



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LARA STEPHANIE TEIXEIRA DO NASCIMENTO

THAÍS CORREA SOUZA

**EXECUÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO EM UM GALPÃO
DE FERTILIZANTES EM SÃO LUÍS-MA**

SÃO LUÍS -MA

2025

LARA STEPHANIE TEIXEIRA DO NASCIMENTO
THAÍS CORREA SOUZA

**EXECUÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO EM UM GALPÃO
DE FERTILIZANTES EM SÃO LUÍS-MA**

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II)
apresentado para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, da Universidade Federal do
Maranhão, Campus Dom Delgado, Vila Bacanga -
São Luís / MA.

Orientador: Prof.Me. Mikhail Luczynski

SÃO LUÍS -MA

2025

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus, por me manter firme e perseverante na busca pelos meus sonhos. À minha mãe, por todo o carinho, pelos conselhos, incentivo e por ser uma constante fonte de inspiração.

Ao meu pai, que, à sua maneira, também foi importante ao longo dessa caminhada. À minha irmã, Luana, pelo companheirismo, apoio e presença.

À minha avó, por ser meu maior exemplo de força e resiliência.

À minha Liris, minha sobrinha tão amada, que me inspira diariamente e para quem desejo ser sempre um bom exemplo.

Agradeço, de forma especial, à minha companheira neste trabalho, Thaís, pela paciência, apoio e incentivo. Obrigada por tornar este trabalho possível e real.

Agradeço ao professor Mikhail pelo conhecimento compartilhado e estendo meus agradecimentos a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Lara stephanie Teixeira do Nascimento

A Deus, por me sustentar em todos os momentos, me conceder força nas diversas vezes que pensei em desistir, sabedoria nas decisões e fé para seguir em frente. Sem sua presença, nada disso teria sido possível!

Aos meus pais, por serem o pilar da minha vida, por serem meu alicerce em todas as fases da minha vida. Obrigada pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelos sacrifícios silenciosos e por nunca deixarem de acreditar em mim, mesmo quando eu mesma duvidei. Tudo o que sou e tudo o que conquistei tem a base de vocês.

À minha dupla de trabalho, Lara, que se tornou meu ponto forte em todos os sentidos. Obrigada pela parceria na vida acadêmica, no estágio, na construção deste trabalho e pelo apoio constante na vida profissional e pessoal. Sua amizade, dedicação e companheirismo tornaram essa jornada mais leve e significativa. Conseguimos juntas! Tornamos este sonho real!

Ao meu professor e orientador, Mikhail Luczynski, minha sincera gratidão pela orientação, disponibilidade, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental não apenas para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para o meu crescimento acadêmico e profissional.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada, meu mais sincero agradecimento.

Thaís Corrêa Souza

EXECUÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO EM UM GALPÃO DE FERTILIZANTES SÃO LUÍS-MA

Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Case Study of a Fertilizer Warehouse in Brazil

Lara Stephanie Teixeira do Nascimento¹

Graduando do Curso de bacharelado Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão.

Email: lara.teixeira@discente.ufma.br

Thaís Corrêa Souza²

Graduando do Curso de bacharelado Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão.

Email: souza.thais@discente.ufma.br

Mikhail Luzynski³

Professor da Universidade Federal do Maranhão.

Email: mikhail.luczynski@ufma.br

Resumo:

As estruturas de concreto armado estão sujeitas à degradação ao longo de sua vida útil, especialmente quando inseridas em ambientes industriais agressivos, como galpões destinados ao armazenamento de fertilizantes. Nessas condições, a exposição contínua a agentes químicos, aliada a falhas construtivas, aumento de cargas e mudanças de uso, pode comprometer o desempenho e a durabilidade das edificações. Este trabalho apresenta um estudo de caso de execução de reforço estrutural em vigas de concreto armado de um galpão industrial localizado em São Luís – MA. A metodologia adotada contemplou inspeção visual detalhada, levantamento geométrico e ensaios para caracterização do concreto, permitindo a identificação de diferentes manifestações patológicas, tais como fissuração, elevada porosidade, insuficiência de armaduras e, em um caso específico, desaprumo significativo. A partir do diagnóstico obtido,

foram definidas estratégias distintas de intervenção, incluindo a reconstrução completa de uma viga com elevado grau de deterioração e o reforço das demais vigas por meio da aplicação de sistemas compósitos à base de fibra de carbono (CFRP). Os resultados evidenciaram a eficácia das soluções adotadas na recuperação do desempenho estrutural e no aumento da vida útil dos elementos, reforçando a importância de intervenções tecnicamente fundamentadas para estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos.

Palavras-chaves: Reforço estrutural; Concreto armado; Vigas; Estudo de caso.

Abstract:

Reinforced concrete structures are subject to degradation throughout their service life, especially when exposed to aggressive industrial environments, such as fertilizer storage warehouses. Under these conditions, continuous exposure to chemical agents, combined with construction deficiencies, increased loads, and changes in use, can compromise the performance and durability of buildings. This study presents a case study on the execution of structural strengthening of reinforced concrete beams in an industrial warehouse located in São Luís, Maranhão, Brazil. The adopted methodology included detailed visual inspection, geometric survey, and concrete characterization tests, allowing the identification of different pathological manifestations, such as cracking, high concrete porosity, insufficient reinforcement, and, in a specific case, significant misalignment. Based on the diagnosis, different intervention strategies were implemented, including the complete reconstruction of a severely deteriorated beam and the strengthening of the remaining beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) systems. The results demonstrated the effectiveness of the adopted solutions in restoring structural performance and extending the service life of the elements, highlighting the importance of technically grounded interventions for reinforced concrete structures exposed to aggressive environments.

