

# Avaliação dos Parâmetros que Influenciam a Confiabilidade de Vigas Pré-Fabricadas Protendidas: Teoria Versus Prática

Natália Lo Tierzo<sup>1</sup>

Fabio Albino Souza<sup>2</sup>

Maria Cecilia Amorim Teixeira da Silva<sup>3</sup>

## Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar uma análise comparativa entre valores teóricos e experimentais dos fatores que influem na análise de confiabilidade de vigas pré-fabricadas de concreto protendido submetidas à flexão. A abordagem teórica, extraída da literatura corrente, estabelece como são tratadas as principais variáveis consideradas como aleatórias e os parâmetros a elas associados. Os valores experimentais foram obtidos a partir do acompanhamento da produção de vigas em uma indústria de pré-fabricados. Foram considerados como principais parâmetros que influenciam a confiabilidade estrutural das vigas à flexão as dimensões da peça, as resistências dos materiais e a força de protensão aplicada. A partir dos valores coletados foi possível verificar que teoria e prática se alinham quando parâmetros geométricos e aqueles referentes às resistências dos materiais são analisados. Verificou-se, entretanto, que a aplicação da força de protensão na viga foi o ponto crítico da análise, com difícil mensuração das perdas de protensão devido ao grande número de incertezas vinculadas a esse processo. A análise comparativa entre os parâmetros teóricos e experimentais da perda da força de protensão foi inconclusiva, mostrando ser necessário um aprimoramento no tratamento desse parâmetro para que seja possível se obter resultados mais representativos.

**Palavras-chave:** concreto protendido, confiabilidade, viga pré-fabricada.

## 1 Introdução

Uma estrutura executada em concreto pré-fabricado é aquela em que os elementos estruturais, são moldados e adquirem certo grau de resistência, antes do seu posicionamento definitivo na estrutura. Sua produção é feita em fábricas, havendo uma completa industrialização da construção, com o emprego de forma racional e mecanizada dos materiais, dos meios de transporte e das técnicas construtivas para se conseguir uma maior produtividade, diferentemente das estruturas moldadas *in loco*, que têm um processo artesanal de produção. Esta industrialização do processo construtivo faz com que as estruturas pré-moldadas sejam mais eficientes e econômicas, garantindo a padronização das peças e qualidade da produção. Quando se junta o processo de pré-fabricação com a protensão os resultados são peças ainda mais eficientes, aliando as vantagens do concreto protendido, que seriam peças mais esbeltas que resistem a grandes cargas com as

vantagem da industrialização dos pré-fabricados, que minimizam os erros nas obras.

Quando se trata de estruturas pré-fabricadas e protendidas o sistema construtivo mais utilizado é a pré-tração com aderência inicial, trazendo como vantagem a produção em grande escala em pistas de protensão e evitando o desperdício de materiais.

Apesar do maior controle de qualidade das estruturas pré-fabricadas, existem ainda as incertezas geradas pela aleatoriedade de alguns parâmetros que podem fazer com que haja variações na segurança estrutural. A aplicação de técnicas de confiabilidade na avaliação da segurança estrutural leva a resultados mais realísticos quanto à probabilidade de falha de uma estrutura. Avaliar os parâmetros que podem ser tratados como variáveis aleatórias e qual a sua influencia do desempenho da estrutura de concreto tem sido, estudo há alguns anos por diversos autores como Al-Harthi e Frangopol (1994), que estudaram os níveis de confiabilidade de elementos submetidos a solicitações

