

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações Iniciais

Os sistemas de ancoragem atualmente utilizados podem ser divididos em duas categorias: sistema de pré-concretagem, o qual é posicionado na forma ou no local a ser instalado antes da concretagem, e sistema pós-instalado, o qual é instalado no concreto endurecido por meio de perfuração.

Neste trabalho, dando continuidade a linha de pesquisa iniciada por Oliveira (2003), será abordado e estudado especificamente um sistema de pré-concretagem, composto por pino de ancoragem único com cabeça (*headed stud*), e submetido à carga de impacto.

Neste capítulo é feita uma descrição geral dos sistemas de ancoragem, mostrando os mecanismos de transferência de carga, possíveis modos de ruptura e métodos estimativos da força última de sistemas de ancoragem, para pinos isolados sujeitos a carregamento estático e dinâmico.

Parte da presente revisão bibliográfica baseia-se em publicações do CEB (1994,1997), principalmente nos tópicos relacionados aos tipos de sistemas de ancoragem, modos de ruptura e mecanismos de transferência de carga. São feitas adaptações de figuras, e métodos para a estimativa da carga última.

2.2. Sistemas de Ancoragem para Concreto

Um sistema de ancoragem com chumbadores embutidos em concreto é composto basicamente pelos elementos ilustrados na Figura 2.1.

Estrutura: elemento do qual são originadas as solicitações que se deseja transferir ao material base por intermédio do pino de ancoragem. Pode ser constituído de aço estrutural, madeira, concreto estrutural ou outro material.

Chumbador: elemento que recebe as solicitações da estrutura e as transfere ao material base.

Material Base: é o que envolve o chumbador. Geralmente emprega-se o concreto.

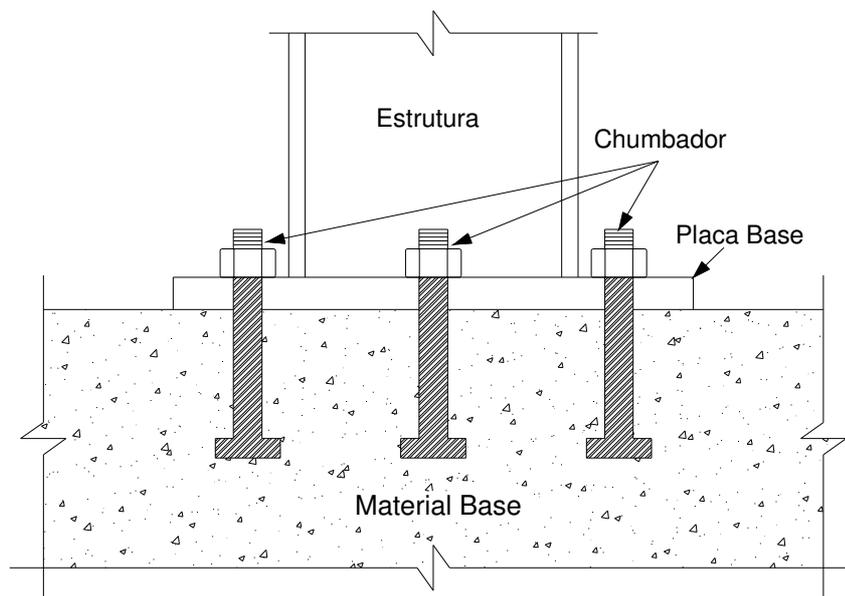


Figura 2.1 - Elementos básicos que compõem uma ancoragem; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* - CEB (1994).

As solicitações na ancoragem, que são transmitidas ao concreto, podem ser força normal, força cortante e momento, agindo isoladamente ou combinadas (Figura 2.2).

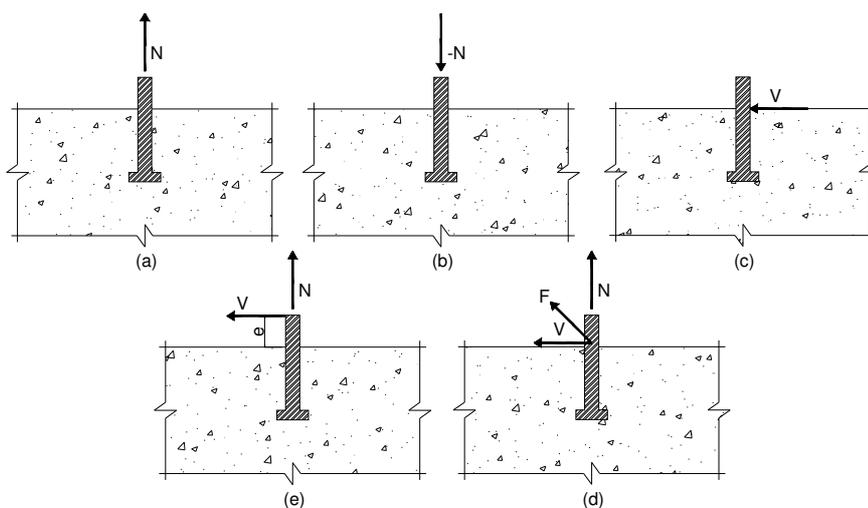


Figura 2.2 - Tipos de solicitações na ancoragem: (a) e (b) força normal; (c) cisalhamento; (d) tração e cisalhamento combinados; (e) tração, cisalhamento e momento fletor combinados; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* - CEB (1994).

2.3. Mecanismos de Transferência de Carga

Podem ser identificados três diferentes tipos de mecanismos de transferência de carga para chumbadores submetidos à tração (Figura 2.3):

- ancoragem mecânica:** é o mecanismo onde a transferência de solicitações está concentrada numa região, geralmente próxima a extremidade do chumbador, onde são desenvolvidas altas tensões de esmagamento. As tensões de atrito e aderência podem ser desprezadas ou não, dependendo da conformação superficial da barra do chumbador, e principalmente do diâmetro do dispositivo de ancoragem mecânica;
- atrito:** a transferência de carga se dá pela proporcionalidade da transferência de força pela força normal aplicada à superfície de atrito;
- aderência:** a transferência de carga se dá pela transferência contínua de carga ao longo de todo o comprimento efetivo de ancoragem. Pode haver aderência mecânica (barra nervurada ou com rosca) ou aderência química (aglomerantes).

