



Avaliação das Perdas Imediatas de Protensão: Modelo Manual x Software Midas Civil

Fábio Albino de Souza¹, Angelo Rubens Migliore Junior²

¹Instituto Nacional de Estruturas Protendidas - INAEP - Email: eng.fabio.35@gmail.com

²Instituto Nacional de Estruturas Protendidas – INAEP – Email: rubens.migliore@gmail.com

Resumo

Historicamente, mensurar os valores das perdas de protensão sempre foi um desafio para os engenheiros estruturais, pois inúmeros fatores como tipo de estrutura, especificações de projeto e o local de implantação influenciam nesse cálculo sendo uma temática de grande relevância seja na fase de projeto bem como na execução de estruturas protendidas. As perdas de protensão podem ser classificadas de acordo com a sua ocorrência e se dividem em dois grupos: perdas imediatas e perdas progressivas. Neste artigo enfatiza-se as perdas por atrito e perdas por acomodação na ancoragem bem como o encurtamento elástico do concreto. Para avaliar as perdas imediatas foi considerada uma viga isostática com 24 (vinte e quatro) metros de comprimento na qual cada cabo parabólico composto por 8 (oito) cordoalhas de 15,2 mm de diâmetro de aço CP-190, totalizando 3 (três) cabos no sistema de pós-tração aderente. Levando em conta o modelo manual foram avaliadas as perdas por atrito e por acomodação da ancoragem cabo a cabo e também para o cabo resultante para estimar a discrepância de valores de acordo com a ABNT NBR 6118:2023 e a ACI PRC 423.10:2016. Além disso foi utilizado o software Midas Civil com o intuito de confrontar com os procedimentos manuais pois a prática profissional requer cada vez mais velocidade e integração em projetos. Foi constatado que os casos estudados apresentaram pequenas diferenças de resultados consideradas perfeitamente aceitáveis

Palavras-chave

Protensão; Perdas de Protensão; Perdas por Atrito; Perdas por Acomodação da Ancoragem; Encurtamento Elástico do Concreto.

Introdução

Como mencionado por ALBINO e MIGLIORE JUNIOR (2024) o concreto protendido nas modalidades pré-tração e pós-tração tornou-se uma tecnologia muito versátil e presente em elementos estruturais de edifícios, pontes, tanques, lajes, silos, radiers entre outros, e usado praticamente em todo o mundo devido a sua simplicidade. Sabe-se que uma determinada força colocada em um cabo de protensão quando transferida para um elemento de concreto sofre redução através das perdas imediatas e progressivas. Mensurar o valor da força residual, também denominada força efetiva ou força no tempo infinito após as perdas totais constituem um desafio e tema de grande relevância seja na fase de projeto bem como na fase de execução de estruturas protendidas. Em particular este artigo traz ênfase nas perdas imediatas de elementos protendidos com pós-tração, ou seja, perdas por atrito entre o cabo e a bainha, perda por acomodação da ancoragem e perda por encurtamento elástico do concreto. As perdas por atrito entre o cabo e a bainha ocorrem durante o tensionamento dos cabos, em que a força de protensão ao longo do cabo diminui de seu valor máximo na ancoragem ativa para um valor mínimo na ancoragem passiva. Também existe a condição em que o cabo seja tensionado em ambas extremidades com ancoragem ativa, ou seja, o seu valor máximo permanece nas extremidades e o seu valor mínimo acontece em algum ponto entre as extremidades. Essa diminuição da força de protensão acontece devido as perdas por atrito entre o cabo de protensão e a bainha devido a curvatura intencional e a curvatura não intencional, também chamada de ondulação parasita. A curvatura intencional refere-se ao perfil de projeto do cabo propriamente dito, mas a ondulação parasita sucede-se dos desvios construtivos entre o perfil de projeto e o perfil de execução, dependente da qualidade do processo de montagem. Segundo NAWY (2009) a perda por acomodação da ancoragem surge pela redução da força de protensão quando ocorre a transferência da força do aparelho tensor hidráulico para o dispositivo de ancoragem (placa de ancoragem / bloco de ancoragem). Uma parcela do alongamento do cabo obtido se perde devido à própria operação de ancoragem, a qual geralmente se dá acompanhada pela etapa de cravação

definitiva das cunhas em sistemas de pós-tração. De um modo geral, a perda por acomodação depende do dispositivo de ancoragem previsto em projeto sendo assim a normativa ACI PRC 423.10R (2016) faz um alerta para os valores típicos na acomodação de ancoragem. Quando o tensor hidráulico (macaco hidráulico) apresentar o sistema automático de cravação (power seating) valores de 6.35mm podem ser encontrados para a acomodação da ancoragem, no entanto quando o aparelho não possuir esse dispositivo os valores podem chegar a 19mm. Outro aspecto importante relaciona-se com a qualidade de montagem do dispositivo de ancoragem no elemento estrutural e da perpendicularidade ou não do tensor hidráulico nessa operação, ou seja, depende da qualificação da mão de obra envolvida. De acordo com LIBBY (1977) quando aplicada à protensão ocorre o encurtamento elástico do concreto resultando em encurtamento igual e simultâneo no aço de protensão. Durante a transferência da protensão, o aço de protensão encurta e o concreto circundante se comprime até que seja atingido equilíbrio nas deformações, consequentemente existe a diminuição da deformação no aço de protensão acompanhada da redução na força do cabo. A perda por encurtamento elástico do concreto de um elemento com pós-tração aderente e não aderente depende da sequência de operações de protensão e ao promover o estiramento do primeiro cabo de protensão com o tensor hidráulico apoiado contra a extremidade ativa do elemento estrutural, o concreto sofre encurtamento elástico imediato. Elementos protendidos com apenas um cabo faz-se a protensão em operação única envolvendo todas as cordoalhas, as quais todas se ancoram ao mesmo tempo sendo assim para esses casos não existe perda por encurtamento elástico do concreto a considerar. Todo esse esforço para calcular as perdas imediatas deve ser levado em conta como uma estimativa no âmbito de que perdas reais podem ser maiores ou menores do que o valor calculado. Destaca-se também a importância de uma boa aferição dos modelos para as perdas imediatas, uma vez que através desse procedimento pode-se conhecer a intensidade da força no ato de protensão (P_0) indispensável para verificação do estado limite último no ato de protensão (ELU-ATO) de acordo com a referência ABNT NBR 6118 (2023).

