CAPÍTULO 18 · Parte I · Deterioração e ensaios
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/5855eh86
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/vn127492

RETROFIT ESTRUTURAL SUSTENTÁVEL: CAMINHO PARA A DESCARBONIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Victor Hugo de Souza Rolo[1*], Glauco José de Oliveira Rodrigues[1], Luiz Octavio de Souza Bueno de Oliveira[2], José Guilherme Santos da Silva[3]
*Autor de contato: rolovictorhugo@gmail.com

1 Departamento de Estruturas e Fundações (ESTR), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil.
2 Departamento de Construção Civil e Transportes (DCCT), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil.
3 Departamento de Estruturas e Fundações (ESTR), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO

Em construções de concreto é comum a ocorrência de manifestações patológicas que indicam a ocorrência de processos de degradação e queda de desempenho estrutural. Normalmente, esta degradação é fruto de ausência de um plano eficaz de manutenção preditiva, acarretando custos de conservação atrelados à execução de obras de reparo corretivas, mais onerosas do que a execução de processos preventivos que possam garantir segurança aos usuários e maior expectativa de vida útil. Nesse cenário, surgem questões sobre as vantagens econômicas entre demolição, reconstrução ou recuperação estrutural. Além disso, a tendência de modificação do uso de construções existentes, o retrofit, levanta o dilema entre optar pela adaptação estrutural ou seguir com a demolição e construção de uma nova estrutura. Assim sendo, este trabalho objetivou investigar experimentalmente a eficiência de produtos específicos para a recuperação, o reparo e o reforço de estruturas de concreto, através da criação de elementos estruturais em escala reduzida degradados, reparados com esses produtos e submetidos a testes de compressão para atestar que seu uso garante uma resistência equivalente à de uma estrutura íntegra. Concluiu-se que a presença dos produtos reparadores nas estruturas degradadas não garante resistência à compressão igual ou superior as estruturas íntegras de concreto, isso se deve, possivelmente, a particularidades da metodologia de estudo desenvolvida.

Palavras-chave: retrofit, sustentabilidade, recuperação, concreto, argamassa.

ABSTRACT

In concrete constructions, it is common to have pathological manifestations that indicate the occurrence of degradation processes and a drop in structural performance. Usually, this degradation is the result of the absence of an effective predictive maintenance plan, resulting in conservation costs linked to the execution of corrective repair works, more costly than the execution of preventive processes that can ensure safety for users and longer life expectancy. In this scenario, questions arise about the economic advantages between demolition, reconstruction, or structural recovery. In addition, the trend of modifying the use of existing buildings, retrofit, raises the dilemma between opting for structural adaptation or proceeding with the demolition and construction of a new structure. Therefore, this work aimed to experimentally investigate the efficiency of specific products for the recovery, repair and reinforcement of concrete structures, through the creation of degraded small-scale structural elements, repaired with these products and submitted to compression tests to attest that their use guarantees a resistance equivalent to that of an intact structure. It was concluded that the presence of repair products in degraded structures does not guarantee compressive strength equal to or superior to intact concrete structures; this is possibly due to particularities of the study methodology developed.

Keywords: retrofit, sustainability, recovery, concrete, mortar.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A versão de 2023 da NBR 6118 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) foi a primeira a abordar de maneira consistente a questão da durabilidade do concreto, alinhando-se às diretrizes desenvolvidas pelo comitê europeu do concreto desde o final dos anos 1970. No entanto, estruturas mais antigas, anteriores a essa versão da norma, foram projetadas e construídas com base em recomendações vigentes desde a década de 1940, que ignoravam boas práticas para mitigar a perda de desempenho das estruturas ao longo do tempo, frente às ações agressivas do meio ambiente.

Além disso, a falta ou ineficiência de planos de manutenção preditiva nessas construções mais antigas - muitas ainda em uso - resultou em manifestações patológicas indicativas de degradação estrutural, o que pode comprometer sua integridade, tornando-as mais vulneráveis a ações solicitantes mais exigentes.