Key-words: Structural strengthening; Reinforced concrete; Beams; Case study.

1. Introdução

As estruturas de concreto armado, embora projetadas para apresentar elevada durabilidade, sofrem perda de desempenho ao longo de sua vida útil devido a fatores como mudanças de uso operacional, mudança de finalidade de uso, aumento de cargas, falhas construtivas e exposição a ambientes agressivos. Em edificações industriais, como galpões de armazenamento de fertilizantes, essas condições são ainda mais críticas, em razão da presença de agentes químicos potencialmente corrosivos e da elevada solicitação estrutural.

Nesse contexto, o reforço estrutural surge como alternativa técnica e economicamente viável para adequar a estrutura às novas exigências de segurança e desempenho, evitando a demolição ou substituição completa dos elementos estruturais. Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso de reforço estrutural em vigas de concreto armado de um galpão industrial localizado em São Luís – MA, descrevendo as patologias identificadas, o reforço estrutural mais eficiente definido e os procedimentos executivos adotados.

Logo, a combinação de inspeções regulares, diagnósticos precisos e a aplicação de medidas corretivas e preventivas assegura a preservação da integridade estrutural das edificações. Além disso, contribui para a otimização dos recursos aplicados em manutenção, promovendo não apenas a segurança, mas também a redução de custos com reparos emergenciais a longo prazo.

2. Referencial Teórico

2.1 Reforço Estrutural em Estruturas de Concreto Armado

O reforço de estruturas de concreto armado consiste em um conjunto de intervenções técnicas destinadas a restaurar, aumentar ou adequar a capacidade resistente, a rigidez e a durabilidade de elementos estruturais existentes. Essas intervenções tornam-se necessárias quando a estrutura apresenta degradação, falhas de projeto ou execução, mudanças de uso, aumento das cargas solicitantes ou quando se busca prolongar sua vida útil (Souza; Ripper, 2009).

O reforço estrutural deve ser precedido por uma avaliação criteriosa da estrutura existente, abrangendo inspeção visual detalhada, identificação e mapeamento das manifestações patológicas, análise estrutural dos elementos e verificação da segurança quanto aos estados limites últimos e de serviço. Essa etapa é fundamental para compreender o comportamento real da estrutura, identificar as causas da deterioração e definir a técnica de intervenção mais adequada, garantindo desempenho, segurança e durabilidade após o reforço (Ortiz et al., 2023).

A intervenção deve garantir que a estrutura reforçada atenda aos mesmos requisitos de segurança e desempenho exigidos para estruturas novas. Nesse sentido, a NBR 6118:2023 estabelece que, em situações de reabilitação e reforço estrutural, a análise deve contemplar os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), respeitando-se critérios de segurança, durabilidade e desempenho. Além disso, a compatibilidade entre os materiais existentes e aqueles adicionados no reforço constitui fator determinante para o comportamento satisfatório da estrutura.

Entre as principais técnicas de reforço em vigas de concreto armado, destacam-se:

- aumento da seção transversal (encamisamento);
- adição de armaduras longitudinais e transversais;
- adição de chapas ou perfis metálicos;
- utilização de materiais compósitos, como fibras de polímero reforçado (FRP), incluindo fibra de vidro, fibra de carbono ou aramida.

Segundo Helene (2010), a escolha da técnica depende de aspectos estruturais, econômicos e construtivos, bem como da agressividade ambiental e das condições de uso da edificação.

2.2 Reforço de Vigas de Concreto Armado

O reforço de vigas pode ser projetado para atuar no aumento da resistência à flexão, ao cisalhamento ou de forma combinada, devendo-se considerar o comportamento conjunto entre o concreto existente e o sistema de reforço adotado. Estudos recentes demonstram que a eficiência da técnica de reforço está diretamente associada à qualidade da aderência entre os materiais e à

correta ancoragem das armaduras adicionadas, fatores determinantes para a adequada transferência de esforços e para a prevenção de falhas prematuras (LI et al., 2023).

As técnicas de reforço em vigas devem ser selecionadas de modo a garantir o comportamento monolítico do conjunto, minimizando incompatibilidades de deformação e assegurando desempenho estrutural adequado ao longo da vida útil da estrutura.

2.2.1 Aumento da Seção Transversal (*Encamisamento*)

Segundo Helene (2010), o encamisamento consiste no aumento da seção transversal do elemento estrutural, mediante a adição de um novo envoltório de concreto e armaduras. Essa técnica amplia a capacidade de resistência à flexão, ao cisalhamento e à torção, além de proporcionar proteção adicional às armaduras originais, especialmente em ambientes agressivos.

2.2.2 Adição de Armaduras Longitudinais e Transversais

A adição de armaduras constitui uma técnica tradicional de reforço que visa aumentar a resistência do elemento às solicitações normais de projeto, especialmente em vigas submetidas a esforços de flexão e cisalhamento. A estratégia envolve a inserção de barras de aço adicionais, devidamente ancoradas ao elemento existente.

