

1

Introdução

1.1.

Considerações Gerais

O estudo da instabilidade das armaduras longitudinais em pilares de concreto armado tem atraído a atenção de muitos pesquisadores nos últimos anos, entretanto a maioria dos estudos está restrita à análise da flambagem ocorrendo sempre entre dois estribos consecutivos. A flambagem da armadura longitudinal com a participação dos estribos no impedimento da mesma é um fenômeno pouco estudado na literatura.

A flambagem das armaduras longitudinais em pilares de concreto armado pode ocorrer na região longitudinal entre dois estribos consecutivos, ou pode envolver um certo número de estribos.

Em 1678 Robert Hooke apresentou os primeiros estudos referentes a flambagem elástica. Posteriormente, Leonhard Euler (1707-1783) fez um estudo onde propôs um procedimento para calcular a carga crítica de flambagem de uma coluna biapoiada de comprimento L , submetida à carga axial P , mediante a seguinte expressão:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 Ek^2}{L^2} \quad (1.1)$$

Euler definiu k^2 , como uma propriedade da coluna. É de se observar que o valor de Ek^2 , corresponde ao que hoje se conhece como EI (onde E é o módulo de elasticidade da coluna e I é o momento de inércia da seção), já que, quando Euler propôs esta expressão, ainda não se conhecia o conceito de momento de inércia.

Engesser e Considère propuseram modificações para estender a aplicação da expressão de Euler a flambagem inelástica. Em 1889, Engesser propôs uma teoria para a flambagem inelástica baseada na hipótese de que, quando uma coluna tem uma relação de esbeltez tal que o esforço crítico de flambagem é maior que o

limite elástico, é possível obter uma configuração deformada em equilíbrio indiferente, para a qual a deformação é controlada pelo módulo tangente E_t , avaliado no ponto que corresponde ao esforço crítico, que se obtém simplesmente ao substituir E por E_t na expressão de Euler. Este procedimento é conhecido como a teoria do módulo tangente, portanto a eq. (1.1) transforma-se em

$$(P_t)_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{L^2} \quad (1.2)$$

Em 1895, Engesser apresentou uma nova solução para o problema, conhecida como a teoria do módulo duplo. A partir de então, se considerou a teoria do módulo duplo como a solução correta da flambagem inelástica de colunas. Mais tarde apareceram dúvidas sobre esta teoria, pois resultados experimentais obtidos com corpos de provas com seções transversais de diversas formas indicavam que as cargas de flambagem se encontravam entre as cargas obtidas pelas duas teorias. Estas dúvidas foram esclarecidas por Shanley em 1946 (Johnston, 1983), o qual demonstrou que quando uma coluna inicialmente reta é submetida à compressão e alcança uma configuração deformada em equilíbrio, os esforços do lado côncavo da seção associados a E_t , aumentam, porém ao aumentar um diferencial de carga, não ocorre uma diminuição imediata dos esforços do lado convexo, já que são compensados pelos esforços de compressão direta. Isto faz com que no instante em que ocorre a flambagem, o valor do módulo duplo diminua e por tal motivo a carga de flambagem da coluna ocorra entre os valores propostos pela teoria do módulo tangente e a do módulo duplo.

Dessa forma considera-se a carga de flambagem proposta pela teoria do módulo tangente como um limite inferior e a carga determinada através da teoria do módulo duplo como um limite superior (Salmon & Johnson, 1990).

Um dos primeiros estudos analíticos sobre a instabilidade das armaduras longitudinais em estruturas de concreto armado foi efetuado por Bresler & Gilbert (1961), que empregaram critérios de análise elástica para encontrar relações entre a flambagem da armadura sob cargas monotônicas e parâmetros como espaçamento e rigidez dos estribos. Um estudo semelhante ao de Bresler & Gilbert (1961) foi realizado por Scribner (1986).

Uma solução analítica para o problema da flambagem da armadura longitudinal foi proposta por Vallenás *et al.* (1977), onde o espaçamento máximo

da armadura transversal é determinado pelo cálculo da carga crítica da coluna limitada nas extremidades tendo um comprimento igual ao espaçamento entre os estribos. Esta interpretação do fenômeno se mostra muito restritiva, visto que a flambagem pode envolver vários espaçamentos entre estribos.

Papia *et al.* (1988) empregaram a teoria do módulo duplo para estudar a instabilidade sob cargas monotônicas em armaduras longitudinais de elementos de concreto armado.

Papia & Russo (1989) encontraram a deformação última de elementos de concreto comprimido baseando-se na condição limite de estabilidade da armadura longitudinal e o modelo de análise utilizado foi proposto em Papia *et al.* (1988).