Metodologia

Avaliar adequadamente as perdas imediatas tornou-se um desafio em projeto, talvez não pelo sistema construtivo de elementos pré ou pós-tracionados, mas sim em ponderar os inúmeros critérios que de certa maneira podem afetar a precisão e qualidade exigida pela obra. Diante disso esse artigo discute as considerações recomendadas das normativas ABNT NBR 6118 (2023) e ACI PRC 423.10R (2016) bem como do software MIDAS CIVIL 20

19 levando em conta aspectos teóricos como também a apresentação de um exemplo numérico com o intuito de destacar as diferenças e metodologias consideradas.

Perda por atrito

A ABNT NBR 6118 (2023) permite avaliar as perdas imediatas para o sistema de pós-tração através das seguintes previsões: encurtamento elástico do concreto, atrito entre as armaduras e as bainhas ou o concreto, deslizamento da armadura junto à ancoragem e à acomodação dos dispositivos de ancoragem. A medida que um cabo mantido inicialmente curvo for tensionado, este tende a retificar e exerce pressão radial contra o duto ou a bainha promovendo resultantes de força tanto na direção radial quanto na direção tangencial da curva. A partir de um trecho de comprimento elementar torna-se razoável supor que as resultantes de força nas direções radial e tangencial à curva sejam N e F_{atr} , tal como esquematizado na figura 1a, assumindo simetria na direção de forças no cabo e desvio angular elementar, o equilíbrio estático das resultantes pode ser esquematizado de modo mais detalhado tal como apresentado na figura 1b, ALBINO e MIGLIORE JUNIOR (2021).

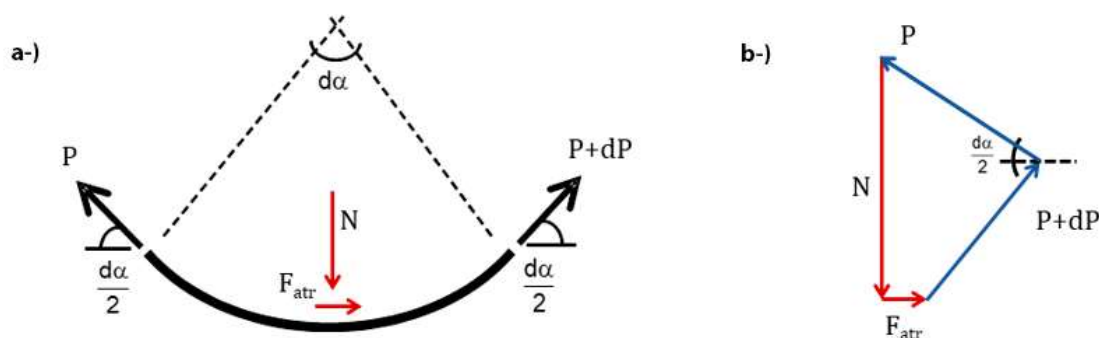


Figura 1 –a-) Resultantes de força dos efeitos radiais e no cabo e b-) Detalhamento do equilíbrio estático de forças resultantes.

Na prática, a trajetória curva de um cabo de protensão com mudança de direção entre duas posições A e B apresentam desvios construtivos entre o perfil previsto em projeto e a trajetória efetivamente construída, resultando em ondulações adicionais não intencionais ou parasitas. A materialização dessa trajetória em campo obriga conhecer e reproduzir as posições do cabo em espaçamentos curtos, tomando como referência o eixo do cabo. No entanto, a precisão da montagem depende fundamentalmente da qualidade de mão de obra envolvida bem como da utilização de espaçadores suficientemente próximos para garantia da posição. Como resultado, a montagem em campo gera um perfil de execução ligeiramente diferente do projetado. A figura 2 ilustra a situação de perfil de projeto com uma hipotética trajetória curva de cabo, adaptado de AALAMI (2014).

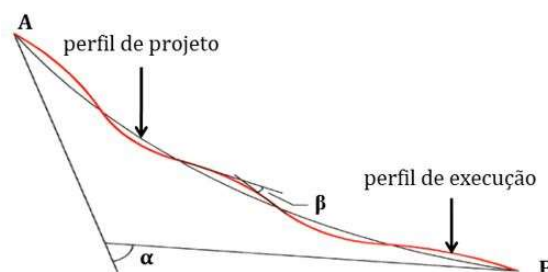


Figura 2 –Desvios construtivos entre o perfil de projeto de cabo de protensão e o perfil de execução com ondulações adicionais ou parasitas

A força no cabo de protensão em uma posição X ao longo do elemento estrutural levando em conta a perda por atrito pode ser calculada de acordo com a equação (1).

$$P_x = P_i \exp^{(-u \sum \alpha - kx)} \quad (1)$$

Onde:

P_i = Força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração em kN

x = Abscissa do ponto onde se calcula o P_x , medida a partir da ancoragem, expressa em metros (m)

$\sum \alpha$ = Soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa x , expressa em radianos (rad)

μ = Coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha em 1/ radianos

k = Coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo. Na falta de dados experimentais, pode ser adotado o valor de $0,01 \mu$ (1/m)

Vale ressaltar que a equação (1) pertence a uma nomenclatura universal que leva em conta essa hipótese ou seja diversas normativas, manuais técnicos e pesquisadores a utilizam contudo os valores adotados para o coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha e o coeficiente de perda provocada por curvaturas não intencionais do cabo apresentam uma faixa de valores. A recomendação de tais valores pode ser consultada em uma série de bibliografias tais como: KELLEY (2000), ABNT NBR 6118 (2023), ACI PRC 423.10R (2016).