A eficácia dessa técnica depende da correta ancoragem das barras suplementares e do desenvolvimento de aderência satisfatória entre o concreto existente e os novos elementos de armadura (LI et al., 2023)

2.2.3 Adição de chapas ou perfis metálicos

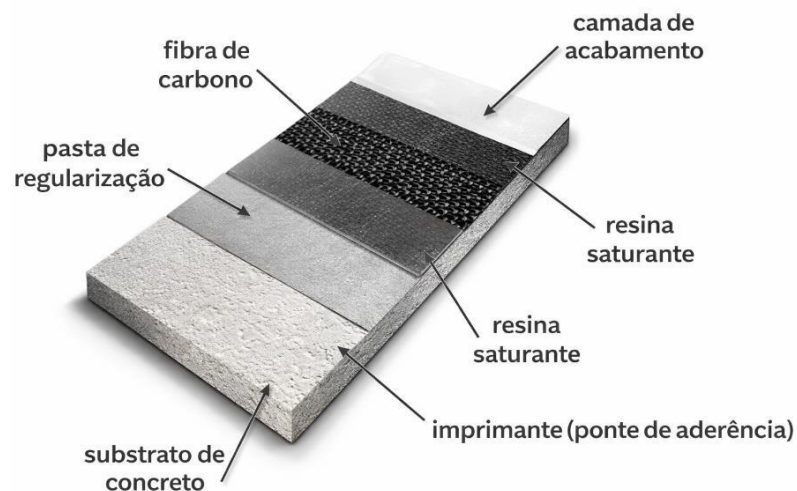
A adição de chapas ou perfis metálicos constitui uma técnica de reforço estrutural em vigas de concreto armado, empregada especialmente para aumentar a resistência à flexão e ao cisalhamento sem acréscimo da seção transversal significativa. Essa solução consiste na fixação de chapas ou perfis de aço na face tensionada da viga, normalmente associados a adesivos epóxi e/ou parafusos/chumbadores metálicos, promovendo a atuação conjunta entre o concreto existente e o reforço metálico (Dalfré; Sarti Júnior; Araújo, 2021).

2.2.4 Materiais Compósitos com Fibras de Polímero Reforçado (CFRP)

As tecnologias baseadas em compósitos reforçados com fibras de polímero (FRP) têm se destacado no reforço de vigas de concreto armado devido à elevada resistência mecânica, baixa densidade e boa resistência à corrosão. Dentre elas, a fibra de carbono reforçada com polímero (CFRP) apresenta elevada rigidez e capacidade de aumentar significativamente a resistência à flexão e ao cisalhamento, sem alterações relevantes na geometria ou no peso do elemento estrutural (ORTIZ et al., 2023).

O reforço com CFRP é aplicado por colagem externa de mantas ou lâminas de fibra de carbono sobre o concreto, usando resinas epóxi para garantir aderência. O desempenho do sistema depende da preparação adequada da superfície e da qualidade da ligação entre compósito e concreto (Figura 1). Estudos mostram que procedimentos rigorosos de preparo, uso de primer e aplicação controlada da resina são essenciais para assegurar a transferência de esforços e o comportamento estrutural do reforço (Dalfré; Sarti Júnior; Araújo, 2021).

Figura 1- Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono



Fonte: Machado, 2009.

2.3 Ambientes Agressivos e Galpões Industriais

Em ambientes industriais agressivos, como galpões destinados ao armazenamento de fertilizantes, a presença de elevada umidade e agentes químicos potencializa os mecanismos de degradação do concreto. Estudos mais recentes confirmam que atmosferas industriais e marítimas apresentam elevado risco de deterioração, exigindo maior rigor nos critérios de durabilidade e manutenção (Medeiros; Andrade, 2017).

Segundo Helene (2010), ambientes industriais agressivos favorecem a corrosão das armaduras, especialmente quando associados a cobrimentos insuficientes e falhas de execução. A corrosão provoca expansão das armaduras, fissuração do concreto e redução da seção resistente, comprometendo a segurança estrutural.

A durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada ao nível de agressividade do ambiente em que estão inseridas. A NBR 6118:2023 classifica os ambientes quanto à agressividade ambiental em quatro classes. De acordo com essa norma, galpões destinados ao armazenamento de fertilizantes enquadram-se, em geral, nas classes de agressividade **forte (Classe III)** ou **muito forte (Classe IV)**, em função da presença de sais, compostos químicos agressivos e elevados níveis de umidade, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 01 - Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente	Riscos de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano (*) (**)	Pequeno
III	Forte	Marinho (*)	Grande
		Industrial (*) (**)	
IV	Muito forte	Industrial (*) (***)	Elevado
		Respingos de maré	
(*) pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banhos, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura)			
(**) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes de estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.			
(***) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústria químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.			

Fonte: NBR 6118:2023 Adaptado, 2025.

As patologias do concreto armado manifestam-se, em geral, sob a forma de fissuras, trincas, destacamento do cobrimento, eflorescências e corrosão das armaduras. A fissuração pode ter origem em retração plástica, retração por secagem, variações térmicas, sobrecargas ou falhas de detalhamento estrutural. De acordo com Thomaz (2016), “as fissuras constituem os primeiros indícios de anomalias estruturais, funcionando como vias preferenciais para a penetração de agentes agressivos” (Thomaz, 2016, p. 87).

No estudo de caso analisado, o galpão de fertilizantes localizado em São Luís– MA está inserido em um ambiente de elevada agressividade ambiental, típico de regiões litorâneas com ambiente marinho. A presença de maresia, aliada às altas temperaturas, à elevada umidade e aos compostos químicos provenientes do armazenamento de fertilizantes, intensifica os ciclos de molhagem e secagem do concreto, favorecendo a corrosão das armaduras e o surgimento de patologias estruturais, como fissuração e destacamento do cobrimento.