Mau (1990) efetuou estudos analíticos sobre a utilização da teoria do módulo tangente na avaliação da instabilidade de armaduras sob cargas monotônicas. Monti & Nuti (1992) estudaram os efeitos da flambagem inelástica em armaduras sob carregamento monotônico e cíclico.

Claeson (1995) apresentou uma análise através do método dos elementos finitos utilizando um modelo de confinamento dependente da resistência uniaxial, do espaçamento entre os estribos e da configuração da seção transversal e concluiu que o espaçamento entre estribos e a configuração da armadura são de grande importância para o comportamento pós - pico.

O estudo experimental de pilares de concreto armado submetidos a carregamentos monotônicos ou cíclicos, com a finalidade de se visualizar o comportamento das armaduras longitudinais tem atraído atenção de vários pesquisadores nos últimos quarenta anos dentre os quais cita-se os trabalhos de Pfister (1964) que ensaiou onze pilares retangulares sob carregamento concêntrico para explorar a influência do arranjo e espaçamento entre os estribos na resistência e comportamento de pilares.

Experiências de observação de campo e evidências de laboratório mostram que é possível alcançar um comportamento estável para o pilar além do ponto de escoamento dos membros da armadura longitudinal. Na verdade flambagem visível em pilares detalhados adequadamente ocorre em deformações 5-10 vezes maiores que a deformação de escoamento, sugerindo que a estabilidade da armadura longitudinal é uma função do confinamento, isto é, do grau de eficiência do arranjo do estribo (Pantazopoulou, 1998).

Este parâmetro não está bem explicitado nos códigos de projeto existentes. Contudo, não há método sistemático em projetos onde se leve em consideração as condições de instabilidade da barra, o confinamento efetivo da armadura transversal e o núcleo do pilar de concreto. O espaçamento entre estribos é tratado independentemente do confinamento efetivo de arranjos específicos adotados pelo projetista.

Informações experimentais de deformações axiais no início da flambagem da armadura mostram diferenças substanciais, devido às diferenças nos arranjos de vários ensaios. Porém, são também relacionadas ao fato de que a detecção da flambagem tem sido feita principalmente através de observação visual, embora em um certo número de ensaios as deformações tenham sido registradas na armadura longitudinal através de extensômetros elétricos (*Strain Gages*) e no concreto através de extensômetros mecânicos (LVDT).

