

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
DE NÓS DE PÓRTICO DE CONCRETO ARMADO
SUBMETIDOS A AÇÕES CÍCLICAS**

Gerson Moacyr Sisniegas Alva

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADORA: Prof. Dra. Ana Lúcia H. C. El Debs

São Carlos
2004

*À minha esposa Ana Carolina,
pelo constante apoio e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, o criador de todas as coisas, sem o qual não poderia começar nem terminar este trabalho.

À professora Ana Lúcia, pela amizade e pela orientação dispensada durante a elaboração deste trabalho.

À FAPESP pela bolsa de estudos concedida, a qual possibilitou a realização deste trabalho.

Aos funcionários da secretaria do Departamento de Estruturas: Nadir, Rosi e Eli, pela disponibilidade e atenção. Aos funcionários do Laboratório de Estruturas: Luis Vareda, Amauri, Mário, Valdir e Fabiano pelo bom trabalho durante os ensaios.

Aos amigos Yuri, Patrícia, Rodrigo, Rejane, Valentim, Marcelo, Carrazedo, Fernando e Josafá, pelo companheirismo destes anos em que convivemos juntos.

Aos meus pais Heli e Nora, pelo apoio e encorajamento que sempre me deram, e por quem tenho grande respeito.

À minha esposa Ana Carolina, pelo enorme carinho, incentivo e compreensão, durante a realização deste trabalho.

Enfim, deixo a minha gratidão a todos que participaram e contribuíram, direta ou indiretamente, na elaboração desta pesquisa.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1	Generalidades.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Justificativas.....	2
1.4	Breve descrição do conteúdo da tese.....	3

2. NÓS DE PÓRTICO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

2.1	Definições e tipos de nós de pórticos.....	5
2.2	Crítérios gerais de dimensionamento e desempenho.....	7
2.3	Solicitações em nós de pórtico.....	8
2.3.1	Forma usual de determinação dos esforços solicitantes.....	8
2.3.2	Ações Gravitacionais e Horizontais.....	9
2.3.3	Diferenças de solicitações entre os tipos de nós.....	10

3. DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE NÓS DE PÓRTICOS

3.1	Detalhamento de nós de pórtico.....	13
3.1.1	Introdução.....	13
3.1.2	Detalhamento de ligações viga-pilar de extremidade: nós externos.....	14
3.1.3	Detalhamento de ligações viga-pilar intermediário: nós internos.....	18
3.2	Recomendações normativas para o dimensionamento.....	19
3.2.1	Classificação dos nós segundo as normas americanas: ACI 352 (1991) e ACI 318 (1995).....	20
3.2.2	Armadura transversal em nós.....	20
3.2.3	Área efetiva dos nós.....	21
3.2.4	Resistência nominal ao cisalhamento.....	23
3.2.5	Ancoragem das barras longitudinais das vigas.....	24
3.2.6	Limitação de diâmetros.....	26
3.3	Exemplo de dimensionamento.....	27

4. EFEITO DAS AÇÕES CÍCLICAS SOBRE OS NÓS DE PÓRTICO

4.1	Revisão sobre os estudos experimentais realizados.....	31
4.2	Fatores que influenciam o comportamento da ligação.....	34
4.2.1	Aderência aço-concreto.....	35
4.2.2	Taxa de estribos.....	37
4.2.3	Força normal no pilar.....	40
4.2.4	Tipo de carregamento atuante.....	43
4.2.5	Resistência à compressão do concreto.....	43
4.2.6	Dimensões do nó: relação entre as alturas das seções da viga e do pilar.....	43
4.2.7	Outros fatores.....	44

5. MODELOS TEÓRICOS

5.1	Introdução.....	45
5.2	Modelos de análise local.....	46
5.2.1	PAULAY & PRIESTLEY (1992).....	46
5.2.2	ORTIZ (1997).....	53
5.2.3	HWANG & LEE (1999).....	57

