

LAJE DE TRANSIÇÃO PROTENDIDA EM EDIFÍCIO DE ALVENARIA ESTRUTURAL: ESTUDO DE CASO

Prestressed Transition Slab in Structural Masonry Building: Case Study

Diego Badzinski Burlamaque¹

¹ IDD / Pós-graduando em Estruturas Protendidas / diego_burlamaque@yahoo.com.br

Rafael Alves de Souza²

² Engracon / Pós-doutor em Engenharia de Estruturas / engracon@gmail.com

Fábio Albino de Souza³

³ IDD / INAEP / Mestre em Engenharia de Estruturas / eng.fabio.35@gmail.com

Resumo

O avanço crescente da construção civil vem exigindo dos projetistas estruturais alternativas cada vez mais desafiadoras como forma de vencer a sustentação das edificações projetadas. A introdução assertiva da protensão no dimensionamento de estruturas de concreto torna capaz a resolução de grandes empecilhos arquitetônicos. Dentro desse nicho, a utilização de lajes de transição, especialmente para embasamento de edifícios em alvenaria estrutural, possibilita um robusto enrijecimento capaz de suprir as necessidades de tensão e deslocamento na estrutura. Como forma de externar o conhecimento sobre o comportamento desse tipo de laje, o presente trabalho apresentará o dimensionamento analítico de um caso real de laje de transição, sobre a qual 13 pavimentos tipo de alvenaria estrutural estarão apoiados. Para fins comparativos, a estrutura será simulada, globalmente, em concreto armado convencional, com auxílio do software Eberick, da AltoQI, e em concreto protendido, nas modalidades aderente e não aderente, com auxílio do software Adapt Builder Edge. Ao final das etapas de dimensionamento e análise, é constatado um modelo conclusivo para o objetivo proposto, no qual são apresentados os desempenhos dos modelos analisados, balanceando-os quanto aos aspectos de tensão e deformação resultantes à estrutura.

Palavras-chave: Laje de Transição; Laje Protendida; Protensão Aderente; Protensão Não-Aderente.

Abstract

The increasing advancement of construction has required increasingly challenging alternative structural designers as a way of overcoming the sustainability of designed buildings. The assertive introduction of prestressing in the design of concrete structures enables the resolution of major architectural obstacles. Within this niche, the use of transition slabs, especially for the basement of buildings in structural masonry, enables a robust stiffening capable of meeting the tension and displacement needs in the structure. As a way to express the knowledge about the behavior of this type of slab, the present work will present the analytical dimensioning of a real case of transition slab, on which 13 structural masonry floors will be supported. For comparative purposes, the structure will be simulated globally in conventional reinforced concrete, with the aid of AltoQI's Eberick software, and prestressed concrete, in the bonded and unbonded modalities, with the aid of Adapt Builder Edge software. At the end of the design and analysis steps, a conclusive model for the proposed objective is found, in which the performances of the analyzed models are presented, balancing them on the stress and deformation aspects resulting from the structure.

Keywords: Transition Slab; Prestressed Slab; Bonded Prestressing, Unbonded Prestressing.

Introdução

A incorporação do uso de lajes de transição tem se tornado frequente em edificações multifamiliares, especialmente em casos projetados com estruturas mistas. A ideia da laje de transição foi inicialmente desenvolvida por Le Corbusier, na sua primeira unidade habitacional, Marselha, na França, entre os anos de 1947 e 1952 (LEME e SALGADO, 2009). A adoção desse modelo estrutural no Brasil também não é novidade, já que, conforme registros históricos de LEME e SALGADO (2009), ainda no ano de 1952 foi construído, por Werner Müller, o Edifício Itatiaia, em Campinas – SP, sendo o mesmo elevado acima do térreo por pilotis em “V” e sua torre apoiada sobre laje de transição. Seguindo o mesmo princípio, Oscar Niemeyer adotou o recurso da laje de transição nos blocos de apartamentos das superquadras em Brasília - DF, no final dos anos 1950. Alguns anos mais tarde, no início da década de 1960, o engenheiro Olquidio Bardney Lopez fez o uso da mesma estratégia de laje de transição na construção do Edifício Acapulco, em Campinas – SP. Para a situação específica do sistema de alvenaria estrutural, as lajes de transição tornam-se de grande valia por serem capazes de oferecer o suporte necessário ao lançamento da estrutura, além de conseguirem garantir seus valores limites de tensão e deslocamento. Para fins práticos de utilização, os edifícios em alvenaria estrutural com grande altura têm utilizado seus térreos e subsolos como áreas úteis a salões de festa, espaços de lazer e pavimentos de garagem. Isso torna-se possível através do uso de uma laje de transição em concreto, armado ou protendido, no primeiro pavimento, também conhecido como “pilotis”. Este é capaz de absorver as cargas das paredes e transferi-las até as fundações da edificação. Desse modo, tem-se um edifício misto: da laje de transição para cima, alvenaria estrutural; dela para baixo, uma estrutura convencional (RIZZATTI JR, 2015). Muito tem-se falado sobre o comportamento estrutural desse pavimento (WENDLER, 2017). Para validação de sua execução através do uso do concreto armado convencional, a geometria de laje exigida acaba apresentando valores de dimensão e taxa de consumo de aço consideravelmente elevados. Como alternativa de modelo estrutural equivalente, o concreto protendido, através de seu modo de funcionamento, torna possível a viabilidade do equilíbrio da estrutura com valores de dimensão e consumo de material bem mais atrativos. Com o intuito de determinar as vantagens específicas de cada sistema, o estudo detalhado do comportamento desse tipo de laje, frente aos modelos apresentados, será analisado individualmente a cada modelagem. Para fins de maior detalhamento, o foco principal de análise será direcionado aos modelos protendidos, haja vista que a maior importância de pesquisa se concentra nesse tipo de sistema. Dentro dessa linha, o objetivo central de análise estará na variação de desempenho apresentado entre as modalidades de concreto protendido aderente e não aderente.

Lajes de Transição

O conceito básico do termo lajes de transição baseia-se na aplicabilidade prática e executiva de um elemento de laje que serve como elemento de transição estrutural para dois diferentes tipos de sistemas construtivos, os quais não possuem equivalência direta de transferência de cargas entre si. Dessa forma, o objetivo do uso das lajes de transição também é de diminuir a diferença de rigidez entre duas diferentes estruturas (LOPES, 2008). Fundamentalmente, as lajes são elementos estruturais constituintes das edificações que, juntamente com o conjunto de vigas e pilares, sustentam as obras. A aglomeração dessas três peças, através das interligações existentes entre elas, é a responsável pela transferência das cargas atuantes nas edificações até as estruturas de fundação das mesmas. De maneira geral, as lajes são elementos planos e horizontais, tendo como principal característica o fato de possuir a largura e o comprimento muito maiores do que sua espessura.

Na etapa de concepção estrutural das edificações, a partir do pré-lançamento arquitetônico já definido, pode ocorrer a ligação descontínua dos elementos estruturais entre os pavimentos, especialmente entre os pavimentos tipo e os pavimentos de garagem. Para esses casos, as soluções de arranjo estrutural dos pavimentos superiores, mesmo não correspondendo às dos andares inferiores, podem assim serem adotadas através do uso da laje de transição. Sempre que as soluções encontradas para os pavimentos superiores não corresponderem ao andar térreo, é possível colocar os pilares do térreo em posição diferente dos pilares dos andares superiores; usando a estrutura da laje de transição no teto do andar térreo ou do pavimento de uso comum, para fazer a transição dos pilares, podendo ainda, apoiar os pilares em vigas embutidas nesses tetos (CORRÊA e NAVEIRO, 2001). A exatidão na construção do pavimento de transição é essencial para não obter patologias na alvenaria estrutural (SCHMITZ e MARTINS, 2017).