<sup>1</sup> UNICAMP, Campinas, Brasil, natalia.tierzo@gmail.com

<sup>2</sup> UNICAMP, Campinas, Brasil, Cecilia@fec.unicamp.br

<sup>3</sup> UNICAMP, Campinas, Brasil, fabio@selap.com.br

de flexão, considerando todos os parâmetros envolvidos como variáveis aleatórias. Real (2000) desenvolveu um modelo para análise probabilística de concreto armado sob estado plano de tensões, Nowak, *et al.* (2001), comparam os índices de confiabilidade de vigas pretendidas projetadas segundo os códigos Spanish Norma IAP-98 (1998), ENV 1991-3 Eurocode 1 (1994) e AASHTO LRFD (1998), Biondini *et al.* (2004) avaliaram a confiabilidade de estruturas de concreto armado e pretendido pelo Método de Monte Carlo, Agrawal e Bhattacharya (2010) apresentaram uma metodologia baseada em confiabilidade para obtenção de fatores de segurança parciais para vigas de concreto pretendido no estado limite último de flexão, Rocha (2014) analisou a confiabilidade de vigas portuárias de concreto pretendido em relação ao estado limite último de flexão de acordo com as prescrições da NBR 6118 (2014) e San Martins (2014) estudou a confiabilidade de vigas pré-tracionadas de concreto pretendido em relação ao estado limite último de flexão de acordo com as prescrições da NBR 6118 (2014) por meio do método FORM.

Com base nesses estudos, foi realizado um levantamento dos principais parâmetros de projeto que podem ser tratados como variáveis aleatórias no dimensionamento de vigas pré-fabricadas de concreto pretendido para verificar se a forma como estas variáveis aleatórias são tratadas refletem a realidade. Para isso, foi realizado o acompanhamento da produção de vigas de concreto pré-fabricadas pretendido em uma empresa de estruturas pré-fabricadas. Esse trabalho foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foi realizado um levantamento bibliográfico e identificação dos parâmetros que normalmente são considerados como variável aleatória no cálculo de confiabilidade de estruturas pré-fabricadas pretendidas. Após a obtenção desses dados a segunda etapa foi um estudo de caso em uma fábrica de estruturas pré-fabricadas de pequeno porte, e os parâmetros citados na literatura como variáveis aleatórias foram analisadas *in-loco*. Por fim, na terceira etapa, foi feita uma comparação dos dados teóricos com os dados encontrados na fábrica para averiguar se a variação dos parâmetros considerados como aleatórios referenciados na literatura estão de acordo com os aplicados nas fábricas.

Nessa análise foi possível verificar que ao se tratar de geometria e resistência dos materiais os dados levantados nos estudos teóricos estão de acordo com o encontrado na fábrica. Porém, ao se analisar a questão da perda da força de protensão das vigas de concreto na fábrica, verificou-se que existem muitos fatores que podem influenciar no resultado final, como o tipo de ancoragem, a aplicação da protensão pelo macaco hidráulico, o comprimento da viga, entre outros. Foi possível notar que a aplicação da força de protensão é

o ponto crítico na fábrica, produzindo o maior número de incertezas, o que influencia na confiabilidade destas vigas, por este motivo, não foi possível fazer uma relação direta com os valores adotados na literatura para a perda de protensão.

## 2 Parâmetros Teóricos para Avaliação de Confiabilidade de Vigas Pré-Fabricadas

No desenvolvimento dos projetos estruturais, a presença de incertezas são inevitáveis. Normalmente os dados existentes são incompletos ou insuficientes, engenheiros devem lidar cotidianamente com estimativas baseadas em modelos idealizados com algum grau de imperfeição relativo à realidade.

Quando se desenvolve um projeto as variáveis podem ser consideradas como determinísticas ou aleatórias. A consideração das variáveis como determinísticas nos levam a problemas mais simples, porém, com maiores incertezas, já a consideração das variáveis como aleatórias, geram problemas mais complexos, porém com maior confiabilidade. A determinação de quais variáveis serão consideradas como aleatórias e quais deverão ser consideradas como determinística vai depender do grau de segurança que se pretende atingir. Os problemas de confiabilidade podem ser tão complexos quanto necessário, de acordo com a consideração de como as variáveis se relacionam, podendo exigir grandes esforços computacionais.

