

Rodrigues, S.I.¹; Assis, L.V.²

Graduandos, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

Botassi, S.S.³

Professor MSc., Dr., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

¹ ithalo10@gmail.com; ² vinicius_12340@gmail.com; ³ sergio_botassi@yahoo.com.br

RESUMO: As deflexões ou flechas ocasionadas em lajes quando ocorridas em valores elevados geram danos que podem ultrapassar os limites de serviço definidos em norma ou até mesmo induzir fissuras significativas e instabilidade estrutural. Esse problema vem se tornando cada vez mais recorrente ainda na fase de construção da edificação, principalmente proveniente da aceleração do processo de retirada de escoras, seja por pressão no atendimento de metas de cronograma ou falha na verificação técnica na idade da desforma. A partir desta constatação esta pesquisa busca analisar o comportamento das flechas em lajes simulando o tempo de retirada das escoras poucos dias pós-concretagem, levando em consideração as propriedades do concreto nas primeiras idades e fatores externos próximos da realidade de Goiânia-GO. Para auxiliar na obtenção dos resultados foram realizadas simulações numéricas de um conjunto estrutural de um pavimento, variando o tempo de retirada de escoras, idade de carregamento e condições de umidade do ambiente. Os resultados encontrados mostraram que, para o modelo analisado, a retirada do escoramento aos 7 dias mostrou-se suficiente para atender aos limites estabelecidos por norma, preservando a garantia do desempenho estrutural e otimização de recursos empregados na execução de obras de construção civil.

Palavras-chaves: flechas; idades iniciais do concreto; escoras; fluência; retração; módulo de elasticidade, lajes.

Área de Concentração: 01 ó Construção Civil, 02 ó Estruturas, 03 ó Resistência dos materiais.

1 INTRODUÇÃO

O concreto, comumente utilizado em obras de construção, sofre variações volumétricas e de suas propriedades desde seu lançamento e até mesmo depois de seu estado endurecido. No decorrer do processo a água e o ar incorporados ao concreto são perdidos para o meio externo, causando mudanças de volume e forma, como já previsto dentro de certos limites de tolerância pela norma NBR 6118 - Projetos de estrutura de concreto (ABNT, 2014), e que devem ser controlados para evitar problemas patológicos diversos, como fissurações e deformações excessivas. Sendo assim, o projeto estrutural de concreto armado requer não apenas considerar o desempenho no estado limite último (ELU ó estágio de ruptura), mas ainda situações diversas que colocam em risco a perda de durabilidade ainda nas

primeiras idades pós-concretagem (ELS ó estado limite de serviço), como no caso decorrente do processo de retirada de escoras.

Para garantir o desempenho do concreto nas primeiras idades é importante, portanto, ter conhecimento das suas propriedades mais relevantes e realizar o devido acompanhamento da evolução durante o processo de endurecimento do concreto lançado.

Verifica-se que o módulo de elasticidade, medido em função da tensão versus deformação do concreto, é uma dessas propriedades que possui um valor menor nas primeiras idades, dado que, quanto menor ele for, mais propensa à deformação é o concreto submetido a esforços, aliado ao fato de que nessas circunstâncias o concreto comporta-se ainda como um material visco-elasto-plástico, o que significa que parte dessa deformação é irreversível, caso ela não seja contida.

Outra propriedade relevante é a fluência do concreto, pois está relacionada com o período de carregamento e a idade de aplicação das cargas ao longo do tempo. As variações e deformações do material são, principalmente, influenciadas pela troca de água com o ambiente externo e pela perda de água devido a hidratação do cimento. Quanto mais água perdida para o meio externo maiores serão os efeitos da retração e fluência. Como o concreto na condição de pós-lançamento ainda apresenta baixa rigidez e os poros saturados de água, é de se deduzir que a fluência seja elevada, conseqüentemente grandes deformações devem ser consideradas na análise estrutural.

A resistência a compressão, além de garantir segurança estrutural, pode ser correlacionada com o módulo de elasticidade e fluência do concreto, sendo fundamental para o controle de flechas em lajes. Essa propriedade é de extrema importância para a estrutura pois, garante sua durabilidade, podendo servir como parâmetro para avaliação de risco de fissuras e outros danos estruturais.

Visto que o concreto nas idades iniciais ainda não atingiu resistência suficiente para resistir sequer ao peso próprio, durante e após a concretagem, é necessário a colocação de formas e escoras que sustentarão os elementos estruturais, como as lajes, para que estas não apresentem flechas ou deformações excessivas, como bem destaca Mehta e Monteiro (2014): "As fôrmas não devem ser removidas até que o concreto esteja resistente o suficiente para suportar as tensões de carga permanente e das cargas impostas pela construção."

Por princípio, as lajes de concreto armado de espessura mais relevante tendem a apresentar maior capacidade de vencer grandes vãos sem haver deflexões significativas a ponto de prejudicar seu desempenho. Entretanto, para estas mesmas lajes de grande espessura, nas primeiras idades, quando o concreto ainda não atingiu sua capacidade resistente por completo, o que se percebe é a tendência de maiores flechas, sendo ainda mais expressivas caso haja a retirada das escoras de maneira precoce. Isso ocorre, pois, a peça ainda não atingiu resistência suficiente para sustentar seu peso próprio elevado devido a sua robustez.

Deste modo, observa-se que o comportamento das flechas em lajes precisa ser cuidadosamente estudado, de forma que haja uma preocupação com a evolução das propriedades nas primeiras idades, tal como o módulo de elasticidade, e também ao processo de natureza executiva, associado a retirada das escoras no momento adequado.

Conforme a NBR 15696 - Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos (ABNT, 2009), é necessário que se mantenham as escoras até que as peças concretadas, assim como as lajes, se tornem autoportantes, e enquanto não atingirem tal capacidade

as escoras não devem ser retiradas. Entretanto, a realidade brasileira induz a retirada precoce em função do uso limitado de jogos de fôrmas e escoramentos nas obras de construção civil ou em função de um processo construtivo acelerado, procurando reduzir custos e otimizar recursos. Deste modo, o estudo dos efeitos ocasionados por esta prática torna-se relevante de ser verificado.