O grande interesse técnico e econômico da utilização de lajes de transição em edifícios de alvenaria estrutural tem também despertado atenção nos meios de pesquisa relacionados a esse assunto. Dessa forma, projetistas e pesquisadores vêm tentando desenvolver técnicas de análise que simulem mais adequadamente o comportamento real das estruturas de alvenaria, especialmente quando há estruturas de transição, permitindo uma utilização mais racional dos materiais e dos espaços, bem como o desenvolvimento de projetos mais econômicos, fundamentados em teorias melhores elaboradas (CAVALCANTI, 2018). Comparativamente falando, devido ao efeito arco, estruturas de transição em edifícios de alvenaria estrutural não são tão onerosas quanto em edifícios de concreto estrutural, com viabilização comprovada de edifícios de vários andares com pavimentos inferiores em concreto estrutural e pavimentos superiores em alvenaria estrutural (CARVALHO, 2012).

Devido à existência do chamado “efeito arco”, cargas aplicadas pela alvenaria estrutural em estruturas de concreto sobre apoios discretos, como pavimentos de pilotis e fundações sobre estacas, tendem a ser muito diferentes dos valores uniformes usualmente encontrados (BARBOSA, 2000). Dessa forma, segundo relata CAVALCANTI (2018), pode-se superestimar os esforços nestas estruturas pela adoção incorreta do carregamento a que estão submetidas e, por outro lado, existem concentrações de tensões na alvenaria que comumente deixam de ser consideradas. Por esses e outros motivos de distribuição de carregamento é que se dá a importância da correta análise e dimensionamento das lajes de transição, as quais necessitam corresponder ao suporte de carga necessário, atendendo, ainda, aos limites máximos de deslocamento impostos pelas edificações a elas apoiadas.

Lajes Protendidas

O sistema de lajes protendidas compreende uma modalidade estrutural baseada na incorporação de sua resistência através da interligação do concreto com a armadura ativa, considerando ainda a adoção de uma parcela de armadura passiva. A inclusão de estados prévios de tensão na estrutura de uma laje protendida, torna possível um significativo incremento de sua resistência à capacidade de carga submetida no Estado Limite de Serviço (ELS). O controle maior sobre as fissurações, possibilita uma maior durabilidade das peças sujeitas à protensão (SOUZA e MACEDO, 2016).

As lajes protendidas passíveis de utilização com finalidade de transição podem ser do tipo pós-tração aderente ou não-aderente. No sistema de lajes protendidas com pós-tração aderente, os cabos de aço são colocados no interior de bainhas metálicas, que após o tensionamento, são preenchidas com calda de cimento, o que garante a aderência mecânica entre a armadura ativa e o concreto, além de conferir proteção à corrosão (LORENCI, 2010). Já no sistema de lajes protendidas com pós-tração não aderente, as cordoalhas de aço são envoltas por uma camada de graxa e embaladas por uma capa de polietileno de alta densidade (PEAD). A existência da graxa no interior do cabo tem como finalidade a proteção das

cordoalhas após a concretagem, além de proteger as mesmas à corrosão. O cabo possui uma ancoragem em cada uma de suas extremidades, e devido à inexistência de aderência, todas as tensões estão concentradas nestes dispositivos de fixação (LORENCI, 2010). Os cabos de protensão são normalmente encontrados no mercado nas bitolas de diâmetro 9,5 mm, 12,7 mm e 15,2 mm.

A escolha quanto ao tipo mais adequado depende fielmente das características tanto de obra quanto de projeto a serem adotadas. Conforme explica SCHMID (2009), a solução não aderente apresenta maior número de pontos “críticos” (riscos), razão pela qual tanto o projeto como a execução exigem as providências adequadas. O autor também cita que a solução não aderente é viável e interessante, mas exige cuidados especiais na proteção contra a corrosão. Além disso, o sistema possui desempenho perfeito e por tempo indefinido das ancoragens, também perante cargas dinâmicas. A partir de tais peculiaridades de cada modelo pretendido é que será ensaiada a laje de transição em estudo. Será definido como modelo mais adequado aquele que corresponder ao comportamento favorável às exigências técnicas prescritas na NBR 6118 (2014), com o menor montante de material necessário.

Alvenaria Estrutural

A alvenaria estrutural diz respeito a um tipo de estrutura onde as paredes são elementos compostos por unidade de alvenaria, unidos por junta de argamassa, capazes de resistirem a outras cargas além do seu peso próprio (PARSEKIAN, 2010). O sistema estrutural de edifícios de alvenaria estrutural é do tipo laminar, constituído por lajes horizontalmente e por paredes estruturais verticalmente. Na resistência às cargas laterais ou horizontais, as lajes atuam como diafragmas, distribuindo os esforços cisalhantes para as paredes estruturais (BRISOT, 2001). O edifício em alvenaria estrutural necessita ser mais rígido do que um edifício em concreto armado, revelando a necessidade de menor sensibilidade à ação do vento, e, em contrapartida, uma maior sensibilidade a deformações impostas (recalques diferenciais, dentre outros) (GONÇALVES e MARTINS, 2016). Em diversos países, existem muitas construções de grande porte, realizadas em alvenaria estrutural e que demandam soluções arrojadas (DÉSIR, 2015).

Devido ao fato desse modelo estrutural admitir limites de deformação bastante reduzidos e consideravelmente mais restritos, quando comparado a estruturas de concreto armado, a exigência de seu embasamento ser bastante rígido e praticamente indeformável torna-se fundamental. Desse modo, a alternativa do sistema aqui estudado de laje de transição pretendida propõe uma opção de desempenho favorável à alvenaria estrutural, a qual consiga uniformizar o comportamento de toda base, resistindo à solicitação de carga empregada, linearmente, pelo conjunto de paredes. Mesmo a alvenaria estrutural tendo sua característica modular, é graças à utilização de laje de transição que se consegue torná-la mais versátil nas construções, conforme cita RIZZATTI JR. (2015). A rigidez de uma laje de transição por si só já seria de grande serventia ao comportamento estrutural necessário. Adotando a protensão no seu uso, a partir da inserção gradativa de estados prévios de tensão na estrutura, a possibilidade de controle de deformação e fissuração torna-se ainda mais eficiente para o desempenho desejado.

Da mesma forma como ocorre em estruturas pretendidas, na alvenaria o principal conceito estrutural é a transmissão de ações através de tensões de compressão (RAMALHO e CORRÊA, 2003). Já as tensões de tração devem estar restritas a alguns elementos e não devem apresentar valores elevados na estrutura, conforme cita CARDOSO (2013). Assim sendo, a adoção mútua empregada de estrutura de alvenaria estrutural sobre laje de transição pretendida resulta em um conjunto com características de semelhante comportamento, que juntas desempenham função técnica e analiticamente compatíveis entre si.

Parâmetros Normativos – NBR 6118 (2014)

Segundo a NBR 6118 (2014), os elementos de concreto protendido são aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU). Para fins de pré-dimensionamento de estruturas protendidas, a norma brasileira determina como força média na armadura de protensão, na abscissa x e no tempo t , o valor resultante de:

$$P_{t(x)} = P_{o(x)} - \Delta P_{t(x)} = P_i - \Delta P_{o(x)} - \Delta P_{t(x)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$$P_{o(x)} = P_i - \Delta P_{o(x)} \quad (\text{Equação 2})$$

A norma também estabelece valores-limites por ocasião do tipo de operação adotado na protensão. No estudo aqui proposto, será utilizada protensão pós-tracionada, com utilização de aços de relaxação baixa, comparando a modelagem de cordoalhas engraxadas com aderentes. Para esses parâmetros de interesse, a normativa cita que, por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites $0,74 f_{ptk}$ e $0,82 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação baixa. Além disso, para cordoalhas engraxadas, com aços também da classe de relaxação baixa, os valores-limites da tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração podem ser elevados para $0,80 f_{ptk}$ e $0,88 f_{pyk}$. Tais valores são estabelecidos como limites máximos de tensão $\sigma_{po(x)}$ da armadura decorrente da força $P_o(x)$.