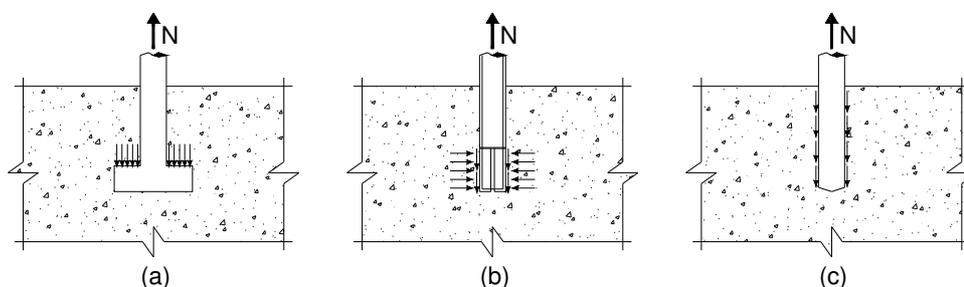


Figura 2.3 - Mecanismos de transferência de carga: (a) ancoragem mecânica; (b) atrito; (c) aderência; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures – CEB* (1994).

2.4. Tipos de Ancoragem para Concreto

Os sistemas de ancoragem utilizados atualmente podem ser classificados em dois grupos: a) sistema de pré-concretagem (*cast-in-place*); b) sistema pós-instalado.

2.4.1. Sistemas de Pré-concretagem

A transferência do carregamento nos sistemas de pré-concretagem pode ocorrer por intermédio de ancoragem mecânica e/ou por aderência.

Neste sistema de ancoragem, os chumbadores são usualmente posicionados na forma antes da concretagem. Podem ser utilizados em elementos densamente armados sem as mesmas dificuldades apresentadas pelos sistemas pós-instalados.

Podem ser utilizados para transmitir esforços provenientes de uma placa base para o concreto como, por exemplo, na fixação de tubulações, em instalações industriais, na fixação de equipamentos pesados, em bases de torres e colunas. Os tipos de chumbadores que podem ser utilizados neste sistema são apresentados na Figura 2.4 e Figura 2.5.

Chumbadores de encaixe com rosca podem ser fabricados com barras, tubos e peças moldadas de aço, que possuem roscas internas ou externas. Além dos elementos de ancoragem podem também ser utilizado em ligações estruturais para o transporte e manuseio de elementos estruturais pré-moldados, como paredes, vigas, pilares e tubulações. São encontrados em vários tamanhos e diâmetros. A Figura 2.4 mostra alguns modelos de ancoragem com encaixe rosqueado.

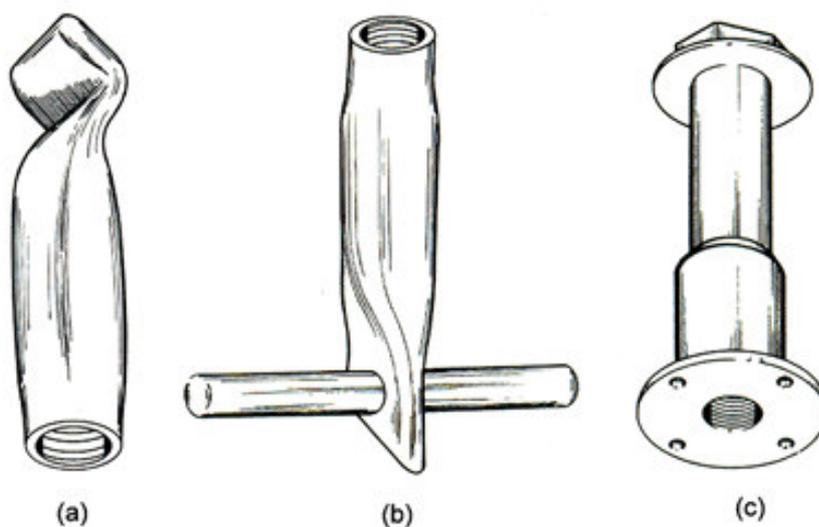


Figura 2.4 - Encaixe com rosca: (a) tubo amasso; (b) ancoragem reta; (c) parafuso com cabeça; (*Fastenings to Concrete and Masonry Structures* – CEB, 1994).

Parafuso com cabeça podem ser feitos de aço estrutural (Figura 2.5(a)). Sua fixação depende da ancoragem mecânica promovida pela cabeça do parafuso na transferência da solicitação ao concreto.

Parafusos-L (Figura 2.5(b)) e parafusos-J (Figura 2.5(c)) podem ser fabricados com barras lisas dobradas, onde numa extremidade assumem a forma J ou L, e na outra extremidade têm uma rosca.

Pinos com cabeça podem ser utilizados em todos os tipos de ligações em várias aplicações. Consiste numa barra lisa com um dispositivo de ancoragem numa extremidade embutida no concreto, e na outra extremidade pode ser soldada uma placa metálica, ou uma porca. A relação entre o diâmetro desta cabeça circular e o diâmetro da barra lisa usualmente é de 1,5 (Figura 2.5(d)).

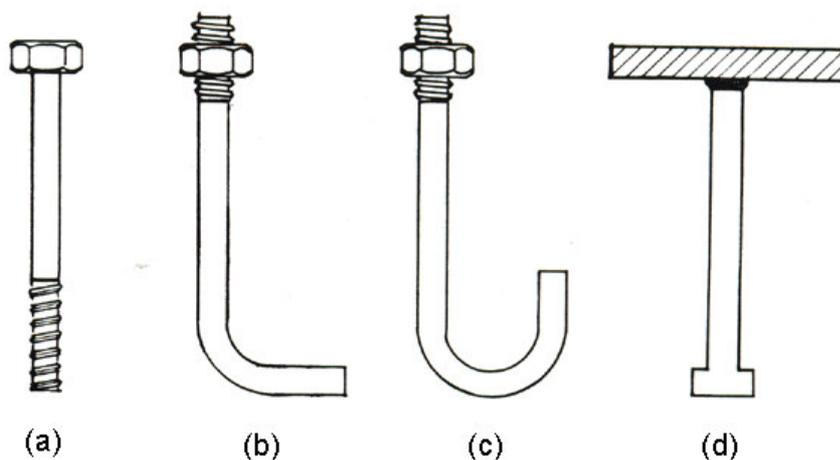


Figura 2.5 - Parafusos de formas variadas: (a) parafuso com cabeça; (b) parafuso-L; (c) parafuso-J; (d) pino com cabeça; (*Fastenings to Concrete and Masonry Structures – CEB, 1994*).