O projeto de vigas de concreto pretendido com aderência inicial envolve um número relativamente grande de parâmetros, dessa forma, a consideração de todas as variáveis como aleatória tornaria a solução do problema inviável. Cabe ao projetista analisar quais os parâmetros que devem ser considerados aleatórios e quais devem ser considerados como determinístico. Essa não é uma tarefa tão intuitiva, sendo estudo de muitos pesquisadores a análise de como cada parâmetro pode influenciar no resultado final.

São abordadas quais são as variáveis aleatórias mais comumente empregadas no dimensionamento de vigas pretendidas com aderência inicial e como cada uma delas vem sendo abordada nos estudos de confiabilidade.

### 2.1 Resistência do Concreto

Os coeficientes de variação para a resistência à compressão do concreto dependem do grau de controle de qualidade em todas as fases da produção, na maioria das bibliografias, assume-se que este coeficiente pode variar entre 0,10, 0,15 e 0,20 se o controle de qualidade

for excelente, médio ou baixo respectivamente. No caso como a pré-tração é utilizada em vigas pré-fabricadas, produzidas em fábricas, onde se espera que haja um controle de qualidade alto, é possível adotar um coeficiente de variação para o concreto de 0,10.

Com o coeficiente de variação definido, é possível calcular a média e desvio padrão. O conceito de  $f_{ck}$  segue uma curva normal de distribuição e corresponde a uma porcentagem de 5% das amostras não atingirem a resistência estipulada, com isso, assume-se que.

$$f_{cm} = \frac{f_{ck,est}}{1 - 1,645 * CV} \quad (1)$$

$$\sigma_{fc} = CV \cdot f_{cm} \quad (2)$$

sendo

$f_{cm}$  – média da resistência à compressão;

$f_{ck,est}$  – resistência característica à compressão;

$CV$  – coeficiente de variação;

$\sigma_{fc}$  – desvio padrão.

## 2.2 Resistência do aço

Para os coeficientes de variação do aço, tanto para as armaduras ativa quanto para as passivas, é comum encontrar valores entre 0,10 e 0,05, valores menores do que o encontrado para o concreto devido ao maior controle e qualidade no processo de fabricação, o que resulta numa menor variabilidade das resistências.

Com o coeficiente de variação definido, é possível calcular a média e desvio padrão. O conceito de  $f_{yk}$  leva a uma porcentagem de 5% das amostras não atingirem a resistência estipulada e têm uma distribuição normal, assim como no concreto, assumindo as seguintes equações.

$$f_{ym} = \frac{f_{yk,est}}{1 - 1,645 * CV} \quad (3)$$

$$\sigma_{fy} = CV \cdot f_{cm} \quad (4)$$

sendo

$f_{ym}$  – média da resistência ao escoamento;

$f_{yk,est}$  – resistência característica;

$CV$  – coeficiente de variação;

$\sigma_{fy}$  – desvio padrão.

## 2.3 Características geométricas

As imperfeições das peças de concreto armado e protendido surgem por diversos fatores e em diferentes fases da construção, desde a montagem das formas até a concretagem e vibração do concreto. Quando se trabalha com peças de pré-fabricado essas variações são minimizadas, com o uso de formas metálicas e maior controle das concretagens, o que

garante uma menor variabilidade das dimensões.

Com relação ao posicionamento da armadura dentro das formas, nas estruturas pré-fabricação existe também um maior controle do cobrimento em relação ao concreto moldado *in-loco*. A montagem da armadura passiva é feita fora da estrutura para posteriormente ser introduzida na forma, já a armadura ativa é limitada pelas cabeceiras das pistas, garantido seu posicionamento adequado.

Para a geometria recomenda-se a utilização de distribuição de probabilidade normal.