No quesito de forças de protensão, a norma cita que as tensões induzidas no concreto pelas ancoragens de protensão somente podem ser consideradas linearmente distribuídas na seção transversal do elemento estrutural a uma distância da extremidade dessas armaduras, chamada distância de regularização. No caso dos elementos pós-tracionados, essa distância prevista em norma pode ser determinada admitindo-se que a difusão da força se faça a partir da ancoragem, no interior de um ângulo de abertura β , tal que $\text{tg } \beta = 2/3$. Para efeitos de análise, a NBR 6118 (2014) cita que a ação da protensão deve ser considerada em todas as estruturas, incluindo, além dos elementos protendidos propriamente ditos, àqueles que sofrem a ação indireta da protensão, isto é, de seus esforços hiperestáticos. Nesse mesmo sentido, o item 14.2.2 da norma destaca que a análise estrutural deve considerar a migração da protensão para elementos adjacentes. Para minimizar tal efeito, pode-se diminuir a rigidez desses elementos ou usar procedimentos construtivos, de modo a garantir a deslocabilidade adequada à realização efetiva da protensão. Esse é o caso do deslocamento máximo imposto pela alvenaria estrutural sobre a laje protendida de transição da edificação em estudo.

No que diz respeito à geometria de lajes protendidas, o item 13.2.4.1 da NBR 6118 (2014) regulamenta, para lajes maciças, um limite mínimo de espessura igual a 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, de $l/42$ para lajes de piso biapoiadas e de $l/50$ para lajes de piso contínuas. Para efeitos de dimensionamento das armaduras ativas e passivas em lajes, a norma cita que devem ser considerados, na verificação do Estado Limite Último (ELU), além do efeito de outras ações, apenas os esforços solicitantes hiperestáticos de protensão, não devendo serem incluídos seus isostáticos. A consideração das armaduras ativas nos esforços resistentes deve ser feita a partir dos diagramas tensão-deformação especificados e da consideração de seus pré-alongamentos, os quais devem ser calculados com base nas tensões

iniciais de protensão com valores de cálculo e com a consideração de perdas no momento de análise.

Os valores de deslocamentos-limites prescritos na NBR 6118 (2014) cabem como valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura. Ao caso aqui analisado, de estrutura base para recebimento de alvenaria estrutural, o modelo enquadra-se no grupo “efeitos em elementos estruturais”, do item 13.3 da presente norma. Nesse item, os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado.

Análise Prática de Desempenho de Laje de Transição

O desenvolvimento do presente estudo baseou-se na análise de um caso real de uma edificação residencial multifamiliar, com concepção arquitetônica já pré-definida, situada no município de Passo Fundo – RS. O seguinte edifício compreende uma estrutura mista, possuindo uma torre com 13 pavimentos de alvenaria estrutural, a qual será completamente apoiada sobre uma laje de transição, abaixo da qual ainda existem três pavimentos em concreto armado, referentes a salão de festas e garagens. A laje de transição em estudo possui dimensões externas máximas de 40,04 m por 23,14 m, área superficial aproximada de 720,00 m², sendo que os vãos livres entre pilares previstos na estrutura possuem valores máximos aproximados de 8,00 m por 5,20 m. A Figura 1 ilustra a planta baixa da laje de transição a ser aqui estudada.

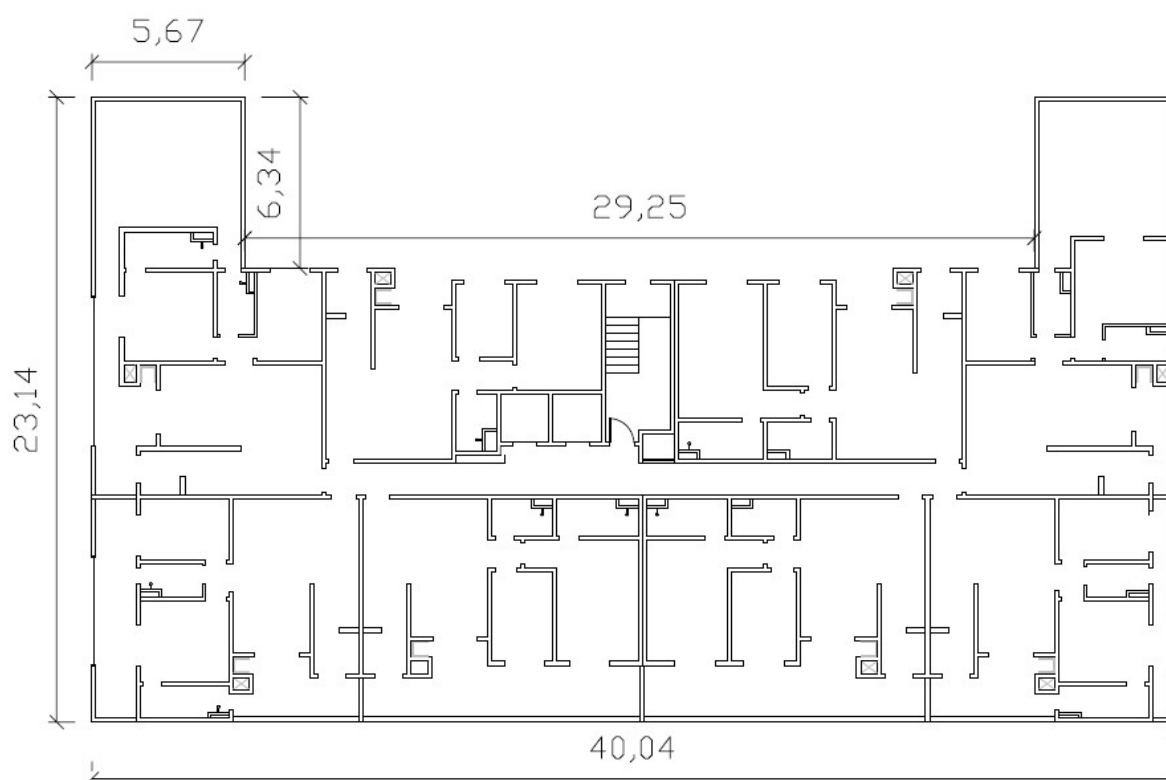


Figura 1 – Planta baixa da laje de transição em estudo. (Autor, 2019)

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram utilizados dois softwares de análise e dimensionamento estrutural, a fim de se conseguir uma refinação de detalhes na avaliação da estabilidade global dos modelos propostos. Para a verificação do modelo de laje de transição em concreto armado convencional foi utilizado o software Eberick, da AltoQi. Paralelamente, a análise do modelo em concreto protendido, tanto para a modalidade aderente quanto para a não aderente, foi feita através do software Adapt Builder, na sua extensão Edge, sendo assim possível o estudo completo da estrutura, incluindo o de sua estabilidade global na edificação.

O dimensionamento estrutural da laje em questão foi elaborado de maneira sequencial, exclusiva e diferenciada para cada sistema proposto, partindo do concreto armado convencional e, então, seguindo para os modelos de concreto protendido, aderente e não aderente. Na consideração do dimensionamento protendido da laje, a modalidade a ser admitida será protensão completa (total), cuja intensidade é tamanha a ponto de eliminar completamente as tensões de tração no concreto, garantindo, assim, a inexistência de fissuras na estrutura. As correspondências de análise e dimensionamento de toda estrutura de concreto, tanto para a modalidade concreto armado convencional quanto para a concreto protendido, seguiram os regimentos da regulamentação brasileira para esse tipo de estrutura, citados na NBR 6118 (2014). A consideração dos carregamentos na estrutura obedeceu aos valores de carga, permanente e acidental, prescritos na NBR 6120 (1980), além das cargas lineares calculadas para as paredes de alvenaria estrutural da torre.

O quesito de estabilidade e vínculo de apoio da edificação, através da sustentação da laje de transição por meio dos pilares em concreto armado, teve seu dimensionamento realizado com auxílio do software Eberick, da AltoQi. Portanto, a todos modelos que aqui estão sendo estudados, tanto para laje em concreto armado quanto protendido, houve a mesma consideração da estrutura dos pilares de apoio. Foram considerados na estrutura pilares com dimensões de 25x80, 30x120, 30x150, 35x150, além dos pilares do elevador com 25x210.

