

2 Revisão bibliográfica

Os sistemas de ancoragem para concreto podem ser classificados em duas grandes categorias: sistemas de pré-concretagem, que são posicionados na fôrma antes da concretagem, e os pós-concretagem, que são fixados através da perfuração do concreto já endurecido.

Cada um dos sistemas de ancoragem é apropriado para um tipo específico de aplicação. A escolha de um determinado tipo de ancoragem é baseada em critérios econômicos, arquitetônicos e de viabilidade técnica.

Neste trabalho serão estudados especificamente sistemas de ancoragem de pré-concretagem, compostos de pinos com cabeça ligados a uma chapa de aço. Portanto, o interesse deste capítulo é dar uma visão geral dos sistemas de ancoragem, além de mostrar o método de cálculo da capacidade de carga última, para pinos com cabeça, em que o colapso é governado pela ruptura de um cone de concreto.

A presente revisão bibliográfica baseia-se nas informações encontradas nas publicações do *CEB (1994/1997)*, principalmente nos tópicos referentes à classificação dos sistemas de ancoragem, incluindo a adaptação das figuras explicativas, e procedimento de cálculo para a estimativa da carga de ruptura.

2.1. Ancoragem para concreto

Nos sistemas de pré-concretagem a carga é transmitida para o material base por ancoragem mecânica e/ou aderência. As forças atuantes nesse sistema são muitas vezes distribuídas para o concreto através de uma armadura convenientemente posicionada. No caso de sistemas pós-concretagem, o posicionamento da armadura apresenta muita dificuldade, tornando-o inviável. Em contrapartida, avanços na tecnologia de perfuração levam os sistemas posteriormente instalados a serem utilizados em larga escala em novas construções, bem como em projetos de recuperação e reforço estrutural.

A maioria dos sistemas de ligação são compostos basicamente pelos elementos mostrados na Figura 2.1.

Elemento de ligação: é o elemento a partir do qual se deseja transferir esforços para o concreto. Em geral, trata-se de um perfil de aço estrutural, incluindo também uma placa de base.

Chumbadores: ligam a placa de base ao concreto.

Material base: concreto que envolve os chumbadores.

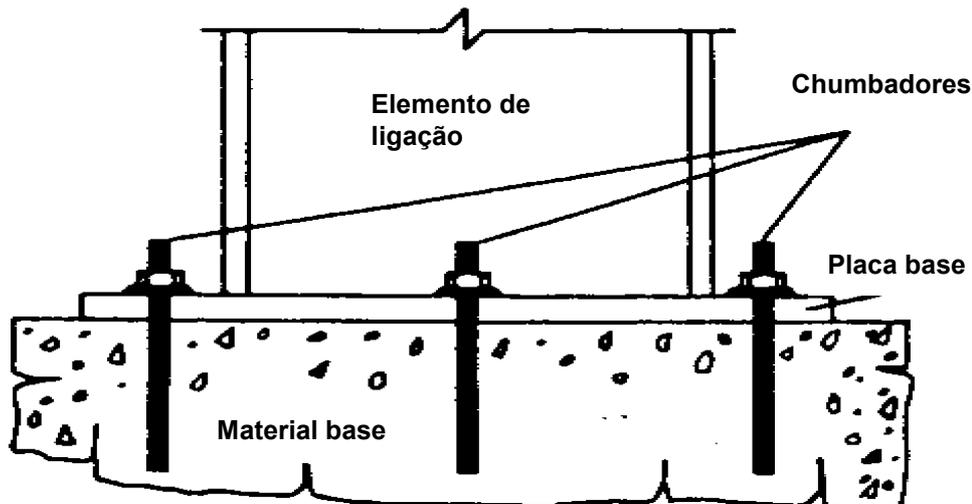


Figura 2.1 - Elementos componentes de uma ancoragem padrão.

2.2. Tipos de Esforços

A carga é transmitida do elemento de fixação para a placa de base, desta para os chumbadores, e destes para o concreto. Os esforços solicitantes nos chumbadores podem ser normal, cisalhante e momento, atuando isolados ou simultaneamente, conforme mostra a Figura 2.2.

2.3. Mecanismos de transferência de carga

Para se classificar os sistemas de ancoragem é necessário o entendimento dos mecanismos de transferência de carga na interface do chumbador com o material base.

Para chumbadores submetidos a esforços de tração, os principais mecanismos de transferência de carga são:

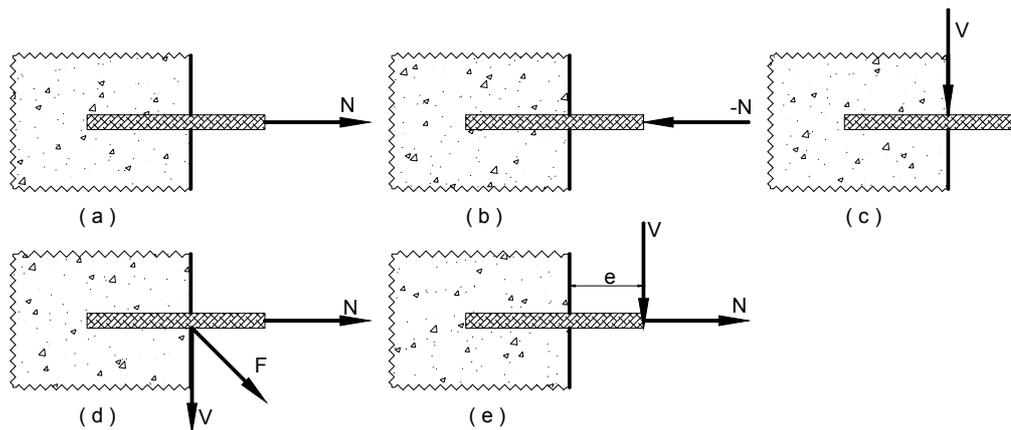


Figura 2.2 - Possíveis modos de transferência de carga: (a) tração; (b) compressão; (c) cisalhamento; (d) tração e cisalhamento; (e) tração, cisalhamento e momento fletor.

Ancoragem mecânica: a transferência de carga se dá em uma região próxima à extremidade do chumbador onde se desenvolvem elevadas tensões de esmagamento. Figura 2.3(a).

Atrito: a principal característica deste mecanismo é a proporcionalidade da transferência da força aplicada com relação a força normal à superfície de atrito, Figura 2.3(b).

Aderência: a transferência de carga se dá ao longo de todo o comprimento do chumbador embutido no material base. Pode ser ainda aderência mecânica ou química. Figura 2.3(c).

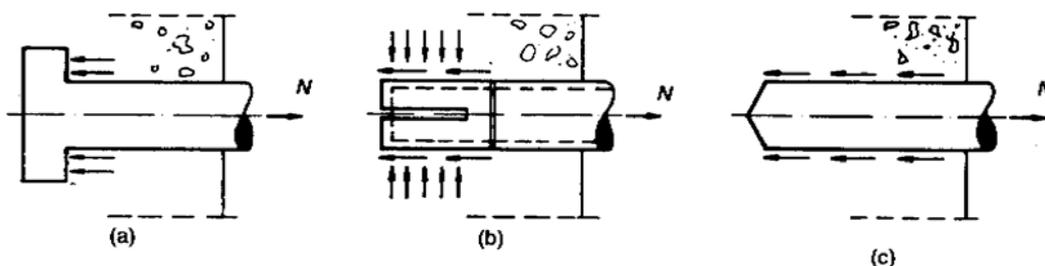


Figura 2.3 - Mecanismos de transferência de carga: (a) ancoragem mecânica; (b) atrito; (c) aderência.

2.4. Tipos de sistemas de ancoragem

Como visto anteriormente, os sistemas de ancoragem para concreto podem ser classificados em duas grandes categorias: sistemas de pré-concretagem, que são posicionados na fôrma antes da concretagem, e os pós-concretagem que são fixados através da perfuração do concreto já endurecido.

2.4.1. Sistemas de pré-concretagem

2.4.1.1. Trabalhando com ancoragem mecânica

Encaixes com rosca: os chumbadores mostrados na Figura 2.4 são fabricados a partir de barras, tubos e peças moldadas de aço, as quais possuem roscas no interior. Consistem em tubos amassados (Figura 2.4(a)), elemento de ancoragem reto (Figura 2.4(b)) ou cabeças de parafusos (Figura 2.4(c)) e estão disponíveis em diversos tamanhos e diâmetros.