Nessas condições, o reforço estrutural deve priorizar soluções que aumentem o cobrimento, melhorem a proteção das armaduras e utilizem materiais com maior resistência à penetração de agentes agressivos, contribuindo para o aumento da vida útil da estrutura.

3. Metodologia

3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo corresponde a um galpão industrial localizado na zona industrial de São Luís – MA, área caracterizada pela concentração de atividades industriais e logísticas e pela proximidade com vias principais, portos e centros de distribuição. O galpão integra uma instalação industrial de grande porte voltada à fabricação de fertilizantes e encontra-se em uso contínuo, condição que impõe elevadas exigências ao desempenho estrutural devido ao ambiente com elevado potencial de agressividade.

Ressalta-se que a empresa responsável pela instalação autorizou a realização da coleta de dados, e das inspeções técnicas necessárias ao desenvolvimento do estudo, entretanto, solicitou a preservação de sua identidade, motivo pelo qual o nome da organização não é mencionado neste trabalho.

A edificação é constituída por estrutura predominantemente em concreto armado, composta por pórticos formados por vigas e pilares. Parte da estrutura foi executada em sistema pré-moldado, associada a elementos monolíticos, sendo a cobertura constituída por telhas de

fibrocimento apoiadas sobre a estrutura principal. O galpão possui área total de 11.558,37 m² e perímetro de 478,45 m, características compatíveis com edificações industriais de grande porte.

Figura 2 – Vista superior do galpão



Fonte: Google Maps, 2025.

Figura 3 – Vista lateral da fábrica



Fonte: Autores, 2025.

Durante as inspeções técnicas realizadas, foram identificadas manifestações patológicas relevantes nas vigas pórtico, com padrões e intensidades distintos. O conjunto analisado é composto por oito vigas pórtico, localizadas a aproximadamente 23 m de altura (Figura 3), posicionadas na área de descarga de matéria-prima, sobre a correia transportadora e acima das baias de armazenagem de material, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Área de armazenagem de materiais



Fonte: Autores, 2025.

A localização dessas vigas é relevante do ponto de vista ambiental e operacional, considerando a proximidade com o sistema de transporte de matéria-prima e a operação contínua da instalação industrial, fatores que contribuem para um ambiente com elevado potencial de agressividade.

Durante inspeções, foram identificadas na Viga Pórtico 01 a presença de fissuras inclinadas assimétrica, associada a deformações excessivas e ao desaprumo do pilar adjacente. Essas manifestações indicam a atuação de esforços combinados não adequadamente absorvidos pelo sistema estrutural original, conforme ilustrado na Figura 5 (a) e (b).

Figura 5 – (a) Fissuração da Viga Pórtico 01 próximo ao encontro com pilar e (b) Fissuração da Viga Pórtico 01

(a)



Fonte: Autores, 2025

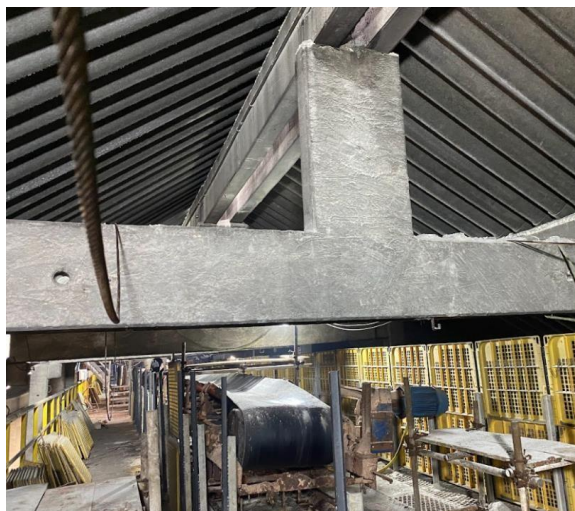
(b)



Fonte: Autores, 2025

As Vigas Pórtico 02 a 08 apresentaram manifestações patológicas de menor severidade, caracterizadas por porosidade do concreto, fissuração moderada e indícios de insuficiência de armadura. Apesar dessas ocorrências, foi identificada a existência de capacidade resistente residual, o que viabilizou a adoção de soluções de reforço estrutural sem necessidade de demolição dos elementos, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Condição geral das Vigas Pórtico 02 a 08



Fonte: Autores, 2025.

3.2 Procedimento executivo

A metodologia adotada neste estudo baseou-se em uma abordagem sequencial, compreendendo inspeção visual para identificação das manifestações patológicas, ensaios e levantamentos técnicos, análise estrutural, definição das estratégias de intervenção e avaliação do comportamento das soluções adotadas, realizada aproximadamente seis meses após a intervenção por meio de inspeção visual in loco.

O estudo caracteriza-se como um estudo de caso, fundamentado na análise documental de relatórios técnicos elaborados por empresa de engenharia contratada pela proprietária de uma instalação industrial em operação. A identificação das manifestações patológicas foi realizada exclusivamente por meio de inspeção visual, com acompanhamento da evolução das fissuras nas vigas pórtico.

Os ensaios, levantamentos técnicos e análises estruturais foram executados pela empresa contratada, sendo seus resultados consolidados em relatórios técnicos que constituíram a base de dados analisada neste trabalho.

Com base nas conclusões apresentadas nos relatórios, foram definidas estratégias de intervenção estrutural compatíveis com o grau de comprometimento dos elementos, incluindo substituição estrutural e reforço com sistemas compósitos de fibra de carbono (CFRP).