A concepção estrutural protendida da laje de transição teve seus parâmetros baseados, além na NBR 6118 (2014), também nas indicações de CAUDURO (2005). Dessa forma, após diferentes tentativas de modelagens de distribuição das cordoalhas sobre a laje, adotou-se a incorporação de cabos concentrados na direção perpendicular à menor direção (eixo x) e de cabos distribuídos na direção perpendicular à maior direção (eixo y). A ambos casos, procurou-se manter cabos com número máximo de cordoalha igual a 5, espaçando-os, ainda, pelo menos em 40 cm entre eles. Às bordas das lajes, adotou-se um espaçamento mínimo de 16 cm entre suas faces e os cabos de protensão. O mesmo espaçamento de 16 cm foi atribuído entre as cordoalhas e os furos previstos ao longo do pano da laje de transição. Na etapa de distribuição dos cabos, também procurou-se manter a passagem de pelo menos um cabo em cada direção sob a cabeça dos pilares, já favorecendo, assim, o reforço de armadura à punção nessas regiões.

Para fins de maior enriquecimento comparativo ao estudo aqui proposto, o dimensionamento protendido da laje de transição será realizado com cordoalhas dos tipos CP 190 RB e CP 210 RB, ambas de 7 fios, tanto as engraxadas quanto as aderentes. A considerável solicitação de carregamento atribuído à laje em questão é que favoreceu e contribuiu para a possibilidade do ensaio ao dimensionamento com a cordoalha CP 210 RB, tornando tal alternativa possivelmente técnica e economicamente viáveis. As cordoalhas do tipo CP 190 RB possuem diâmetro nominal de 12,7 mm, área de seção transversal de 101,40 mm², módulo de elasticidade de 200 kN/mm² e carga mínima de ruptura de 187 kN. Já as cordoalhas do tipo CP 210 RB possuem mesmo diâmetro nominal de 12,7 mm, área de seção transversal de 101,40 mm², módulo de elasticidade de 200 kN/mm² e carga mínima de ruptura de 203 kN. O concreto considerado a todas análises foi o de $f_{ck} = 40$ MPa, peso específico de 2500 kg/m³ e módulo de elasticidade de 31875 MPa. O movimento de retorno das cunhas dentro da cavidade da placa, durante a transferência da força de protensão do macaco para a ancoragem, conhecido como acomodação, foi considerado de 6 mm. Referente às perdas de protensão

incorporadas ao processo, a determinação das mesmas fora executada juntamente ao cálculo da modelagem pelo software Adapt, mas o somatório delas, entre imediatas e diferidas, ficou na ordem de aproximadamente 20%.

Estudo do Modelo Protendido Não Aderente

O estudo do dimensionamento da laje de transição em análise pelo modelo protendido não aderente seguiu as especificações de projeto conforme mencionadas acima. Primeiramente, o pré-lançamento dos cabos de protensão iniciou-se pelos do tipo CP 190 RB, com a consideração de 30 cordoalhas, divididas em feixes de 5 cordoalhas, a cada faixa concentrada, situadas na direção perpendicular à menor direção da planta (eixo x). No sentido dos cabos distribuídos, a divisão do pré-lançamento foi iniciada mantendo-se um espaçamento de 0,90 m a 1,20 m entre os cabos, direcionados perpendicularmente à maior direção da planta (eixo y). Cabe salientar que a geometria de tracejado dos cabos, tanto distribuídos quanto concentrados, procurou sempre manter a ligação sequencial entre os pilares da edificação. Ao mesmo tempo, o pré-dimensionamento da espessura da laje foi iniciado com o valor de 30 cm. Evolutivamente, após variadas tentativas de modelagem, estabeleceu-se fixamente a necessidade de uma espessura de laje igual a 55 cm, ficando determinada essa dimensão à sequência dos demais dimensionamentos. Para fins justificativos, o dimensionamento da laje à flexão possibilitaria a aceitabilidade de uma espessura de 50 cm, entretanto, para aceitação do critério de punção, fora necessário um incremento de altura. O modelo de lançamento de cablagem na laje de transição em estudo pode ser observado na Figura 2.

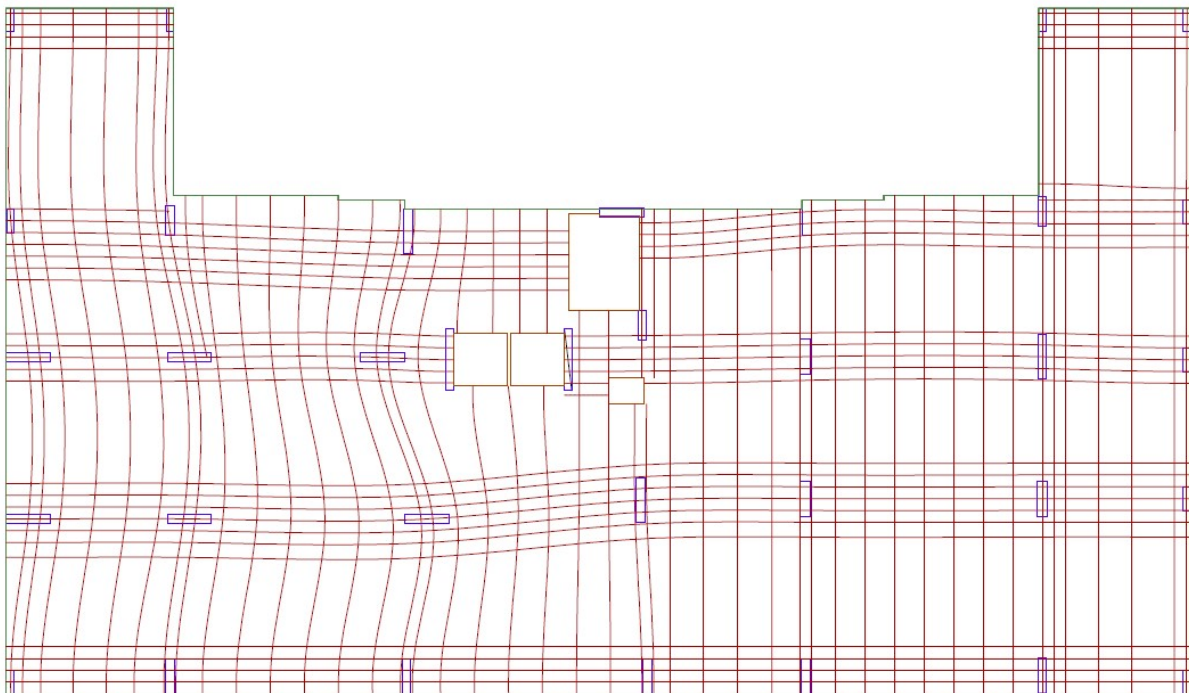


Figura 2 – Distribuição de cablagem na estrutura da laje de transição, para o modelo protendido não aderente. (Autor, 2019)

Feito o lançamento inicial do cablagem, partiu-se à determinação da tipologia de protensão a ser considerada em cada cabo. Para isso, fora adotado o princípio de respeitar um limite máximo de comprimento linear dos cabos igual a 30,00 m, para assim se admitir a protensão ativa em uma extremidade e passiva na outra. Nas situações em que esse limite tenha sido atingido, fora adotada a protensão ativa em ambas extremidades. Tal correspondência é

justificada pelo fato da aceitação dos níveis das perdas de protensão, tanto imediatas quanto progressivas, até esse valor limite de extensão do cabo. A partir de tal medida, os prejuízos causados pelas perdas começam a ficar acentuados, interferindo no desempenho da protensão incorporada e tornando questionável o comportamento estrutural do elemento.