5.2.4 Comparação entre modelos de resistência ao cisalhamento.....	67
5.3 Modelos de análise global.....	72
5.3.1 Modelos simplificados de dano e plasticidade.....	77
5.3.2 FLÓREZ--LÓPEZ (1995).....	81
5.3.3 PICÓN & FLÓREZ-LÓPEZ (2000).....	82
5.3.4 Simulações numéricas com os modelos de dano originais.....	83
5.3.5 Modificações propostas na formulação original.....	97
5.3.6 Simulações numéricas com os modelos de dano modificados.....	102
6. PROGRAMA EXPERIMENTAL	
6.1 Introdução.....	112
6.2 Características dos modelos físicos.....	112
6.3 Esquema de Ensaio.....	117
6.4 Materiais.....	122
6.5 Moldagem e cura dos modelos.....	123
6.6 Instrumentação dos modelos e equipamentos utilizados.....	125
6.7 Procedimentos de Ensaio e Resultados Obtidos.....	131
7. RESULTADOS E ANÁLISES	
7.1 Análise Local.....	148
7.1.1 Início da fissuração dos nós de pórtico.....	149
7.1.2 Comportamento mecânico dos nós frente às ações cíclicas.....	154
7.1.3 Resistência ao cisalhamento dos nós de pórtico.....	172
7.2 Análise Global.....	179
7.2.1 Emprego de modelos simplificados de dano e plasticidade.....	179
7.2.2 Comparações adicionais entre os modelos físicos ensaiados.....	202
8. CONCLUSÕES	205
8.1 Conclusões gerais.....	205
8.2 Sugestões para novas pesquisas.....	212
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	218

RESUMO

ALVA, G.M.S. (2004). *Estudo teórico-experimental do comportamento de nós de pórtico de concreto armado submetidos a ações cíclicas*. São Carlos, 2004. 218p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho consiste em um estudo do comportamento de nós de pórtico de ligações viga-pilar de concreto armado submetidos a ações cíclicas. O trabalho é composto por duas etapas: uma de investigação experimental e outra de cunho teórico.

A etapa experimental teve como base os ensaios realizados em cinco modelos físicos de ligações viga-pilar. Os resultados desses ensaios permitiram a observação de diversos aspectos do comportamento estrutural dos nós de pórtico frente às ações cíclicas e a avaliação da influência de algumas variáveis. Neste trabalho, as variáveis escolhidas foram a variação do carregamento aplicado e o detalhamento da armadura transversal na região do nó.

Os principais efeitos das ações cíclicas sobre as cinco ligações ensaiadas foram: aumento generalizado dos deslocamentos globais, perda de resistência e de rigidez dos elementos estruturais, propagação e aumento da abertura das fissuras inicialmente formadas, tendência de uniformização das deformações dos estribos do nó ao longo dos ciclos e maior deterioração do nó de pórtico em relação aos elementos viga e pilar.

Na etapa teórica, foram empregados essencialmente dois tipos de modelos: i) modelos derivados da idealizações dos modelos clássicos de biela e tirante. ii) modelos simplificados que empregam conceitos da Mecânica do Dano e da Fratura, para a avaliação dos efeitos de perda de rigidez (dano) e das deformações permanentes (plasticidade) na resposta global da ligação viga-pilar.

Por fim, foram feitas comparações entre os resultados experimentais e teóricos, chegando-se a importantes conclusões sobre o comportamento mecânico do nó frente às cargas cíclicas e sobre a eficiência dos modelos teóricos em simular a resposta do nó de pórtico e da ligação como um todo. As comparações mostraram que, dentro de certos limites, os modelos teóricos fornecem resultados satisfatórios frente aos resultados experimentais.

Palavras-chave: concreto armado, ações cíclicas, ligações viga-pilar, nós de pórtico, dano

ABSTRACT

ALVA, G.M.S. (2004). Theoretical and Experimental Study of Reinforced Concrete Frame Joints Behavior under Cyclic Load. São Carlos, 2004. 218p. Doctoral Thesis – School of Engineering at São Carlos. The University of São Paulo.

The present thesis studies the behavior of frame joints in reinforced concrete beam-column joints subjected to cyclic loads. The thesis is divided into two parts: an experimental study and a theoretical-based study.

The experimental study is based on laboratory tests on five physical models of beam-column joints. The results of this experimental study permitted the observation of various aspects of the structural behavior of frame joint subjected to cyclic load and estimating the influence of certain variables that affect the behavior of such joints. In the present thesis, the variables studied are the applied load and reinforcement detailing at the joint location.

The effects of cyclic loads on the tested joints were: an increase in the overall deformation, loss of strength and stiffness of structural elements, crack propagation and increase in crack width of previously formed cracks, a tendency towards a uniform strain distribution in the transverse reinforcement at the joint section and a more rapid deterioration of frame joints compared to beam/column joints.