O escoramento é parte fundamental, e sua retirada também é uma etapa importante a ser executada de maneira correta, sendo em muitos casos uma tarefa perigosa, como pode-se verificar em uma reportagem do jornal Cidade Verde (2013): "Para realizar a concretagem da quinta laje era necessário que tanto esta quanto a quarta laje ficassem escoradas. No entanto, o escoramento da quarta laje foi retirado e a soma do peso das duas culminou com o colapso em cadeia da estrutura."

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam a importância deste processo em seu livro, como observa-se a seguir:

"A desmoldagem é, geralmente, a última operação realizada com o concreto no período das primeiras idades. A operação tem grande implicação econômica pois, por um lado, a rápida retirada das fôrmas diminui o custo da obra enquanto, por outro lado, sabe-se do colapso de estruturas de concreto quando as fôrmas foram retiradas antes do concreto alcançar a resistência necessária."

Além dos relatos anteriores é de conhecimento no meio técnico essa tendência de se executar obras com um cronograma enxuto, o qual exige da etapa de alteamento da construção de edifícios a execução dos pavimentos em tempos cada vez menores, gerando como consequência o aumento do risco de patologias, como o aparecimento de grandes deflexões ou até mesmo o colapso localizado de lajes e vigas, quando a retirada da escora ocorre em momento que o concreto não apresenta rigidez suficiente sequer para suportar seu próprio peso.

Este trabalho irá avaliar o comportamento de flechas, em lajes maciças de concreto, decorrentes da retirada de escoras nas primeiras idades após a concretagem, considerando concretos típicos da região metropolitana de Goiânia.

De forma mais específica, pretende-se ainda com essa pesquisa alcançar os seguintes objetivos complementares:

É Verificar os riscos de flecha acentuada durante o processo de retirada de escoras, a fim de entender o momento mais recomendado para o processo, mesmo considerando um exemplo específico;

É Avaliar os resultados de flechas em lajes, simulados por meio de software, e comparar com os limites da Norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014);

É Colaborar com as recomendações técnicas preventivas para garantia do desempenho conforme as normas brasileiras NBR 15696 (ABNT, 2009) e NBR 14931 - Execução de estruturas de concreto (ABNT, 2004).

2 PROPRIEDADES DO CONCRETO INTERVENIENTES NA FLECHA

2.1 Módulo de elasticidade

Pode-se resumir que as principais propriedades e fenômenos do concreto necessárias para compreender o comportamento das flechas em lajes são: módulo de elasticidade, fluência, retração e resistência mecânica. Logo, é importante se conhecer como tais propriedades podem intervir no estudo deformaional das estruturas de concreto.

O concreto é principalmente utilizado de modo a explorar sua resistência a compressão. Por outro lado, não possui uma boa resistência a tração, sendo muitas vezes desconsiderada tal propriedade. Entretanto, a resistência a tração pode estar relacionada com a capacidade de resistência aos esforços cortantes atuantes na peça e com a fissuração, por isso é necessário conhecê-la (CARVALHO e FILHO, 2014).

Conhecendo-se as capacidades de resistência a tração e compressão do concreto, é possível determinar o estado limite de deformação, utilizado para o cálculo estrutural, diretamente relacionado com a durabilidade da estrutura (estado limite de serviço), colapso ou qualquer outra forma de ruína (estado limite último), como citado nos itens 10.3 e 10.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

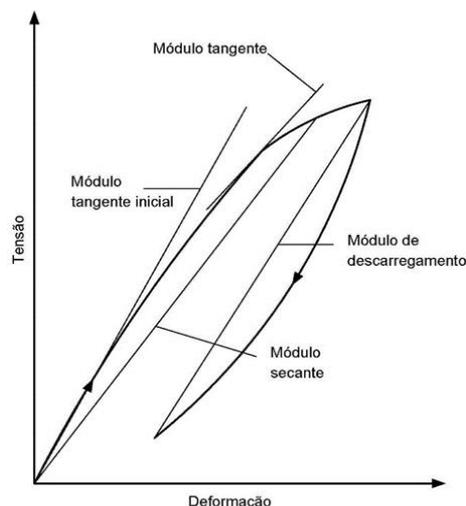
Deste modo utiliza-se o estado limite de serviço (ELS) para a análise de rigidez da estrutura, aparência, conforto do usuário e boa utilização funcional, e o estado limite último (ELU) para os estados de fissuração da estrutura, que determine a paralisação do uso estrutural, porém, não isentando tal verificação também para o primeiro tipo de estado limite.

O módulo de elasticidade está diretamente ligado a resistência, variando das primeiras idades para as maiores idades do concreto, entretanto o módulo cresce mais rápido que a resistência (NEVILLE e BROOKS, 2013). Outros autores, como Botassi (2011), frisam a importância do comportamento destas propriedades ao longo do tempo, normalmente conhecidas após realizados ensaios laboratoriais.

O módulo de elasticidade ou de *Young* é a grandeza mecânica que mede a rigidez do material, sendo obtida por meio da relação entre tensão e deformação, sendo que, quanto maior o módulo menos deformável ou mais rígido é o material.

Como especificado na NBR 6118 (ABNT, 2014), para a análise das flechas destaca-se o módulo secante (E_{cs}), que expressa o valor da rigidez dada a deformação do concreto ao longo do tempo devido ao carregamento. Este módulo é medido traçando-se uma reta do ponto de tensão nula até a tensão de compressão (NEVILLE e BROOKS, 2013), ilustrado na *Figura 1*.

Figura 1 - curvas tensão deformação típicas para o concreto.



Fonte: Adaptado de (NEVILLE e BROOKS, 2013)

Assim observa-se que conhecer o módulo de elasticidade nas primeiras idades do concreto é de suma importância para a predição das flechas em lajes, pois conhecendo-se o módulo é possível avaliar a rigidez do concreto para auxiliar na retirada das escoras, de modo que o valor da rigidez seja suficiente para suportar seu peso próprio.

A influência desta propriedade na flecha é fundamental, pois ela representa a rigidez proveniente do material utilizado na laje ou qualquer outro elemento fletido. A partir da teoria das estruturas pode-se facilmente deduzir que o módulo de elasticidade tende a ser inversamente proporcional à deflexão, como exemplificado na *Figura 2*, o que implica em dizer que se, por exemplo, houver uma redução do módulo em 20% isso se refletirá diretamente sobre a flecha com um aumento de aproximadamente 25%.