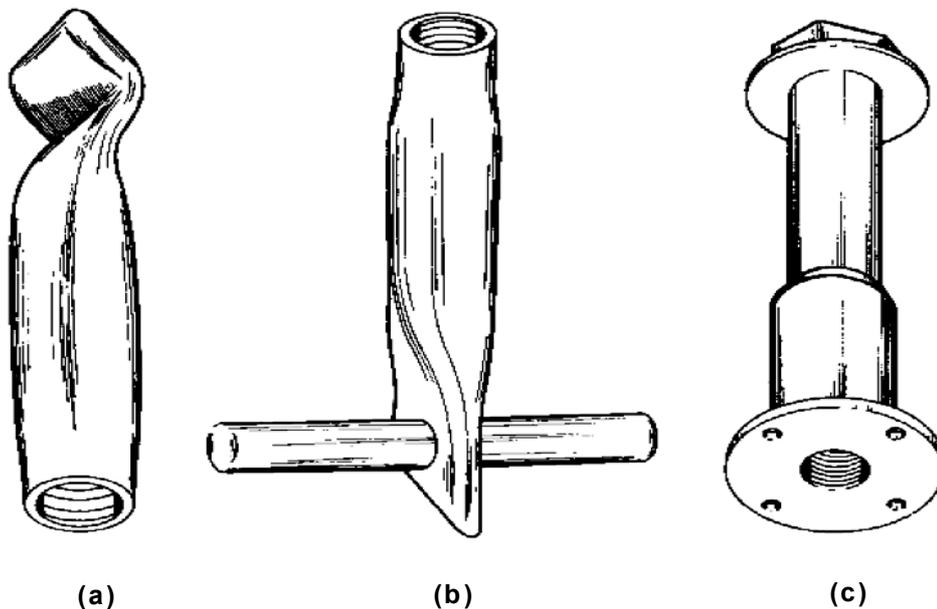


Figura 2.4 - Encaixes com rosca (a) tubo amassado; (b) elemento de ancoragem reto; (c) cabeça de parafuso.

Parafusos com cabeça: são parafusos de aço estrutural (Figura 2.5(a)) posicionados com a cabeça embutida no concreto. Tal ancoragem depende basicamente da ancoragem mecânica promovida pela cabeça do parafuso (no caso de esforços de tração), apesar de alguma aderência se desenvolver ao longo do comprimento do parafuso.

Pinos com cabeça: esses pinos com cabeça consistem de uma barra lisa com uma cabeça circular (Figura 5(d)). Tipicamente a relação entre o diâmetro da cabeça e o diâmetro da barra é aproximadamente 1,5. A extremidade livre

(sem cabeça) pode ser soldada a uma placa de aço ou rosqueada, fazendo esta ancoragem ter o mesmo efeito de uma que utilize parafusos com cabeça.

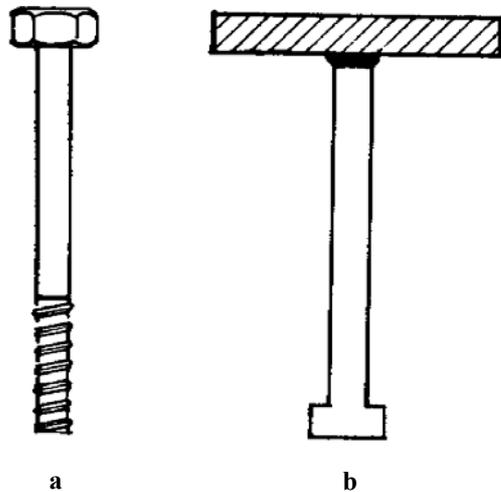


Figura 2.5 - Chumbadores de formas variadas: (a) parafuso com cabeça e (b) pino com cabeça.

Barra canal: esta ancoragem é composta por perfis metálicos U, dobrados ou laminados, e um elemento chumbador, usualmente perfis I ou T, soldados ao perfil U. O conjunto é posicionado na fôrma e então se preenche o interior do U com uma espécie de espuma rígida para que o concreto não penetre quando lançado. Após a remoção da fôrma a espuma é extraída e a ligação pode ser feita com parafusos de cabeça em forma de gancho. A Figura 2.6 mostra os detalhes deste tipo de ancoragem.

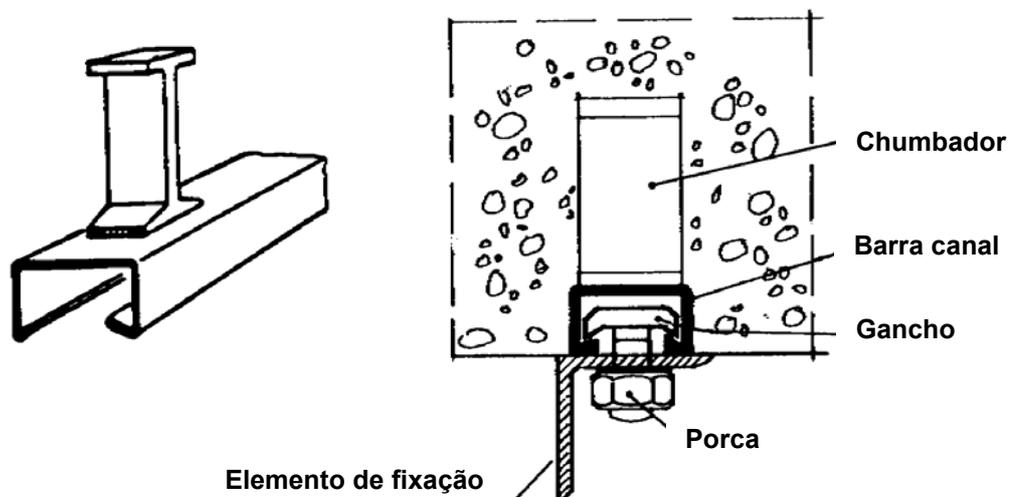


Figura 2.6 - Detalhes de ancoragem tipo barra canal.

2.4.1.2. Trabalhando por aderência

No caso de barras retas sem uma extremidade que promova a ancoragem mecânica, como por exemplo, parafusos e pinos com cabeça, a transferência de carga se dá unicamente por aderência. Barras retas rosqueadas ou com nervuras são freqüentemente utilizadas. A Figura 2.7 mostra o funcionamento da ancoragem por aderência.

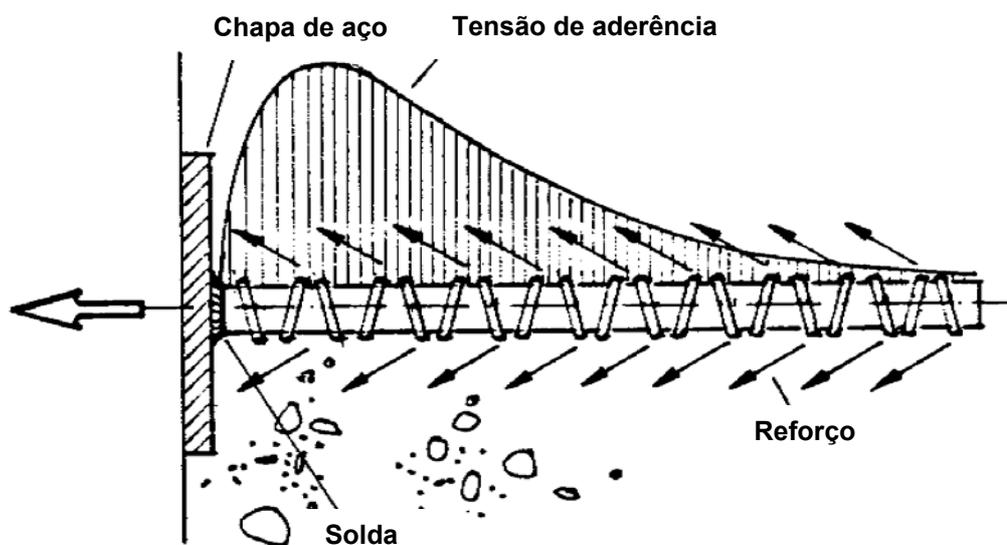


Figura 2.7 - Barra com nervuras utilizada em uma ancoragem por aderência.

2.4.2. Sistemas de pós-concretagem

Os sistemas de ancoragem com instalação posterior admitem furos pré-moldados ou feitos após o endurecimento do concreto, utilizando máquinas perfuradoras ou de impacto. O método mais comum usado para perfurar o concreto é a combinação das ações de rotação e percussão. É possível executar facilmente com furadeiras, utilizando brocas helicoidais de aço, furos de até 30 mm de diâmetro.

A terminologia dos chumbadores baseia-se na NBR Projeto 04:003.01-104/02.