Realizada a primeira análise da estrutura, com a consideração do modelo de pré-lançamento, as primeiras adequações e correspondências foram sendo efetuadas. Primeiramente, o aspecto de maior relevância e cujas correções prioritariamente foram sendo apuradas, foi o atendimento à relação P/A. No caso do Adapt, software utilizado no presente estudo, a análise desse fator é apurada em conformidade a duas situações: pré-compressão, pelo método dos elementos finitos; e pré-compressão, pela consideração dos próprios cabos protendidos. Conforme indicações usuais de referência, o intervalo absoluto de aceitabilidade dessa relação varia de 1,00 N/mm² a 2,60 N/mm². Para o referido estudo, procurou-se, dentro do possível, manter os valores dentro de tais limites, tendo o enquadramento das tensões corrigido através da variação da quantidade de cabos na laje. Complementarmente a essa relação, a análise das tensões nas bordas superior e inferior também fora realizada.

Seguindo os passos da análise, a investigação dos momentos fletores ao longo da laje também é considerada. O Adapt pondera dois aspectos de verificação: a própria capacidade de momento na estrutura e a capacidade de momento comparada com a demanda solicitada. Para validação do modelo, ambos devem estar de acordo com os parâmetros de análise requeridos. Complementarmente, no processo de análise da protensão tem-se o cuidado na limitação da carga balanceada dos cabos. Nesse sentido, procura-se atingir um balanceamento mínimo de 60% a cada cabo, de tal forma a garantir um adequado e proveitoso desempenho do sistema. Como limite superior, costumeiramente é citado o valor de 100%, entretanto, números superiores podem ser atingidos de acordo com a necessidade e solicitação de cada caso. Para tal condicionamento, basta atentar-se ao cuidado de respeitar os quesitos de pré-compressão e tensões máximas nos bordos da laje. Paralelamente aos fatores de análise já mencionados, tem-se, ainda, a verificação ao deslocamento da estrutura. A referência de aceitabilidade a esse parâmetro para o modelo em estudo será o limite de $l/350$, valor esse originado da Tabela 13.3 da normativa NBR 6118 (2014), para aceitabilidade sensorial dos usuários.

O lançamento inicial das cordoalhas na estrutura considerou sua geometria parabólica ao longo de todos os panos, atribuindo um espaçamento do centro geométrico da cordoalha às extremidades da laje de 38 mm, de tal forma a garantir o adequado cobrimento da armadura ativa (25 mm). Conforme o andamento das análises da laje em questão, houve a necessidade de alteração de posicionamento em alguns trechos, variando tanto a altura do cabo em relação às extremidades da laje quanto a forma do cabo no interior da estrutura, alternando de trechos parabólicos a trechos retilíneos. A Figura 3 ilustra a modelagem global da edificação em análise, destacando o posicionamento da laje de transição.

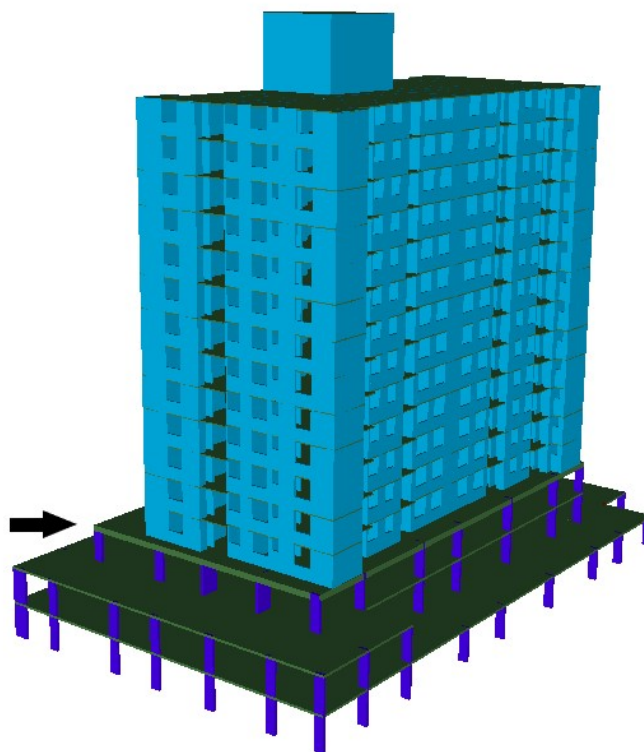


Figura 3 – Modelagem global da edificação, com destaque ao posicionamento da laje de transição em estudo. (Autor, 2019)

Na sequência do estudo, para a análise do dimensionamento com cordoalhas do tipo CP 210 RB, fora adotado o mesmo encaminhamento de passos. Ao pré-lançamento do cabeamento na laje, foi incorporado o modelo final desenvolvido para as cordoalhas do tipo CP 190 RB, partindo-se, então, à redução de aço através do desenvolvimento da análise, até atingir-se um modelo otimizado da estrutura. Os aspectos de verificação e intervalos de aceitabilidade de deslocamentos e esforços foram seguidos os mesmos previamente analisados.

Estudo do Modelo Protendido Aderente

De maneira paralela à análise da estrutura protendida com cabeamento não aderente, o estudo do modelo na modalidade aderente seguiu as mesmas especificações e diretrizes de trabalho acima mencionadas. A locação dos cabos concentrados e distribuídos, tanto para as cordoalhas CP 190 RB quanto CP 210 RB, repetiu a mesma sequência de projeto anteriormente adotada, conjuntamente à sequência dos procedimentos de pré-lançamento da cablagem, incorporando-se a mesma quantidade inicial de cabos nas direções concentrada e distribuída, ajustando-a evolutivamente ao longo das análises. Deve-se citar que para o modelo protendido aderente houve a consideração de bainhas metálicas para multicordoalhas, adotando-se, portanto, para cada uma delas, a passagem de até 8 cordoalhas por bainha. Cabe salientar que, para a correta leitura e consideração do modelo protendido na modalidade aderente, o usuário necessita realizar alguns ajustes de parâmetros e atendimentos dentro do software Adapt. Além da alteração no próprio tipo de protensão, passando de engraxada (*unbonded*) para aderente (*bonded*), na qual as considerações internas de cálculo do programa passam a seguir os parâmetros a esse modelo exigidos, também é necessário condicionar os valores-limites da força na armadura de protensão. Para isso, utiliza-se o especificado no item 9.6.1.2.1 da NBR 6118 (2014), conforme anteriormente citado, o qual sugere, para armaduras

pós-tracionadas, o limite de tensão σ_{pi} da armadura de protensão de $0,74 f_{ptk}$ e $0,82 f_{pyk}$, para aços da classe de relaxação baixa; e, para as cordoalhas engraxadas, com aços de classe de relaxação baixa, a norma possibilita a elevação de tal limite a $0,80 f_{ptk}$ e $0,88 f_{pyk}$. Tais valores referenciados foram os considerados nas análises aqui desenvolvidas, variando-os, respectivamente, a cada tipo de protensão.

Nesse momento do estudo, cabe salientar uma importante diferenciação existente entre os modelos de protensão aderente e não aderente, que é o fato do primeiro ser aplicado com o auxílio de bainhas metálicas, enquanto que o segundo utiliza o próprio revestimento de polietileno já existente no processo de fabricação da cordoalha. Esse fator interfere na etapa de lançamento e modelagem da estrutura, haja vista que a adoção da bainha pelo sistema protendido com aderência permite a montagem de um maior número de cabos em uma única bainha metálica. Por esse motivo é que, quando da necessidade de protensão para suprir uma demanda de alta densidade, a protensão aderente pode surgir como uma opção bastante vantajosa como meio estrutural.

Realizadas as etapas de lançamento e concepção da estrutura, parte-se à fase de análise e adequação dos resultados. A consideração dos fatores P/A (pré-compressão), tensões nas bordas superior e inferior, capacidade de momento e deslocamento fora desenvolvida do mesmo modo feito à metodologia não aderente, ponderando os mesmos valores e intervalos limites de aceitabilidade para validação do modelo. De acordo com o andamento das análises da laje em questão, houve a necessidade de alteração e ajuste nas geometrias dos cabos, de tal maneira que todo comportamento da laje pudesse convergir suas reações às aceitáveis previamente determinadas. A modelagem de trajetória e geometria final dos cabos de protensão aderentes na estrutura obteve a configuração apresentada na Figura 4.

