

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Aellington Freire de Araújo

**Redistribuição de momentos em vigas
contínuas em aduelas protendidas
com cabos sintéticos externos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães

Rio de Janeiro, 27 Fevereiro de 2003



Aellington Freire de Araújo

**Redistribuição de momentos em vigas contínuas
em aduelas protendidas com cabos sintéticos externos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Profa. Claudia Maria Oliveira Campos

IME

Profa Deane de Mesquita Roehl

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Guilherme Sales S. de Azevedo Melo

UnB

Prof. Ibrahim Abd El Malik Shehata

UFRJ

Prof. Sebastião Artur L. de Andrade

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Fevereiro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Aellington Freire de Araújo

Graduou-se em Engenharia Civil pela na UFPB (Universidade Federal da Paraíba). Na UFPB, participou de Iniciação Científica na área de Materiais não-convencionais. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de Mestrado e Doutorado com ênfase em Análise Experimental de Estruturas.

Ficha Catalográfica

Araújo, Aellington Freire de

Redistribuição de momentos em vigas contínuas em aduelas protendidas com cabos sintéticos externos / Aellington Freire de Araújo; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães. – Rio de Janeiro : PUC, 2003.

[14], 255 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Redistribuição de momentos. 3. Concreto protendido. 4. Protensão externa. 5. Cabo sintético. 6. Aduela prémoldada. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

*“...No caminho de nossa felicidade encontraremos o conhecimento para o qual
escolhemos esta vida...”*

Richard Bach
Ilusões

*A toda a minha família,
principalmente a minha mãe Iône, a
minha irmã Celly, aos meus
sobrinhos Wanderson e Wellyson, a
minha tia Irêne, aos meus avós: seu
Irineu (em alma) e a dona Maria.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Giuseppe Barbosa Guimarães pela orientação e pela amizade demonstrada ao longo deste trabalho.

Aos Amigos !!!!!!!!!!!!!!!

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e a Linear Composites Ltda (Inglaterra) pela doação dos cabos.

Resumo

Araújo, Aellington Freire de; Guimarães, Giuseppe Barbosa **Redistribuição de momentos em vigas contínuas em aduelas protendidas com cabos sintéticos externos.** Rio de Janeiro, 2003. 255p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a redistribuição de momentos em vigas contínuas de concreto construídas em aduelas pré-moldadas, com juntas secas, e protendidas com cabos sintéticos externos. Para tanto foram ensaiadas quatro vigas contínuas, com dois vãos iguais, sendo uma monolítica e as demais em aduelas pré-moldadas. Todas as vigas têm a mesma seção transversal tipo I, com dois vãos, altura da seção de 30 cm, largura do flange e espessura da alma igual a 30 cm e 10 cm, respectivamente. A viga monolítica tem relação l/d_p (vão/altura) igual a 18,75 e nas vigas em aduelas os valores desta relação foram entre 12,5, 18,75 e 25. As vigas são protendidas com dois cabos sintéticos externos com traçado poligonal. Os cabos utilizados são feitos com fibras sintéticas de alta resistências (2700 MPa) e alto módulo de elasticidade (126000 MPa) conhecidas comercialmente como *Kevlar*. O objetivo deste estudo é examinar a redistribuição de momentos em vigas contínuas com sistemas construtivos diferentes e com diferentes relações l/d_p frente à utilização de cabos sintéticos. Os resultados mostram que a redistribuição de momentos em vigas em aduelas pode ser obtida a partir de uma viga monolítica semelhante e que o comportamento da redistribuição de momentos nas vigas em aduelas é pouco influenciada pela relação l/d_p .

Palavras-chave

Redistribuição de momentos; concreto protendido; cabo externo; cabo sintético; aduela pré-moldada.

Abstract

Araújo, Aellington Freire de; Guimarães, Giuseppe Barbosa. **Moment redistribution in continuous segmental beams prestressed with external synthetic tendons**. Rio de Janeiro, 2003. 255p. D.Sc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental investigation on the behavior of continuous segmental concrete beams, prestressed with external aramid tendons, was carried out. Four beams were tested; one was monolithic and the others were constructed in precast dry-jointed segments. All the beams had the same overall dimensions, with two spans and an I section 30 cm high, flange width of 30 cm and web thickness of 10 cm. The l/d_p (span/section height) ratio was 18,75 for the monolithic beam and 12.5, 18.75 and 25 for the segmental beams. The beams were post-tensioned with two external aramid tendons, which are made of high strength (2700 MPa) high modulus (126000 MPa) *Kevlar 49* yarns. The main objective was to study the moment redistribution in the post-cracking stage. Test results have shown that the moment redistribution in segmental beams can be obtained from a similar monolithic beam and that the moment redistribution is only slightly affected by the l/d_p .