Perda por acomodação da ancoragem

Segundo NAWY (2009) a perda por acomodação de ancoragem constitui-se na redução da força de protensão na transferência do aparelho tensor hidráulico para o dispositivo de ancoragem (placa e/ou bloco de ancoragem), pois uma parcela do alongamento do cabo obtido se perde devido à própria operação de ancoragem, geralmente acompanhada pela etapa de cravação definitiva de cunhas em sistemas de pós-tração e na cravação provisória no sistema de pré-tração. No caso específico da pré-tração, a perda mantém-se constante ao longo de todo o cabo e, no caso da pós-tração, a perda passa a ser variável ao longo da trajetória do cabo. A ABNT NBR 6118 (2023) recomenda que a perda por acomodação seja determinada experimentalmente conforme o sistema construtivo ou avaliada, para efeito de projeto, adotando valores indicados pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragem. MIGLIORE JUNIOR (2017) apresenta alguns detalhes para avaliação de perda por acomodação com coeficientes práticos e simplificados para avaliação da perda média. Adicionalmente, devem ser ressaltadas as observações de PFEIL (1991) referentes a algumas situações construtivas especiais de pós-tração com possível perda nula na ancoragem. De modo geral, a acomodação depende do dispositivo de ancoragem previsto em projeto e do diâmetro, número e disposição de

fiões e de cordoalhas. Outro aspecto importante está relacionado à qualidade de montagem do dispositivo de ancoragem no elemento estrutural e da perpendicularidade ou não do tensor hidráulico nessa operação, ou seja, também depende da qualificação da mão de obra envolvida. Valores usuais recomendados em projeto para acomodação de ancoragem (ω) podem ser consultados em ALBINO e MIGLIORE JUNIOR (2021), no entanto o valor inicial de 6mm pode ser tornar uma boa referência. A perda de protensão por acomodação ou escorregamento de ancoragem na pós-tração deve considerar a quantidade de energia de deformação total perdida (Ω) no trabalho realizado pela força de protensão quando da acomodação de ancoragem (ω). Tal energia de deformação perdida em certo comprimento pode ser avaliada através da equação (2).

$$\Omega = E_p * A_p * \omega \quad (2)$$

Onde:

E_p = Módulo de elasticidade do aço de armadura ativa em kN/m²

A_p = Área da seção transversal do cabo resultante em m²

ω = Acomodação da ancoragem em m

A figura 3a ilustra trecho do gráfico de força de protensão após a perda por acomodação de ancoragem ativa no ponto notável de extremidade (A). Admitindo variação linear da força de protensão em segmento de curvatura constante, a distância (s) entre a extremidade ativa e essa posição intermediária chama-se comprimento de bloqueio, na qual interessa conhecer a referida posição no intuito de avaliar a força residual em todas as posições longitudinais de um cabo. Como a perda por atrito no comprimento de bloqueio segue variação aproximadamente linear e de mesma declividade absoluta daquela correspondente à perda por atrito, a força de protensão (P_A) na extremidade ativa (A) deve ser reduzida para o valor P_{As} . LIBBY (1977), PELLEGRINO NETO & CARDOSO (2015) utilizam apenas a declividade do diagrama de força de protensão entre a posição de ancoragem e o ponto notável na extremidade de um segmento possível de conter a posição de bloqueio, mesmo para trajetórias complexas do cabo de protensão. Como os perfis reais de cabos de protensão contém diversos segmentos de retas e de semi parábolas, a situação geral e real dificulta a obtenção de relação algébrica única para determinar a posição de bloqueio. Atendendo a estas condições, MIGLIORE JUNIOR (2021a,b) apresenta um processo numérico descrito com utilização de uma função de aproximação não linear retratado na equação (3) e na figura 3b. De acordo com MIDAS/Civil (2019) o software também considera uma distribuição não linear de força para calcular a perda de protensão por acomodação da ancoragem.

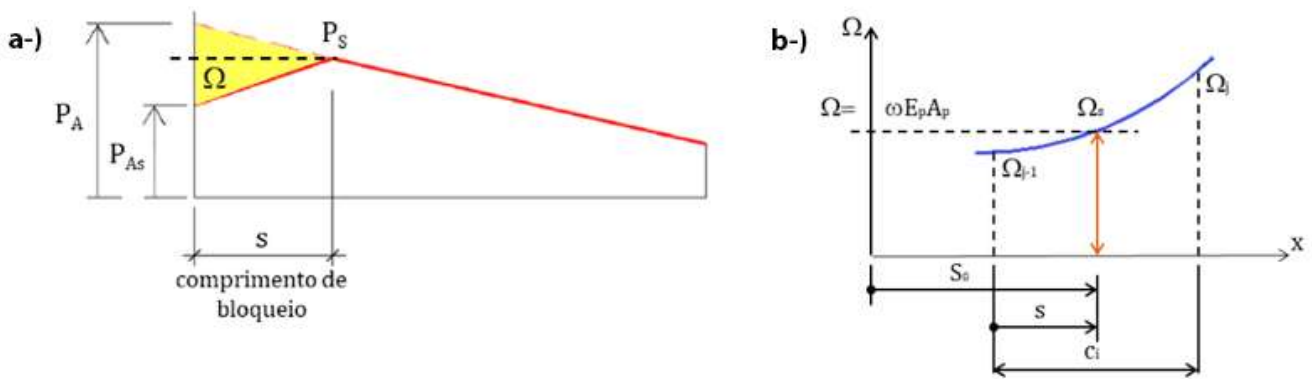


Figura 3 –a-) Gráfico da força de protensão após perda por acomodação da ancoragem. b-) Variação da energia de deformação e notação para obtenção da posição relativa de bloqueio ξ_s .