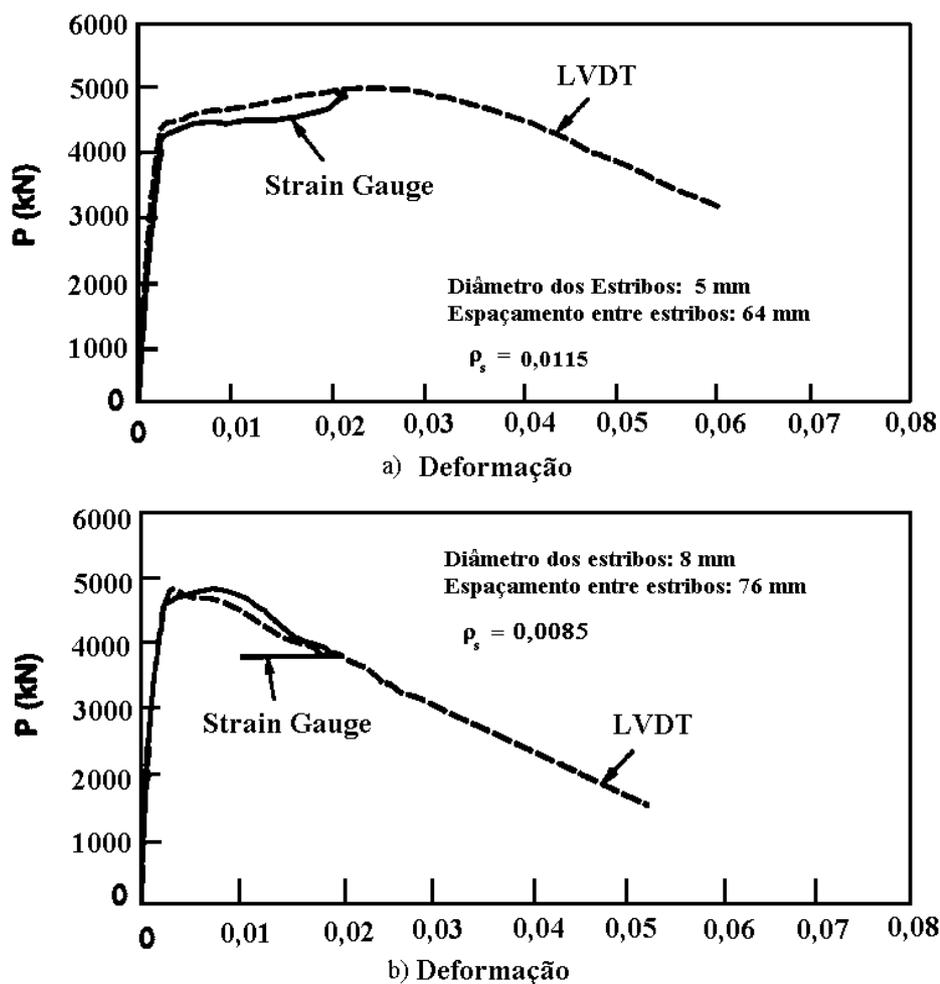


Figura 1.1 - Deformação axial padrão registrada no concreto (LVDT) e armadura longitudinal (Strain Gauge) em ensaios de pilares circulares com diferentes armaduras (Sheikh & Toklucu, 1993).

O ponto onde se inicia a flambagem é identificado como o ponto onde a deformação na barra desvia-se da deformação média no concreto como mostra o exemplo da Figura 1.1 e às vezes ocorre antes do instante da flambagem visível. Desta forma o colapso pode ocorrer em níveis de deformações maiores do que o ponto de desvio entre duas medidas de deformações.

No primeiro caso apresentado na Figura 1.1, tão logo as condições críticas são alcançadas, a flexão lateral começa e resulta no encurtamento da barra longitudinal.

No segundo caso, a mesma quantidade de encurtamento axial deve ocorrer no centro de concreto e, portanto, a flexão permanente da barra é retardada se o concreto resistir a deformação por longo tempo. A capacidade de deformação de um membro de concreto armado depende do confinamento efetivo provido pelo aço, o qual inclui estribos e armaduras longitudinais, sendo chamada de deformação longitudinal máxima do concreto, ε_c^{cr} , medida sobre o comprimento crítico (Pantazopoulou, 1998).

Inicialmente, em um membro de concreto armado, a redistribuição de esforços ocorre do concreto para a armadura, pois o concreto perde rigidez mais rapidamente. Porém, caso a armadura seja solicitada por tensões adicionais, a redistribuição de esforços ocorre da armadura para o concreto, uma vez que a barra perde rigidez. Esta redistribuição é provavelmente o mecanismo pelo qual a barra vence o nível de escoamento sem flambar e alcança a região de deformação com encruamento. Verificou-se em ensaios de pilares sob compressão concêntrica que seções transversais idênticas de membros de concreto podem alcançar diferentes níveis de ε_c^{cr} para diferentes modelos de confinamento, mesmo que o espaçamento entre os estribos seja idêntico (Sheikh & Uzumeri, 1980; Sheikh *et al.*, 1990; Cusson & Paultre, 1994).

Embora a maioria destes experimentos tenha tido como objetivo investigar a ruptura por compressão do concreto antes da flambagem, está claro, das fotografias de corpos de prova rompidos, que o esmagamento do centro é acompanhado pela flambagem da armadura. Em corpos de prova bem confinados, onde o concreto pode suportar altas deformações axiais, a zona de ruptura é mais extensa e a flambagem espalha-se sobre um grande número de espaçamentos entre

estribos, muito mais do que no caso de um confinamento menos efetivo, onde o centro esmaga em baixas deformações axiais.

Estudos contendo numerosos dados experimentais realizados por Vallenas *et al.* (1971), Kaar & Corley (1977), Sheikh & Uzumeri (1980), Scott *et al.* (1982) e Moehle & Cavanagh (1985) mostram que a flambagem das barras longitudinais em pilares de concreto armado fortemente confinados envolvem os próprios estribos, deformando um certo número deles e finalmente causando sua falha por tração.

Mander *et al.* (1984) efetuaram ensaios monotônicos de compressão em armaduras longitudinais de pilares de concreto armado. Os resultados foram comparados com os obtidos empregando-se modelos analíticos de flambagem inelástica e as comparações entre estes resultados foram aceitáveis.

Pantazopoulou (1998) desenvolveu estudos experimentais para verificar a estabilidade da armadura levando-se em conta a eficiência do estribo, a deformação limite do concreto, o diâmetro da barra e espaçamento entre estribos como mostra o modelo da Figura 1.2. O autor estudou um extenso banco de dados da literatura internacional consistindo de 300 ensaios em pilares sob carregamentos monotônicos e cíclicos, simulando terremotos e com uma variedade de arranjos laterais e longitudinais da armadura. O banco de dados foi analisado para identificar evidências experimentais, as condições críticas de estabilidade da armadura.