A avaliação do desempenho das intervenções foi realizada por meio de inspeção visual qualitativa aproximadamente seis meses após a execução das soluções adotadas.

4. Resultados e Discussões

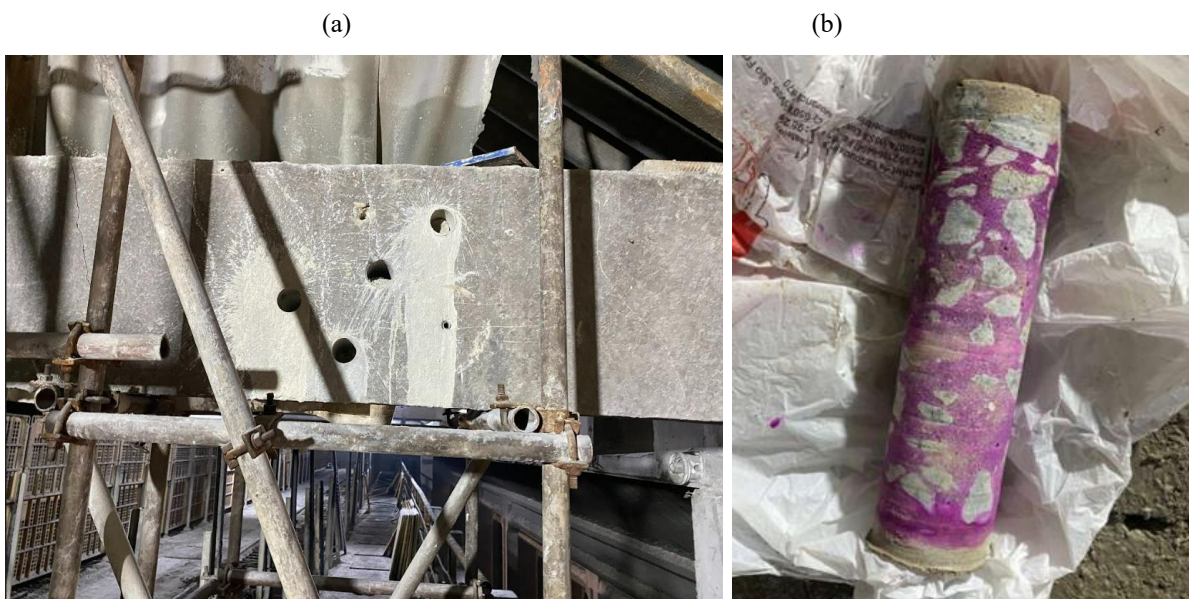
A Viga Pórtico 01 apresentou o comportamento estrutural mais crítico entre os elementos analisados, principalmente em função do desaprumo da viga, medido em aproximadamente 12,0 cm, por meio de levantamento realizado em campo com equipamento a laser (Figura 7). Esse valor mostrou-se superior aos limites normativos usualmente recomendados, que relacionam o deslocamento admissível à altura do elemento estrutural, indicando comportamento fora do previsto e comprometimento da rigidez global do pórtico.

Figura 7 – Medição do desaprumo da Viga Pórtico 01 realizada com equipamento a laser.



Os ensaios de resistência à compressão, realizados a partir de corpos de prova extraídos da estrutura, apresentaram valores entre 17,58 MPa e 26,79 MPa, com resistência média em torno de 22 MPa. Os corpos de prova contemplaram amostras de diferentes pontos da viga, e os resultados indicaram variabilidade do concreto, condição que influenciou a avaliação da capacidade resistente da seção quando analisada em conjunto com o estado de fissuração observado e o comportamento global da estrutura, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – (a) Furos de extração de testemunhos (b) Corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão do concreto.



Fonte: Autores, 2025

Fonte: Empresa de engenharia, 2025

A decisão pela reconstrução integral da Viga Pórtico 01, em detrimento de soluções de reforço localizado, baseou-se na avaliação do seu comportamento estrutural global. O desaprumo significativo do pilar associado indicava que intervenções pontuais ou superficiais não seriam suficientes para restabelecer adequadamente o desempenho estrutural do conjunto.

A demolição controlada da Viga Pórtico 01 foi adotada em função do diagnóstico preliminar que indicava comprometimento do comportamento estrutural global do pórtico, associado ao desaprumo. As análises iniciais indicaram que soluções de reforço superficial não seriam suficientes para restabelecer o desempenho estrutural do conjunto. Dessa forma, tornou-se necessária a verificação direta das condições internas da viga, inviável por métodos não destrutivos.

Figura 9 – Armaduras da Viga e pilar Pórtico 01 antes da intervenção.



Fonte: Autores, 2025

Durante a demolição controlada, foi possível realizar a inspeção direta da seção existente e do detalhamento real das armaduras (figura 9), evidenciando taxa de armadura inferior à requerida e indícios de transferência inadequada de esforços entre viga e pilares. Essas condições confirmaram a limitação das soluções de reforço localizado e fundamentaram a decisão pela reconstrução integral da viga, como alternativa tecnicamente mais segura e compatível com o comportamento estrutural observado

Assim, definiu-se a reconstrução da Viga Pórtico 01, com redefinição da seção transversal e novo detalhamento de armaduras, incluindo o reforço dos pilares associados a esse pórtico (figura 10), de modo a garantir redistribuição adequada dos esforços e maior segurança estrutural.

Figura 10 – Armaduras do pilar Pórtico 01 após a reconstrução e reforço estrutural.