$$\xi_s = \frac{s}{c_i} = \frac{\sqrt{\Omega} - \sqrt{\Omega_j - 1}}{\sqrt{\Omega_j} - \sqrt{\Omega_j - 1}} \quad (3)$$

Onde:

Ω_j = Área do gráfico até a extremidade do segmento considerado

Ω_{j-1} = Área do gráfico até a extremidade do segmento anterior

Ω = Área do gráfico da energia de deformação total perdida

Para casos usuais de cabo curto (pós-tração aderente), de cabo com pouco atrito (pós-tração não aderente) ou de cabo com simetria de ancoragens ativas nas duas extremidades, existe a possibilidade que a posição de bloqueio não seja encontrada apenas com a equação (3). Esse caso pode ser observado na figura 4 para cabo simétrico na posição central (C) na qual para se atingir a energia de deformação exige-se uma área adicional ($\Delta\Omega$). A forma geométrica da área adicional no gráfico de força de protensão constitui-se de uma figura composta por segmentos de paralelogramo e determinada pela equação (4).

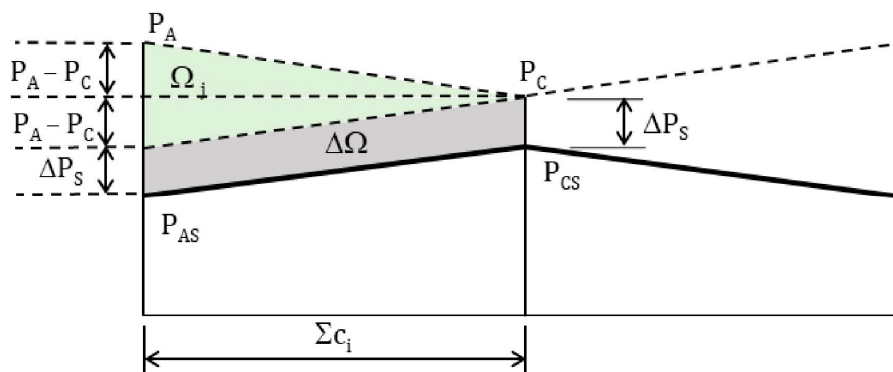


Figura 4 –Avaliação da área adicional quando a posição de bloqueio ultrapassa o meio do vão de elemento simétrico

Conhecida a área adicional ($\Delta\Omega$) as forças residuais em todos os pontos notáveis devem ser reduzidas da quantidade (ΔP_s), conforme equação (4) independentemente do número de segmentos de cabo em razão do espelhamento do gráfico de força de protensão de modo que c_i pode ser definida como a projeção na horizontal de cada segmento de cabo curvo ou linear.

$$\Delta P_s = \frac{\Omega - \Omega_j}{\sum c_i} \quad (4)$$

Onde:

Ω_j = Área do gráfico até a extremidade do segmento considerado

Ω = Área do gráfico da energia de deformação total perdida

Σc_i = Somatória da projeção horizontal dos segmentos

Perda por encurtamento elástico do concreto

Segundo LIBBY (1977) quando aplicada a protensão ocorre encurtamento elástico do concreto resultando em encurtamento igual e simultâneo no aço de protensão, fato importante para a avaliação de tensões elásticas no concreto e no aço de protensão imediatamente após a transferência da força. As tensões no concreto devem respeitar limites pré-estabelecidos nas normativas vigentes para garantir o comportamento elástico em serviço, evitando deformações de encurtamento próximas à plastificação. Outro aspecto está relacionado com a resposta ao longo do tempo do concreto na fluência, a qual advém diretamente do encurtamento elástico inicial. Durante a transferência da protensão, o aço de protensão encurta e o concreto circundante é comprimido até que seja atingido equilíbrio nas deformações. Consequentemente, a diminuição da deformação no aço de protensão acompanha redução na força do cabo, lembrando também que existem critérios a serem considerados para elementos protendidos pré e pós-traçados. Segundo a ABNT NBR 6118 (2023) nos elementos estruturais com pós-tração, a protensão sucessiva de cada um dos (n) grupos de cabos protendidos simultaneamente provocam uma deformação imediata do concreto e consequentemente, afrouxamento dos cabos anteriormente protendidos. Assim a referida normativa apresenta a equação (5) para o cálculo da perda média de protensão por cabo, porém vale ressaltar que a formulação das perdas por encurtamento elástico do concreto pode apresentar variações de acordo com pesquisadores e normativas. Através de MIDAS/Civil (2019) o software também considera a perda por encurtamento elástico do concreto, no entanto, torna-se necessário aplicar os parâmetros de construção em estágios na modelagem a fim de que se possa obter os efeitos da protensão de um cabo sobre o outro.

$$\Delta\sigma_p = \alpha_p(t) * \left(\frac{n-1}{2n}\right) * \sigma_{c,p0g} \quad (5)$$

Onde:

$\alpha_p(t)$ = Relação entre o módulo de elasticidade da armadura ativa e o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto para idades inferiores a 28 dias

n = Grupos de cabos de protensão

$\sigma_{c,p0g}$ = Tensão no concreto adjacente ao cabo resultante

Além da normativa brasileira outras duas abordagens foram propostas para o encurtamento elástico: a primeira levando em consideração os critérios da ACI PRC 423.10R (2016) e a segunda os de ZIA et al. (1979) e após uma análise pode-se notar ligeira divergência entre os critérios sugeridos. Sendo assim para elucidar tais diferenças pode-se consultar as equações 6 e 7, que representam os documentos respectivamente citados.

$$\Delta f_{pES} = K_{es} * E_p * \frac{f_{cpa}}{E_{ci}} \quad (6)$$

Onde:

K_{es} = Valor relacionado ao tensionamento e tipo de estrutura, que pode variar de 0 a 0,5 para elementos pós-traçados.