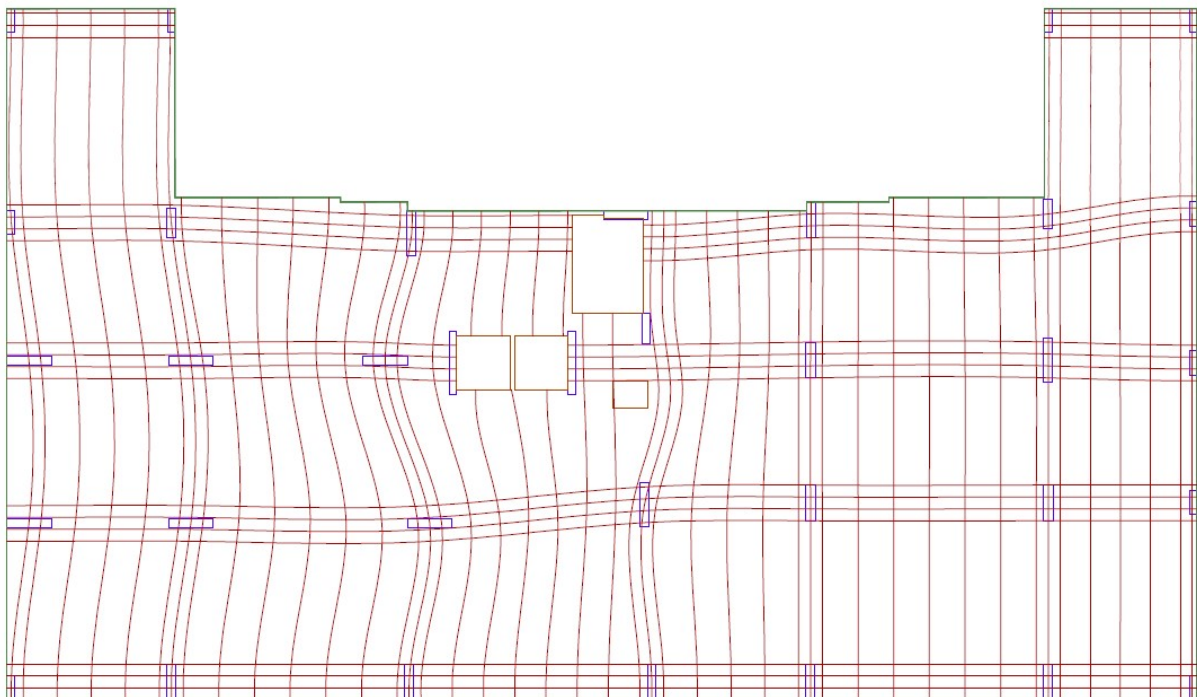


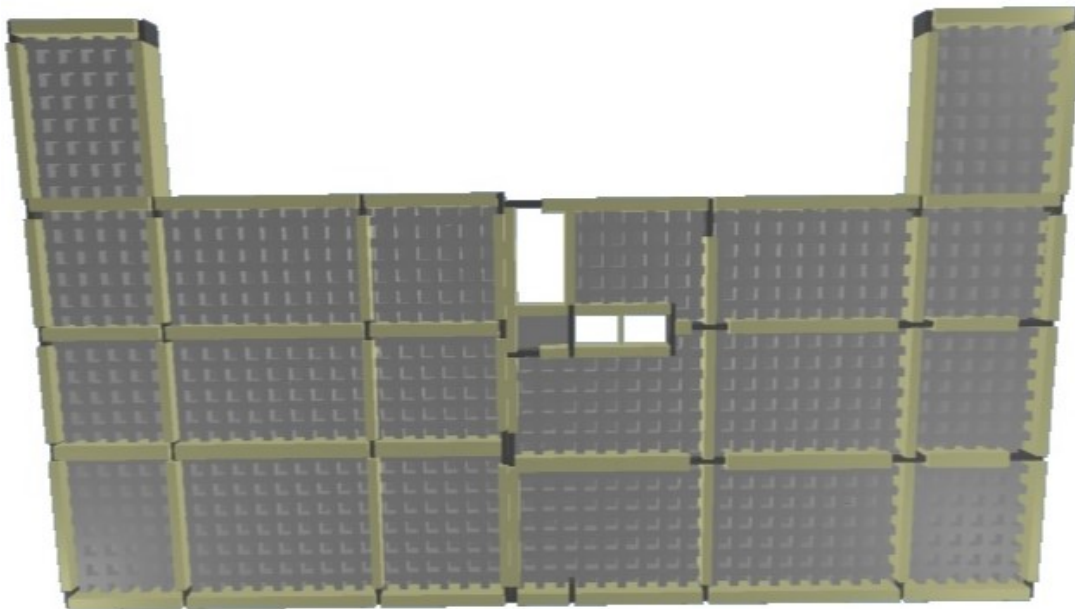
Figura 4 – Distribuição de cabeamento na estrutura da laje de transição, para o modelo protendido aderente. (Autor, 2019)

Finalizado o estudo do modelo protendido aderente com cordoalhas do tipo CP 190 RB, realizou-se os mesmos procedimentos de cálculo e análise com as cordoalhas do tipo CP 210 RB. Para validação final da geometria da laje estudada, buscou-se a otimização máxima do

cabeamento na estrutura, considerando-se apto o modelo final através da total verificação dos parâmetros de análise considerados.

Estudo do Modelo em Concreto Armado

Para fins de dimensionamento comparativo entre diferentes modelos de estruturas passíveis à sustentação da edificação em estudo, também foi realizada a análise da laje de transição em estrutura de concreto armado, através do software Eberick, da AltoQI. O dimensionamento da estrutura nessa modalidade considerou as mesmas especificações de material, concreto e aço, admitidos no estudo em concreto protendido, de tal forma a manter a máxima singularidade dos aspectos variáveis entre os modelos. Devido à grande amplitude da solicitação de carregamento distribuído ao longo da laje, a exigência da capacidade de resistência e estabilidade da estrutura torna-se um desafio bastante intenso para a modalidade de concreto armado convencional. Tal afirmação é ainda mais consolidada quando se busca uma alternativa realisticamente competitiva frente às demais opções existentes no mercado, especialmente quando se fala em protensão. Em busca de tal objetivo, realizou-se uma série de modelagens da estrutura de transição, adotando diferentes estratégias e modelos, almejando-se a máxima otimização possível da estrutura em concreto armado. Além disso, foi necessária a incorporação de 4 pilares extras na estrutura de concreto armado, sendo ainda previsto o uso de junta de dilatação ao longo da laje, em função das suas extensas dimensões. Assim sendo, o modelo final da laje de transição nesse sistema construtivo, para aceitabilidade dos padrões de deformação, foi determinado como uma estrutura conjunta de vigas e lajes do tipo nervurada. As lajes obtiveram espessura total de 75 cm, sendo 50 cm de enchimento com blocos de EPS e 25 cm de capa de concreto, sendo que as nervuras ficaram com largura igual a 35 cm. Além disso, foram atribuídas vigas com dimensão na ordem de 125 cm de altura por 60 cm de largura. A Figura 5 apresenta a modelagem final da laje de transição em estudo na modalidade de concreto armado convencional.



**Figura 5 – Modelagem da laje de transição em concreto armado convencional.
(Autor, 2019)**

Verificação e Análise dos Resultados

O desenvolvimento executivo do dimensionamento estrutural da laje de transição estudada ascendeu à análise crítica comparativa dos diferentes desempenhos das metodologias de protensão aplicadas. Conforme previsto desde o princípio do presente estudo, as características pontuais e específicas de cada modelo foram respeitadas e comprovadas durante o dimensionamento.