Ao mesmo tempo, a tendência de reaproveitamento de estruturas existentes para novos usos - o chamado retrofit - exige que essas estruturas sejam verificadas conforme as recomendações normativas atuais. Muitas vezes, o novo projeto impõe aumento de carga (por exemplo, na transformação de edificações residenciais em hospitalares), o que demanda o reforço de elementos estruturais como lajes, vigas, pilares e fundações. Ainda assim, a reutilização de estruturas com reforços pontuais é favorável à sustentabilidade, pois evita a demolição de edificações cuja construção já consumiu grandes quantidades de insumos naturais (como calcário, argila, areia, brita, água e minérios de ferro) e gerou significativa emissão de dióxido de carbono (aproximadamente 410 quilogramas de CO_2 para cada metro cúbico de concreto produzido).

Ao aproveitar total ou parcialmente as estruturas e sistemas prediais existentes, evita-se a devolução desses insumos na forma de resíduos da construção civil, que ocupam espaço em aterros e frequentemente requerem tratamento específico para o descarte.

1.2. RETROFIT E SUSTENTABILIDADE

Retrofit consiste na modernização de edificações existentes, adaptando-as às exigências normativas atuais e aumentando sua eficiência, sem necessidade de reconstrução, o que demandaria mais recursos não renováveis e resultaria em maior emissão de dióxido de carbono. Essa prática pode ser aplicada não apenas em edificações, mas também em obras de arte especiais (pontes, viadutos e passarelas) e outras construções de concreto. Com a construção civil focada em promover maior sustentabilidade em suas operações nos últimos anos, o retrofit se alinha perfeitamente a esse esforço.

Essa prática não só impede que os materiais, energia e esforços anteriormente investidos nas estruturas sejam desperdiçados, mas também promove a recuperação e o novo uso de edificações antigas, preservando o patrimônio histórico e permitindo a readequação funcional. Isso possibilita a modernização dos edifícios e contribui para a eficiência energética, além de reduzir o consumo de água e materiais e evitar a geração de resíduos provenientes da demolição de construções mais antigas.

Cada vez mais recomendada por engenheiros e construtores comprometidos com a sustentabilidade, essa solução exige, no entanto, a mitigação de problemas estruturais e manifestações patológicas em estruturas antigas. Isso demanda conhecimento técnico e a elaboração de projetos específicos de reparação e reforço.

Como muitas vezes o projeto estrutural original está perdido e as características mecânicas dos materiais constituintes das edificações se alteram com o tempo - com o concreto ganhando resistência por um lado, mas perdendo desempenho devido à ação dos agentes agressivos ambientais - surge a necessidade de caracterização física e mecânica dos elementos existentes. Além disso, é fundamental testar, experimentalmente, a eficiência e durabilidade dos produtos de engenharia e estudar os métodos corretos de aplicação.

Do ponto de vista estrutural, é necessário avaliar numericamente o comportamento global das estruturas retrofitadas frente aos seus novos usos, utilizando modelagem estrutural com uso do BIM, por meio de ferramentas computacionais apropriadas.

Adicionalmente, novos materiais e técnicas devem ser desenvolvidos e estudados experimentalmente para obtenção de parâmetros dos materiais de forma minimamente invasiva - os chamados "ensaios não destrutivos". Também é essencial avaliar a eficiência de técnicas de reforço comumente utilizadas (estruturas metálicas e de madeira, encamisamento, e uso de materiais alternativos como fibras de carbono e vidro, além de polímeros, entre outros).

1.3. JUSTIFICATIVA

Tais soluções estão sendo cada vez mais indicadas por engenheiros e consultores para tratamento de patologias diagnosticadas em especificações técnicas, projetos para reforço de estruturas e retrofit de edificações.

Neste diapasão, a indústria da química do concreto acena com soluções industrializadas com relação custo-benefício cada vez mais viáveis e aplicáveis às mais diversas demandas nesta área tais como:

- Argamassas reparadoras;
- Grautes;
- Microconcretos;
- Inibidores de corrosão;
- Anodos de sacrifício;
- Pontes de aderência etc.

Surge a necessidade de caracterizá-los física e mecanicamente, testar a eficiência, durabilidade e métodos corretos de aplicação em diversas condições de uso, bem como deve-se avaliar numericamente o comportamento global de estruturas retrofitadas através de modelagem estrutural BIM de edificações com uso de ferramentas computacionais apropriadas para esta finalidade.