E_p = Módulo de elasticidade do aço de armadura ativa

f_{cpa} = Tensão média de compressão do concreto no centro de gravidade dos cabos imediatamente depois do tensionamento ser aplicado

E_{ci} = Módulo de elasticidade do concreto no ato de protensão

$$ES = K_{es} * E_s * \frac{f_{cir}}{E_{ci}} \quad (7)$$

Onde:

K_{es} = Valor relacionado ao tensionamento e tipo de estrutura, que pode variar de 0 a 0,5 para elementos pós-traçados.

E_s = Módulo de elasticidade do aço de armadura ativa

$f_{cir} = k_{cir} * f_{cpi} - f_g$

$k_{cir} = 1$ para pós-tração

f_{cpi} = Tensão no concreto no centro de gravidade dos cabos no ato de protensão

f_g = Tensão no concreto no centro de gravidade dos cabos devido ao peso próprio da estrutura

E_{ci} = Módulo de elasticidade do concreto no ato de protensão

Análise numérica e resultados

A análise numérica foi desenvolvida através de uma viga isostática com 24 metros de vão com 3 cabos parabólicos, sendo cada cabo composto por 8 cordoalhas de diâmetro de 15,2 mm de aço CP-190 RB utilizando o sistema de pós-tração aderente. A avaliação das perdas imediatas de protensão foram efetuadas admitindo a execução da protensão após 30 dias da data de concretagem e que os cabos foram estirados a partir dos dois lados da peça e sequencialmente. Os dados iniciais foram: Força Inicial (P_i) = 1500 kN/cabo, Coeficiente de atrito (cordoalha – bainha) = 0,20 rad⁻¹, atrito devido à ondulação parasita = 1% rad/m e acomodação da ancoragem = 6 mm. A figura 5 representa a geometria da seção transversal típica e a posição dos cabos na seção meio do vão. Os dados utilizados foram baseados em um problema típico de obras de arte especial rodoviária em que a concretagem da viga protendida ocorre no canteiro de obras para solidarização da mesa adicional posterior à montagem sobre vigas travessas de apoio no local definitivo da obra.

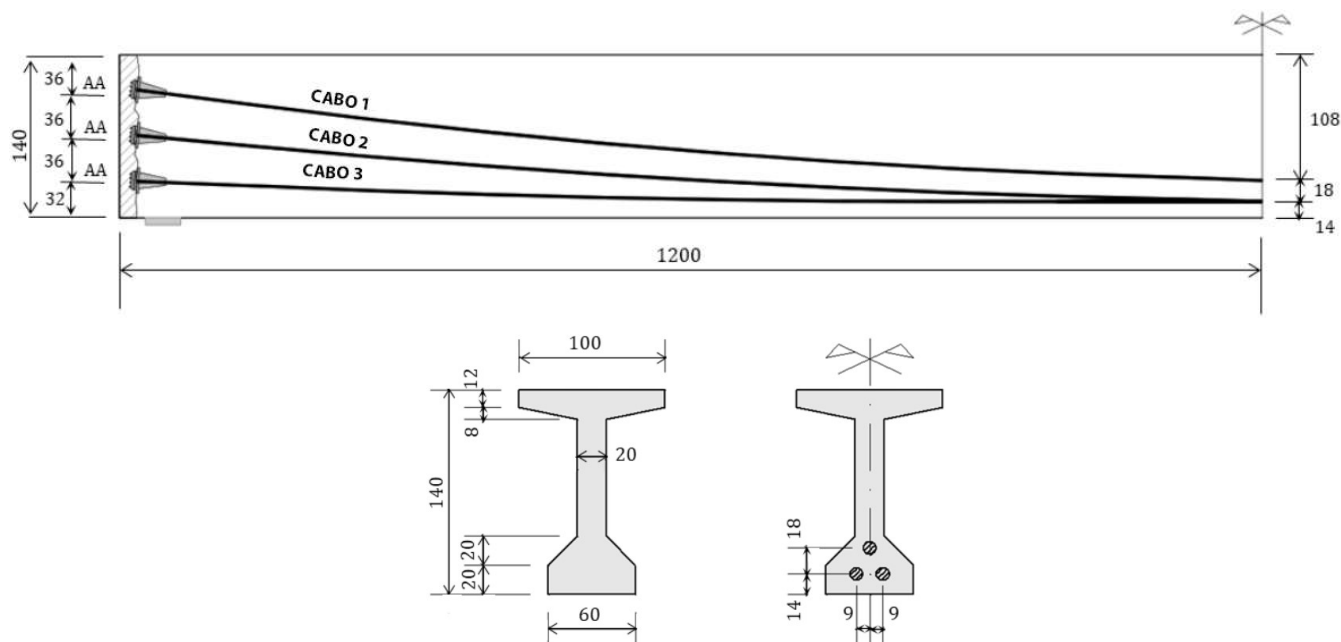


Figura 5 –Geometria da seção transversal típica e a posição dos cabos na seção meio do vão com unidades em centímetros (cm).

Com relação a análise numérica escolheu-se a versão MidasCivil 2019 baseada no método dos elementos finitos na qual executou-se a modelagem de duas vigas, sendo que na primeira viga os cabos foram posicionados isoladamente e a segunda viga utilizou-se o recurso do cabo resultante, conforme ilustrado na figura 6a e 6b, respectivamente. Nessa primeira modelagem o objetivo foi analisar o quão discrepante os resultados poderiam ser levando em conta a força de protensão após as perdas por atrito e também na acomodação da ancoragem, em que os resultados obtidos podem ser observados na tabela 1, nas figuras 7a e 7b. Desse modo pode-se verificar que os resultados encontrados com a utilização do cabo resultante foram muito próximos aqueles dos cabos isolados corroborando para utilização dessa técnica. No entanto torna-se necessário ressaltar que o encurtamento elástico do concreto no modelo de cabo resultante no MidasCivil 2019 apresenta efeito nulo, pois para que haja encurtamento elástico do concreto os cabos devem ser tensionados sequencialmente e no caso do cabo resultante isso não ocorre pois trata-se de um cabo único. Sendo assim para solucionar essa questão e encontrar os valores do encurtamento elástico no modelo do MidasCivil 2019 empregou-se uma sequência de protensão em que o primeiro tensionamento ocorreu no cabo 2 (dois), posteriormente no cabo 3 (três) e por último o cabo 1 (hum). Já no cálculo manual pode-se utilizar o modelo de cabo resultante para encontrar o valor do encurtamento elástico do concreto uma vez que assume-se os critérios do número de cabos e obviamente somente uma posição.