Figura 2 - Cálculo simplificado da flecha para uma viga simplesmente apoiada.

O diagrama mostra uma viga de comprimento l apoiada em dois pontos. Uma carga distribuída p atua sobre a viga. O eixo x é indicado na direção da viga.

$$\frac{5}{384} \frac{pl^4}{EI}$$

Fonte: Adaptado de (Carvalho & Filho, 2014)

2.2 Fluência

O fenômeno da fluência do concreto pode ser definido como a deformação crescente ao longo do tempo provocada por um esforço mecânico, mesmo que constante, cuja causa está associada à migração paulatina de água dos meso, micro e nano-poros da matriz cimentícia do concreto. Este fenômeno ocorre quando os valores das deformações são influenciados pelo simples transcorrer do tempo, independente do crescimento do carregamento (CARVALHO, 1997). Logo observa-se uma deformação do concreto mesmo após a retirada das cargas atuantes sobre ele, considerando que ele ainda sofra efeito de seu peso próprio.

As deformações dos materiais podem ser classificadas em elástica, plástica, viscosa, ou ainda combinações entre elas: elasto-plástica e visco-elástica. A alteração das dimensões volumétricas do material quando cessado o carregamento, estão associadas as deformações elástica e plástica, enquanto que, as alterações das dimensões do material quando mantido o carregamento, estão associadas a deformação viscosa. O concreto possui um comportamento viscoso sob carregamento, e quando retirado tal carregamento, se deforma sob o efeito elástico, mas acumula parte da deformação (efeito plástico). Portanto o comportamento do concreto poderia ser classificado como: visco-elasto-plástico (BOTASSI, 2011).

A presença de água no interior do maciço do concreto é o principal motivo para o fenômeno da fluência, de modo que a umidade externa influencia diretamente na fluência do concreto. Quanto menor for a umidade relativa do ar maior será a fluência, pois o aumento inicial deste efeito se deve à rápida expulsão da água evaporável (BOTASSI, 2011).

Além da umidade, a relação A/C também é um fator determinante na fluência, sendo que, esta relação influencia na resistência do concreto, de forma que, para uma relação água cimento menor, maior será a resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Como explica a NBR 6118 (ABNT, 2014), a fluência do concreto pode ser dividida em rápida, que ocorre durante as primeiras 24 h após a aplicação da carga que a originou, e deformação lenta, composta por outras 2 parcelas: lenta irreversível e lenta reversível. Uma fluência reversível pode ser associada a deformação elástica, que é totalmente recuperável. Por outro lado, a fluência irreversível ocorre quando se tem parte da deformação não recuperável. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Deste modo observa-se que, quanto maior a resistência no momento de aplicação das cargas, menor será o fenômeno da fluência (NEVILLE e BROOKS, 2013). Como o peso próprio da laje se torna uma carga, quanto

mais demorada for a retirada das escoras, menos suscetível ao efeito de fluência a laje estará sujeita, por isso é de suma importância avaliar esta propriedade momento da retirada das escoras.

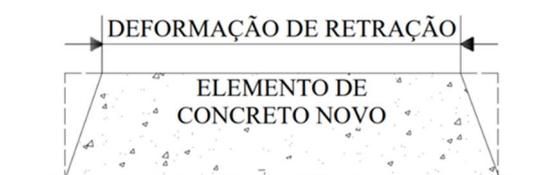
2.3 Retração Hidráulica

O fenômeno da retração está associado à expulsão de água de dentro da pasta de cimento do concreto. Existem três tipos de retração associadas com a migração de umidade interna ao concreto: a retração por secagem, autógena e plástica (Mehta & Monteiro, 2014). Neste estudo, será considerada a retração por secagem nos cálculos para a análise das flechas em lajes, visto que esta é mais relevante nas primeiras idades do concreto.

ãA retração do concreto por secagem é comumente definida como a redução do volume do concreto resultante da perda de água para o meio ambiente quanto este já se encontra no estado endurecido. (CARVALHO, 1997). Tal fenômeno se deve principalmente a quantidade de água existente na pasta de cimento e as condições de exposição para o ambiente.

Uma pasta de cimento saturada não permanecerá com mesma dimensão quando exposta a umidades ambientais abaixo da saturação ($UR < 100\%$). Sendo assim, quanto menor a umidade relativa do ambiente, maior será o efeito da retração por secagem do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Deste modo, como a face superior da laje tende a ficar mais exposta a condições climáticas mais desfavoráveis do que a inferior e de se supor que a retração contribuirá para uma maior deflexão da laje e potencialização de seu fenômeno, como mostrado na **Figura 3**.

Figura 3 - Deformação devido à retração



Fonte: Adaptado de (AMARAL, 2011)

Logo, após as considerações feitas anteriormente, verifica-se que o processo de cura é de extrema importância para que se tenha uma redução da retração, apesar de que parte da retração inicial é irreversível (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Neville e Brooks (2013) mostram ainda que, quanto maior a relação água/cimento, maior também será a retração, pois existirá mais água a ser perdida para o meio ambiente. Além disso o tipo ou puramente o módulo de elasticidade do agregado empregado no concreto, também contribui para a retração, de modo que, um concreto leve tem maior retração que o concreto produzido com agregado normal.

Acredita-se assim que a retração tenha papel não só nos riscos de fissuração nas primeiras idades, como também possa interferir no aumento da flecha e, portanto, será considerada no modelo numérico para análise de flechas em lajes neste trabalho.

3 METODOLOGIA

O trabalho consiste em um levantamento bibliográfico e análises numéricas para estudo das deflexões ocorridas em lajes devido a retirada precoce de escoras, demonstrando a importância do conhecimento das propriedades do concreto durante este processo.

Foram definidas as propriedades do concreto e outras variáveis para entrada de dados no *software* como: resistência do concreto, módulo de elasticidade, tipo de laje, espessura da laje, tipo de escoramento, tipo de fôrmas e carregamento adotado.

Em seguida, foram realizadas simulações computacionais, para testes das variáveis, verificando o aumento ou não da flecha na laje para diferentes idades pós concretagem, visando maximizar o número de possibilidades de retiradas das escoras.