Em ancoragens com barras retas irregulares (com rosca ou nervuradas) embutidas no concreto, sem que numa extremidade haja dispositivos especiais que forneçam uma ancoragem similar à ancoragem mecânica, a transferência de carga é realizada por aderência. Os fatores que influenciam a resistência da ancoragem por aderência são: a resistência do concreto, a conformação superficial da barra, a posição da barra na estrutura. A Figura 2.6 ilustra a distribuição das tensões de aderência ao longo de uma barra nervurada.

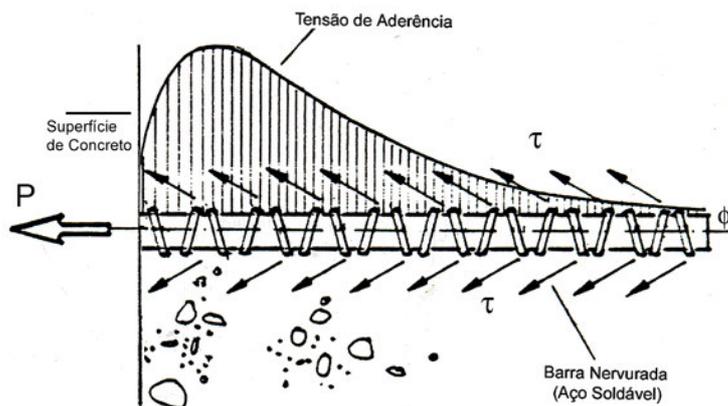


Figura 2.6 - Ancoragem por aderência numa barra nervurada; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* – CEB, 1994.

2.4.2. Sistemas Pós-instalados

Os chumbadores pós-instalados podem ser instalados em furos pré-moldados, ou feitos após o endurecimento do concreto. Os tipos de chumbadores pós-instalados mais utilizados são:

Em chumbadores de expansão a transferência das forças de tração se dá por atrito, onde a resistência ao atrito depende diretamente das forças normais geradas pelo mecanismo de expansão do chumbador durante a sua instalação e a sua vida útil. Dependendo da maneira como as forças de expansão são geradas, podem ser:

- expansão controlada por torque, onde é aplicado um torque específico na porca ou na cabeça do parafuso que faz com que uma cunha seja puxada entre os elementos de expansão, forçando-os contra as paredes do furo no material base, transferindo as forças de atrito ao mesmo;
- expansão controlada por impacto, onde a cunha é inserida nos elementos de expansão por meio de impacto, causado por um martelo ou por uma determinada ferramenta.

Chumbadores de segurança transferem as solicitações ao material base por ancoragem mecânica por meio do alargamento se sua extremidade, desenvolvendo-se assim pouca ou quase nenhuma força de expansão durante sua instalação.

Chumbadores de adesão química reúnem um conjunto de argamassas aglutinantes que trabalham para embutir o chumbador, incluindo-se polímeros e o cimento. O mecanismo de transferência da força se dá pela adesão entre o chumbador e a argamassa, e entre a argamassa e a parede do material base. Pode

ser dividido em: a) chumbador tipo cápsula, que consiste de uma ampola contendo uma resina, um catalisador e um agregado mineral, e a mistura do componente químico com o catalisador ocorre com a perfuração da cápsula, quando da inserção do chumbador; b) chumbador tipo injeção, é aquele onde a argamassa é inserida diretamente e livremente sem que esteja contido numa cápsula, podendo o agente aglutinante ser químico (injeção de resina) ou não-químico (injeção de aglomerante a base de cimento).

Chumbadores acionados por pólvora por não requererem eletricidade fornecem mais flexibilidade e economia para várias aplicações. Estes tipos de chumbadores têm a forma de prego ou pinos com rosca, e são inseridos no concreto ou aço por meio do uso de ferramentas que utilizam carga explosiva. O princípio de operação de um chumbador acionado por pólvora é o de deslocar o concreto enquanto o penetra. Na região imediatamente próxima à área de penetração ao pino do chumbador ocorre um esmagamento parcial do material base. A força que ancora o pino é oriunda da reação ao deslocamento instantâneo do concreto e a uma parcela devida à adesão química.

2.5. Modos de Ruptura à Tração

Na Figura 2.7 são apresentados os diversos tipos de ruptura de sistemas de ancoragem e suas respectivas respostas carga vs deformação específica abordadas por Fuchs *et alii* (1995). Na Figura 2.8 são apresentados os possíveis modos de ruptura para pinos com cabeça isolados submetidos à força de tração, sem a influência da sobreposição de cones de ruptura do concreto.

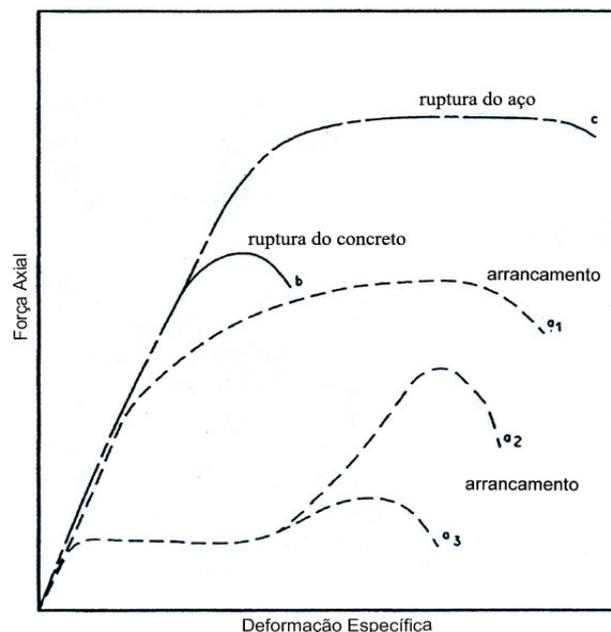


Figura 2.7 – Respostas de modos de ruptura (Fuchs *et alii*, 1995).