Fonte: Autores, 2025

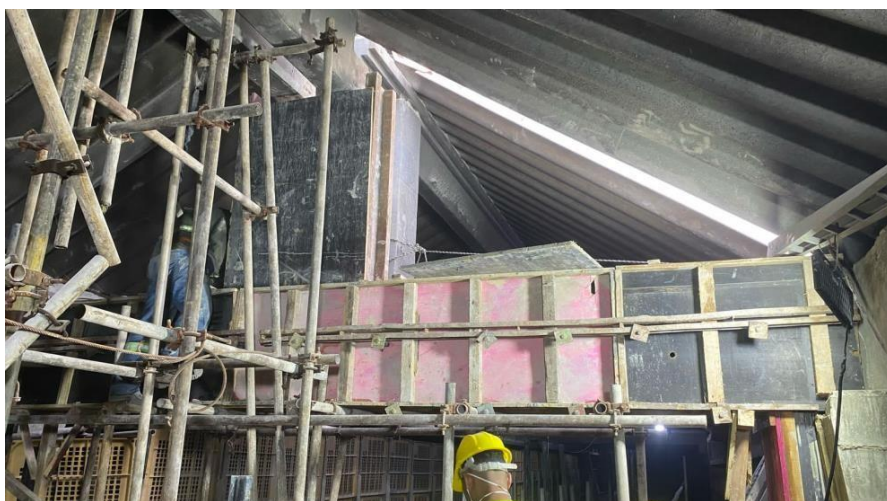
Na reconstrução da Viga Pórtico 01, os pilares foram executados com graute (figura 11), visando garantir adequado preenchimento, aderência às armaduras e controle da resistência em regiões confinadas. A viga foi confeccionada com concreto usinado, solução mais apropriada para elementos de maior volume, permitindo melhor controle de trabalhabilidade, homogeneidade e lançamento, conforme figura 12. Essa escolha assegurou compatibilidade entre desempenho estrutural e condições executivas da obra.

Figura 11 - Execução de grauteamento de pilar



Fonte: Autores, 2025.

Figura 12 - Montagem de fôrmas para concretagem viga pórtico 01.



Fonte: Autores, 2025.

Durante essa etapa, houve discussão técnica quanto à retirada antecipada do escoramento adotado (figura 13), motivada pela necessidade de retomada da operação de uma correia transportadora existente na área. Como alternativa, foi implantado um novo sistema de escoramento em tubo Roll, sendo o sistema de escoramento mais compatível com a

continuidade da operação industrial, permitindo a manutenção das atividades sem comprometer a segurança estrutural. Após o período adequado de cura e ganho de resistência do concreto, o escoramento foi totalmente removido.

Figura 13 – Sistema de escoramento adotado do tipo tubo roll para a execução da recuperação estrutural da Viga Pórtico 01.

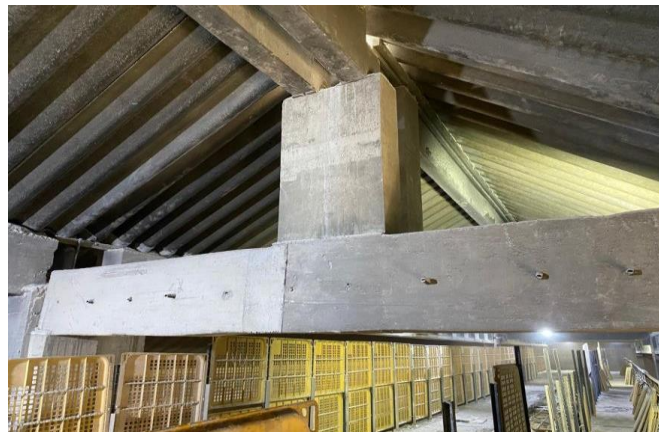


Fonte: Autores, 2025.

Após a conclusão das intervenções e transcorrido um período aproximado de seis meses de operação, foi realizada avaliação visual da viga, com foco na identificação de manifestações patológicas aparentes.

Na Viga Pórtico 01, observam-se irregularidades na face inferior (Figura 14), atribuídas a imperfeições de fôrma durante a concretagem, com caráter predominantemente estético. Verifica-se ainda a presença de elementos tubulares associados ao processo executivo. Na avaliação visual realizada, não foram identificados indícios de comprometimento estrutural.

Figura 14 – Aspecto visual da viga pórtico 01 após a reconstrução.