Adicionalmente, devem ser desenvolvidos e estudados experimentalmente novos materiais, com o desenvolvimento e introdução de técnicas minimamente invasivas destinados a recuperação, reparo e reforço de estruturas retrofitadas além de também ser necessário estudar mais profundamente a eficiência de técnicas e soluções comumente praticadas para reforço (fibra de carbono, estruturas metálicas, estruturas de madeira, encamisamento etc.).

1.4. OBJETIVOS

A) Firmar convênio com empresas fornecedoras nacionais de produtos industrializados para custeio de insumos destinados a recuperação, reparo e reforço de estruturas de concreto com foco no fornecimento de grautes, microconcretos, argamassas reparadoras e materiais convencionais para construção em concreto (cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e demais aditivo);

B) Execução de todos os ensaios necessários para caracterização dos materiais cimentícios (finura, umidade, granulometria etc.) e moldados (resistência à compressão); Comparação dos resultados obtidos entre os elementos estruturais íntegros e os elementos estruturais reparados.

2. METODOLOGIA

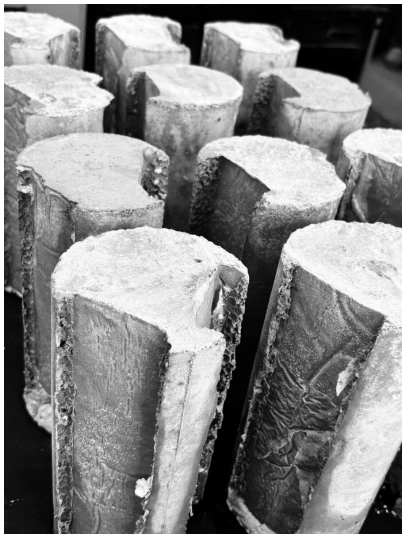
Foi firmada uma parceria com duas empresas fornecedoras nacionais de produtos industrializados, a Tecnosil e a Concrevit, com o objetivo de viabilizar o custeio de insumos destinados à recuperação e ao reforço das estruturas de concreto. A Tecnosil forneceu os materiais de reparo que foram estudados, a argamassa TECNOPOL AP 60 e o graute TECNOGROUT 250, e a Concrevit, cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e aditivos diversos.

A metodologia de estudo, desenvolvida pelos autores devido a carência de normas técnicas para esta finalidade na engenharia civil, consistiu na fabricação e no ensaio de resistência à compressão (NBR 5739) de cinco grupos de corpos de prova cilíndricos, cada um com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. O primeiro grupo foi composto por corpos de prova íntegros de argamassa; o segundo, por corpos de prova íntegros de graute; o terceiro, por corpos de prova íntegros de concreto; o quarto, por corpos de prova de concreto com falhas simuladas, posteriormente reparadas com argamassa; e o quinto, por corpos de prova de concreto com falhas simuladas, posteriormente reparadas com graute.

Os corpos de prova íntegros de concreto tiveram como objetivo representar estruturas sem degradações estruturais, enquanto os corpos de prova com falhas simuladas representaram estruturas degradadas. Buscou-se determinar a resistência à compressão de todos os espécimes e comparar os resultados dos corpos de prova íntegros de concreto com os dos reparados, a fim de verificar se estruturas reparadas com argamassa ou graute mantêm características de resistência à compressão semelhantes às de estruturas íntegras. Os corpos de prova íntegros de argamassa e de graute, por sua vez, tiveram seus resultados comparados com os valores especificados pela fabricante.

Os corpos de prova que seriam posteriormente preenchidos com a argamassa e com o graute foram confeccionados com duas falhas simuladas, feitas através da inserção de paralelepípedos de isopor nos moldes antes da aplicação do concreto (Figura 1), com comprimento e largura iguais, porém espessuras diferentes. Apesar de serem reparados com materiais distintos, todos os espécimes simuladamente degradados eram geometricamente iguais.

Figura 1 – Aspecto final dos moldes antes da aplicação do concreto



Fonte: os autores.

Figura 2 – Aspecto dos corpos de prova após o tempo de cura do concreto e a retirada dos paralelepípedos de isopor



Fonte: os autores.