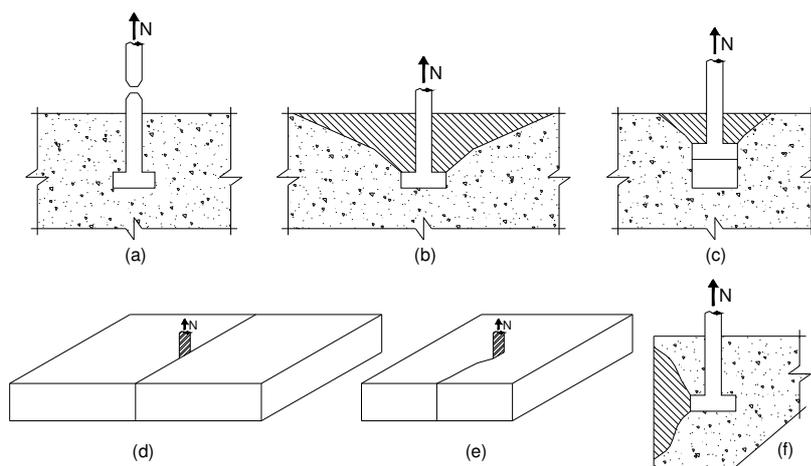


Figura 2.8 - Modos de ruptura do sistema de ancoragem com cabeça submetido à força de tração: (a) ruptura do chumbador; (b) ruptura do cone de concreto; (c) arrancamento do chumbador; (d) e (e) fendilhamento; (f) ruptura lateral concreto; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* – CEB, 1994.

2.5.1. Ruptura do Chumbador

Quando o comprimento efetivo de ancoragem do chumbador é suficiente para que ocorram deformações inelásticas, assumindo-se que não ocorra ruptura do concreto, a ruptura ocorre por escoamento e rompimento da barra do chumbador (curva *c*, Figura 2.7).

Geralmente o comportamento do mesmo está relacionado com sua rigidez e resistência, capacidade de deformação, e ao grau de dissipação e absorção de energia do chumbador. Nesse caso o fator determinante de sua resistência à tração é sua seção transversal e resistência à tração. Quando ocorre o escoamento do chumbador há uma redução da área transversal conforme ilustrado na Figura 2.8(a).

De modo a se evitar a ruptura do chumbador tem-se,

$$F_u = A_s \sigma_y \quad (2.1)$$

onde F_u é força de ruptura do chumbador, A_s é a área da seção transversal do chumbador, e σ_y é a tensão de início de escoamento do aço.

2.5.2. Ruptura do Concreto

Quando a falha ocorre pela ruptura do concreto forma-se uma superfície de ruptura irregular aproximadamente cônica, que se inicia no topo do concreto e se estende até a cabeça do chumbador (curva b , Figura 2.7 e Figura 2.8(b)). A força de ruptura é influenciada pelo comprimento efetivo de ancoragem do chumbador, pelo diâmetro da cabeça do pino, e pela resistência à tração do concreto.

Quando as tensões transversais ao redor da cabeça do chumbador excedem a resistência à tração do concreto na região entre sua cabeça e o bordo livre, ocorre o que se denomina de ruptura lateral (Figura 2.8(f)). A resistência à ruptura lateral aumenta à medida em que se aumenta a distância ao bordo, o diâmetro da cabeça do chumbador, e a resistência à tração do concreto.

2.5.3. Arrancamento do Chumbador

Este tipo de ruptura é caracterizado pelo esmagamento contínuo do concreto situado sobre a cabeça do chumbador, seguido ou não da formação de um cone de ruptura de concreto. A medida em que se aproxima da superfície do concreto poderá haver ou não a formação de um cone de ruptura (Figura 2.8(c)). Este deslizamento geralmente ocorre devido às tensões de contato no concreto serem

elevadas, e devido à relação entre os diâmetros da cabeça e da barra do chumbador ser reduzida.

Ressalta-se que para que este deslizamento dependa da deformação máxima do concreto na região de esmagamento (cabeça do chumbador), se faz necessário um aumento do diâmetro desta cabeça. Um aumento da relação entre os diâmetros da cabeça e da barra não reduz somente a possibilidade de ruptura por arrancamento, mas pode significativamente reduzir os deslocamentos totais do chumbador em relação ao cone de concreto. A ruptura por deslizamento do chumbador se mostra mais visível em chumbadores de expansão, ou seja, em sistemas de ancoragem pós-instalados.

De acordo com Fuchs *et alii* (1995), quando ocorre ruptura por arrancamento do chumbador (Figura 2.8(c)), o mesmo desliza significativamente no furo fazendo com que a curva força x deslocamento aumente continuamente atingindo a força máxima (curva a_1 , a_2 e a_3 , Figura 2.7).

2.5.4. Fendilhamento

Este tipo de ruptura é caracterizado pela fissuração do concreto num plano vertical que vai além do chumbador. A ruptura por fendilhamento impede outros tipos de rupturas somente se as dimensões do elemento de concreto forem relativamente pequenas em relação às dimensões do chumbador, e às de seu comprimento efetivo, ou se estiver próximo a um bordo livre (Figura 2.8(d) e Figura 2.8(e)).

2.6. Métodos de Cálculo

São encontrados na literatura diversos métodos para a estimativa da força última relativos à ruptura do cone de concreto. Muitos destes métodos foram obtidos por observações empíricas relacionadas ao modo de ruptura do cone, com aproximações do estado de tensões de tração no concreto na ruptura, e a estimativa da resistência do concreto à tração.

Após a análise de resultados experimentais, diversos autores constataram que a superfície de ruptura resultava de uma fissura inclinada em relação ao eixo

vertical do chumbador. Porém, os ângulos de inclinação dessa fissura apresentavam valores divergentes.