### 2.3.1. Altura útil da armadura passiva ( $d_s$ )

Para a média da altura útil da armadura passiva  $\mu_{ds}$  adota-se o valor nominal  $d_{s,nom}$ , com coeficiente de variação  $CV_{ds}$  igual a 0,5  $cm/d_{s,nom}$ , já que segundo a NBR6118/14 quando há controle rigoroso de qualidade durante a execução é possível adotar uma variação do cobrimento de  $\Delta c=5$  mm

### 2.3.2. Altura útil da armadura ativa ( $d_p$ )

Para a média da altura útil da armadura ativa  $\mu_{dp}$  adota-se o valor nominal,  $dp_{nom}$ , com coeficiente de variação  $CV_{dp}$  igual a  $1cm/d_{s,nom}$ . Por ter maior responsabilidade no dimensionamento das vigas protendidas, considera-se para essa armadura a possibilidade de ter um desvio maior da sua posição de projeto devido a necessidade de retificação da posição do cabo que tem a tendência a formar uma catenária pelo grande vão que o mesmo deve vencer longitudinalmente sem apoios intermediários.

### 2.3.3 Dimensões da seção transversal

Para a média das dimensões da seção transversal se admite os valores nominais, com desvio padrão igual a 5 mm. Valores totalmente compatíveis quando se imagina que o controle de produção ganha com o uso de formas metálicas, diminuindo a possibilidade de variações das seções, como ocorre nas estruturas convencionais feitas com formas de madeira.

### 2.3.4. Área de aço

Para a área de aço muito autores consideram está variável determinística, pois normalmente já estão incorporadas nas estatísticas de tensão de escoamento do aço, as variações de sua seção transversal [7]

## 2.4 Fator de perda final de protensão

Segundo San Martin (2014) esta variável possui distribuição Normal com média  $\mu_{rf} = 0,8$  e coeficiente de variação adotado  $CV_{rf} = 0,025/\mu_{rf}$ . Esse fator de perdas influi no cálculo do momento resistente último na determinação da deformação prévia do cabo de protensão na ruptura.

## 2.5. Carregamentos

Para a análise dos carregamentos que atuam na estrutura os mesmos são separados em carregamentos permanentes e acidentais.

### 2.4.1. Carregamentos permanentes

Para o carregamento permanente, assume-se uma distribuição de probabilidades normal, com coeficiente seguintes de variação igual a 0,10 e média representada pelas expressões seguinte.

$$\mu_g = 1,05g_k \tag{5}$$

$$\sigma_g = \mu_g CV \tag{6}$$

onde:

$\mu_g$  – média da variável aleatória do carregamento permanente;

$g_k$  – valor do carregamento permanente sem majorações

$\sigma_g$  – desvio padrão da variável aleatória carregamento permanente;

$CV$  – coeficiente de variação.

### 2.4.2. Carregamento Acidental

Ellingwood *et al.* (1980) baseados em dados amostrais concluíram que o valor característico de carga variável acidental é igual à média dos valores máximos anuais para um período de 50 anos. Para o carregamento variável a distribuição de valores extremos do tipo I ou Gumbel é utilizada. A média  $\mu_q$  é tomada como o valor nominal  $q_k$  (valor de carregamento variável, sem ponderação de cálculo) e o coeficiente de variação  $CV$  é igual a 0,25, então.

$$\mu_q = 1,05q_k \tag{7}$$

$$\sigma_q = \mu_q CV \tag{8}$$

As principais variáveis que são tratadas como aleatórias foram apresentadas nesta seção. Vale lembrar que esses valores citados não são fixos e são parâmetros de constantes estudos, sendo apresentadas neste trabalho as considerações mais recorrentes nas literaturas. Outros fatores podem ser introduzidos nos estudos, como por exemplo, os fatores de correlação entre variáveis, que leva a análise para campos estocásticos, gerando um estudos mais elaborados. A complexidade do estudo está ligada a exigência de segurança solicitada pela estrutura.

## 3 Avaliação dos Parâmetros que Influenciam na Confiabilidade de Vigas Pré-Fabricadas Coletados em Campo

Na seção 2 foram descritas, resumidamente, algumas considerações teóricas sobre os parâmetros que devem ser levados em conta no cálculo de confiabilidade de estruturas pré-fabricadas em concreto protendido. Ressalta-se que muitas dessas considerações sobre as variabilidades dependem das condições impostas na obra.