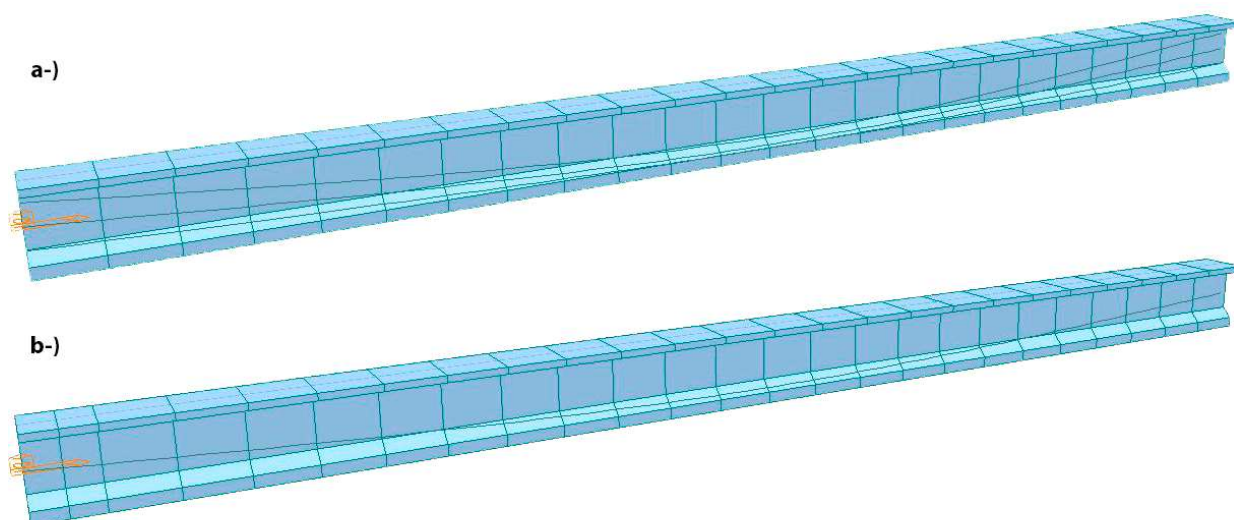


Figura 6 –Modelagem da viga utilizando cabos isolados (6a) e o cabo resultante (6b)

Tabela 1 – Força de protensão no MidasCivil 2019: cabos isolados x cabo resultante

Distância da borda esquerda ou direita (m)	Força de protensão após perdas atrito (kN) Cabos Isolados	Força de protensão após perdas atrito (kN) Cabo Resultante	Força de protensão após perdas por acomodação ancoragem (kN) Cabos Isolados	Força de protensão após perdas por acomodação ancoragem (kN) Cabo Resultante
0,00	4500,00	4500,00	4017,36	4017,92
6,00	4431,30	4431,57	4086,05	4086,35
12,00	4336,22	4337,15	4181,14	4180,77
18,00	4431,30	4431,57	4086,05	4086,35
24,00	4500,00	4500,00	4017,36	4017,92