Com os resultados obtidos, foram verificadas as flechas associadas ao período de retirada das escoras, concluindo-se então qual a idade mínima para retirada do escoramento, estando a flecha e o momento de fissuração encontrados na laje dentro dos limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.1 Variáveis de estudo e cenários simulados

Para realização da parte experimental (simulações) foram estabelecidos quais os fatores fixos e variáveis. Os fatores fixos foram:

- tipo de laje: laje maciça de concreto armado com 15cm de espessura;
- configuração da estrutura: pilares 20x20cm, vigas de 20x60cm, laje de 6x6m;
- condições climáticas: típicas da região de Goiânia;
- tipo e método de escoramento: escoras, longarinas e transversinas de eucalipto;
- cargas atuantes na estrutura para as simulações (conforme especificado no item 4.2 da NBR 15696): peso próprio da estrutura, sobrecarga de trabalho de 2,0 kN/m².

O critério utilizado para cálculo do dimensionamento dos elementos estruturais estão detalhados no item 3.3.

As variáveis principais a serem estudadas foram:

- Tempo de retirada das escoras: 1, 3, 7 e 14, 28 dias;

- Concreto típico da região (30MPa a 45MPa), segundo Cândido (2018);
- Valor do Módulo de Elasticidade, de acordo com o f_{ck} dos concretos analisados.

3.2 Predição das propriedades dos concretos

Os valores obtidos para retração do concreto foram calculados de acordo com o item A.2.3.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), utilizando a seguinte equação (1):

$$\varepsilon_{rt,t} = \varepsilon_{rt,t0} [\beta_f^{t-t_0} - \beta_{f0}] \quad (1)$$

onde:

$$\varepsilon_{rt,t} = \varepsilon_{rt} \varepsilon_{rt}$$

$\varepsilon_{rt,t}$ é o valor final da retração;

ε_{rt} é o coeficiente dependente da umidade relativa; do ambiente e da consistência do concreto;

ε_{rt} é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça.

A umidade relativa do ar utilizada na equação (1), foi obtida de acordo com o histórico de umidade relativa para a região de Goiânia, encontrada no portal INMET, com o valor crítico adotado igual a 22,98%, sendo este a média dos valores mínimos de umidade no mês de setembro dos últimos 15 anos.

Para o cálculo da fluência, foi utilizada a equação (2), conforme o item A.2.2 da NBR 6118:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{\infty} + \varphi_{f0} [\beta_f^{t-t_0} - \beta_{f0}^{t-t_0} + \varphi_{\infty} \beta_f] \quad (2)$$

onde:

t é a idade fictícia do concreto no instante considerado, expressa em dias;

t_0 é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento único, expressa em dias;

t_{bi} é a idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, expressa em dias;

φ_{∞} é o coeficiente de fluência rápida.

Para a obtenção dos valores de módulo de elasticidade do concreto, de acordo com sua evolução ao passar dos dias, adotou-se os dados de rigidez provenientes do ensaio de corpos de provas de concreto típicos da região de Goiânia, segundo o trabalho de Cândido (2018), para as idades de 3, 7 e 28 dias. Feito isso, utilizou-se a equação da NBR 6118 (ABNT, 2014), item 8.2.8 (equação (3)), para obtenção dos valores do módulo E_{ct} para tais idades pós concretagem.

$$E_{ct}(t) = \frac{E_{ct}(t_0)}{E_{ct}(t_0)} \cdot E_{ct} \quad (3)$$

Onde:

E_{ct} é a estimativa do módulo de elasticidade do concreto em idades entre 7 e 28 dias;

f_{ct} é a resistência característica a compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade, em megapascal (MPa);

E_{ci} é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto;

f_{ct} resistência característica a compressão do concreto;

Tal equação é utilizada para valores posteriores aos 7 dias de concretagem, porém, este trabalho estuda a retirada em idades iniciais das escoras após a concretagem. Assim, como estratégia utilizou-se a equação (4), aplicada por Botassi (2019), para ajustar curvas com os valores de módulos conhecidos e obter resultados para idades inferiores à 7 dias.

$$E_{ct} = \frac{E_{ci}}{1 - \alpha_1 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\alpha_2}} \quad (4)$$

Onde:

E_{ci} é o módulo tangente inicial;

t é a idade em dias do concreto após a concretagem;

α_1 é o coeficiente para ajuste inicial da curva;

α_2 é o coeficiente para ajuste final da curva.

Entretanto, para verificação de flechas, a NBR 6118 (ABNT, 2014) item 8.2.8, salienta a utilização do módulo de elasticidade secante (E_{cs}), encontrado segundo a equação (5):

$$E_{cs} = \alpha_3 \cdot E_{ct} \quad (5)$$

Onde:

E_{ct} é a estimativa do módulo de elasticidade do concreto em idades entre 7 e 28 dias;

α_3 é o coeficiente em função da classe de resistência do concreto (tabela 8.1).

3.3 Laje de referência e carregamentos

O sistema de simulação considera a situação de uma estrutura recém concretada com e sem escoramentos, uma vez que por norma, este escoramento deve ser calculado e dimensionado para uma estrutura de concreto que ainda não atingiu sua plena capacidade de rigidez.

Para o cálculo da armadura da estrutura e dimensionamento dos elementos estruturais, foi considerada uma situação de carregamento, estabelecida pela NBR 6120 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 2019), consideradas as cargas como especificado para áreas de uso comum para edifícios residências. Tais cargas foram de: 3kN/m² para carga uniformemente distribuída e 1,5kN/m² para carga de revestimento. Estas cargas

foram utilizadas apenas para o cálculo de armaduras da estrutura, e não para as simulações.