Nesta seção serão apresentados os parâmetros de controle, montagem e execução de peças pré-fabricadas com o intuito de verificar se a teoria e a prática se alinham para garantir a eficiência dos modelos teóricos.

A fábrica visitada foi a Tulipa pré-moldados, localizada no estado de São Paulo, cidade de Holambra, com uma produção mensal aproximadamente de 400 m<sup>3</sup> mês de concreto, sua produção é focada principalmente em galpões industriais.

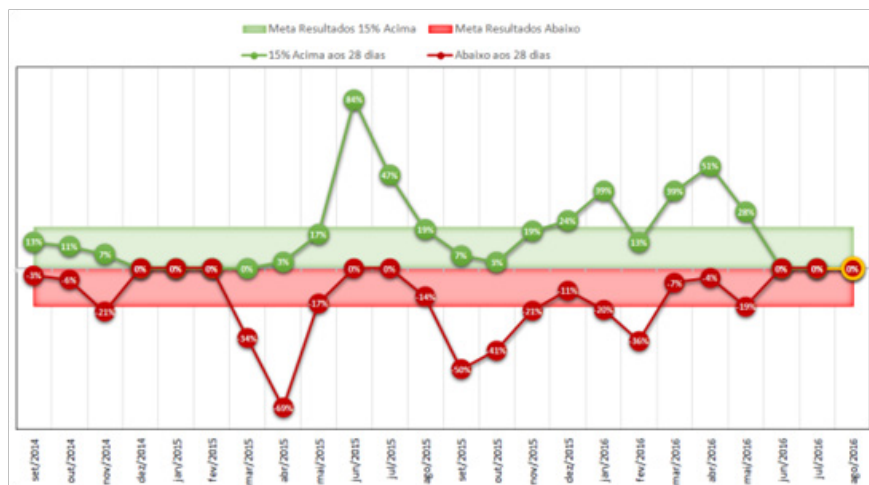


Figura 1 – Avaliação de indicadores de desempenho para concreto do ano 2014 à 2016.

### 3.1. Controle de qualidade do concreto.

A empresa tem uma usina interna e um laboratório onde são realizados os ensaios dos materiais e do concreto a fim de garantir a qualidade do concreto que é utilizado na fábrica. Indicativos de qualidade dos corpos de prova são produzidos e avaliados mensalmente, para que desvios sejam corrigidos. Na Figura 1 são apresentados os indicadores de qualidade mensais dos anos de 2014 à 2016, com as porcentagens de corpos de prova que ficaram com as resistências de compressão superiores ou inferiores as metas estabelecidas pela empresa.

A partir dos dados coletados das amostras de concreto produzidas nesse período foi possível fazer uma análise estatística da resistência à compressão do concreto produzido, obtendo-se os valores da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação para cada classe de resistência produzida na empresa. Conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Análise estatística da resistência à compressão do concreto**

Número de amostras	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	Desvio Padrão	CV
477	40	43,61	4,5	0,103
281	45	47,71	4,09	0,086
74	50	53,21	2,12	0,040

Analisando-se os dados, foi possível verificar que os valores de coeficiente de variação para os concretos produzidos na fábrica estão menores ou iguais aos utilizados para concreto com controle de fabricação ótimo sugeridos na literatura e conforme o  $f_{ck}$  aumenta o coeficiente de variação diminui.

### 3.2 Ato da protensão e medidas de alongamento

No ato da protensão algumas medidas são importantes para garantir que a força necessária em projeto seja realmente aplicada à cordoalha. A forma mais comum de medir se a força aplicada foi realmente transmitida à cordoalha é por meio do alongamento, fator esse que é imposto em projeto e verificado no ato da protensão.

