIPO (2º AO 23º PAVIMENTOS) - PLANTA ESCALA 1:75

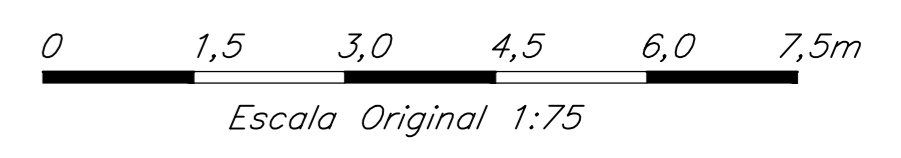


DETALHES DOS PILARES P25 A P28 E P37 A P40 ESCALA 1:75

DETALHES DOS PILARES P29 A P36 ESCALA 1:75

DESENHOS COMPLEMENTARES

- PROJETO EXECUTIVO DE ARQUITETURA:
- 1-EDIFÍCIO CENTRAL-PLANTA-PAVIMENTO TIPO 3856-DC-H1803-P
 - 2-EDIFÍCIO CENTRAL-PLANTA-1º PAVIMENTO 3856-DC-H1804-P
- PROJETO EXECUTIVO DE ESTRUTURA:
- 1-PREDIO CENTRAL - FORMA - FUNDAÇÃO 3856-DC-H3801-P
 - 2-PREDIO CENTRAL - FORMA - SUBSOLO 3856-DC-H3802-P
 - 3-PREDIO CENTRAL - FORMA - TERREJO 3856-DC-H3803-P
 - 4-PREDIO CENTRAL - FORMA - 1º PAVIMENTO 3856-DC-H3804-P



| 5 | ONDE INDICADO | | | | |
|-------|-------------------------------|------------|----------|-----------------|----------|
| 4 | ONDE INDICADO | JCS | 13/04/12 | PVL/CPN | |
| 3 | PILARES P25 A P28 E P37 A P40 | JCS | 27/06/11 | PVL/CPN | |
| 2 | REVISÃO GERAL | JCS/MTC | 21/03/11 | PVL/CPN | |
| 1 | REVISÃO GERAL | JCS/MTC | 21/03/11 | PVL/CPN | |
| N | DESCRIÇÃO | ASSINATURA | DATA | ASSINATURA DATA | |
| | REVISÕES | PROJETISTA | ITAIPI | | |
| PROJ. | MTC | VERIF. | JCS | APROV. | JCS |
| DES. | MFA | VISTO | MTC | DATA | 30/10/10 |

Casuarina Consultoria Ltda



UNILA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
 PROJETO EXECUTIVO DE ESTRUTURA
 PRÉDIO CENTRAL

FORMA
 PAVIMENTO TIPO

| | | | | |
|-------------------|-------|----------|-----------------|----|
| ITAIPI BINACIONAL | VISTO | DATA | 3856-DC-H3805-P | R5 |
| APROV. | DATA | 21/03/11 | | |