De acordo com os carregamentos, a taxa de armadura para vigas, pilares e lajes, foram respectivamente 0,83%, 2,0% e 1,44%, dentro dos limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

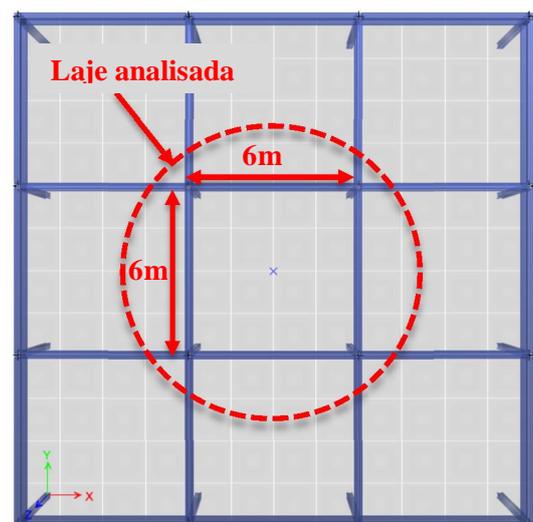
3.4 Modelagem numérica

O modelo numérico é uma solução desenvolvida por um método virtual, por meio de softwares computacionais, onde suas equações também são fundamentais em modelos matemáticos mais sofisticados, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), na qual são utilizadas as equações diferenciais, possibilitando resultados precisos e mais próximos dos reais (ESSS, 2017).

O MEF utiliza um elemento geométrico discretizado, mantendo suas propriedades originais e submetida a carregamentos. As divisões podem apresentar formas distintas e diferentes quantidades de nós, sendo que, para maior precisão é necessária uma quantidade de pontos nodais e uma a divisão em malhas dos elementos analisados (ALVES, 2007).

Para o modelo numérico foi utilizado o software ETABS - Versão de avaliação. O software utiliza o Método dos Elementos Finitos e leva em consideração os efeitos da fluência de curto, médio e longo prazo, permitindo analisar as deflexões devido ao tempo juntamente com a sequência da construção.

Figura 4 - Modelo estrutural estudado.



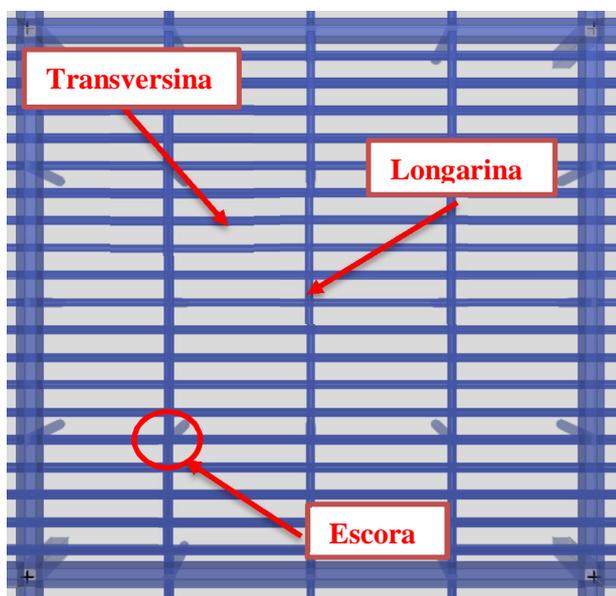
Fonte: software ETABS 2018.

O modelo para análise estrutural inserido no *software*, utilizou os valores das propriedades físicas do concreto, sendo elas: fluência, módulo de elasticidade, retração e resistência, e também as propriedades físicas das

escoras de eucalipto, tais como: módulo de elasticidade e massa específica do eucalipto. Foram consideradas nove lajes, sendo que, apenas a laje do centro foi analisada para obtenção dos dados de flecha, pressupondo-se que esta apresentaria maior deflexão em relação as demais. A **Figura 4** demonstra o modelo estrutural estudado.

O modelo de escoramento adotado foi o seguinte: longarinas e transversinas foram espaçadas respectivamente em 1,5m e 0,30m, e as escoras de eucalipto seguindo o espaçamento das longarinas, com distanciamento de 1,5m x 1,0m. (**Figura 5**). Este distanciamento foi obtido em função do cálculo do deslocamento máximo em função da flambagem das peças de eucalipto, devido a carga crítica em cada escora, seguindo o modelo de cálculo apresentado no item 4.3 da NBR 15969 (ABNT, 2009).

Figura 5 é Detalhe das peças de escoramento



Fonte: software ETABS - Versão de avaliação

As simulações realizadas referem-se aos resultados de flecha máxima e momento solicitante máximo da estrutura de concreto no estado endurecido, não cabendo, portanto, uma análise com as escoras remanescentes (reescoramento) em conjunto com a estrutura, visto que, este estudo buscou verificar a capacidade do concreto em resistir aos esforços nas primeiras idades.

Após realizadas as simulações obteve-se valores de flecha elástica, calculada levando-se em consideração o a inércia da seção da peça de concreto, e valores de momento fletor solicitantes. Tais valores foram comparados com os valores estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme tabela 13.3, para deslocamento limite igual a L/350, em função das cargas acidentais (carregamento de 2,0 kN/m² referente

a sobrecarga de trabalho de trabalhadores e máquinas na laje), e para deslocamento limite igual a L/250, para aceitabilidade sensorial, sendo estes os mais comumente utilizados para este tipo de verificação. Também, para verificação da aceitabilidade do momento solicitante, foi obtido o momento de fissuração, calculado utilizando-se a equação (6):

$$M_{f_{\text{cr}}} = \frac{\alpha f_{\text{ct}} I_g}{y_{\text{tr}}} \quad (6)$$

Sendo: $\alpha = 1,5$ para seções retangulares.

Onde:

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

y_{tr} é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

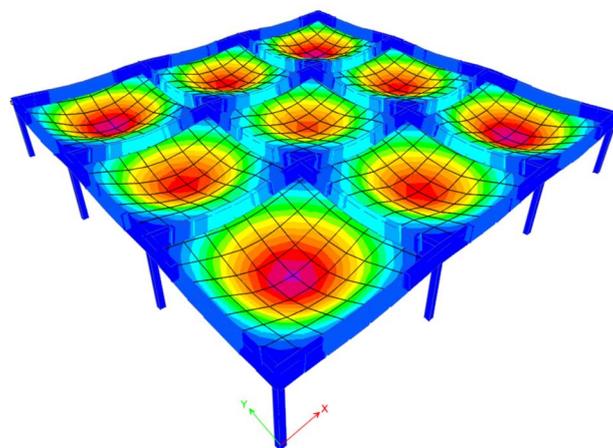
I_g é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas utilizando o recurso de construção em etapas do software. Deste modo pôde-se simular a inserção e a retirada do escoramento de acordo com os dias estabelecidos, além de simular a evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo, de forma transiente. Para a obtenção dos valores de flecha máxima e momento solicitante máximo foi considerada a idade de 90 dias após a concretagem.