O método do ACI 349 (1985), por exemplo, tem como base para a estimativa de resistência última inclinação do cone de aproximadamente 45° com a horizontal. O método CCD adota uma inclinação do cone de aproximadamente 35° com a horizontal. Bode e Roik (1987) relataram ângulos de inclinação de aproximadamente 40° com a horizontal.

A seguir são sumarizados alguns dos métodos de cálculo para a estimativa da força última de ruptura do cone de concreto encontrados na literatura, quando a ancoragem é submetida a carregamento estático.

2.6.1. Método do ACI 349/1985

O Comitê ACI 349/1985 tem como objetivo a análise e projeto de estruturas utilizadas na engenharia nuclear. Segundo Fuchs *et alii* (1995), o método ACI 349-85 adota um modelo estático de equilíbrio de forças na ruptura, o qual assume uma distribuição de tensão de tração uniforme e constante igual a $f_{ct} = 4\phi\sqrt{f_{cc}}$ (expressa em lb/in^2), agindo normalmente sobre a superfície inclinada de ruptura definida por um cone de ruptura truncado (Figura 2.8). O ângulo de inclinação da superfície de ruptura é estimada em $\theta = 45^\circ$. A força última de ruptura é dada por:

$$N_{u,ACI} = 4\phi\sqrt{f_{cc}}A_c \quad (2.2)$$

onde f_{cc} é a resistência à compressão simples do concreto obtida em cubos, em psi, ϕ é um fator redutor da capacidade resistente (adotado $\phi = 1,0$ para encontrar a carga de ruptura sem margem de segurança), e A_c é a área projetada verticalmente da superfície inclinada do cone de ruptura em in^2 .

Para o SI (Sistema Internacional de Unidades), assumindo-se que $1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$, $1 \text{ psi} = 0,006895 \text{ N/mm}^2$, $1 \text{ lb} = 4,448 \text{ N}$ e $\sqrt{f_{cc}} = 1,18\sqrt{f_c}$, tem-se:

$$N_{u,ACI} = 0,33\phi\sqrt{f_c}\pi h_{ef}(h_{ef} + d_u) \quad (2.3)$$

onde N_u é a força à tração resistente do concreto expressa em N, ϕ é um fator redutor de capacidade resistente, f_c é a resistência característica à compressão simples do concreto obtida em cilindros expressa em MPa, h_{ef} é o comprimento efetivo de ancoragem em mm, e d_u é o diâmetro do dispositivo de ancoragem do chumbador em mm. Para que resistência nominal de ruptura do concreto à tração seja encontrada, adota-se $\phi = 1,0$.

A Figura 2.9 mostra o cone de ruptura do concreto idealizado para uma força de tração.

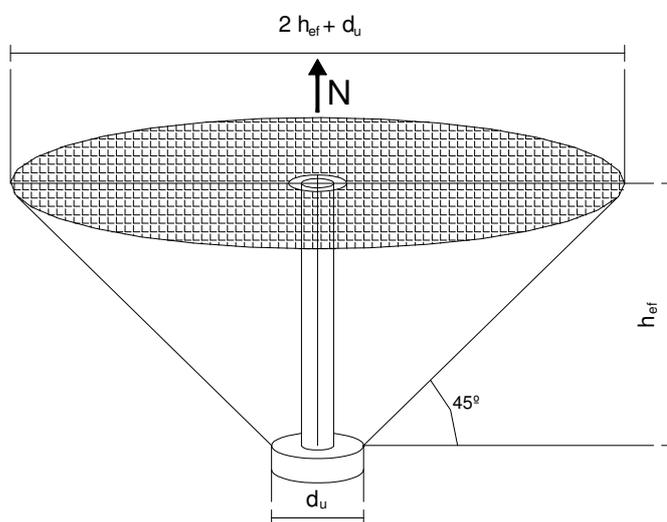


Figura 2.9 - Cone de ruptura idealizado pelo método ACI 349-85 (Fuchs *et alii*, 1995).

Para a estimativa da área do cone de ruptura projetado na superfície tem-se:

$$A_c = \pi h_{ef}(h_{ef} + d_u) \quad (2.4)$$

2.6.2. Método CCD (*Concrete Capacity Design*)

Este método está fundamentado na análise de resultados de ensaios de pinos com cabeça embutidos em concreto não-fissurado sem a interferência de bordos ou superposição de cones de ruptura submetidos à tração (Fuchs *et alii*, 1995; e Eligenhausen *et al*, 1995). Este método admite que a ruptura ocorre pela formação

do cone de concreto e fornece a seguinte expressão para estimativa da força máxima resistente:

$$N_{u,CCD} = 15,5\sqrt{f_{cc}}(h_{ef})^{1,5} \quad (2.5)$$

onde $N_{u,CCD}$ é a força máxima à tração resistente do concreto em N, f_{cc} é a resistência característica à compressão simples do concreto obtida em corpos-de-prova cúbicos ($\sqrt{f_{cc}} = 1,18\sqrt{f_c}$) em MPa , e h_{ef} é o comprimento efetivo de ancoragem embutido no concreto em mm.

A capacidade resistente do concreto de uma ancoragem qualquer, quando a mesma é submetida à tração, pode ser calculada assumindo-se que o cone de ruptura idealizado assume a forma de uma pirâmide, com uma inclinação de aproximadamente $\theta = 35^\circ$ entre a superfície inclinada e a superfície do membro de concreto (Fuchs *et alii*, 1995). Logo a pirâmide tem de base $3h_{ef} \times 3h_{ef}$ conforme mostra a Figura 2.10.

A Figura 2.11 mostra os resultados dos testes realizados em chumbadores com cabeça, onde ocorreu falha pela ruptura do cone de concreto para a força última em função do comprimento efetivo de ancoragem h_{ef} , sendo a curva para força média última obtida pela expressão (2.5). Esses resultados são normalizados para concreto com resistência à compressão de 21 MPa .