2.4.2.1. Chumbadores de expansão

Os chumbadores de expansão diferem dos outros tipos de chumbadores pós-concretagem por transferirem esforços de tração por atrito. A resistência ao

atrito depende diretamente da força normal gerada pelo mecanismo de expansão do chumbador, durante a instalação e toda sua vida útil. Estes podem ser divididos em duas classes, de acordo com o modo como a força de expansão é gerada: expansão controlada por torque e controlada por percussão.

Para chumbadores com expansão controlada por torque, o mecanismo de expansão se dá através da aplicação de um torque específico na cabeça ou na porca do parafuso. O torque aplicado serve para puxar a cunha cônica entre os elementos de expansão, forçando-os contra a parede do furo. O esforço de tração é transmitido do parafuso para a cunha, e desta para os elementos de expansão, os quais transferem o esforço para o concreto, por atrito, através da parede do furo. Cabe ressaltar que esforços externos, de arrancamento do chumbador, tendem a forçar ainda mais a cunha, aumentando assim a força de expansão. A Figura 2.8 mostra os vários tipos de chumbadores com expansão controlada por torque.

Chumbadores com expansão controlada por percussão diferem dos primeiros por que sua cunha é inserida nos elementos de expansão através de energia de impacto, geralmente produzida por um martelo ou uma ferramenta apropriada. A Figura 2.9 mostra os vários tipos de chumbadores com expansão controlada por percussão.

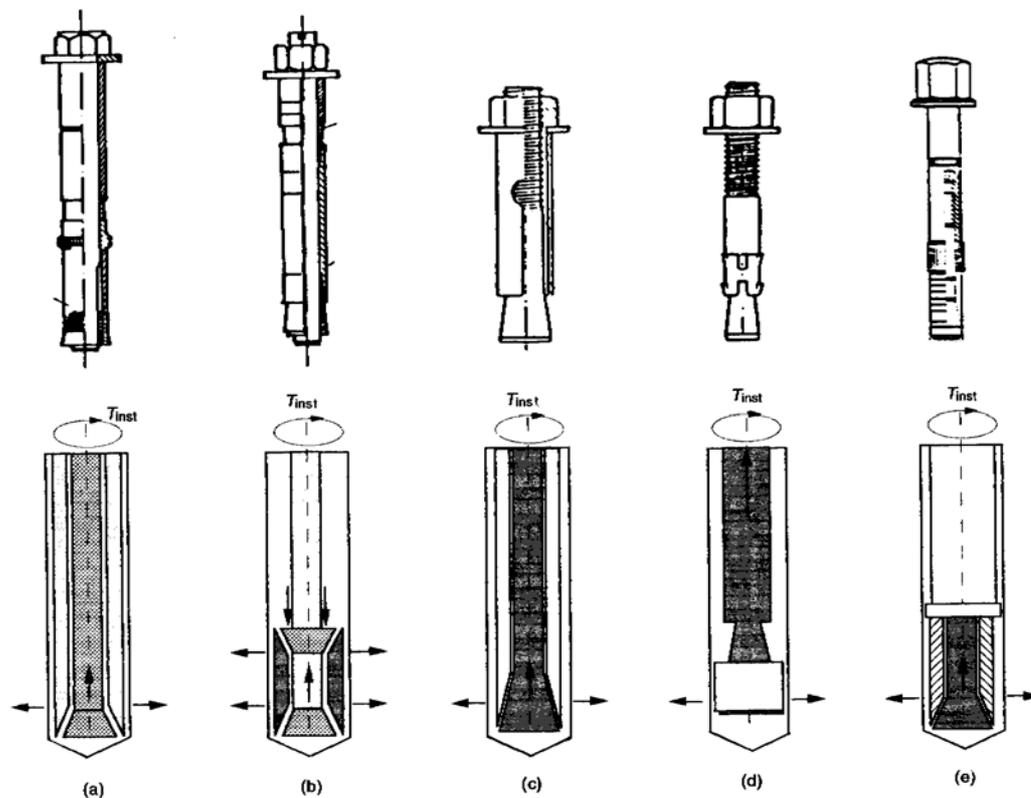


Figura 2.8 - Chumbadores com expansão controlada por torque.

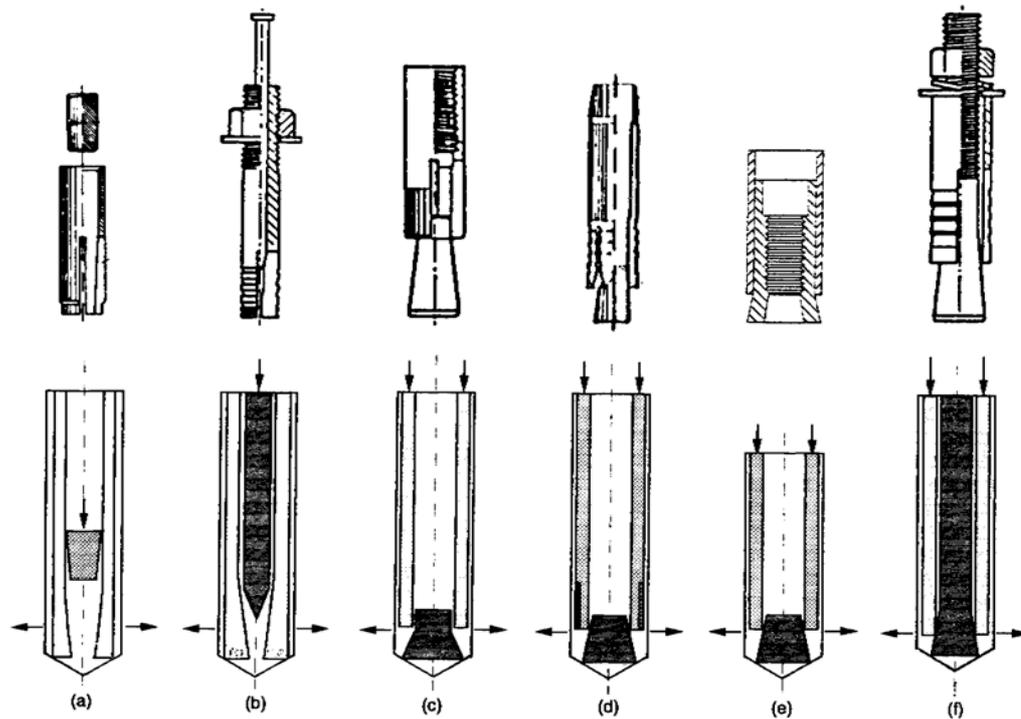


Figura 2.9 - Chumbadores com expansão controlada por percussão.

2.4.2.2. Chumbadores de segurança

Este tipo de chumbador transmite os esforços de tração para o concreto por ancoragem mecânica. É necessário um furo no concreto, com um alargamento localizado, para receber os elementos de expansão do chumbador. Por depender essencialmente da ancoragem mecânica como mecanismo de transferência de carga, estes chumbadores desenvolvem pequena ou quase nenhuma força de expansão durante sua instalação. Pode ser feita uma distinção de tipos segundo o estágio e a posição onde o alargamento do furo é formado. As Figuras 2.10 (a) e (b) mostram chumbadores de expansão de ponta em posições diferentes. Nos chumbadores mostrados nas Figura 2.10 (a)-(c) o alargamento do furo é formado por ferramentas especiais de perfuração antes da instalação. Em outros casos o alargamento é formado após a execução do furo, como mostram as Figura 2.10 (d) e (e).