Analisando-se as medições deste parâmetro na fábrica, chegou-se a conclusão de que esse é o momento mais crítico do processo de protensão, pois envolvem muitas variáveis, que não devem ser tratadas como determinísticas.

Estão envolvidas neste processo as seguintes

variáveis: as dimensões das armaduras, o módulo de elasticidade da armadura, a aferição do macaco hidráulico, a variação da força aplicada pelo macaco (varia de acordo com cada fabricante), a força de protensão necessária para retificar as cordoalhas devido ao grande comprimento das pistas, entre outras.

Nessa empresa foi estipulado como critério de aceitação de alongamento final do cabo que a variação do valor teórico de alongamento exigido em projeto para o valor real medido na obra, seja de no máximo 5%, a fim de garantir que a força de protensão necessária esteja realmente aplicada à peça, qualquer valor diferente deste intervalo deverá ser analisado e corrigido.

Para se ter um controle da influência de cada variável presente no processo de protensão, foram analisadas, individualmente, as incertezas presentes nessa etapa, chegando-se aos dados a seguir relacionados:

1. Macaco de protensão  
Aferição: precisão de 0,5%  
Força de protensão: precisão lida pelo equipamento de 8%
2. Variação da área de aço: de acordo com o catálogo da Belgo, que define área mínima e máxima para cada tipo de aço para protensão as variações entre as áreas de aço máximas e mínimas ficam entre 1,589% à 2,08%.
3. Variação do módulo de elasticidade: valor de 2% de acordo com o catálogo da Belgo.
4. Variação da tensão de escoamento do aço: estes valores são controlados pelas fabricantes e todo lote entregue acompanha um relatório e diagrama de tensão deformação específica do aço, a fim de garantir as especificações da norma, dessa forma, a adoção do coeficiente de variação entre 0,05 e 0,10 é totalmente aceitável.
5. Variação dos comprimento da peça: os valores de tolerância para as dimensões da peça são seguidos de acordo com o manual de selo de qualidade Abcic (Associação brasileira de construção industrializada de concreto). Para peças com até 5 m de comprimento o coeficiente de variação é 10 mm. De 5 m à 10 m o coeficiente de variação é 15 mm e para peças acima de 10 m o coeficiente de variação é de 20mm.

Nos estudos teóricos as variações de módulo de elasticidade e área de aço, normalmente são consideradas como fatores determinísticos, com a justificativa de que essas variações já estão consideradas na tensão de escoamento do aço.

Após o levantamento dos fatores que poderiam

influenciar na transferência de força de protensão para a peça foi realizado um estudo com 330 peças para verificar se os resultados estavam respeitando a variação de alongamento estipulada de 5% entre o valor de projeto e o valor em campo, obtiveram-se os seguintes resultados, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Variação de alongamento em peças protendidas com relação ao projeto**

Situação	Número de amostras	Porcentagem (%)
Curto	229	69
Aprovado	92	28
Longo	9	3

Verifica-se que 72% peças não respeitaram o alongamento estipulado em projeto. Sendo que 69% estavam abaixo do alongamento ideal, mostrando com este resultado que a força de protensão final estaria abaixo do requerido em projeto, o que poderia causar, num primeiro momento, o não comprimento do estado limite de serviço.

Com esses dados verifica-se a importância de uma análise cuidadosa da força de protensão que deverá ser aplicada na viga, e a grande quantidade de fatores que podem gerar variações na mesma.

Os trabalhos analisados tratam de redução da força de protensão como um todo por meio do fator de perdas de protensão  $r_p$ , não referenciando, quais variáveis poderiam influenciar neste parâmetro

### 3.3 Características geométricas e tolerâncias executivas

Na fabrica em questão todo o processo de execução de uma peça passa por diversas verificações,

desde a sua montagem até a sua armazenagem para a entrega.

A armadura é montada e verificada em uma área externa a forma, somente após a conferência com o projeto das dimensões, dobras, bitolas e espaçamentos a mesma é disposta dentro da forma, onde é posicionada de forma cuidadosa, com o auxílio de espaçadores. Nessa fase a armadura de protensão também é montada. Após toda a armação ser posicionada, uma nova verificação é realizada, para liberação da concretagem.