Para a avaliação específica de desempenho entre os modelos de protensão ensaiados, cabe novamente ressaltar que foram mantidas as concepções estruturais e características dos materiais atribuídos às análises. Dessa maneira, buscou-se identificar especificamente a influência do comportamento de cada tipo de protensão à solicitação do contexto estrutural da edificação como um todo.

Realizadas as etapas de dimensionamento estrutural pelas metodologias propostas de protensão, além do método em concreto armado convencional, chegou-se ao final com valores de reações e deslocamentos na estrutura para cada modelo. Proporcionalmente a cada um deles, também resultou um quantitativo mínimo de material necessário à estabilidade e aceitação do sistema estrutural. Tais valores estão exibidos ordenadamente nas tabelas abaixo apresentadas, ambas delas relacionadas à combinação de carregamento de serviço (ELS).

Tabela 1 – Reações resultantes na laje de transição para o sistema de protensão não aderente. (Autor, 2019)

Tipo da cordoalha	Deslocamentos (mm)		Tensão (N/mm ²)				Pré-compressão (N/mm ²)				Capacidade de momento (kN.m)	
			Superior		Inferior		FEM		# dos cabos			
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
CP 190 RB	1,07	-2,44	4,02	-5,28	2,64	-7,37	-1,00	-2,20	-1,05	-2,72	8190,00	-6931,00
CP 210 RB	1,13	-2,26	7,22	-11,33	6,82	-9,47	-1,00	-2,26	-1,00	-2,49	8318,00	-6873,00

Tabela 2 – Reações resultantes na laje de transição para o sistema de protensão aderente. (Autor, 2019)

Tipo da cordoalha	Deslocamentos (mm)		Tensão (N/mm ²)				Pré-compressão (N/mm ²)				Capacidade de momento (kN.m)	
			Superior		Inferior		FEM		# dos cabos			
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
CP 190 RB	1,37	-1,86	4,67	-4,58	3,16	-5,72	-1,01	-2,90	-1,00	-2,47	8693,00	-7929,00
CP 210 RB	0,86	-2,01	3,46	-4,56	2,31	-6,41	-1,00	-1,88	-1,01	-2,18	8383,00	-8522,00

Conforme pode ser observado na Tabela 1 e na Tabela 2, os valores das reações analisados na estrutura protendida, tanto aderente quanto não aderente, ficaram com uma aproximação bastante aceitável entre os sistemas utilizando cordoalhas CP 190 RB e CP 210 RB. Para o quesito de análise de deformação, os valores resultantes convergiram a uma importância quase que idêntica na modalidade não aderente, ficando a variação entre elas em torno de 5% nos valores máximos e em torno de 8% nos valores mínimos. Já na modalidade aderente, a variação constatada nos valores máximos foi um pouco maior, em torno de 59%, enquanto que nos valores mínimos manteve-se uma diferença de 8%. Comparativamente, na modelagem em concreto armado convencional, foram registradas flechas na ordem de 6,5 mm nas vigas e de 7,8 mm nas lajes, valores expressivamente superiores, portanto, aos originados nos dimensionamentos protendidos.

Na avaliação das tensões nos bordos superiores e inferiores, o comportamento manteve-se mais semelhante nos casos modelados de forma aderente, registrando-se uma discrepância um pouco maior nos valores da modalidade não aderente. A variação máxima observada entre os

valores resultantes das modelagens aderentes foi em torno de 35%, enquanto que os valores resultantes das modelagens não aderentes obtiveram variações de até 79%, registrando uma superioridade nas tensões das cordoalhas CP 210 RB, a ambos casos.

A análise do fator de pré-compressão na laje resultou em valores bastante parecidos aos dois tipos de protensão ensaiados com os dois modelos de cordoalhas. De acordo com a metodologia dos elementos finitos, para protensão não aderente, a pré-compressão máxima obteve mesmo resultado de 1 MPa tanto para as cordoalhas CP 190 RB quanto para as CP 210 RB, enquanto que na pré-compressão mínima as cordoalhas CP 210 RB obtiveram resultado ligeiramente superior, com cerca de 3% de favorecimento. No caso da protensão aderente, a pré-compressão máxima obteve resultado apenas 1% superior para as cordoalhas CP 190 RB, enquanto a pré-compressão mínima com cordoalhas CP 190 RB superou em 54% os valores atingidos com as CP 210 RB. Referente à segunda metodologia de análise para o mesmo fator, na protensão não aderente, as cordoalhas CP 190 RB obtiveram resultados superiores a ambos limites, máximos e mínimos, sendo superior em 5% e 9%, respectivamente. Ao mesmo caso, na protensão aderente, as cordoalhas CP 210 RB foram 1% superiores no limite máximo registrado, enquanto que as CP 190 RB foram cerca de 13% superiores no limite mínimo registrado. Por fim, o estudo da capacidade de momento na estrutura resultou em valores bastante próximos a ambos limites, especialmente nas modelagens não aderentes, tendo registrada uma variação inferior a 1%. Nas modelagens aderentes, a variação da capacidade de momento na estrutura ficou na margem de 7%.

Realizando-se uma abordagem geral comparativa entre os tipos de protensão, aderente e não aderente, notamos também uma grande convergência entre os valores originados às análises de reações. Mesmo que em alguns fatores tenham sido registrados maiores discrepâncias, por se tratarem de valores pequenos a validação ainda se mantém. A proximidade dos resultados gerados para os modelos aqui confeccionados, atribuindo as características de protensão e os tipos de cordoalhas utilizados, converge para valores bastante convincentes.

A análise de tais reações na estrutura da laje de transição em estudo foi resultado de diferentes dimensionamentos para cada tipo de sistema protendido adotado. Dessa forma, diferentes quantitativos de material foram necessários para validação dos modelos em cordoalhas CP 190 RB e CP 210 RB. Conforme anteriormente citado, o modelo também fora ensaiado com o uso de concreto armado convencional. Vale ressaltar que a análise aqui desenvolvida considerou o dimensionamento e a consequente estabilidade da estrutura para os esforços de flexão, punção e colapso progressivo. Buscando-se uma confiável validação e consequente comparativo de quantitativos, o dimensionamento à punção e colapso progressivo fora desenvolvido, paralelamente, com a própria ferramenta do software Adapt, além de uma planilha manual de cálculo. Para fins comparativos de análise, a Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os quantitativos de materiais resultantes às modelagens, lembrando que, nesse estudo, não foi considerado o volume de calda de cimento necessário à protensão aderente.

Tabela 3 – Relação de quantitativo de material incorporado a cada sistema estrutural, na modalidade não aderente. (Autor, 2019)

Tipo de sistema	Volume de concreto (m ³)	Área de fôrmas (m ²)	Volume de EPS (m ³)	Relação aço ativo (kg/m ²)	Relação aço passivo (kg/m ²)
CP 190 RB	395,47	796,00	-	10,58	20,82
CP 210 RB	395,47	796,00	-	9,57	22,24
Concreto Armado	564,60	1596,60	104,4	-	55,00

Tabela 4 – Relação de quantitativo de material incorporado a cada sistema estrutural, na modalidade aderente. (Autor, 2019)

Tipo de sistema	Volume de concreto (m ³)	Área de fôrmas (m ²)	Volume de EPS (m ³)	Relação aço ativo (kg/m ²)	Relação aço passivo (kg/m ²)
CP 190 RB	395,47	796,00	-	10,92	23,50
CP 210 RB	395,47	796,00	-	9,77	25,77
Concreto Armado	564,60	1596,60	104,4	-	55,00

Conforme pode ser analisado na Tabela 3 e na Tabela 4, os volumes de concreto incorporados à laje de transição dimensionada pelo sistema protendido ficaram iguais, para os dois tipos de cordoalha. Novamente reforçando, no sistema protendido foi considerada estrutura de laje maciça lisa com espessura de 55 cm. Na verificação do modelo em concreto armado convencional, considerando laje nervurada com espessura de 75 cm, nota-se de início um expressivo aumento na quantidade do volume de concreto, sendo 43% superior aos modelos protendidos. No quesito fôrmas, a comparação fica ainda mais distante entre os sistemas, sendo que a modalidade em concreto armado convencional consome 100% mais de insumo, com a necessidade das caixarias para as vigas, além do incremento da própria altura da laje para 75cm. O consumo de blocos de enchimento em EPS, totalmente desnecessário no modelo protendido, incorpora a necessidade total de porcentagem ao modelo em concreto armado. Na comparação da relação do aço ativo, tanto para a modalidade aderente quanto para a não aderente, o sistema constituído de cordoalhas CP 210 RB apresenta uma vantagem ligeiramente superior a 10% de redução no consumo frente às cordoalhas CP 190 RB, fazendo valer a proporcionalidade da superioridade de sua capacidade resistente. E, por fim, a relação de aço passivo, consideravelmente semelhante entre os sistemas protendidos, é muito inferior quando comparado ao sistema composto por concreto armado convencional. Para esse último, a necessidade de consumo excedente de armadura passiva varia de 113% a 164% a mais frente aos modelos protendidos analisados.