At the theoretical level, two types of models were used to study the behavior of the joint: i) a model derived from the idealization of the classical strut-tie model, and ii) a simplified damage and fracture mechanics-based model for estimating the effects of the loss of stiffness (damage) and permanent strains (plasticity) on the overall response of the beam-column joint.

To reach any conclusion on the mechanical behavior and the efficiency of existing theoretical models employed in the design of reinforced beam-column joints and other joints subjected to cyclic loading, a comparative study between the theoretical and experimental results was carried out. The results show that within certain limits, the theoretical models employed are in good agreement with experimental results.

Keywords: cyclic load, beam-column joint, frame joint, damage mechanic.

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

1.1 GENERALIDADES

As ações cíclicas ou dinâmicas atuantes nas estruturas podem ter diversas origens, dependendo da finalidade e das condições a que essas estruturas são expostas. Entre as diversas origens das solicitações cíclicas, encontra-se a ação de cargas móveis, de pontes rolantes, de ondas marítimas, de pressões hidrostáticas variáveis, de sismos, de vento, de variações de temperatura e de umidade, impacto e de máquinas sujeitas à vibração.

As cargas cíclicas são caracterizadas pela variação de amplitude de um determinado parâmetro, tal como a tensão, podendo haver também a inversão de sinal (direção). As cargas cíclicas podem ser vistas sob dois aspectos:

- *Sob o número de ciclos:* Os elementos estruturais podem estar submetidos a um número baixo de ciclos, porém com uma grande variação da intensidade do carregamento, como é o caso das ações decorrentes de terremotos ou de vento, tendo maior relevância nos estados limites últimos. Para um número elevado de ciclos, com intensidade de carregamento ao nível de serviço, as ações provocam a fadiga desses elementos.
- *Sob o tipo de tensão aplicada:* O carregamento cíclico pode ser repetido (ou unidirecional) ou alternado. No repetido ou unidirecional, as tensões produzidas pelo carregamento cíclico não apresentam inversão de sinal. É o caso típico de carregamento de fadiga. No alternado, as tensões sofrem inversão de sinal. Este é o caso típico de ações sísmicas.

Um dos principais efeitos das ações cíclicas nas estruturas em pórtico de concreto armado é a deterioração mecânica nos nós formados a partir das ligações entre viga e pilar. Essa degradação ocorre progressivamente sobre as propriedades dos materiais aço e concreto ao longo da história de carregamento (ou deslocamento). Evidentemente, em função da intensidade dessas ações, pode-se ter, em menor ou maior grau, a ocorrência de fenômenos tais como: perda de aderência das armaduras, escoamento das barras, fissuração diagonal e distorções por cisalhamento do nó. Tais fenômenos afetam o comportamento da estrutura tanto em termos de deslocamentos como em termos de resistência.

Até três décadas atrás, relata-se na bibliografia especializada que pouca importância era dispensada ao projeto dos nós de pórtico. Pelo visto, os engenheiros estruturais mantinham o foco apenas no dimensionamento das vigas e dos pilares. Entretanto, nessas últimas três

décadas, iniciaram-se pesquisas sobre comportamento dos nós de pórtico sujeitos a cargas cíclicas, motivadas em grande parte por observações reais da ocorrência de ruína dos nós quando submetidos a ações cíclicas de origem sísmica, em diversas edificações de concreto armado. O assunto entretanto é complexo e envolve um grande número de variáveis a serem analisadas.

A contribuição deste trabalho de Doutorado reside num estudo específico acerca dos nós de pórticos, cujas respostas experimentais frente ao carregamento cíclico permitiram um entendimento mais apurado dos fenômenos envolvidos nesse tipo de carregamento e da influência dos parâmetros selecionados como variáveis sobre o comportamento dos nós. Os resultados experimentais deram suporte à avaliação da eficiência dos modelos teóricos utilizados neste trabalho, a saber: i) modelos baseados na Mecânica do Dano e na Teoria da Plasticidade para simular o comportamento global da ligação viga-pilar; ii) modelos de biela e tirante para representar os nós de pórtico do ponto de vista local da ligação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa reside na análise, por meio de investigação experimental e análise teórica, do comportamento estrutural de nós de pórticos formados nas ligações viga-pilar de concreto armado, quando submetidos a carregamentos cíclicos.