É importante ressaltar que após a retirada dos paralelepípedos de isopor (Figura 2), com o término do tempo de cura do concreto, foi necessário realizar um apicoamento das regiões que seriam aplicados os materiais de reparo, para que tivessem maior aderência com o material original. Esse apicoamento foi realizado com o uso de uma furadeira acoplada a uma escova circular com haste (Figura 3). A Figura 4 apresenta a aparência dos corpos de prova após a aplicação dos reparos.

Figura 3 – Superfície de reparo após o apicoamento



Fonte: os autores.

Figura 4 – Aspecto dos corpos de prova após a aplicação dos reparos



Fonte: os autores.

Além dos ensaios de resistência à compressão (NBR 5739), foi realizado o ensaio de resistividade elétrica (NBR 9204 e Figura 5) de todos os grupos de corpos de prova mencionados no primeiro parágrafo desta seção, com exceção dos íntegros de argamassa e íntegros de graute. A finalidade desse experimento é de verificar a resistência oferecida pelo concreto à passagem de uma corrente elétrica. Um maior valor de resistividade elétrica indica um concreto menos suscetível a corrosões em suas armaduras, um menor, mais propenso a corrosões.

Figura 5 – Corpo de prova tendo sua resistividade elétrica aferida



Fonte: os autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Antes de descobrir os resultados encontrados, é necessário conhecer os valores de resistência à compressão dos materiais fornecidos pela Tecnosil (Tecnosil, 2024). Esses dados estão expressos em megapascal (sigla “MPa”) na Tabela 1.

Tabela 1 – Resistencia à compressão prevista dos materiais de reparo estudados

Material	Resistencia à compressão		
	1 dia	7 dias	28 dias
Argamassa TECNOPOL AP 60	35 MPa	40 MPa	60 MPa
Graute TECNOGROUT 250	35 MPa	60 MPa	70 MPa

Fonte: os autores.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com 7, 14, 21 e 28 dias de idade dos corpos de prova, para que pudessem ser analisadas as curvas de ganho de resistência ao longo do tempo dos espécimes íntegros de concreto e dos reparados, comparando-as. Em cada dia de ensaio foram rompidos um corpo de prova íntegro de argamassa, um íntegro de graute, quatro íntegros de concreto, quatro reparados com argamassa e quatro reparados com graute, totalizando 56 espécimes rompidos ao fim da pesquisa.

A Tabela 2 apresenta os valores de resistência à compressão atingidos pelos grupos de corpos de prova íntegros de argamassa e íntegros de graute, seguidos pela diferença percentual entre os resultados da Tabela 1 e da Tabela 2. Valores negativos representam que a resistência foi inferior a informada pela fabricante, positivos, que foi superior. Os dados mostrados estão expressos em megapascal (sigla “MPa”).

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos grupos de corpos de prova íntegros de argamassa e íntegros de graute

Grupo de corpos de prova	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Íntegros de argamassa	54,4 MPa	57,7 MPa	45 MPa	56,3 MPa
Diferença percentual	+26,5 %	-	-	-6,6 %
Íntegros de graute	44,7 MPa	56,6 MPa	44,9 MPa	65,7 MPa
Diferença percentual	-34,2 %	-	-	-6,5 %

Fonte: os autores.

Ao comparar a Tabela 2 com a Tabela 1, chega-se à conclusão de que os dois grupos estudados tiveram grande diferença dos valores fornecidos pela fabricante aos 7 dias e quase nenhuma aos 28 dias.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos grupos de corpos de prova íntegros de concreto, reparados com argamassa e reparados com graute. É importante lembrar que, diferentemente dos dados da Tabela 2, onde foi rompido apenas um espécime por grupo em cada dia, agora foram rompidos quatro espécimes por grupo em cada dia. Assim dizendo, os valores apresentados a seguir são uma média aritmética dos resultados encontrados.

Nas linhas abaixo dos dois grupos de reparados, há a diferença percentual entre valores do grupo íntegros de concreto e eles. Valores negativos, representam que a média do grupo de reparados teve resistência inferior à dos íntegros de concreto; valores positivos, resistência maior.

Os dados de resistência à compressão apresentados estão expressos em megapascal (sigla “MPa”).