Keywords

Moment redistribution; concrete prestressed; external tendon; synthetic tendon; precast segment.

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1. Generalidades	15
1.2. Vigas construídas a partir de aduelas pré-moldadas.....	16
1.3. Protensão externa com cabos sintéticos.....	17
1.4. Justificativas	18
1.5. Objetivo do trabalho	18
1.6. Organização deste trabalho	19
2. Revisão bibliográfica	20
2.1. Introdução.....	20
2.2 Comportamento de vigas construídas a partir de aduelas pré-moldadas.....	20
2.3. Análise plástica das vigas.....	26
2.3.1 Vigas isostáticas.....	28
2.3.2 Vigas hiperestáticas	29
2.4. Capacidade de rotação da rótula plástica	39
2.5. Redistribuição de momentos	48
2.5.1 Vigas protendidas com cabos de aço.....	48
2.5.1.1 Prescrição de normas.....	48
2.5.1.2 Consideração segundo diferentes estudos	52
2.5.2 Vigas com cabos sintéticos	56
3. Ensaio preliminares sobre concentração de deformações nas juntas	63
3.1. Introdução.....	63
3.2. Características das vigas.....	63
3.3. Detalhe das armaduras	65
3.4. Propriedades dos Materiais.....	66
3.4.1 Concreto	66
3.4.2 Armadura.....	66
3.4.3.Cabo de Protensão.....	67

3.5. Montagem dos ensaios e Instrumentação.....	68
3.5.1. Operação de Protensão	68
3.5.2. Instrumentação.....	69
3.5.3. Procedimento do ensaio.....	71
3.6. Apresentação e discussão dos resultados	72
3.6.1. Apresentação dos resultados.	72
3.6.1.1. Deslocamento, deformação, força nos cabos e abertura das juntas.....	72
3.6.1.2. Modo de ruptura	79
3.6.2. Discussão dos resultados.....	81
3.6.2.1. Momento atuante vs. Abertura da junta	81
3.6.2.2. Momento atuante vs. Deformação	82
3.6.2.3. Variação da Força nos cabos de protensão	86
3.6.2.4. Efeito da concentração de deformação no concreto sobre a resistência das vigas.....	87
3.7. Considerações Finais	90
4. Ensaio principais: descrição e apresentação dos resultados	91
4.1. Introdução.....	91
4.2. Características geométricas das vigas	91
4.3. Detalhe das armaduras	96
4.4. Concretagem	99
4.4.1. Vigas monolíticas	99
4.4.2. Vigas em aduelas	99
4.5. Propriedades dos Materiais.....	99
4.5.1. Concreto	99
4.5.2. Característica do aço.....	100
4.5.3. Características dos cabos de protensão	102
4.6. Montagem dos ensaios	102
4.6.1. Operação de Protensão	102
4.6.2. Instrumentação.....	103
4.6.3. Procedimento do ensaio.....	108
4.7. Apresentação dos resultados	110

4.7.1. Deslocamentos.....	110
4.7.2. Deformações	113
4.7.3. Variação da força nos cabos	116
4.7.4. Reações dos Apoios.....	121
4.7.5. Abertura das Juntas	123
4.7.6. Resultados gerais.....	125
5. Ensaio principais: análise dos resultados	129
5.1. Introdução.....	129
5.2. Vigas monolítica e em aduelas, com mesma relação $l/d_p= 18,75$...	129
5.2.1. Deslocamentos ao longo da viga.....	129
5.2.2. Momento vs. Deslocamento	131
5.2.3. Deformações ao longo da viga	134
5.2.4 Variação da força nos cabos de protensão	138
5.2.5 Redistribuição de momentos	142
5.3. Vigas em aduelas com diferentes relações l/d_p	155
5.3.1. Abertura das juntas	155
5.3.2. Deslocamentos ao longo das vigas.....	159
5.3.3. Momento vs. Deslocamento	160
5.3.4. Deformação no concreto ao longo da viga.....	162
5.3.5. Variação da força nos cabos.....	166
5.3.6 Redistribuição de momentos nas vigas em aduelas com diferentes relações l/d_p	168
5.5. Comparação entre os resultados experimentais e teóricos.....	175
6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	181
6.1. Conclusões.....	181
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	185
7. Referências bibliográficas	201