Figura 6 é deformações do modelo analisado no software devido as flechas.



Fonte: software ETABS é Versão de avaliação

Inicialmente foram estimados os valores de módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ti}) utilizando as equações (3) e (4), e secante (E_{sc}), conforme equação (4), para

idades do concreto entre 1 e 14 dias, apresentados nas tabelas do Apêndice A. As **Figuras 4, 5, 6 e 7** mostram as curvas para obtenção dos valores de E_{cs} , conforme a equação de Botassi (2019). Os valores de fluência, retração e módulo de elasticidade foram inseridos no software, para que a análise ocorresse de forma transiente.

Figura 4 Curva do E_{cs} para concretos de 30 MPa.

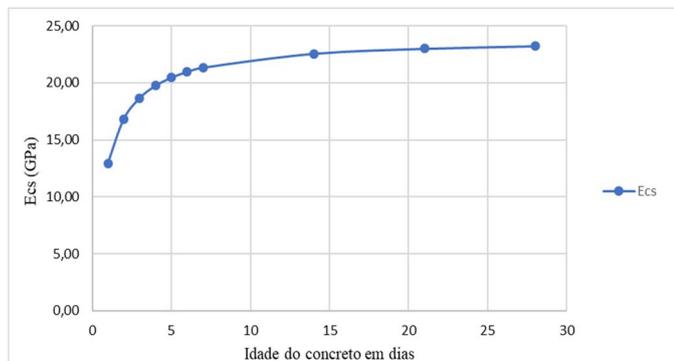


Figura 5 - Curva do E_{cs} para concretos de 35 MPa.

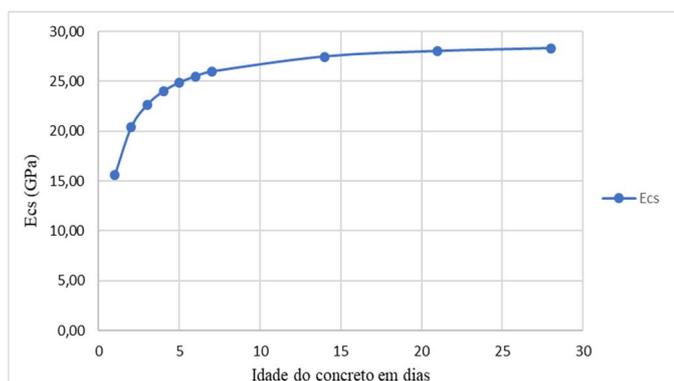


Figura 6 - Curva do E_{cs} para concretos de 40 MPa.

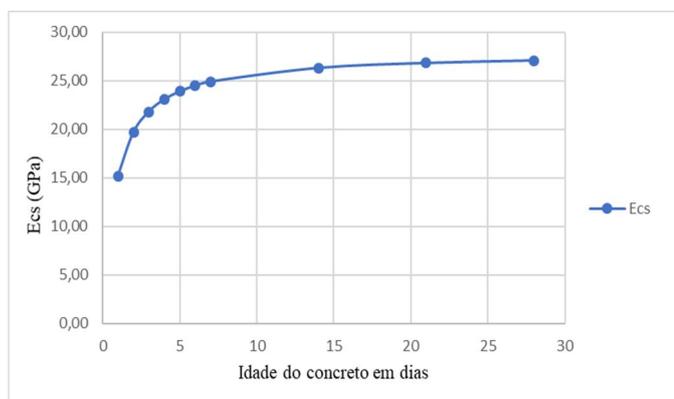
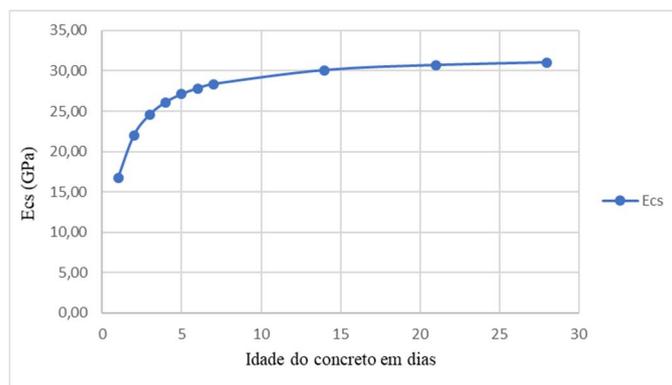


Figura 7 - Curva do E_{cs} para concretos de 45 MPa.



Para o processamento dos elementos estruturais no software, utilizou-se o modelo de cálculo de lajes em malhas, sendo a laje dividida em oito partes em uma direção e oito partes na direção perpendicular à primeira.

As combinações utilizadas foram as de ELS, com as cargas atuantes na laje multiplicadas pelo coeficiente $\gamma_f = 1$, e para a verificação do ELU, as cargas impostas a estrutura foram multiplicadas pelo coeficiente $\gamma_n = 1.4$, de acordo com o item 11.7.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os resultados encontrados após as simulações para os valores de flecha, são os apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 ó valores de flecha máxima comparados com limite de $L/250$, para modelo sem escoramento.

Retirada das escoras (dias)	E_{cs} (MPa)			
	30	35	40	45
	Flecha (cm)	Flecha (cm)	Flecha (cm)	Flecha (cm)
1	6,29	5,63	5,68	5,34
3	2,13	1,94	1,95	1,86
7	1,64	1,50	1,51	1,44
14	1,44	1,32	1,32	1,27
28	1,21	1,11	1,12	1,07

- deformação dentro do limite de $L/250$
- deformação acima do limite de $L/250$

De acordo com os resultados obtidos observa-se que, para a retirada de todo o escoramento na idade de 1 dia, todos os concretos estudados apresentaram deflexão maior que $L/250$ (igual a 2,4 cm). Logo, para idades superiores a 3 dias, os concretos de todas as classes de resistência apresentaram deflexões inferiores a $L/250$, estando portando, dentro do limite estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Já para a verificação do limite de flecha de L/350 (igual a 1,71 cm), notaram-se que, os concretos de todas as classes de resistência estudados, apresentaram flecha inferior a L/350 somente aos 7 dias, como observado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - valores de flecha máxima comparados com limite de L/350, para modelo sem escoramento.