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos grupos de corpos de prova íntegros de concreto, reparados com argamassa e reparados com graute e suas respectivas diferenças percentuais

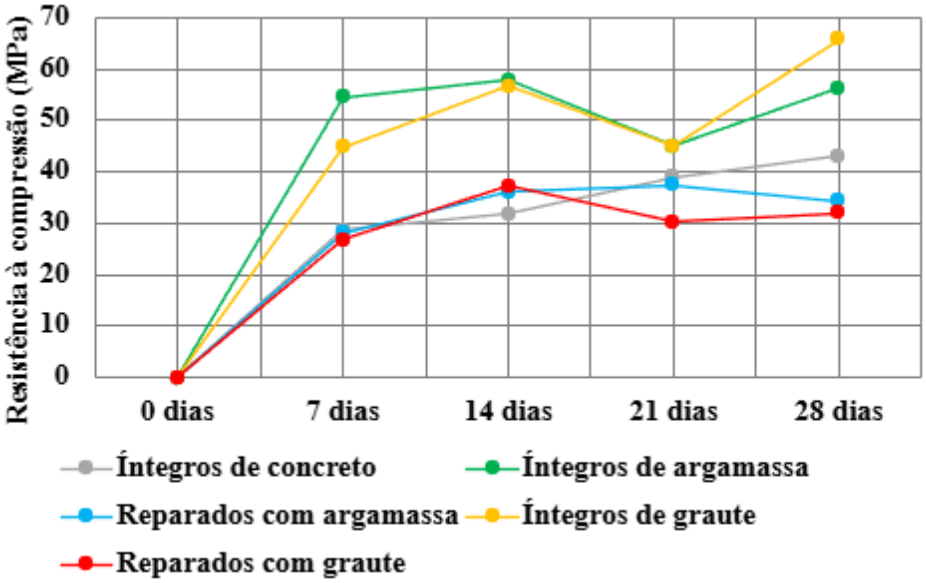
Grupo de corpos de prova	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Íntegros de concreto	28,7 MPa	31,8 MPa	38,9 MPa	43 MPa
Desvio padrão	1,35 MPa	4,48 MPa	3,34 MPa	5,20 MPa
Reparados com argamassa	28,1 MPa	36,1 MPa	37,4 MPa	34,3 MPa
Desvio padrão	5,08 MPa	3,18 MPa	4,85 MPa	4,87 MPa
Diferença percentual	-2,1 %	+13,5 %	-3,9 %	-20,2 %
Reparados com graute	26,7 MPa	37,3 MPa	30,2 MPa	31,9 MPa
Desvio padrão	4,05 MPa	3,47 MPa	6,10 MPa	4,65 MPa
Diferença percentual	-7,0 %	+17,3 %	-22,4 %	-25,8 %

Fonte: os autores.

Ao analisar as diferenças percentuais entre os grupos dos reparados e íntegros de concreto, chega-se à conclusão de que o desempenho dos reparados, em geral, foi abaixo do esperado.

A Figura 5 apresenta um gráfico onde o eixo das abscissas é representado pelos dias em que foram rompidos os espécimes e o eixo das ordenadas seus respectivos valores de resistência à compressão, expressos em megapascal (sigla “MPa”). Lembrando, o valor de resistência à compressão é uma média aritmética de todos os corpos de prova daquele grupo rompidos naquele dia, com exceção dos íntegros de argamassa e íntegros de graute, onde foi rompido apenas um de cada tipo em cada dia de ensaio.

Figura 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão



Fonte: os autores.

Ao analisar o gráfico, é possível concluir que as curvas de resistência dos corpos de prova íntegros de argamassa e íntegros de graute tiveram desempenho de acordo com o especificado pela fabricante. Já os corpos de prova reparados tiveram desempenho insatisfatório quando comparados ao dos corpos de prova íntegros de concreto.

3.2. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica foi executado aos 28 dias de idade dos corpos de prova, momentos antes do ensaio de resistência à compressão. Nele foram estudados quatro corpos de prova do grupo dos íntegros de concreto e de cada grupo dos reparados. O experimento foi baseado na norma técnica ABNT NBR 9204.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos no experimento por cada espécime estudado. Nas linhas abaixo dos dois grupos de reparados, há a diferença percentual entre valores dos íntegros de concreto e do grupo imediatamente acima. Valores negativos representam que o grupo de reparados teve resistividade elétrica inferior à dos íntegros de concreto, valores positivos, resistividade elétrica maior, e nulos, que não houve alteração.