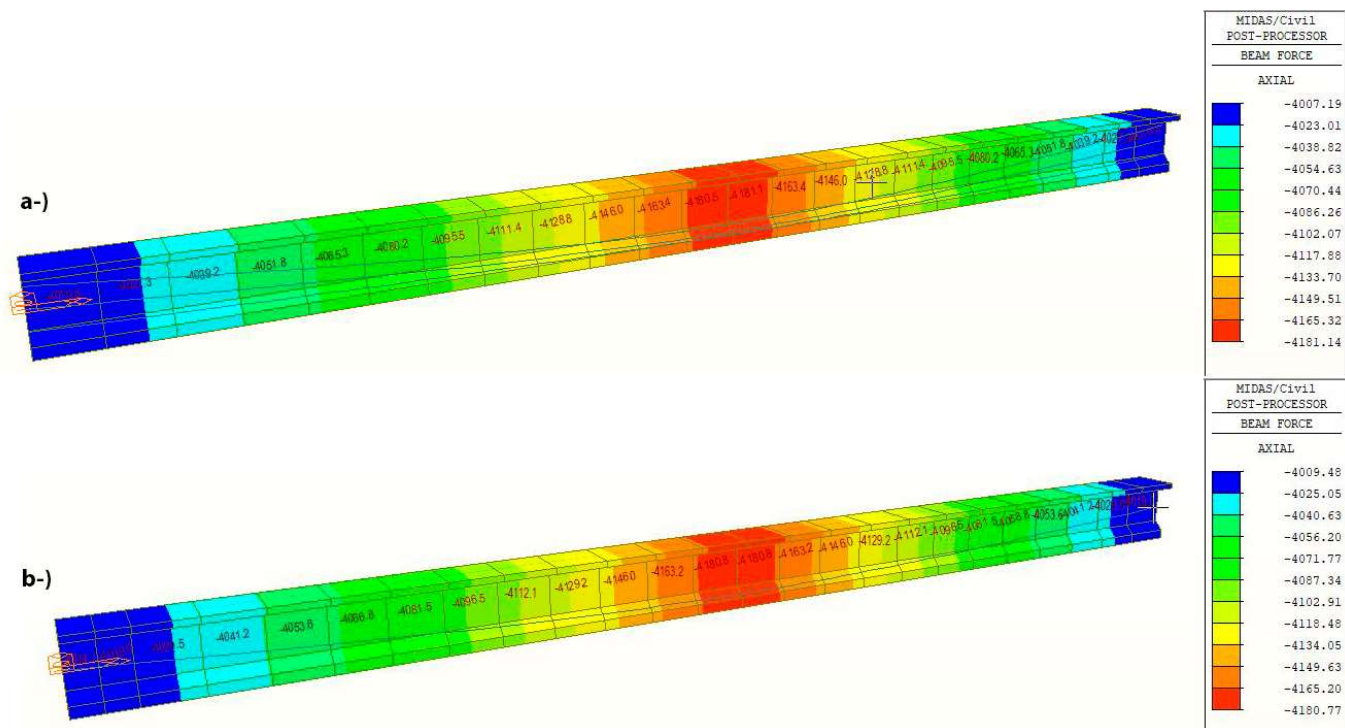


Figura 7 –Forças axiais obtidas pelo MidasCivil 2019 considerando as perdas por atrito e acomodação da ancoragem através dos cabos isolados (7a) e o cabo resultante (7b).

A figura 8 apresenta uma série de resultados obtidos para as perdas imediatas levando em consideração o cálculo manual x software MidasCivil 2019 em que pode-se constatar:

- Com relação as perdas por atrito o cálculo manual levou em conta as premissas do cabo resultante e o software MidasCivil 2019 a condição de cabos isolados sendo que esse último apresentou uma diferença de 0,43% maior em relação ao cálculo manual na posição meio do vão.
- Na análise das perdas por atrito juntamente com as perdas por acomodação da ancoragem evidenciou-se que a modelagem no MidasCivil 2019 mostrou uma variação de 0,59% maior no meio do vão e 1,07% maior nas extremidades em referência ao cálculo manual.
- No que concerne ao cálculo das perdas imediatas, ou seja, fazendo a somatória das perdas por atrito, das perdas por acomodação da ancoragem e das perdas por encurtamento elástico foram consideradas quatro possibilidades: a primeira usou-se os critérios da ABNT NBR 6118 (2023), a segunda os parâmetros propostos por ZIA et al. (1979), a terceira os parâmetros da ACI PRC 423.10R (2016) e por fim os valores obtidos no MidasCivil 2019. Analisando a força de protensão no cabo no meio do vão constatou-se que a modelagem no MidasCivil foi 0,81% maior em relação aos valores encontrados na ABNT NBR 6118 (2023), 2,00% maior em comparação a ZIA et al. (1979) e 3,08% maiores que na ACI PRC 423.10R (2016). Tomando como referência os valores da força de protensão no cabo nas extremidades verificou-se que os valores no MidasCivil 2019 foram 1,59% maior em relação a ABNT NBR 6118 (2023) e 2,32% maiores para ZIA et al. (1979) e ACI PRC 423.10R (2016).