Retirada das escoras (dias)	f_{ck} (MPa)			
	30	35	40	45
	Flecha (cm)	Flecha (cm)	Flecha (cm)	Flecha (cm)
1	6,29	5,63	5,68	5,34
3	2,13	1,94	1,95	1,86
7	1,64	1,50	1,51	1,44
14	1,44	1,32	1,32	1,27
28	1,21	1,11	1,12	1,07

 deformação dentro do limite de L/350

 deformação acima do limite de L/350

Juntamente com as deflexões ocasionadas em lajes, as fissuras na peça também podem comprometer sua durabilidade. Por isso os valores de momento de fissuração (M_r) foram calculados utilizando-se a equação (6), conforme as resistências encontradas de acordo com a evolução da idade do concreto, e comparados com o momento de cálculo solicitante (M_{sd}) obtido pelo software igual a 8.411 kN.cm, como mostrado na **Tabela 3**. Com base nos resultados encontrados para momento de fissuração, nota-se que, os valores para os concretos de todas as classes de resistência, são superiores ao momento solicitante somente a partir do terceiro dia. Isso mostra que, ao retirar as escoras em idades inferiores a esta, o concreto apresentará não somente flechas excessivas como também fissuras.

Tabela 3 ó valores de momento de fissuração (M_r).

Idade do concreto (dias)	f_{ck} (MPa)			
	30	35	40	45
	M_r (kN.cm)	M_r (kN.cm)	M_r (kN.cm)	M_r (kN.cm)
1	5.712	6.267	7.609	7.731
3	8.726	9.513	11.644	11.564
7	10.354	11.161	13.354	14.088
14	10.895	11.980	14.537	14.732
28	11.684	12.829	15.569	15.792

 momento M_r abaixo do M_{sd}

 momento M_r acima do M_{sd}

4.1 Comportamento das flechas em função do fck

A partir dos resultados encontrados, observa-se uma diminuição das flechas devido ao aumento do fck do concreto associado ao aumento da rigidez. Entretanto, em alguns casos tal situação não acontece, como pode ser visto na **Tabela 1**, onde, o concreto com fck igual a 40 MPa apresenta uma deflexão maior em relação ao concreto com fck igual a 35 MPa. Isso se dá em função do módulo de elasticidade dos concretos analisados, sendo que, apesar de apresentar uma resistência inferior, o concreto com fck igual a 35 MPa apresentou módulo de elasticidade superior ao concreto de 40 MPa, considerando os concretos estudados por Cândido (2018), conforme observado nas Tabelas 2 e 3 do **Apêndice A**. Tal situação pode servir de base como alerta aos projetistas quanto as considerações de projeto a partir de dados de norma sem conhecimento do comportamento dos materiais da região.

Notou-se ainda que, para concretos com fck igual a 30MPa, ou superior, mesmo com a retirada precoce das escoras a partir de 3 dias o concreto já apresentou flecha abaixo do limite (para condição de conforto visual), embora seja importante ressaltar que ao longo da vida útil da estrutura os valores de flecha poderão ser ultrapassados, uma vez que os efeitos da fluência, e talvez até mesmo a retração por secagem, continuarão a ocorrer.

Logo, para condições de carregamentos variáveis, os concretos com fck igual a 45MPa apresentaram flecha inferior a limite (L/350), somente aos 7 dias. Tais condições de carregamentos foram utilizadas segundo os valores mínimos estabelecidos por norma, não considerando situações de novos apoios de escoramentos para lajes superiores.

Vale ressaltar ainda que, para as simulações feitas no software, os valores de fck do concreto não influenciaram no valor final das flechas. Verificou-se uma alteração desses resultados somente quando os valores de módulo de elasticidade, fluência e retração foram modificados. Entretanto, os valores de fck influenciaram nos valores de momento de fissuração, visto que a equação dessa resultante é em função do fck. Os valores de momento de fissuração aumentaram em função da evolução dos valores de fck.

4.2 Comportamento das flechas em função do tempo de retirada das escoras

Ao analisar o comportamento em função do tempo de retirada das escoras, observa-se que, esta ação influencia diretamente nos valores de flecha. As simulações realizadas retirando-se as escoras nas primeiras idades do concreto resultaram em deflexões maiores em relação as idades posteriores. Quanto maior a idade do concreto, menor flecha apresentada e quanto

maior o tempo de permanência das escoras, menor flecha apresentada. Verificou-se ainda que, para o modelo analisado, a retirada das escoras mostrou-se viável somente aos 7 dias, respeitando os limites de L/350 proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Como a laje do centro possuía condições de contorno favoráveis as deflexões em relação as lajes das extremidades, constatou-se durante as simulações que, as deflexões ocorridas nas lajes de extremidade foram maiores do que as deflexões ocorridas na laje do centro.

Por outro lado, verificou-se também deflexões nas lajes mesmo com o sistema de escoramento, entretanto significativamente menores em relação a estrutura completamente livre de escoramentos.

Como as normas NBR 14931 (ABNT, 2004) e NBR 15696 (ABTN, 2009) não expressam com exatidão a idade de retirada das escoras, pode-se ter um parâmetro quanto a retirada das escoras de acordo com os resultados apresentados neste estudo.

5 CONCLUSÕES

A cerca dos objetivos propostos para esta pesquisas, pode-se concluir, como esperado, que a retirada precoce das escoras propicia o aumento da ocorrência de flechas em lajes. Para o modelo analisado a retirada das escoras mostrou-se viável somente aos 7 dias, para concretos com classe de resistência entre 30 e 45 MPa, atendendo aos limites propostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de L/250 e L/350.

Constatou-se ainda a importância da retração, da fluência e do módulo de elasticidade para a predição das flechas, visto que, em alguns casos, apesar do concreto apresentar resistências altas, o módulo de elasticidade pode não alcançar valores tão altos. Isso mostra a importância da composição do concreto, uma vez que, a relação a/lig., a/c e os agregados empregados no concreto influenciam nas propriedades do módulo de elasticidade. Esta propriedade mostrou-se como primordial para a obtenção dos valores de flechas em lajes, como já era esperado.

Para as situações de fissuração das lajes, a resistência do concreto mostrou-se relevante já que, o cálculo do momento de fissuração se dá em função da resistência do concreto. As resistências após 3 dias para todas as classes de concretos mostraram-se suficientes para resistir ao momento solicitante.