Por meio da investigação experimental, verificaram-se propriedades que influenciam o comportamento das ligações viga-pilar mediante as ações cíclicas, em especial o detalhamento da armadura na região do nó e a variação do carregamento aplicado. Ou seja, procurou-se analisar como tais variáveis podem afetar o nó de pórtico e a ligação quanto à resistência, à ductilidade, à fissuração e à perda de rigidez.

A análise teórica foi apoiada por modelos numéricos de Dano e Plasticidade e por modelos de biela e tirante aprimorados, os quais foram propostos recentemente por outros pesquisadores. Algumas desses modelos sofreram alguns ajustes, sendo modificados em função de necessidades associadas à qualidade dos resultados.

Inclui-se ainda a comparação dos resultados da análise numérica com os resultados experimentais, a partir da qual foi possível chegar a diversas conclusões. Adicionalmente, são feitas algumas sugestões a respeito do dimensionamento de nós de pórtico de concreto.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os nós de pórticos, definidos pela ligação entre vigas e pilares, caracterizam-se por serem regiões diferenciadas nas estruturas de concreto armado, devido a uma série de fatores, a saber:

- As ligações entre vigas e pilares formam pórticos que conferem estabilidade lateral à estrutura frente às ações horizontais (vento);
- São regiões de forças cortantes e momentos fletores de grande intensidade;
- A mudança de direção dos esforços internos que ocorrem nos nós provoca uma alteração na distribuição de tensões;
- A limitação das dimensões dos elementos estruturais e a necessidade de se atender aos critérios de ancoragem podem ocasionar o congestionamento das armaduras que concorrem no nó;

- Em virtude da concentração de armadura nos nós, estas regiões oferecem condições mais difíceis de concretagem.

Como consequência desses fatores, verifica-se a complexidade do comportamento estrutural dos nós viga-pilar.

Diversas pesquisas foram realizadas a respeito do comportamento dos nós de pórtico, incluindo diversos tipos de detalhes de armadura e a aplicação de materiais de resistência maior, como o concreto de alta resistência (CAR). Entretanto, devido ao grande número de variáveis envolvidas e que afetam o comportamento mecânico do nó, o assunto ainda não está completamente esclarecido e, por isso, vem sendo objeto de estudos constantes.

Ainda com relação à resposta dos nós de pórticos em presença de carregamento cíclico, existe a necessidade de se considerarem os fenômenos responsáveis pela não linearidade física do material. Dessa forma, surge a preocupação em se modelar os processos que geram a degradação estrutural do concreto. Nesse contexto, dentro de certos limites, os modelos de danificação e plastificação são adequados em análises numéricas, pois:

- os modelos que se baseiam na Mecânica do Dano permitem simular as perdas progressivas de rigidez e de resistência do material concreto;
- os modelos provenientes da Teoria da Plasticidade permitem avaliar a irreversibilidade da resposta do material nas situações de carga e descarga.

Por outro lado, na representação do nó propriamente dito, os conhecidos modelos de biela e tirante são adequados, pois:

- os modelos de biela e tirante são bem compreendidos no cálculo de estruturas de concreto armado;
- os modelos de biela e tirante são úteis no dimensionamento e podem prever, com segurança, a capacidade resistente dos nós frente aos esforços cisalhantes.

1.4 BREVE DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DA TESE

Neste capítulo 1, apresentam-se brevemente a origem e os tipos de cargas cíclicas, acenando para os efeitos dessas ações sobre os nós de pórticos, regiões especiais do sistema estrutural formadas nas ligações viga-pilar. Apresentam-se os objetivos principais deste trabalho e as motivações que deram origem ao mesmo.

No capítulo 2, apresentam-se a definição e os tipos de nós de pórticos em estruturas correntes de concreto armado, incluindo os critérios de dimensionamento e de desempenho usualmente adotados em nível de projeto. Comentam-se também as diferentes formas de solicitações nos nós em função da natureza das ações.

O capítulo 3 é voltado para o dimensionamento e detalhamento dos nós de pórtico de acordo com as recomendações das principais normas que tratam do assunto e segundo sugestões de alguns pesquisadores. Adicionalmente, desenvolve-se um exemplo numérico referente ao dimensionamento.

No capítulo 4, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos experimentais acerca do comportamento de nós de pórtico submetidos a ações cíclicas, desenvolvidos nas últimas três décadas. Com base nas conclusões dessas pesquisas

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