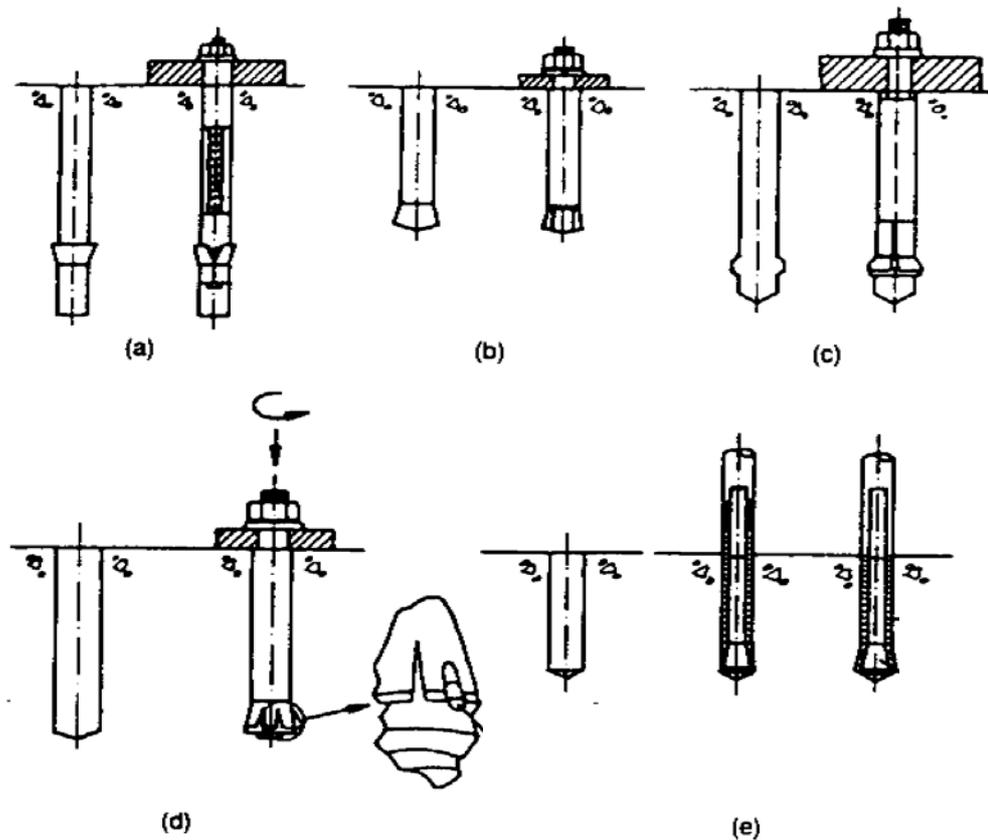


Figura 2.10 Chumbadores de expansão de ponta: (a)-(c) o alargamento é formado antes da instalação; (d) e (e) o alargamento é formado durante a instalação do chumbador.

2.4.2.3. Chumbadores de adesão química

O termo chumbadores de aderência, utilizado neste trabalho, reúne um conjunto de aglutinantes que servirão para embutir o chumbador, incluindo cimento e polímeros. Estes chumbadores podem ser subdivididos, de acordo com o método de posicionamento ou instalação, em dois grupos: os que utilizam cápsulas e os que utilizam injeção. A limpeza da parede do furo é um fator determinante da capacidade de carga deste tipo de ancoragem.

Um chumbador tipo cápsula típico (Figura 2.11), consiste de uma ampola contendo um componente químico (polímero), um acelerador ou catalisador, e agregado mineral. Neste caso a mistura do componente químico com o catalisador se dá quando, na inserção do chumbador, este perfura a cápsula.

Chumbadores do tipo injeção são aqueles onde o componente aglutinante é introduzido de forma livre, ou seja, sem estar contido em uma cápsula. O componente aglutinante pode ser químico (chumbadores de injeção de resina),

Figura 2.12(b), ou não-químico (chumbadores de injeção de aglomerante a base de cimento), Figura 2.12(a).

No caso da resina, esta é misturada ao catalisador em proporções adequadas e inserida no furo antes do chumbador. São utilizados como chumbadores barras deformadas e/ou rosqueadas.

Parafusos com cabeça, barras com rosca e porca e barras de armadura são freqüentemente utilizadas como chumbadores de injeção de aglomerante a base de cimento. Neste caso são posicionados no furo antes da inserção do aglomerante. Apesar de grande parte da transferência de carga se dar por aderência, algum atrito pode ser desenvolvido se for utilizado um aglomerante de expansão.

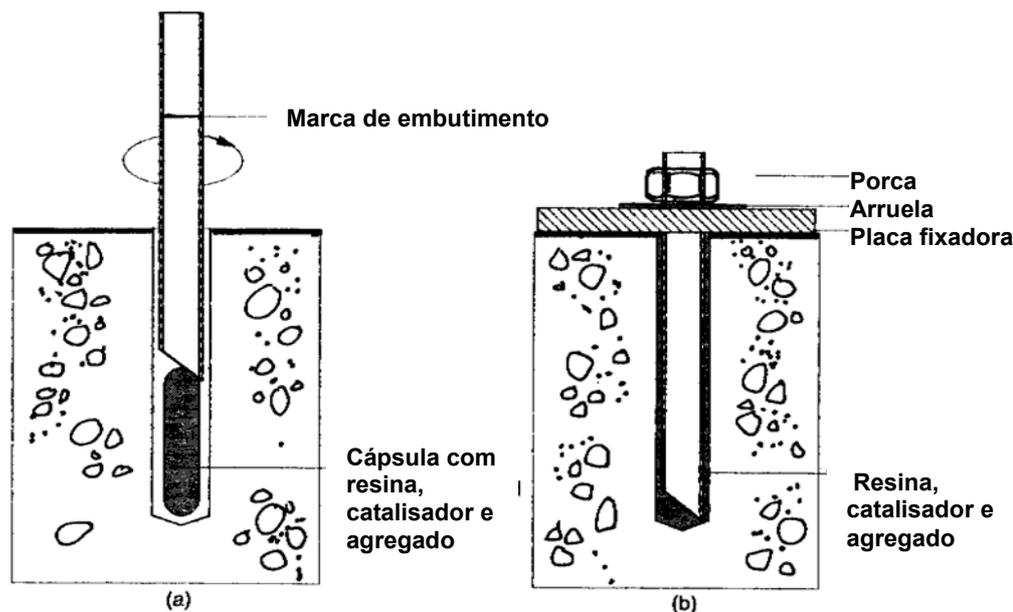


Figura 2.11 - Chumbador tipo cápsula: (a) durante instalação; (b) após instalação.

2.4.2.4. Chumbadores acionados por pólvora

Os chumbadores acionados por pólvora, por dispensar energia elétrica, fornecem maior flexibilidade e economia para aplicações repetitivas. Estes chumbadores têm a forma de pregos (Figura 2.13) e são introduzidos no concreto por meio de ferramenta que utiliza carga explosiva.

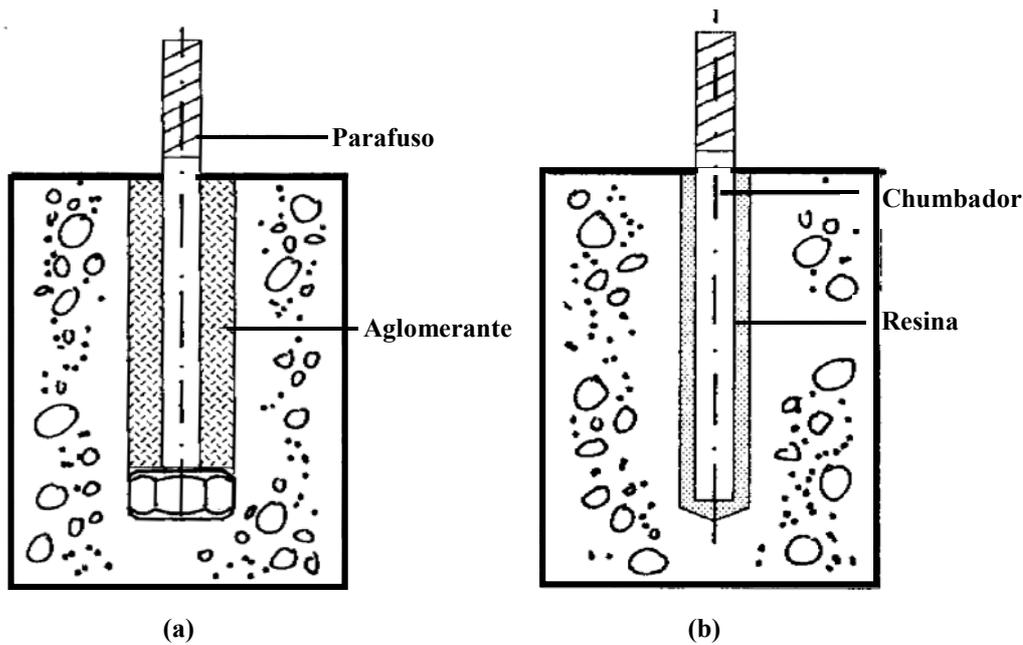


Figura 2.12 - Chumbador de injeção de aglomerante a base de cimento e resina.