Para a estimativa da área da superfície da pirâmide de ruptura tem-se:

$$A_c = 9h_{ef}^2 \quad (2.6)$$

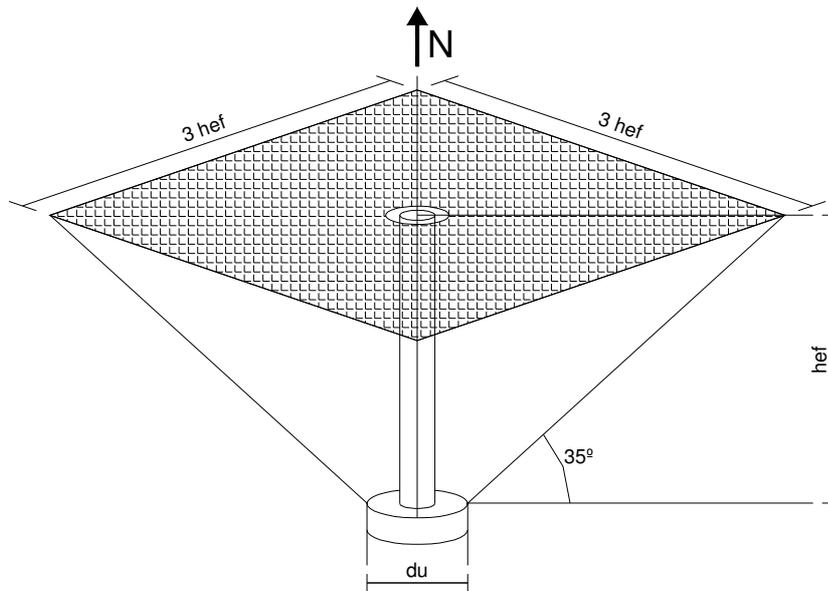


Figura 2.10 - Tipo de ruptura idealizado pelo Método CCD (Fuchs *et alii*, 1995; Eligenhausen *et al*, 1995).

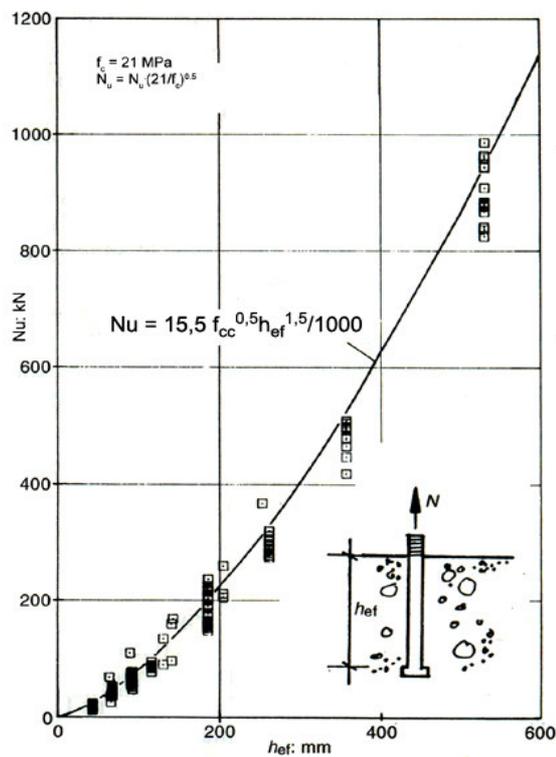


Figura 2.11 - Comparação da expressão ((2.5) com os resultados dos testes de tração de pinos com cabeça, normalizada para concreto com resistência à compressão de 21 MPa; adaptado de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* – CEB (1994).

2.6.3. Métodos de Bode e Hanenkamp (1985) e Bode e Roik (1987)

Baseados nos resultados de mais de 100 ensaios em pinos com cabeça, Bode *et al* (1985) e Bode *et al* (1987) chegaram a uma expressão empírica para a estimativa da força última de ruptura à tração de pinos isolados embutidos em concreto, onde a ruptura ocorreu por meio do cone de concreto. Nos ensaios analisados os comprimentos efetivos de ancoragem variavam entre 40 mm e 140 mm, com resistência à compressão do concreto variando entre 20 MPa e 45 MPa, para resistências obtidas em cubos de 200 mm de aresta, e 17 MPa a 38 MPa para resistências obtidas em corpos-de-prova cilíndricos.

Por intermédio de uma análise de regressão dos resultados obtidos nos ensaios, esses autores obtiveram a seguinte relação para a força última de ruptura:

$$N_{u,BODE} = 11,89\sqrt{f_c} (h_{ef})^{1,5} [1 + (d_u / h_{ef})] \quad (2.7)$$

onde N_u é a força última à tração resistente do concreto em N, f_c é a resistência característica à compressão simples do concreto obtida em corpos-de-prova cilíndricos em MPa, h_{ef} é o comprimento efetivo do pino de ancoragem embutido no concreto em mm, e d_u é o diâmetro do dispositivo de ancoragem do chumbador em mm.

A Figura 2.12 mostra a curva da resistência ao arrancamento normalizada $N_{u,BODE} / f_{ct}$, em função do comprimento de ancoragem h_{nom} . As curvas são desenhadas para a força de ruptura dada pela expressão (2.7), com dois valores limites para a relação entre o diâmetro da cabeça do pino e seu comprimento efetivo.

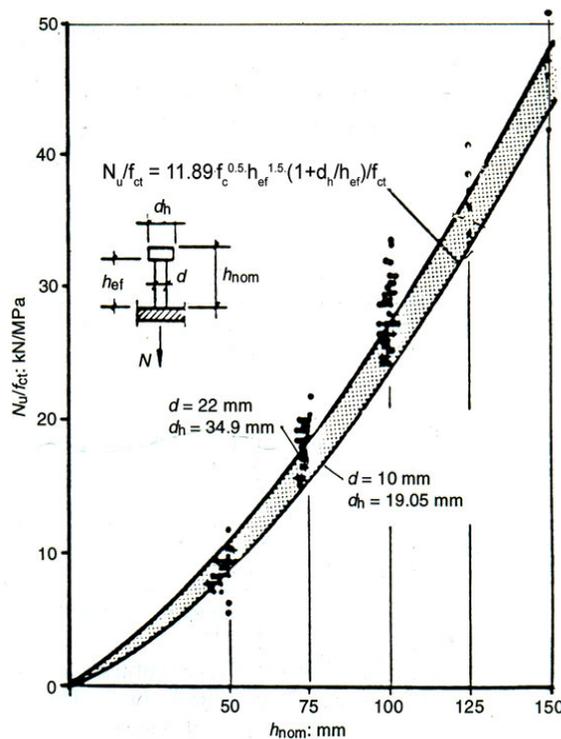


Figura 2.12 - Resultados dos testes para chumbadores em função do seu comprimento de ancoragem, comparados com a expressão (2.7); adaptada de *Fastenings to Concrete and Masonry Structures* – CEB (1994).