Após as considerações feitas, para o modelo estudado, a retirada das escoras atendendo aos limites impostos por norma, mostrou-se viável para concretos de classe de resistência entre 30MPa e 45MPa aos 7 dias, visto que nesta idade, o concreto já se aproxima do ápice de suas propriedades de resistência e módulo de elasticidade,

próximo aos valores de sua idade aos 28 dias, onde em seguida, observa-se poucas variações. Entretanto, as análises realizadas consideram uma idade de 90 dias, não levando em consideração as possíveis deformações ocorridas após tal período, que podem ser superiores aos valores encontrados neste estudo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15696: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para cálculo de estruturas de edificações**. ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ALVES, L. M. **Métodos dos Elementos Finitos**, março 2007.
- AMARAL, J. C. D. **Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito de fluência**, São Paulo, 2011. Dissertação de Mestrado (Escola Politécnica) Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- BOTASSI, S. D. S. **Análise da influência do concreto nas primeiras idades de carregamento: influência de aditivos plastificantes e adições minerais**, Porto Alegre, 2011. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BOTASSI, S. D. S. **Fenômeno térmico do concreto: fundamentos e aplicações práticas**, 1ª. ed. Interciência, 2019.
- CÂNDIDO, M. D. P. **Avaliação da Durabilidade de Concretos Fornecidos por Centrais Dosadoras, Goiânia**, 2018. 129. Dissertação de Mestrado (Escola de engenharia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- CARVALHO, F. M. D. **Efeito do Carregamento Precoce na segurança das estruturas de concreto**, São Carlos, 1997. 123.
- CSI. Computers & Structuers, INC Disponível em: <<https://www.csiamerica.com/products/etabs/features#user-interface>> Acesso em: 20 maio 2020.
- Diretor da consol se defende e diz que analise de ex secretário**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas->

gerais/noticia/2015/06/diretor-da-consol-se-defende-e-diz-que-analise-de-ex-secretario-e-parcial.html>. Acesso em: 05 abril 2020.

CHUST, R.; FIGUEIREDO, J. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, 4ª. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA
Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em: 28 de outubro de 2020.

ESSS. **Engineering Simulation and Scientific Software**, 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/simulacao-numerica-metodo-analitico-experimental-concorrentes-ou-complementares-na-engenharia/>> Acesso em: 23 maio 2020.

HENRIQUE, M. B. **Projeto de escoramento em madeira para laje**, 2017. Trabalho de conclusão de curso (Escola de engenharia), Faculdade de ciências de gerencias de Manhuaçu, Manhuaçu.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. [S.l.]: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª. ed. London, Leeds: bookman, 2013.

Shopping divulga laudo e admite que "houve erro" e retomará obra. cidade verde, 2013. Disponível em: <<https://cidadeverde.com/noticias/141387/shopping-divulga-laudo-e-admite-que-houve>>

7 APÊNDICES

APÊNDICE A ó Valores estimados de resistência, modulo de elasticidade tangente inicial e secante.

Tabela 4 - f_{ck} , E_{ci} e E_{cs} para concreto com $f_{ck} = 30$ MPa.

Concreto - $f_{ck} = 30$ Mpa			
Idade	f_{ck} MPa	E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
1	13,4	14,72	12,95
3	25,3	21,20	18,66
7	32,7	24,25	21,34
14	35,3	25,64	22,56
28	39,2	26,39	23,22

Tabela 5 - f_{ck} , E_{ci} e E_{cs} para concreto com $f_{ck} = 35$ MPa.

Concreto - $f_{ck} = 35$ Mpa			
Idade	f_{ck} MPa	E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
1	15,4	17,57	15,64
3	28,8	25,44	22,64
7	36,6	29,18	25,97
14	40,7	30,87	27,48
28	45,1	31,80	28,30

Tabela 6 - f_{ck} , E_{ci} e E_{cs} para concreto com $f_{ck} = 40$ MPa.

Concreto - $f_{ck} = 40$ Mpa			
Idade	f_{ck} MPa	E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
1	20,6	16,89	15,20
3	39	24,25	21,82
7	47,9	27,69	24,92
14	54,4	29,25	26,33
28	60,3	30,10	27,09

Tabela 7 - f_{ck} , E_{ci} e E_{cs} para concreto com $f_{ck} = 45$ MPa.

Concreto - $f_{ck} = 45$ Mpa			
Idade	f_{ck} MPa	E_{ci} (GPa)	E_{cs} (GPa)
1	21,1	18,42	16,76
3	38,6	27,00	24,57
7	51,9	31,14	28,34
14	55,5	33,05	30,07
28	61,6	34,09	31,02

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Ítalo Rodrigues dos Santos
do Curso de Engenharia Civil, matrícula 2015.1.0025.0720-0,
telefone: (62) 98282-8449 e-mail italo10@gmail.com, na
qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos
do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o
Trabalho de Conclusão de Curso intitulado
ANÁLISE DE FLECHA EM LAJES NAS PRIMEIRAS IDADES PÓS-CONCRETAGEM

gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões
do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado
(Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG,
MOV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a
título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 10 de dezembro de 2020.

Assinatura do(s) autor(es): Ítalo Rodrigues dos Santos

Vinicius de Assis Leite

Nome completo do autor: Ítalo Rodrigues dos Santos

Vinicius de Assis Leite

Assinatura do professor-orientador: 

Nome completo do professor-orientador: SERGIO BOTASSI DOS SANTOS

RESOLUÇÃO n°038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Vinícius de Assis Leite
do Curso de Engenharia Civil, matrícula 2015.1.0025.0641-9
telefone: (62) 9.3469-2776 e-mail vl3ism@gmail.com, na
qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei n° 9.610/98 (Lei dos Direitos
do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o
Trabalho de Conclusão de Curso intitulado
Análise de flecha em lajes nas primeiras idades
nos concretos,
gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões
do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado
(Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG,
MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a
título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 10 de dezembro de 2020.

Assinatura do(s) autor(es): Vinícius de Assis Leite

Ítalo Rodrigues dos Santos

Nome completo do autor: Vinícius de Assis Leite

Ítalo Rodrigues dos Santos

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: _____