Lista de símbolos

ROMANOS

- A_p - área de armadura protendida
- A_s - área de armadura passiva (tração)
- A'_s - área de armadura passiva (compressão)
- b - largura da seção
- b_f - largura da mesa
- b_w - largura da alma
- d - distância da fibra comprimida até o centróide da armadura passiva de tração
- d_p - distância da fibra comprimida até o centróide da armadura de protensão
- d_s - altura da fibra mais comprimida ao centróide da armadura passiva de tração
- e - excentricidade do cabo
- E_{I_c} - rigidez à flexão na ruptura na seção crítica do apoio
- $E_{I_{cy}}$ - rigidez à flexão da seção no apoio no início do escoamento da armadura passiva
- E_s - módulo de elasticidade da armadura de passiva
- E_{ps} - módulo de elasticidade da armadura de protensão
- f'_c - resistência à compressão do concreto
- f_{ck} - resistência à compressão característica do concreto
- f_{cm} - resistência média de compressão dos corpos de prova de concreto
- f_{pe} - tensão efetiva da armadura de protensão
- f_{ps} - tensão última da armadura de protensão
- f_{pu} - resistência última da armadura de protensão
- f_{py} - tensão de escoamento do aço de protensão
- f_y - tensão de escoamento da armadura passiva de tração
- f'_y - tensão de escoamento da armadura passiva compressão
- F_a - força nos cabos de protensão medidas nas ancoragem ativa
- F_p - força nos cabos de protensão medidas nas ancoragem passiva
- F_o - força de protensão inicial

- F_3 - força de protensão inicial do ciclo 3
- F_4 - força de protensão inicial do ciclo 4
- F_r - força de protensão na ruptura
- h_f - espessura do flange
- h - altura da seção
- K - fator de atrito
- l_p - comprimento de rótula plástica
- l - comprimento do vão
- L - comprimento do vão
- $M_{a,el}$ - momento elástico no apoio central
- $M_{a,exp}$ - momento experimental no apoio central
- M_{apoio} - momento resistente no apoio.
- M_{cr} - momento de fissuração
- $M_{d,max}$ - momento fletor desta seção que está mais solicitada à flexão
- M_e - momento de escoamento
- M_{max} - momento máximo aplicado em uma seção
- M_p - momento de plastificação
- M_{pc} - momento último no apoio central
- $M_{p,el}$ - momento elástico no ponto de aplicação de carga
- $M_{p,exp}$ - momento experimental no ponto de aplicação de carga
- M_{ps} - momento último na seção crítica do vão
- M_R - momento resultante
- M_{sec} - momento secundário
- M_u - momento último
- $M_{vão}$ - momento de resistente do vão
- M_o - momento de descompressão numa seção
- M_1 - momento primário
- M_2 - momento secundário
- n - número total de vãos
- P - carga concentrada aplicada
- P_e - carga concentrada de escoamento
- P_r - carga concentrada de ruptura
- P_u - carga concentrada última
- P_{col} - capacidade de carga última

- P_{el} - capacidade de carga baseada na teoria elástica - linear
 P_{pl} - capacidade de carga obtida na análise plástica
 PAR - relação de adaptação plástica
 R_c - força resultante no concreto
 R_p - força de protensão
 R_s - força na armadura passiva de tração
 V_a - força devido ao efeito do engrenamento do agregado
 V_c - forças oriundas de mecanismos complementares ao modelo em treliça
 V_{cv} - componente vertical da força resultante de compressão
 V_d - força devido ao efeito de pino
 V_s - resultante das forças que atuam na armadura transversal
 V_u - força cortante última
 x - profundidade da linha neutra
 z - braço de alavanca entre a força resultante de compressão e a força de protensão
 z_s - braço de alavanca em relação ao cabo de protensão
 z_s - braço de alavanca em relação à armadura passiva

GREGOS

- κ_e - curvatura referente ao escoamento da armadura passiva
 $\kappa_{m\acute{a}x}$ - curvatura máxima
 η - grau de redistribuição de momentos
 ρ_s - taxa de armadura passiva de compressão
 ρ_p - taxa geométrica de armadura passiva de protensão;
 ρ - taxa geométrica de armadura passiva de tração;
 ρ' - taxa geométrica de armadura passiva de compressão;
 ϵ_{uk} - deformação última
 δ - fator de redistribuição
 ω - taxa mecânica de armadura passiva de tração
 ω' - taxa mecânica de armadura passiva de compressão
 ω_p - taxa mecânica de armadura protendida.

ω_t - índice total de armadura

ϕ - acréscimo deste ângulo devido aos deslocamentos da viga no ponto de desvio, após a aplicação do carregamento externo.

μ - coeficiente de atrito

θ - ângulo desvio do cabo antes da aplicação do carregamento externo