Após 24 horas da concretagem a peça já adquiriu resistência suficiente para que haja a transferência da força de protensão para a peça de concreto. Nesse instante a mesma já está pronta para ser içada e armazenada.

Após a retirada da peça da forma ocorre a última verificação, para a liberação da mesma. Caso apresente alguma irregularidade, ela passa por retificações e em último caso é descartada.

Nessa etapa inspeciona-se: coloração, manchas, deslocamento, falha do concreto, comprimento, altura, largura, esquadro ou inclinação, alinhamento, torção, contra flecha, consolo, pinos de engaste, metalon ou ganchos, alça para içamento, furo de engaste, furo de içamento, entre outros aspectos.

Essas verificações seguem o recomendado pelo selo de qualidade da Abcic, que impõem as tolerâncias dimensionais para as peças conforme apresentado na Figura 2.

Comparando-se os limites para as variações das dimensões utilizadas na fábrica com os valores encontrado na literatura, verifica-se que os valores são correspondentes. Na literatura as dimensões da seção transversal são consideradas com desvio padrão de 5 mm, na prática este valor é considerado -5 mm/+10 mm, permitindo uma tolerância maior para cima do valor estipulado, o que é a favor da segurança. Na

<b>Pilares, Vigas, Pórticos, Terças e Escadas</b> (itens b2, b3 e b4 do requisito 1.2.12)	Comprimento	Até 5m	±10
		De 5m a 10m	±15
		Superior a 10m	±20
	Seção transversal - ver desenho a	vigas e escadas	-5; +10
		pilares e pórticos	±10
	Alinhamento (qualquer lado) - ver desenho b		L/1000*
	Esquadro do topo ou base da peça - ver desenho c		±5
	Dimensão do consolo		±5
	Posição do consolo		±10
	Posição dos insertos para fixação, furos ou tirantes - ver desenho d		±15
	Posição de chumbadores (em relação à face da peça) - ver desenho f		±10
	Posicionamento do cabo de protensão - ver desenho e		±10
Posição de dispositivos para içamento (em relação à lateral) - ver desenho g		±30	
Posição de dispositivos para içamento (relação ao comprimento) - ver desenho h		±80	

**Figura 14 – Tolerâncias exigidas para elementos estruturais segundo selo de qualidade em mm.**

literatura o posicionamento do cabo de protensão é considerado com desvio padrão de 10 mm, na prática o valor também é 10 mm. Apesar do posicionamento da armadura passiva não ser tratado no manual da Abcic, nessa fábrica a variação é limitada a um desvio máximo de 5 mm, mesmo valor encontrado na literatura.

### 3.4 Carregamentos

Na fábrica não existe como mensurar os carregamentos que atuarão na estrutura e suas variações, não sendo, portanto, uma variável passível de comparação, entre o projeto e a fabricação, a análise dessa variação pode ser mensurada apenas durante a utilização da estrutura ou em laboratório por meio de ensaios.

## 4 Discussão

Neste trabalho foram apresentados às principais variáveis que costumam ser tratadas como aleatórias no cálculo de vigas pré-fabricadas de concreto protendido. Teoricamente todas as variáveis poderiam ser tratadas como aleatórias com a aplicação das devidas correlações entre elas. Porém, isto tornaria o cálculo da confiabilidade inviável. Por esse motivo fica a critério do engenheiro verificar o nível de confiabilidade adequado à sua estrutura, para assim, determinar quais as variáveis serão consideradas como aleatórias e quais serão consideradas como determinísticas. Diversos trabalhos tratam desse assunto e podem ser referências para essa escolha.

Nesta análise verificou-se que dentro das fábricas o controle de qualidade é tratado de forma rigorosa, todas as peças produzidas são verificadas e liberadas etapa a etapa, desde a sua montagem até a instalação na obra.