2.7. Fatores que Podem Influenciar a Capacidade Resistente de Chumbadores

2.7.1. Proximidade da Borda

Os sistemas de ancoragem têm sua capacidade resistente reduzida devido à proximidade de bordos, numa distância onde o cone de tensão é interrompido por uma superfície lateral, ocorrendo uma perturbação nos mecanismos de transferência de carga. Nos estudos de Oliveira (2003) e Meira (2005) ficou constatado que quanto mais próximo de um bordo o chumbador estiver, menor será a capacidade resistente do sistema.

2.7.2. Efeito de Disco

De acordo com Jermann (1993) *apud* Meira (2005), o efeito de disco num sistema de ancoragem é observado devido à orientação do plano principal de tensões, caso a altura efetiva do chumbador seja pequena. A fissura se propaga em

direção à superfície e, com isso, na seção não-fissurada próximo à superfície ocorre uma flexão com um disco ao redor do perímetro, resultando na mudança do plano de inclinação do cone de ruptura (Figura 2.13). Para ancoragens rasas ($h_{ef} < 127 \text{ mm}$) a resistência à flexão devido à formação do disco é maior que a resistência de ruptura do cone, requerendo uma força mais elevada para propagar a fissura, fazendo com que o ângulo de inclinação fique próximo a 30° .

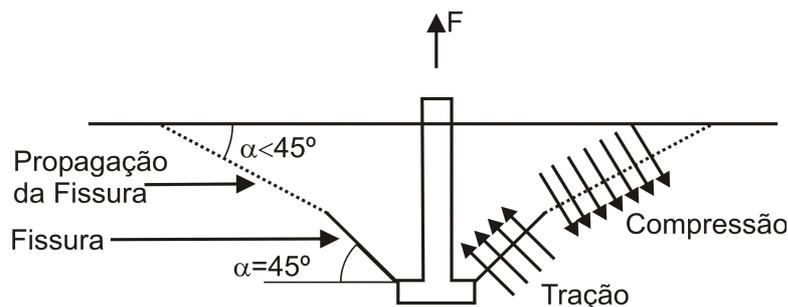


Figura 2.13 – Inclinação do cone de ruptura devido ao efeito de disco (Jermann, 1993 *apud* Meira, 2005).

2.7.3. Efeito de Cunha

Segundo Hasselwander *et alii* (1987), o efeito de cunha é iniciado pela formação de um cone de concreto comprimido na região do dispositivo de ancoragem, semelhante a uma cunha. Quando a força aplicada ao chumbador é transferida ao concreto, surgem fissuras diagonais causadas por forças de tração (fendilhamento) formadas pela ação da cunha. Também surgem forças de tração circunferenciais gerando fissuras longitudinais formando blocos triangulares. (Figura 2.14).

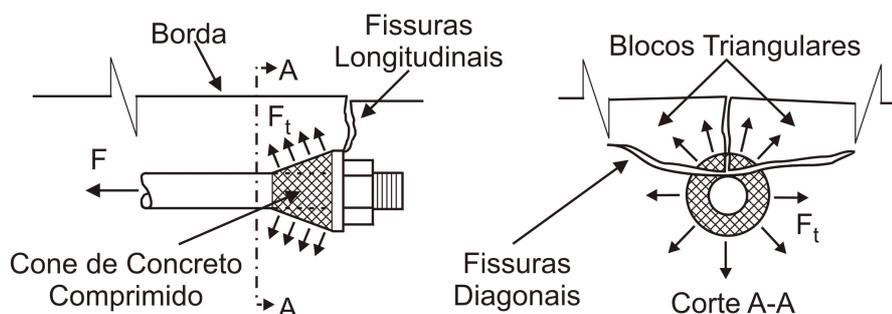


Figura 2.14 – Ruptura por efeito de cunha; adaptado de Hasselwander *et alii* (1987).

2.7.4. Ancoragens em Grupo

Estudos experimentais de diversos autores mostraram que há uma redução na capacidade resistente de sistemas de ancoragem quando de sua proximidade. Essa redução ocorre devido à superposição dos diversos cones de ruptura próximos entre si. A capacidade resistente de um sistema com vários chumbadores é alcançada quando há uma distância entre eles capaz de desenvolver a capacidade individual de cada chumbador. Oliveira (2003) mostrou uma redução na capacidade resistente de sistemas de ancoragem com vários chumbadores da ordem de 60%.

2.7.5. Relação entre o Diâmetro do Dispositivo de Ancoragem e a Altura Efetiva

Ozbolt *et alii* (1999) analisaram uma série de resultados experimentais, e estudaram a influência do diâmetro do dispositivo de ancoragem do chumbador no cone de ruptura do concreto e em seu modo de ruptura. Neste estudo observaram que com para uma maior relação obtém-se um comportamento mais rígido, com menores deslocamentos e maiores capacidades resistentes ao arrancamento.

Esses autores relatam ainda que o aumento, ou redução na capacidade resistente ocorre devido ao fato de uma maior relação entre os diâmetros gerar um cone de ruptura mais largo e espalhado para a mesma altura efetiva, e devido às tensões de cisalhamento que aparecem a medida em que se reduz o diâmetro do dispositivo de ancoragem, influenciando o modo de ruptura. A Figura 2.15 apresenta curvas força x deslocamento para três diferentes.