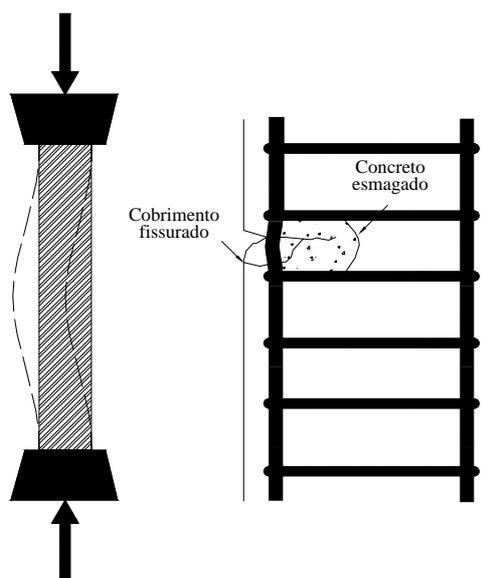


Figura 1.2- Condições na flambagem durante os ensaios e a armadura longitudinal no elemento de concreto armado (Pantazopoulou, 1998).

1.2.

Objetivo e Descrição do Trabalho

Esta tese se insere nas linhas de pesquisa de Instabilidade das Estruturas e Concreto Armado. O objetivo desta tese é estudar a flambagem das armaduras longitudinais em pilares de concreto armado. Em particular, deseja-se estudar a influência do diâmetro da armadura longitudinal, do diâmetro e espaçamento entre estribos e do arranjo das armaduras na seção transversal na flambagem das armaduras. Pretende-se com estes resultados propor um critério de projeto racional para a escolha do espaçamento, diâmetro dos estribos e arranjo dos estribos.

No Capítulo 2, apresenta-se de forma resumida a revisão bibliográfica, dando ênfase aos trabalhos de Bresler & Gilbert (1961), Papia *et al.* (1988), Mau (1990), Pantazopoulou (1998) e Queiroga & Lima (1999). Apresentam-se as prescrições normativas da NBR6118/1978, NBR6118/2003, CEB 95, EUROCODE 2/2001 e ACI318/2002, no que concerne ao detalhamento das armaduras longitudinais e transversais em pilares de concreto armado.

No Capítulo 3, apresenta-se a formulação matemática utilizada para descrever o comportamento da armadura longitudinal, que é considerada com um ou mais graus de liberdade. Além disso, admite-se apenas carregamento axial concêntrico, incluindo-se ainda o efeito da imperfeição geométrica inicial, para se levar em consideração a deformação lateral do concreto e falhas de construção.

A armadura longitudinal é considerada engastada nas extremidades no primeiro caso e engastada-livre no segundo caso, para se levar em conta os casos onde se tem emenda da armadura longitudinal. Um modelo simples e uma solução em série é apresentada, na qual os estribos são representados esquematicamente como apoios intermediários unilaterais distribuídos discretamente ou continuamente ao longo da coluna, cuja rigidez K depende das características mecânicas e geométricas. Em seguida uma introdução à consideração do conjunto de armaduras longitudinais e transversais como uma placa ortotrópica é apresentada. As informações daí decorrentes são aproveitadas nos capítulos que seguem.

Todos os desenvolvimentos algébricos deste trabalho foram realizados usando-se o programa de álgebra simbólica *Maple* e algumas implementações

computacionais foram realizadas através da linguagem de programação Fortran 90.

No Capítulo 4, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos através da formulação apresentada. São obtidas as curvas que relacionam a carga crítica vs. rigidez dos estribos para o modelo considerado. Os caminhos pós-críticos são apresentados a fim de avaliar sua estabilidade e possível sensibilidade a imperfeições levando-se em consideração em cada caminho a influência do parâmetro de rigidez do estribo, o comprimento da coluna e a imperfeição geométrica inicial.

No Capítulo 5, apresenta-se um critério para o cálculo do diâmetro e espaçamento entre estribos através da formulação proposta, onde a carga de flambagem é maior que a carga de plastificação por compressão por um fator $\gamma > 1$, isto para garantir o uso de $P_y = f_y A_s$ no dimensionamento inicial, como é feito usualmente. O diâmetro e o espaçamento entre os estribos são obtidos a partir da análise dos gráficos da carga vs. rigidez dos estribos. Analisa-se também o caso de emendas e o caso da flambagem com uma meia-onda entre dois estribos. Verifica-se ainda a influência dos arranjos adotados no cálculo da rigidez dos estribos e também no valor da carga crítica da armadura longitudinal.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Em seguida, o Apêndice apresenta as principais simulações dos resultados obtidos na revisão bibliográfica e a descrição detalhada da implementação do modelo adotado para o estudo da flambagem da armadura longitudinal.