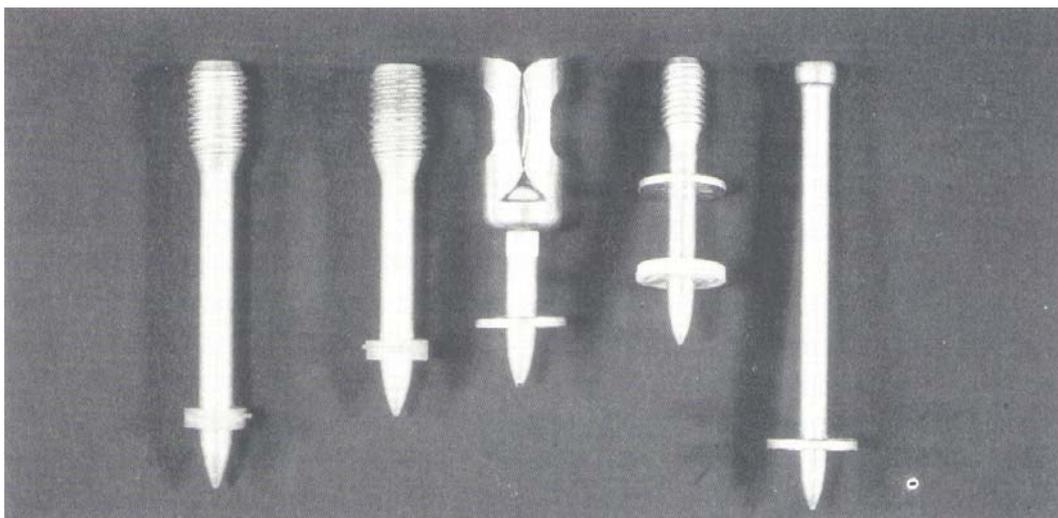


Figura 2.13 - Chumbadores acionados por pólvora.

O princípio básico da ancoragem acionada por pólvora consiste no deslocamento do concreto durante sua penetração. Na região imediatamente vizinha ao pino do chumbador, o concreto é parcialmente destruído. A força que ancora efetivamente o pino é oriunda da reação ao deslocamento do concreto, e uma parcela de aderência química. Devido à alta velocidade de penetração do pino, a temperatura se eleva na superfície do furo. Tal fenômeno aumenta a aderência entre o pino e o concreto.

2.5. Sistema de ancoragem estudado

Com a apresentação dos diversos sistemas de ancoragem existentes, pode-se inserir o sistema estudado no grupo dos sistemas de pré-concretagem trabalhando com ancoragem mecânica, compostos por pinos com cabeça soldados à placa de fixação, como mostra a Figura 2.14.

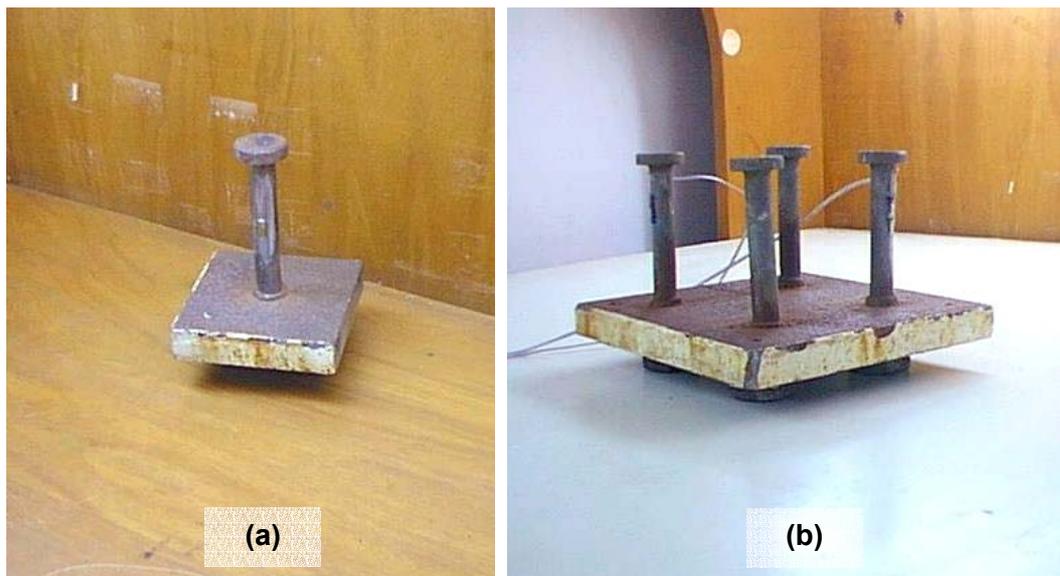


Figura 2.14 - Sistema de ancoragem estudado: (a) placa com 01 e (b) com 04 pinos.

2.6. Modos de ruptura (tração)

De maneira geral, cinco modos de ruptura foram identificados para chumbadores com cabeça submetidos à tração (Klingner & Mendonça, 1982a; Collins, Klingner & Polyzois, 1989; Rehm, Eligehausen & Mallée, 1988):

2.6.1. Ruptura do Aço

Este modo de ruptura ocorre com o escoamento e ruptura da barra do chumbador (Figura 2.15 (a)). A carga de ruptura tem como fatores determinantes a área da seção transversal e a resistência do aço.

2.6.2. Ruptura do cone de concreto

Este tipo de ruptura, que será objeto deste estudo, é caracterizado pela formação de uma superfície de fratura aproximadamente cônica, que se inicia no topo da cabeça do chumbador e termina na superfície livre do material base, (Figuras 2.15 (b), (b) e (c)). O comprimento de ancoragem e a resistência do concreto são fatores determinantes da carga de ruptura. Para o caso de um grupo de chumbadores, o espaçamento entre eles determina o volume de concreto mobilizado para resistir à carga aplicada. (Figura 2.15 (c)). Se um chumbador está localizado próximo a um bordo livre do elemento de concreto, o cone de ruptura é limitado por este bordo (Figura 2.15 (d)). Quando o cone de ruptura é reduzido, seja pela proximidade de um bordo ou pelo pequeno espaçamento entre chumbadores, a carga na qual este tipo de ruptura ocorre, também é reduzida.

2.6.3. Ruptura lateral (*Bursting failure*)

Ocorre quando as tensões transversais em torno da cabeça do chumbador excedem a resistência à tração do concreto na região entre a cabeça do chumbador e o bordo livre (Figura 2.15 (e)). A resistência a este modo de ruptura aumenta com a distância de borda, resistência à tração do concreto e o diâmetro da cabeça.

2.6.4. Arrancamento do chumbador

Ruptura caracterizada pelo esmagamento contínuo do concreto sobre a cabeça do chumbador, seguido pela formação de um cone de ruptura do concreto à medida que a cabeça do chumbador se aproxima da superfície livre do concreto (Figura 2.15 (f)). Este modo de ruptura ocorre quando as tensões de contato no concreto são elevadas, devido à reduzida relação entre os diâmetros da cabeça e da barra. A resistência ao arrancamento do chumbador aumenta com o aumento do diâmetro da cabeça e da resistência à compressão do concreto.

2.6.5. Fendilhamento

Modo de ruptura caracterizado pelo fendilhamento do concreto num plano vertical passando pelo chumbador (Figura 2.15 (g)-(i)). O fendilhamento impede outros modos de ruptura, somente se as dimensões do elemento de concreto forem reduzidas frente às do chumbador e ao comprimento embutido (Figura 2.15 (g)), ou se o chumbador estiver próximo a um bordo livre. Teoricamente este modo de ruptura pode ocorrer se o espaçamento entre os chumbadores for reduzido (Figura 2.15 (i)), embora este fenômeno seja limitado aos chumbadores de expansão.