Comparando-se as exigências impostas pela Abcic para as dimensões da peça, com os valores adotados nas análises de confiabilidade, foi possível comprovar que os mesmos estão de acordo, levando a valores de variabilidade das peças teóricos condizentes com a prática.

Outro fator que levou a resultados satisfatórios foi a resistência à compressão do concreto. Os dados estatísticos obtidos em campo geraram coeficientes de variação iguais ou abaixo dos sugeridos na literatura para concretos com controle de qualidade alto.

O aço, por ser um produto industrializado, possui um grande controle de qualidade, desta forma, é possível a adoção de coeficientes de variação baixos, fato que se aplica na teoria e na prática.

Portanto, tratando-se de materiais e geometria,

os fatores considerados como aleatórios utilizados nas análises de confiabilidade estão de acordo com o realizado nas empresas que seguem as recomendações de qualidade do selo Abcic.

Quando se trata das questões das forças de protensão e alongamentos, a quantidade de variáveis envolvidas são grandes e cada uma delas carrega erros que somados podem apresentar variações muito além do estipulado como ideal. Ao se trabalhar com confiabilidade e protensão neste trabalho, não foi possível chegar a um consenso se as variáveis aleatórias consideradas na teoria são suficientes para representar as diversas variáveis encontradas em campo.

Ressalta-se que é muito importante um estudo minucioso sobre quais os fatores que podem ser determinantes na variação das cargas de protensão aplicada nos cabos no ato da protensão, e não apenas tratar todas as perdas conjuntas como uma única variável aleatória.

## 5 Conclusão

Conclui-se, então, que devido ao grande controle de qualidade na produção das vigas pré-fabricadas, as análises de confiabilidade são muito realistas quando levado em conta as variáveis geometria e resistência dos materiais, pois os valores considerados na teoria e na prática estão muito próximos. Porém, é necessário um cuidado maior com as considerações sobre as possíveis variáveis envolvidas no ato da protensão, dos cabos. O tratamento desses fatores como variáveis determinísticas numa análise de confiabilidade pode levar a resultados que não necessariamente correspondem à realidade das obras.

## Referências

- [1] AL-HARTHY, A. S., FRANGPOL, D. M. *Reliability Assessment of Prestressed Concrete Beams*. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, n. 1, p. 180-199, jan. 1994.
- [2] REAL, M. V., *Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob o estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos*. Tese de Doutorado, PPGEC/ UFRGS, Porto Alegre, junho, 2000.
- [3] NOWAK, A. S. PARK, C., CASAS, J. R. *Reliability analysis of prestressed concrete bridge girders: comparison of Eurocod, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD*. Structural Safety. 2001
- [4] BIONDINI, F., BONTEMPI, F., FRANGOPOL,

D. M., MALERBA, P. G.. *Reliability of Material and Geometrically non-linear Reinforced and Prestressed Concrete Structures*. Computer and Structures, Vol. 82, p. 1021-1031. 2004

[5] AGRAWAL, G., BHATTACHARYA, B.. *Partial safety factor design of rectangular partially prestressed concrete beams in ultimate flexural limite state*. Journal of Structural Engineering, Vol. 37, n. 4, p. 257-267, oct-nov. 2010.

[6] ROCHA, R. G. *Análise de Confiabilidade de Vigas Portuárias de Concerto Protendido*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

[7] SAN MARTINS, D. A. *Confiabilidade de vigas pré-tensionadas de concreto protendido*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

[8] MIRZA, S. A., MACGREGOR, J. G. Slenderness and Strength Reliability of Reinforced Concrete Columns”, *ACI Structural Journal*, 86(4), 428-438, 1989.

[9] ELLINGWOOD, B., GALAMBOS, T. V., MACGREGOR, J. G., CORNELL, A, Development of a Probability-Based Load Criterion for American National Standard A58, NBS Special Publication 577, National Bureau of Standards, Washington, DC (1980).