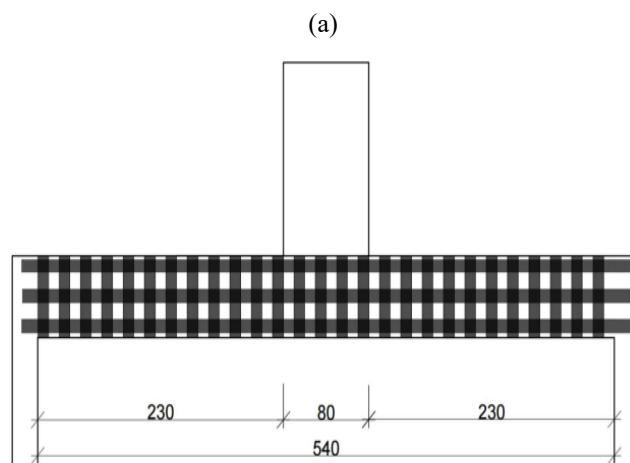


Fonte: Autores, 2026

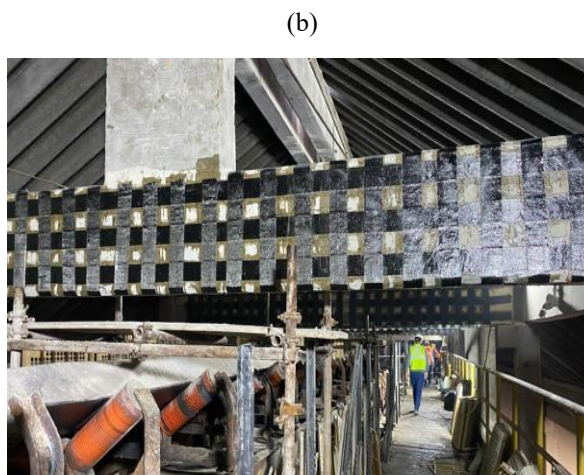
As Vigas Pórtico 02 a 08 não apresentaram desaprumos significativos nem fissuração severa, indicando comportamento estrutural distinto em relação à Viga Pórtico 01. Apesar de apresentarem resistências à compressão em faixa semelhante, esses elementos mantiveram condições que permitiram a adoção de soluções menos invasivas.

Para essas vigas, foi executado o reforço estrutural por meio de sistemas compósitos de fibra de carbono (CFRP), conforme a figura 15. Os pilares associados a esses pórticos não receberam reforço estrutural, não por inexistência de necessidade técnica, mas em função de limitações contratuais, ficando essas intervenções previstas para execução posterior sob responsabilidade da empresa contratante, conforme registrado no relatório técnico.

Figura 15 – (a) Projeto de aplicação do sistema de reforço com fibra de carbono (CFRP) (b) Detalhe da aplicação das fibras de carbono na viga.



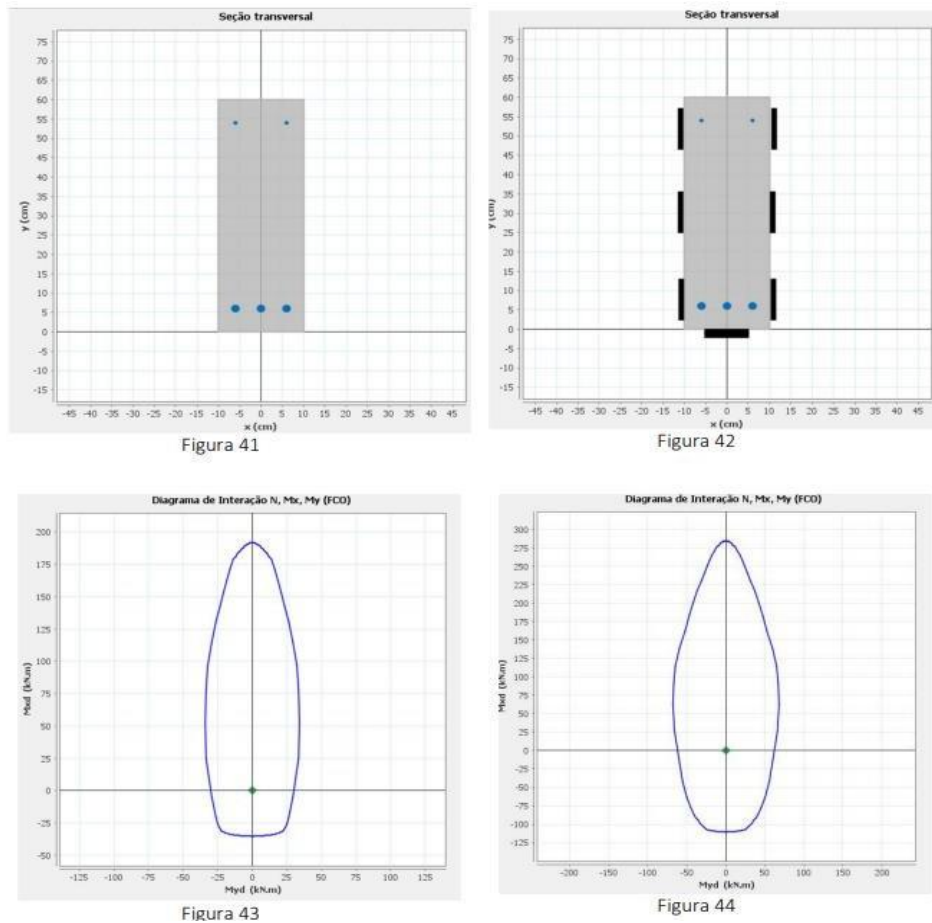
Fonte: Empresa de engenharia, 2025



Fonte: Empresa de engenharia, 2025

Os diagramas de interação indicaram aumento do momento fletor resistente de aproximadamente 192 kN·m para 285 kN·m, representando ganho da ordem de 48%, conforme apresentado na Figura 16, evidenciando a eficácia do reforço adotado.

Figura 16 – Diagrama de interação momento fletor antes e após o reforço com CFRP.



Fonte: Empresa de engenharia, 2025

Considerando as condições ambientais da edificação, os ensaios indicaram umidade superficial em torno de 2%, evidenciando maior permeabilidade do concreto e potencial ingresso de agentes agressivos.

Figura 17 – Vista da viga de concreto após a aplicação do compósito de fibra de carbono (CFRP) e a camada de proteção com argamassa estrutural.

Fonte: Autores, 2025.