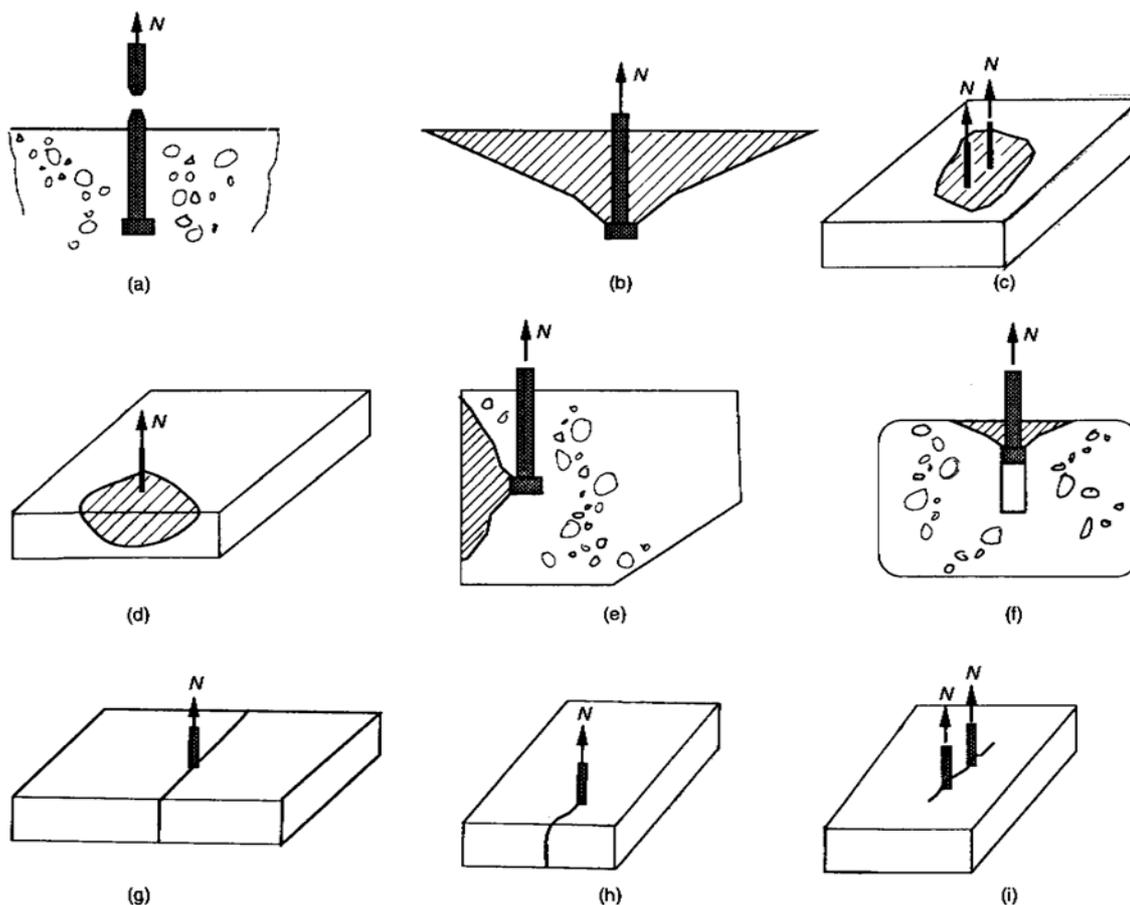


Figura 2.15 - Modos de ruptura de sistemas de ancoragem submetidos à tração.

2.7. Métodos de dimensionamento

O projeto de um sistema de ancoragem usando chumbadores com cabeça deve ser realizado de modo a evitar todos os modos de ruptura descritos nas

Seções 2.6.1 - 2.6.5. Entretanto, o interesse desta pesquisa está relacionado diretamente com o modo de ruptura descrito na Seção 2.6.2.

Existem vários métodos para estimar a carga de ruptura governada pelo arrancamento do cone de concreto. A maioria destes estudos baseia-se em observações empíricas da forma do cone de ruptura, do estado de tensão na ruptura e de suposições da capacidade de carga do concreto. Basicamente, são ajustadas as formulações, que são o resultado destas observações, com a finalidade de alcançar um melhor ajuste dos dados de ensaios disponíveis.

Dentre os diversos métodos de estimativa, o CEB cita o método do ACI 349 (1985), de Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987), e o método de Eligehausen, Fuchs & Mayer (1987/1988) e Rehm et al. (1988), como sendo os três métodos mais comumente utilizados para o cálculo da carga última de tração associada à ruptura do cone de concreto.

Para fins de comparação com os resultados obtidos experimentalmente, será mostrado como é estimada a capacidade de carga para a ruptura do cone de concreto pelo método de Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987), e o método de Eligehausen, Fuchs & Mayer (1987/1988) e Rehm et al. (1988), este denominado método ψ na notação do CEB.

2.7.1.

Método segundo Eligehausen, Fuchs & Mayer (1987/1988) e Rehm et al. (1988) (método ψ)

O método ψ apresenta um procedimento para o cálculo da carga última de tração, baseado em 196 testes de pinos com cabeças. Os ensaios abrangeram comprimento de ancoragem de 40 mm a 525 mm e concreto com resistência à compressão f_c de 17 a 51 MPa, obtida na data dos ensaios. Baseado na análise de regressão dos resultados dos ensaios, a seguinte relação foi obtida para a carga última média:

$$N_{u,m} = 17 h_{ef}^{1.5} f_c^{0.5} \quad (2.1)$$

onde $N_{u,m}$ é a carga última em N, h_{ef} é o comprimento efetivo de ancoragem em mm e f_c a resistência à compressão do concreto em MPa.

A Figura 2.16 define o comprimento efetivo da ancoragem. O comprimento efetivo de ancoragem atinge a superfície do concreto se o cone não intercepta a placa de ancoragem, Figura 2.16(a). Se essa condição não for satisfeita, o

comprimento embutido chega somente à superfície da placa de ancoragem como mostra a Figura 2.16(b).

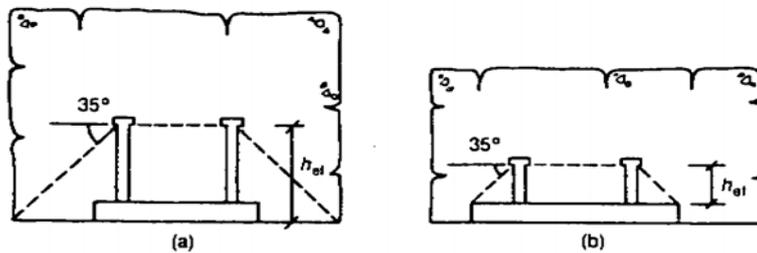


Figura 2.16 - Definição do comprimento efetivo de ancoragem h_{ef} para chumbadores com a placa de ancoragem embutida no concreto.

A Figura 2.17 mostra o resultado dos ensaios para a carga de ruptura em função do comprimento de ancoragem h_{ef} . A curva para força média de ruptura foi obtida através da eq. (2.1).

A redução da carga, causada por grupos de chumbadores próximos uns dos outros, é baseada no estudo originalmente desenvolvido por Eligehausen & Pussil-Wachtmuth (1982). Baseado num ângulo $\alpha \approx 35^\circ$ para o cone de ruptura, medido a partir de plano perpendicular ao eixo do chumbador até a superfície de ruptura (Figura 2.16), e admitindo que a superposição dos cones de ruptura adjacentes promovem a redução da capacidade de carga do grupo de chumbadores, os pesquisadores propuseram a seguinte distância crítica para que haja redução da carga média última por efeito de grupo:

$$s_{cr} = 3h_{ef} \quad (2.2)$$

Dessa maneira, a carga média para um grupo de dois chumbadores é dada por:

$$N_{u,m,gr} = \psi_s N_{u,m} \quad (2.3)$$

$$\psi_s = 1 + s/s_{cr} \leq 2 \quad (2.4)$$

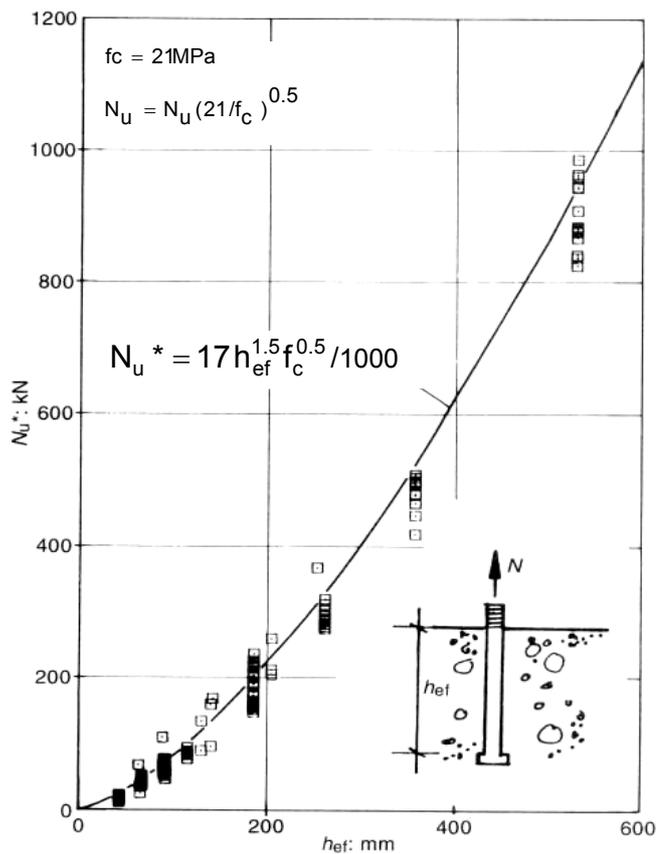


Figura 2.17 - Comparação da eq. (2.1) com o resultado de ensaios de pinos com cabeça, normalizado para concreto com resistência à compressão de 21 MPa (Rehm et al., 1988).

onde ψ_s representa o fator de redução devido ao espaçamento entre chumbadores e s a distância entre chumbadores.