A coluna com o título “Média” apresenta a média aritmética dos quatro corpos de prova estudados por cada grupo, para uma análise mais precisa acerca dos resultados.

Os corpos de prova estudados estão representados na tabela pela sigla “CP n.º”, sendo “n.º” o número do espécime em questão. Os resultados estão em quilo-ohm por centímetro (sigla “KΩ/cm”).

Tabela 4 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica dos grupos de corpos de prova íntegros de concreto, reparados com argamassa e reparados com graute e suas respectivas diferenças percentuais

Grupo de corpos de prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
Íntegros de concreto	24,2 KΩ/cm	24,3 KΩ/cm	22,3 KΩ/cm	22,4 KΩ/cm	23,3 KΩ/cm

Reparados com argamassa	26,5 KΩ/cm	21,4 KΩ/cm	23,2 KΩ/cm	22,1 KΩ/cm	23,3 KΩ/cm
Diferença percentual	-8,7 %	+13,6 %	-3,9 %	+1,4 %	0,0 %
Reparados com graute	21,9 KΩ/cm	22,1 KΩ/cm	23,3 KΩ/cm	23,6 KΩ/cm	22,7 KΩ/cm
Diferença percentual	+10,5 %	+10,0 %	-4,3 %	-5,1 %	+2,5 %

Fonte: os autores.

Ao analisar os resultados presentes na tabela, a conclusão que se chega é de que os corpos de prova reparados com argamassa e com graute não tiveram mudança significativa nos valores de resistividade elétrica. O experimento foi realizado sem quaisquer dados base para uma comparação e teve o intuito justamente de verificar se havia algum aumento devido à presença dos materiais de reparo. Esses materiais possuem inibidor de corrosão em sua composição química, realizando uma proteção eletroquímica da estrutura, garantindo que os processos de degradação não ocorram futuramente. Por esse motivo, tomou-se a decisão de atestar se poderia ocorrer algum tipo de aumento nos valores de resistividade elétrica, o que, em geral, não ocorreu.

4. CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos através dos procedimentos experimentais permite chegar a duas conclusões distintas: a respeito dos corpos de prova íntegros de argamassa e de graute e dos corpos de prova reparados com argamassa e graute.

Os espécimes íntegros de argamassa TECNOPOL AP 60 e graute TECNOGROUT 250 atenderam as estimativas de resistência à compressão estipuladas pela fabricante.

Os espécimes reparados com esses materiais não atingiram os valores especificados. Isso mostra que o seu desempenho geral não depende exclusivamente de suas propriedades, mas também de fatores mais específicos, como: geometria dos corpos de prova, controle dimensional das cavidades de reparo, espessura dos reparos e, principalmente, modo de aplicação e tratamento das interfaces entre o substrato de concreto e os reparos.

Por essas razões, os resultados deste estudo devem ser considerados apenas para o método utilizado, sendo necessária a realização de ensaios mais complexos através da confecção de elementos estruturais em escala reduzida, como vigas e pilares, para uma conclusão mais assertiva a respeito do desempenho da argamassa TECNOPOL AP 60 e do graute TECNOGROUT 250.

5. AGRADECIMENTOS

Por meio desta seção, agradecemos a todos os que viabilizaram e auxiliaram na execução desta pesquisa, sendo eles: Higor de Souza Moura e Regis Sandro Bazuco, representantes da Concrevit, Douglas Reis Pinto e Robson de Assis de Oliveira, representantes da Tecnosil e a todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204: Concreto endurecido – **Determinação da resistividade elétrico-volumétrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

Tecnosil Soluções Especiais. (2024). **TECNOPOL AP60**: argamassa polimérica com inibidor de corrosão incorporado e ponte de aderência para reparos estruturais. Ficha Técnica. Edição 01/2024. Itupeva/SP, Brasil.

Tecnosil Soluções Especiais. (2024). **TECNOGROUT 250**: graute de alta precisão e resistência. Ficha Técnica. Edição 01/2024. Itupeva/SP, Brasil.