Diagrama Perdas Imediatas - Ativo - Ativo

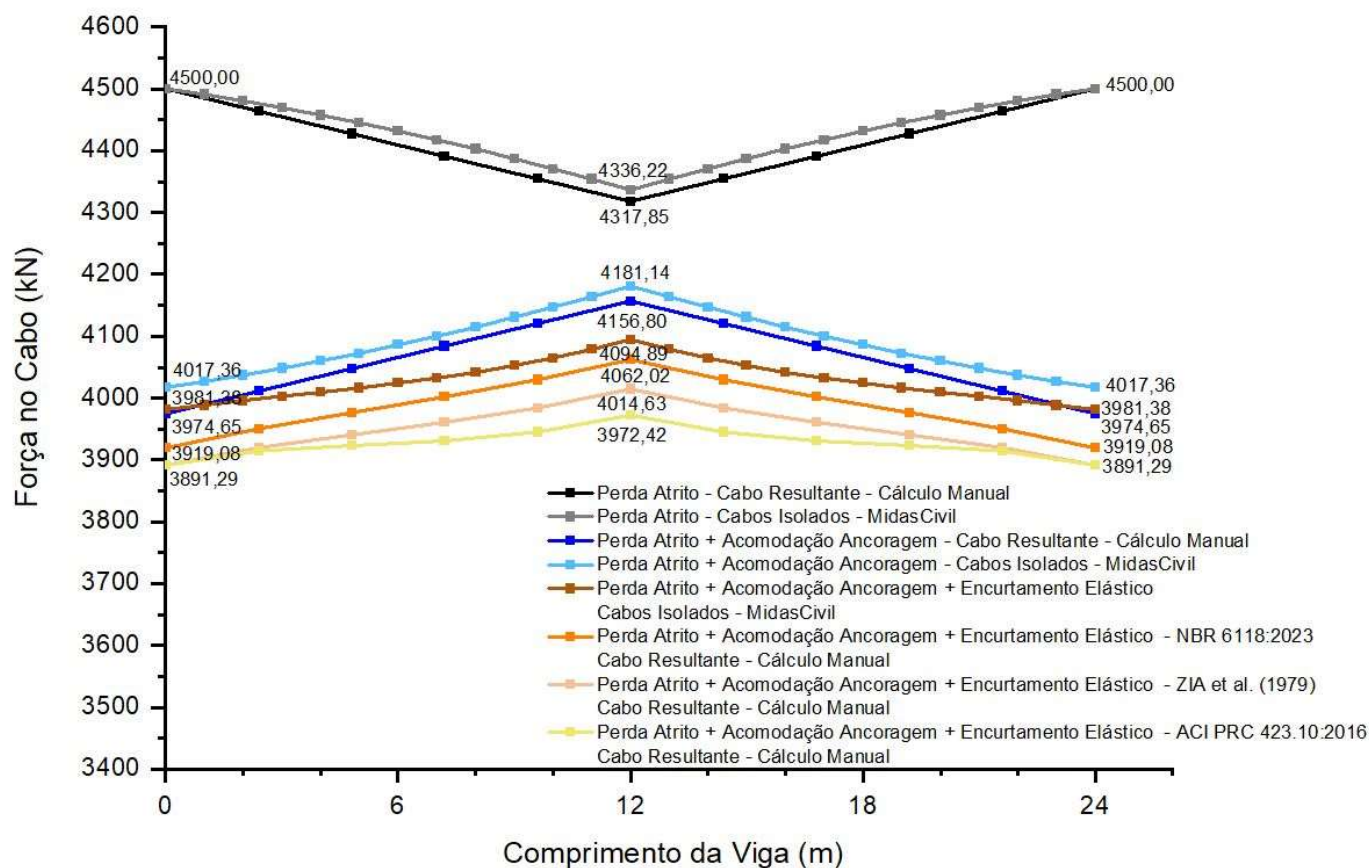


Figura 8 –Gráfico da força de protensão provenientes das perdas por atrito, acomodação da ancoragem e encurtamento elástico.

Conclusões

A avaliação das perdas imediatas torna-se uma ação de extrema importância no intuito de verificar a aferição dos modelos em relação as perdas reais em campo com a obtenção da força no ato de protensão (P_0), indispensável para verificação do ELU-ATO.

Através da análise dos resultados apresentadas neste artigo pode-se concluir que:

- Considerando a utilização do software MidasCivil 2019 para verificação das perdas por atrito e acomodação da ancoragem através dos critérios de cabos isolados e de cabo resultante pode-se constatar que os valores encontrados foram praticamente idênticos demonstrando que o modelo de cabo resultante pode ser utilizado sem ressalvas para esse projeto em específico.
- Embora o modelo de cabo resultante no software MidasCivil 2019 tenha apresentado excelente resultado o mesmo não foi utilizado para se obter os valores das perdas por encurtamento elástico pois para que haja encurtamento elástico do concreto os cabos devem ser tensionados sequencialmente e no caso do cabo resultante isso não ocorre pois trata-se de um cabo único.
- As perdas por atrito encontradas no cálculo manual através do cabo resultante e no software MidasCivil 2019 por meio dos cabos isolados foram concordantes validando ambas metodologias.
- A força de protensão no cabo após as perdas por atrito e as perdas por acomodação de ancoragem mostraram uma diferença máxima de 1,07% levando em conta o cálculo manual x MidasCivil 2019 indicando congruência de ambos os modelos.
- Foram estudados 4 (quatro) modelos para as perdas imediatas na qual a diferença máxima da força de protensão no cabo foi de 3,08% o que definitivamente pode-se considerar algo singular de modo positivo, visto que cada modelo possui critérios intrínsecos.
- Por fim, conclui-se que os valores das perdas imediatas foram aceitáveis para todos os métodos, mas a escolha do procedimento deve estar comprometida com o comportamento mais realístico do elemento estrutural em questão.

Agradecimentos

Os autores agradecem toda comunidade da protensão, em especial o INAE- Instituto Nacional de Estruturas Protendidas e o INAE-TECH Centro de Pesquisa em Protensão pela divulgação responsável e fomento de pesquisas envolvendo o concreto protendido.

Referências

- AALAMI, B. O. Post-tensioned buildings: Design and construction. Palo Alto: PT-Structures, 396pp. International Edition, 2014.
- ALBINO, F.S.; MIGLIORE JUNIOR, A.R. Alterações da ABNT NBR 6118:2023 para Análise e Projeto de Estruturas de Concreto Protendido. 65º CBC – Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió – Alagoas-AL, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, ISSN 2175-8182, 2024.
- ALBINO, F.S.; MIGLIORE JUNIOR, A.R. Avaliação Prática de Perdas de Protensão, Edição do Autor, 159 p, ISBN 978-85-471-0447-4, São Paulo, 2021.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI PRC-423.10R-16 – Guide to Estimating Prestress Loss, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto, 2023.
- KELLEY, G. S. Prestress losses in post-tensioned structures. PTI Technical Notes, Phoenix, September, 2000.
- LIBBY, J. R. Modern prestressed concrete. Design principles and construction methods. 2nd. ed. San Diego: [s.n.], 1977.
- MIDAS/Civil Manual Interno de Consulta ao Software Midas Civil, 2019
- MIGLIORE JUNIOR, A. R. Avaliação numérica da perda por acomodação de ancoragem na pós-tração. CONCRETO & CONSTRUÇÃO, São Paulo, v. XLVIII, n. 101, p. 61-67, ISSN 1809-7197, 2021a
- MIGLIORE JUNIOR, A. R. Avaliação sobre perda de protensão. Revista Estrutura, n. 10, p. 71-75, 2021b.
- MIGLIORE JUNIOR, A. R. Notas de aula sobre perdas de protensão. Florianópolis: Instituto IDD, Pós-graduação em estruturas protendidas, 2017.
- NAWY, E. G. Prestressed concrete: a fundamental approach. 5a. ed. Upper Sadle River: Prentice Hall, 949 p, 2009.
- PELLEGRINO NETO, J.; CARDOSO, S. D. Exemplo de uma viga isostática protendida. In: BUENO, S.; KIMURA, A. (coord). ABNT NBR 6118:2014 Comentários e exemplos de aplicação. São Paulo: Ibracon, 2015.
- PFEIL, W. Concreto protendido. 3a. ed. Rio de Janeiro: Científica, 465 p, 1991.
- ZIA, P.; KENT, P.H.; SCOTT, N.L.; WORKMAN, E.B. Estimating prestress losses. ACI Committee 423 Report. Concrete International, Farmington Hills, v. 1, n. 6, p. 32-38, June 1979.