Para o cálculo de um arranjo ortogonal de quatro chumbadores, que é um dos casos analisados neste trabalho, Rehm et al. (1988) propuseram que o fator ψ_s pode ser separado para cada direção ortogonal resultando as expressões:

$$N_{u,m,gr} = \psi_{s1}\psi_{s2} N_{u,m} \quad (2.5)$$

$$\psi_{si} = 1 + s_i/s_{cr} \leq 2 \quad (2.6)$$

onde s_i é a distância de entre centros dos chumbadores na direção i e $N_{u,m}$ é a carga de ruptura média para um chumbador simples dado na eq. (2.1).

A Figura 2.18 (Rehm et al. 1988) mostra a carga de tração de ensaios para grupo de quatro chumbadores com espaçamento iguais nas duas direções. Os

resultados dos ensaios foram divididos pela carga de ruptura de um chumbador isolado, calculada através da eq. (2.1), e plotado em função do espaçamento

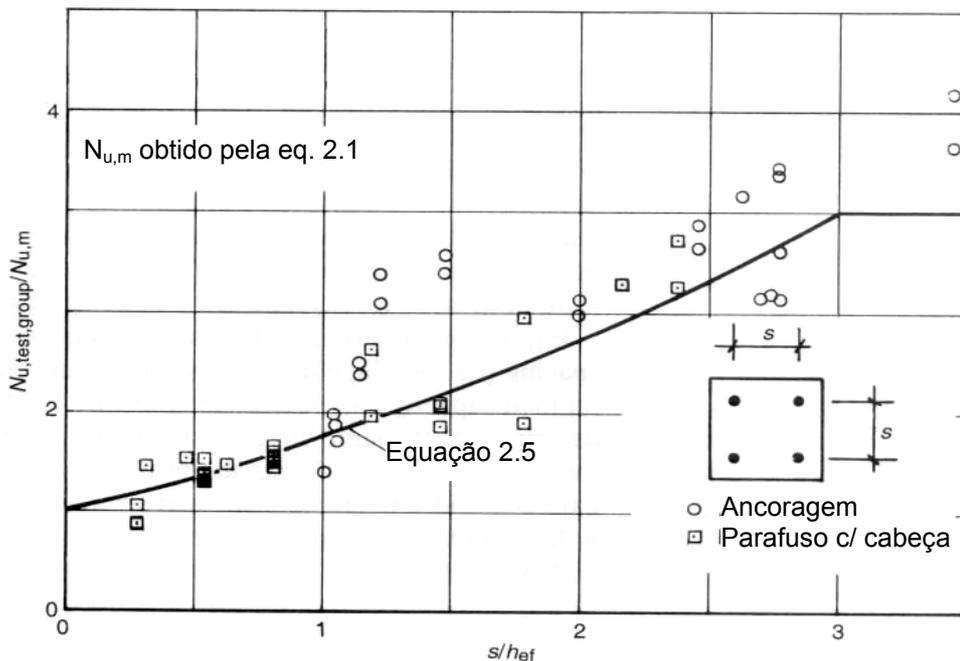


Figura 2.18 - Comparação da eq. (2.5) com o resultado de ensaios de tração para grupo de quatro chumbadores ligados por uma placa rígida (Rehm et al., 1988).

entre chumbadores dividido pelo comprimento de ancoragem. Ensaios com chumbadores de expansão de ponta também foram incluídos.

Implícito na eq. (2.6) está a hipótese de que o efeito negativo do espaçamento sobre a capacidade de carga pode ser estimado através da multiplicação dos efeitos individuais determinados através de medidas ou análises. Esta hipótese de um efeito multiplicativo é a base para o método ψ . Rehm et al. (1998). Ampliando a idéia de ortogonalidade e simetria no arranjo de grupo dos chumbadores, com uma distância máxima em cada direção $s_{t,i} \leq s_{cr}$ e substituindo as distâncias entre chumbadores mais afastados do grupo, $s_{t,i}$ por s_i na eq. (2.6) e multiplicando todos os termos obtém-se:

$$N_{u,mn} = \prod_{i=1}^{i=m1} \psi_{s,i} N_{u,m} \tag{2.7}$$

onde $N_{u,mn}$ é a carga prevista para um grupo de n chumbadores, $n_{u,m}$ é carga média para um único chumbador, segundo a eq. (2.1).

$$\psi_{s,i} = 1 + s_{t,i}/s_{cr} \leq n_i \quad (2.8)$$

onde $s_{t,i}$ é a distância entre chumbadores mais afastados do grupo na direção i , n_i é o número de chumbadores na direção i , $m_1 = 1$ para grupo de chumbadores distribuídos em fila única e $m_1 = 2$ para grupo de chumbadores distribuídos em duas direções.

A excentricidade do carregamento também pode ser introduzida por meio de um fator multiplicativo. A Figura 2.19 mostra a influência de um carregamento excêntrico sobre o comportamento do grupo de chumbadores. Quando a carga atua no centro do grupo de chumbadores a eq. (2.7) é suficiente para determinação da carga média para o grupo de chumbadores (Figura 2.19 (caso 1)). Para o carregamento atuando sobre um chumbador individualmente, a carga limite do grupo de chumbadores corresponde ao valor encontrado para um chumbador único obtido na eq. (2.1), como mostra a Figura 2.19 (caso 3). Quando a força de tração atua em qualquer lugar (Figura 2.19 (caso 2)) sobre o grupo de chumbadores uma curva hiperbólica entre os limites dos casos 1 e 3 pode representar a carga de ruptura do grupo de chumbadores com influência de excentricidade do carregamento. Com isso, a influência de carga excêntrica sobre o grupo de chumbadores pode ser introduzida através do coeficiente adicional ψ_e :

$$N_{u,me} = \psi_s \psi_e N_{u,m} \quad (2.9)$$

$$\psi_e = 1/[1 + (2e/s_{cr})] \leq 1 \quad (2.10)$$

onde e é a excentricidade da carga de tração em relação ao centróide do grupo de chumbadores e $N_{u,me}$ é a carga última com influência de carga excêntrica (Figura 2.19 (caso 2)), com $e \leq st/2$.

A eq. (2.9) também pode ser utilizada para grupos de chumbadores, submetidos à tração, computando os valores $\psi_{s,i}$ e $\psi_{e,i}$ calculados separadamente nas duas direções e multiplicando-os em seguida. O fator de carregamento excêntrico foi proposto por Riemann (1985) com base numa proposta de Moe (1961) para aplicação em lajes sob carga concêntrica.

onde $A_{c,N}^0$ é área do cone na superfície do concreto, para um chumbador simples com grande espaçamento e com grande distância de bordo, idealizando o cone como uma pirâmide de altura h_{ef} e comprimento das arestas da base igual a s_{cr} , conforme define a Figura 2.20 e $A_{c,N}$ é a área atual do cone de ruptura para uma ancoragem na superfície do concreto. É limitada pela sobreposição dos cones de chumbadores adjacentes ($s < s_{cr}$), bem como pelas bordas do elemento de concreto ($c < c_{cr}$). A Figura 2.21 mostra como é obtida a área atual do cone de ruptura para uma ancoragem na superfície do concreto.

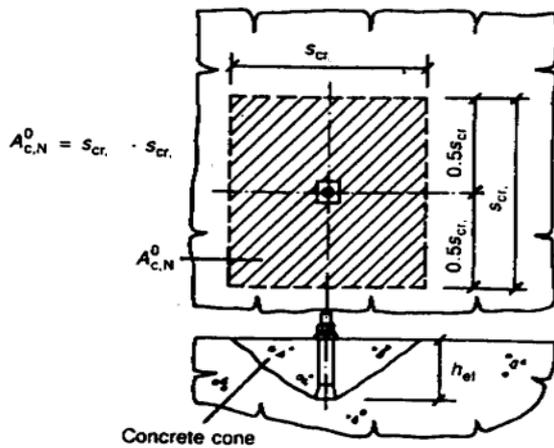


Figura 2.20 - Cone idealizado e área $A_{c,N}^0$ do cone de um chumbador simples sob tração.

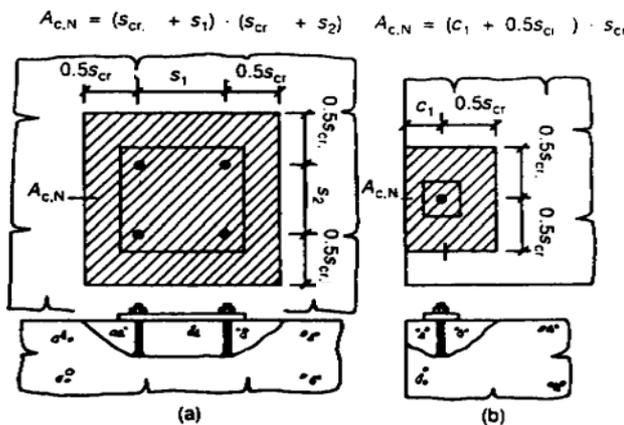


Figura 2.21- Cone idealizado e área $A_{c,N}$: (a) grupo de chumbadores ($s < s_{cr}$); (b) chumbador simples próximo a um bordo ($c_1 < c_{cr}$).