Diante desse cenário, definiu-se a aplicação de proteção química superficial após a execução do reforço. Foram avaliadas alternativas como aplicação de resina epóxi e proteção com graute, sendo esta última adotada, conforme figura 17, por apresentar desempenho compatível com as condições de exposição, maior familiaridade operacional da equipe e melhor viabilidade econômica.

Nas Vigas Pórtico 02 a 08, observam-se fissuras de orientação horizontal e vertical, distribuídas ao longo das faces laterais e na face inferior das vigas (Figura 18), além de regiões com acúmulo de material particulado sobre a superfície, característica do ambiente industrial da edificação.

Figura 18 – Vista das Vigas Pórtico 02 a 08, evidenciando fissuras aparentes.



Fonte: Autores, 2026.

As fissuras identificadas apresentam, de modo geral, caráter superficial, podendo estar associadas a marcas de fôrma, retração do graute, variações na espessura do revestimento e às condições ambientais, não sendo observados, no período avaliado, indícios visuais de instabilidade global ou deformações excessivas.

Observou-se ainda que a espessura do graute apresenta variações ao longo das vigas, reflexo das condições de execução e da geometria existente.

Considerando que os pilares associados às Vigas Pórtico 02 a 08 permanecem sem intervenção até o momento da avaliação, as manifestações observadas reforçam a importância de acompanhamento periódico, especialmente em função do ambiente agressivo e da interação estrutural entre elementos reforçados e não reforçados.

A avaliação visual evidencia que o reforço estrutural em fibra de carbono (CFRP) foi aplicado ao longo de todo o comprimento das Vigas Pórtico 02 a 08, conforme previsto em projeto. Observa-se, entretanto, que o revestimento em graute apresenta aplicação não uniforme, perceptível pela diferença de acabamento superficial, conforme mostra a figura

20. Essa condição está relacionada às etapas executivas e às características do revestimento adotado, não configurando falha do sistema de reforço, uma vez que a função resistente principal é desempenhada pela fibra de carbono.

Figura 19 – Vigas Pórtico 02 a 08, evidenciando diferença de acabamento superficial associada à aplicação não uniforme do revestimento em graute



Fonte: Autores, 2025.

De forma integrada, os resultados demonstram que as soluções adotadas foram definidas a partir da interpretação conjunta dos ensaios, registros visuais e condições reais de execução,

considerando não apenas a segurança estrutural, mas também as restrições contratuais e operacionais da planta, além da durabilidade da intervenção. O estudo evidencia a aplicação de engenharia estrutural em situação real, com decisões técnicas fundamentadas em dados, observações de campo e viabilidade prática.

5. Conclusão

A análise estrutural evidenciou comportamentos distintos entre a Viga Pórtico 01 e as Vigas Pórtico 02 a 08. A Viga Pórtico 01 apresentou condição crítica, associada ao desaprumo excessivo e à deficiência de armaduras, exigindo intervenção mais abrangente por meio de reconstrução estrutural.

A reconstrução da Viga Pórtico 01, com redefinição da seção e reforço dos pilares associados, mostrou-se adequada para restabelecer a segurança e a rigidez do pórtico. O uso de graute nos pilares e concreto usinado na viga garantiu melhor controle executivo e desempenho estrutural compatível com as solicitações atuantes.

As Vigas Pórtico 02 a 08 apresentaram condições que permitiram soluções menos invasivas, sendo adotado o reforço com sistemas compósitos de fibra de carbono (CFRP). Os resultados indicaram aumento significativo da capacidade resistente à flexão, confirmando a eficácia da técnica empregada.

A avaliação visual realizada seis meses após a intervenção identificou fissuras predominantemente superficiais e variações no revestimento em graute, sem indícios de comprometimento estrutural. A ausência de reforço nos pilares desses pórticos reforça a necessidade de acompanhamento periódico, especialmente em ambiente industrial agressivo.

De forma integrada, o estudo demonstra a aplicação prática da engenharia estrutural, com soluções definidas a partir da análise conjunta de ensaios, inspeções visuais e restrições operacionais, assegurando segurança estrutural, viabilidade executiva e durabilidade da intervenção.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

DALFRÉ, Glaucia Maria; SARTI JÚNIOR, Luiz Antônio; ARAÚJO, Ciro José Ribeiro Villela. **Protocolo acelerado de degradação do sistema de reforço EBR-CFRP aplicado em vigas de concreto armado.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 47-63, jul./set. 2021.

EMPRESA DE ENGENHARIA. **Relatório 02** - Recuperação e Reforço de Vigas do Setor Descarga. São Luís, 2025.

LI, Q.; CHEN, M.; ZHANG, L. **Effect of additional longitudinal and transverse reinforcement on the performance of strengthened RC beams.** Engineering Structures, v. 272, p. 114971, 2023.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: PINI, 2010.

MACHADO, ARI DE PAULA. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** Viapol. 2009.

MAURYA, K. K.; RAWAT, A.; SHANKER, R. Damage in concrete due to corrosion of reinforcement. In: **Review Article on Condition Assessment of Structures Using Electro-Mechanical Impedance Technique.** 2022

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** 4. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2014.

ORTIZ, J. D.; KHEDMATGOZAR DOLATI, S. S.; MALLA, P.; NANNI, A.; MEHRABI, A. **FRP-Reinforced/Strengthened Concrete:** State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects. Materials, v. 16, n. 5, p. 1990, 28 fev. 2023. DOI: 10.3390/ma16051990.

THOMAZ, Eduardo. **Trincas em edifícios:** causas, prevenção e recuperação. 2. ed. São Paulo: PINI, 2016.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: PINI, 2009.