Considerações Finais

O dimensionamento estrutural da laje de transição em estudo procedeu à série de resultados apresentada no item antecedente do presente trabalho. Conforme analisado e definido após o estudo, identificou-se aspectos e características peculiares a cada um dos modelos de laje testados, direcionando pontos de interesse ao aspecto estrutural e construtivo de lajes protendidas para a devida situação.

A análise direta do quantitativo de material consumido em cada concepção estrutural comprovou a ideia inicial esperada da grande vantagem na utilização do sistema protendido. Conforme a relação de material gerada nos modelos testados, a economia de insumos como

um todo, considerando tanto concreto quanto aço, é significativamente favorável a ambos modelos protendidos, em detrimento da concepção em concreto armado convencional. Considerando o impacto financeiro que a superestrutura gera no orçamento de uma obra, sendo essa etapa geralmente classificada no nível “A” da curva ABC, todo e qualquer ganho é de extrema valia. A contar apenas pela economia direta que os modelos protendidos oferecem, o sistema já se torna extremamente atrativo. Somando a ela a redução de custos indiretos impactados com mão de obra e redução de volume de fôrmas, o sistema tende a ganhar ainda mais força frente aos modelos alternativos concorrentes.

Seguindo o foco de principal interesse do presente trabalho, a análise direcionada dos diferentes modelos de concreto protendido apresentou resultados bastante expressivos e consolidados. Tanto a modelagem aderente quanto a não aderente demonstraram uma tendência de comportamento e desempenho bastante semelhante quando ensaiadas comparativamente entre as cordoalhas CP 190 RB e CP 210 RB. Em todos fatores comparativos de reações e deslocamentos, foram obtidos valores conexos e de proximidade bastante aceitável a ambos casos, validando a veracidade real e plausível de ambas análises. Em virtude de tais condutas, obviamente foram necessárias incorporações distintas de materiais a cada caso, por conta da diferença da capacidade resistente entre as cordoalhas. Dessa forma, considerando a geração de resultados bastante próximos, os modelos protendidos, aderente e não aderente, analisados com as cordoalhas CP 210 RB foram os que obtiveram maior destaque. Assim sendo, para o caso em análise no presente trabalho, o modelo protendido não aderente composto por cordoalhas CP 210 RB foi o determinado como de maior vantagem de utilização, comprovando, mais uma vez, a consolidada vantagem do sistema protendido frente ao armado convencional.

A análise comparativa de desempenho dos modelos aqui ensaiados fora avaliada a partir da consideração dos valores e resultados teóricos de cada dimensionamento. Por conta disso, aspectos práticos e executivos não obtiveram ponderação relevante ao resultado final desse estudo. Dessa forma, cabe citar o fato de, por exemplo, o modelo protendido não aderente ter superado favoravelmente os quesitos de avaliação frente ao modelo protendido aderente. Para o presente caso, uma laje de transição estruturada para sustentação de elevado carregamento, a utilização de protensão aderente é, teoricamente, mais indicada do que a protensão não aderente. Tal proposição baseia-se no fato de que no primeiro modelo a ancoragem dos cabos é garantida ao longo de toda sua extensão, em ambos sentidos, assegurada pela calda de cimento a eles aderida. Portanto, em caso de qualquer falha ou ruptura localizada na cordoalha, todo restante do sistema permanece inalterado. Já no segundo caso, considerando protensão não aderente, a ancoragem de todo sistema fica assegurada apenas pelas placas superficiais às bordas da laje. Dessa forma, qualquer possível falha ocorrida em uma dessas placas implica na desprotensão total da cordoalha a ela fixada, tornando, assim, o sistema muito mais passivo a intercorrências frente ao aderente.

A aceitabilidade executiva do dimensionamento estrutural aqui desenvolvido torna-se convincente e adequada aos modelos ensaiados. Consideradas todas as ocorrências e peculiaridades incorporadas ao presente trabalho, conclui-se que o mesmo resultou em uma validade plausível de aplicação à real atividade construtiva. Como expectativas futuras de evolução do seguinte estudo, sugere-se a modelagem de novos e diferentes casos práticos de protensão em lajes de transição. Por esse ainda ser um núcleo de estudo pouco abordado e com precária bibliografia referencial, o crescente investimento nesses casos garantirá o desenvolvimento evolutivo do tema. Dessa forma, tornar-se-á possível o completo usufruto das características vantajosas da protensão também em estruturas de transição, resultando, portanto, em um conhecimento ainda mais amplo e consolidado à realidade da engenharia estrutural.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:1980. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro – RJ, 1980.
- BARBOSA, P.C. **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP, 2000.
- BRISOT, G. **Modelagem de lajes na análise tridimensional de edifícios de alvenaria estrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.
- CARDOSO, R. **Alvenaria estrutural protendida: princípios e aplicação**. Porto Alegre – RS, 2013.
- CARVALHO, L.A. **Alvenaria estrutural – projeto**. Notas de aula. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2012.
- CAUDURO, C.E. **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas**. São Paulo – SP, 2005.
- CAVALCANTI, R.A.S. **Estudo preliminar à análise do colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural sobre estrutura de transição em concreto armado**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal – RN, 2018.
- CORRÊA, R.M.; NAVEIRO, R.M. **Importância do ensino da integração dos projetos de arquitetura e estrutura de edifícios: fase de lançamento das estruturas**. São Carlos – SP, 2001.
- DÉSIR, J.M. **Alvenaria estrutural protendida: procedimento e aplicação**. Rio de Janeiro – RJ, 2015.
- GONÇALVES G.; MARTINS S. **Alvenaria estrutural: aspectos construtivos nas habitações de interesse social**. Belo Horizonte – MG, 2016.
- LEME, R.S.; SALGADO, I. **Arquitetura moderna em Campinas: o edifício Itatiaia**. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2009.
- LOPES, J.A.F.P. **Modelação dos efeitos dinâmicos em zonas de transição em vias ferroviárias de alta velocidade**. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto – PT, 2008.
- LORENCI, G.V. **Lajes lisas protendidas: comparação dos métodos de dimensionamento à flexão**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre – RS, 2010.

- PARSEKIAN, G.A. **Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos: projeto, execução e controle**. São Paulo – SP, 2010.
- RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1ª ed. Pini. São Paulo – SP, 2003.
- RIZZATTI JR., E. **Modulação, paginação e cálculo de um edifício em alvenaria estrutural**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 2015.
- SCHMID, M.T. **Lajes planas protendidas**. Rudloff Industrial LTDA, São Paulo – SP, 2009.
- SCHMITZ, G.A.; MARTINS, W. **Alvenaria estrutural: diretrizes para o detalhamento de projeto em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto**. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça – SC, 2017.
- SOUZA, J.P.V.L.; MACEDO, M.G.G. **Lajes lisas em concreto protendido: análise e dimensionamento estrutural**. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Goiânia – GO, 2016.
- WENDLER Fº, A. A. **As transições na alvenaria estrutural**. PINI, São Paulo – SP, 2017.