O método ψ inclui todos os três fatores (espaçamento, excentricidade da carga e distância de bordo) no cálculo da carga média do cone de ruptura para

arranjos ortogonais e simétricas de grupos de chumbadores pela multiplicação de todos os fatores:

$$N_{u,m,gec} = \Psi_{s,1}\Psi_{s,2}\Psi_c\Psi_{A,N}\Psi_{e,1}\Psi_{e,2}N_{u,m} \quad (2.13)$$

2.7.2.

Método segundo Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987)

Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987) apresentam uma equação empírica para o cálculo da carga última de tração, para chumbadores individuais em que o colapso ocorre por ruptura do cone de concreto, baseado em 100 testes de pinos com cabeças. Os ensaios abrangeram comprimento de ancoragem de 40 - 140 mm e concreto com resistência à compressão f_c de 17 a 38 MPa, obtida na data dos ensaios. Baseado na análise de regressão dos resultados dos ensaios, a seguinte relação foi obtida para a carga última média:

$$N_{u,m} = 10.89h_{ef}^{1.5} [1 + (d_h/h_{ef})] (f_c)^{0.5} \quad (2.14)$$

onde $N_{u,m}$ é a carga última em N, h_{ef} é o comprimento efetivo de ancoragem em mm, f_c a resistência à compressão do concreto em MPa e d_h é o diâmetro da cabeça do pino em mm.

A Figura 2.22 mostra a carga de ruptura normalizada N_u/f_{ct} em função do comprimento de ancoragem h_{nom} . São plotadas as curvas para a carga de ruptura $N_{u,m}$ de acordo com a eq. (2.14).

Como ocorre no método ψ , o método segundo Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987) baseia-se no estudo originalmente desenvolvido por Eligehausen & Pussil-Wachtmuth (1982), para calcular a redução da carga promovida por grupos de chumbadores próximos uns dos outros e de chumbadores próximos a extremidades. Duas condições de contorno são admitidas para o a distância entre chumbadores:

- (1) Para a distância teórica entre chumbadores de s igual a zero ($s = 0$), a capacidade de carga do grupo de chumbadores é reduzida à capacidade de um chumbador único.

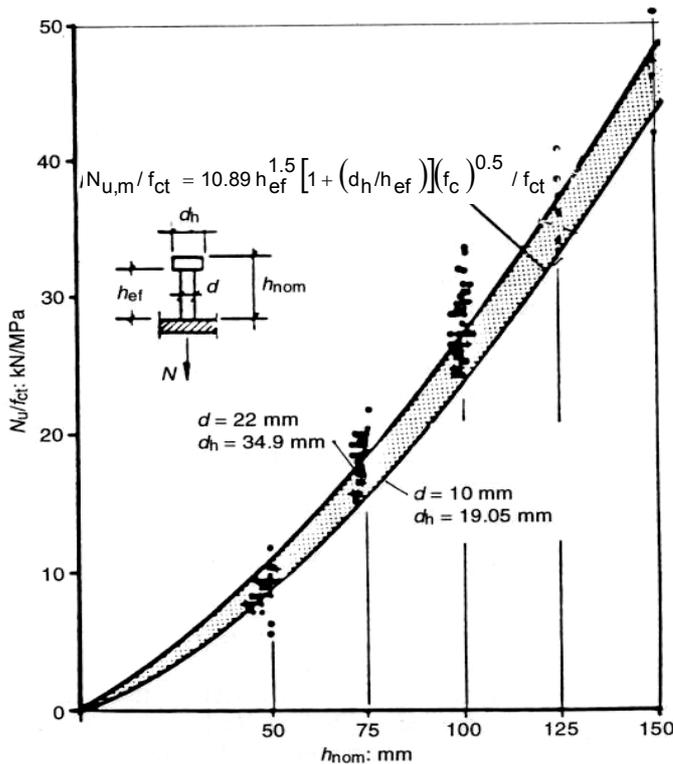


Figura 2.22 - Resultados da carga de ruptura, para ensaios de chumbadores com cabeça, plotados em função do comprimento de ancoragem comparados com a eq. (2.14) (Bode e Roik (1997)).

- (2) Se o espaçamento entre chumbadores s é maior ou igual ao valor $4h_{ef}$, utilizado como espaçamento crítico para o desenvolvimento da capacidade total de carga do cone de ruptura, então o grupo de chumbadores atinge a capacidade máxima de tração, ou seja, n vezes a carga de ruptura de um chumbador único.

Uma linha reta é considerada entre estes valores limites, resultando em:

$$N_{u,m,gr} = [1 + s(n-1)/(4h_{ef})]N_{u,m} \quad (2.15)$$

onde n é o número de pinos atuando juntos em um grupo, s é a distância de centro a centro entre chumbadores e $N_{u,m}$ é a carga de ruptura média para um chumbador isolado calculada pela eq. (2.14).

De modo semelhante, uma distância de bordo crítica c_{cr} é considerada para a obtenção da carga de ruptura máxima do cone de concreto. Dois valores são considerados para distância crítica de bordo, dependendo do número de bordos livres próximos, sendo $c_{cr} = 1.5h_{ef}$ (para um bordo livre) e $c_{cr} = 2h_{ef}$ (para dois ou mais bordos livres, por exemplo, pinos localizados em cantos). A redução da capacidade de carga do chumbador é dada pela equação:

$$N_{u,mc} = c/c_{cr} N_{u,m} \quad (2.16)$$

onde c é a distância do centro do pino ao bordo livre e $N_{u,m}$ é o valor da carga média de ruptura calculado através da eq. (2.14).

A Figura 2.23 mostra o resultado de ensaios para pino com cabeça localizado próximo a um bordo livre comparado com a eq. (2.16). A carga obtida foi normalizada em relação ao valor calculado pela eq. (2.14), e plotado em função do fator distância de bordo dividido pelo comprimento de ancoragem (c/h_{ef}).

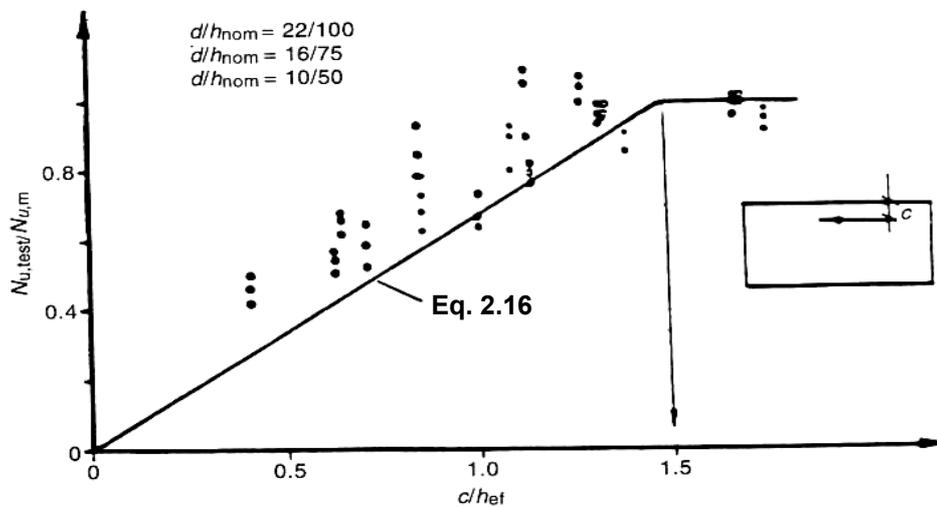


Figura 2.23 - Dados dos ensaios de chumbadores com cabeça próximos a um bordo, plotados em função do fator: distância do bordo dividido pelo comprimento de ancoragem, comparados com a eq. (2.16) (Bode e Roik (1997)).

2.7.3. Método do ACI 349(1985)

A equação do ACI 349 para o cálculo da carga de ruptura de uma ancoragem de pino único isolado é a seguinte:

$$N_{u,m} = \phi 0,33 f_c^{0,5} \pi h_{ef} (h_{ef} + d_h) \quad (2.17)$$

onde $N_{u,m}$ é a carga última em N, h_{ef} é o comprimento efetivo de ancoragem em mm, f_c a resistência à compressão do concreto em MPa, d_h é o diâmetro da cabeça do pino em mm e $\phi=1$ para determinação de carga de ruptura.