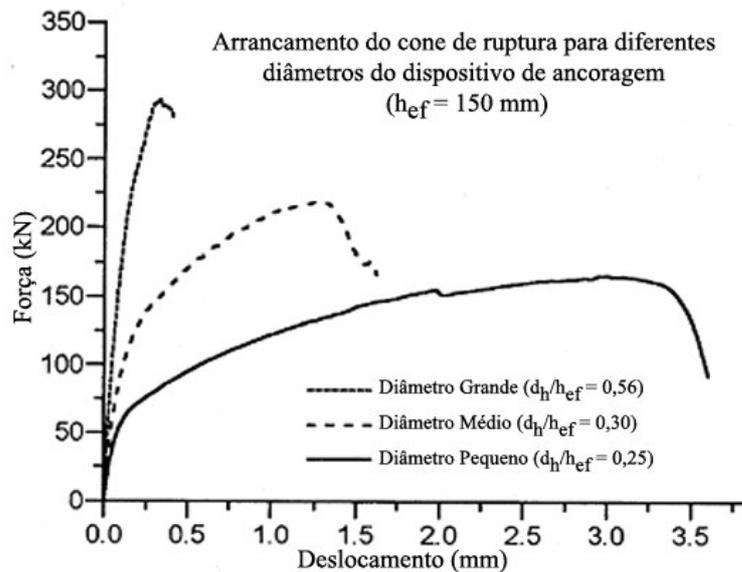


Figura 2.15 - Curvas força vs deslocamento para três diâmetros diferentes do dispositivo de ancoragem: pequeno, médio e grande, $f_c = 33MPa$; adaptado de Ozbolt *et alii*, (1999).

2.7.6. Concreto Fissurado

Quando um sistema de ancoragem é instalado numa zona de tração do material base, deve-se considerar o aparecimento de fissuras devido à baixa resistência à tração do concreto.

Considerações teóricas mostram que as fissuras se propagam além da zona de tensão do chumbador. Quando a ancoragem é carregada, são geradas tensões que resultam no fendilhamento formando uma zona de distúrbio no estado de tensões, reduzindo a área do cone de tensão do concreto, e impedindo a transferência de solicitações de forma axi-simétrica.

Rodriguez *et al* (2001) afirmam que o efeito de concreto fissurado reduz significativamente a resistência de um sistema de ancoragem. Eligehausen *et al* (1995) relatam que em elementos estruturais que apresentam fissuras, o chumbador apresenta maiores deslocamentos. ACI 355-93 (1993) prescreve que há uma redução de aproximadamente 40 % na resistência de um sistema de ancoragem devido à formação de fissuras.

2.7.7. Excentricidade de Carregamento

Inicialmente os estudos em sistemas de ancoragens eram realizados sem a consideração do efeito da excentricidade de carregamento, a qual poderia estar influenciando a resistência do sistema. Nestes estudos procurava-se ao máximo manter a carga aplicada no mesmo eixo do centro de gravidade do chumbador. Novos estudos foram realizados de modo que fosse avaliada a influência da excentricidade na resistência final do sistema de ancoragem.

2.7.8. Taxa de Carregamento

Diversos pesquisadores têm estudado a influência da velocidade de carregamento no comportamento de sistemas de ancoragem. Nessas pesquisas foi observado que a medida em que se aumenta a velocidade do carregamento ocorre um certo aumento na resistência do sistema. Rodriguez *et alii* (2001) observaram que em sistemas de pré-concretagem as resistências do chumbador e do material base crescem juntas na ordem de 25%. Salim *et alii* (2005) relatam aumentos de 95% na resistência de chumbadores de expansão.

2.8. Pesquisas sobre Sistemas de Ancoragem

2.8.1. Concreto

O principal critério na análise do comportamento dinâmico, mais precisamente em carregamento súbito em sistemas de ancoragem, é a capacidade dos elementos (chumbador e concreto) em resistir forças instantâneas, e, principalmente, a possibilidade de absorver energia antes da ruptura.

Green *apud* Neville (1997) estudou o número de impactos que um cubo de concreto com 100 mm de aresta pode suportar antes de atingir a condição de deterioração, alcançando resultados que produziam resultados maiores dos que os apresentados pela resistência à compressão estática do concreto. Concluiu que os resultados observados são devido ao fato de que no ensaio estático de compressão simples é possível algum alívio de tensões devido à fluência, ao passo que no caso

de ensaios de impacto não é possível a redistribuição de tensões durante um período tão curto de deformações, onde as baixas resistências localizadas têm maior influência na resistência observada de um corpo-de-prova. Da mesma maneira que ocorre um aumento na resistência do concreto quando submetido à força de impacto à compressão, acredita-se que também ocorra um acréscimo na resistência à tração do mesmo.

Dentro do intervalo em que pode ser aplicada, a taxa de carregamento tem um efeito considerável sobre a resistência do concreto. Para taxas muito altas, ocorre um considerável aumento, provavelmente devido à resistência inercial do concreto à microfissuração, e quanto menor esta velocidade de aplicação, menor sua resistência, o que provavelmente se deve à fluência, e quando a deformação limite é atingida chega-se à ruptura. A Figura 2.16 mostra a influência da velocidade de carregamento no crescimento relativo da resistência à compressão simples do concreto.

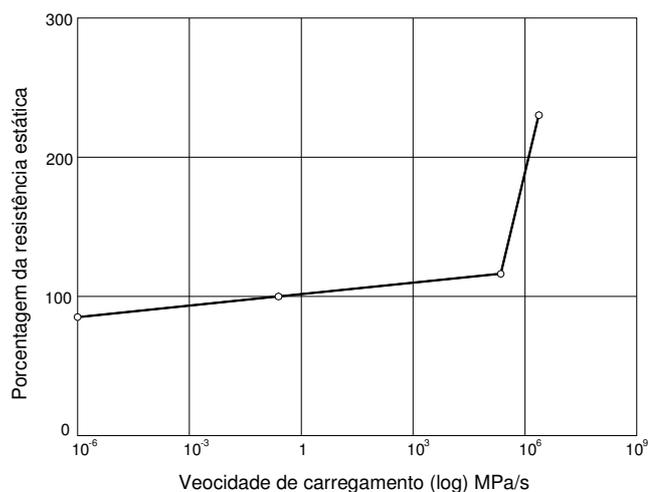


Figura 2.16 – Relação entre resistência à compressão e velocidade de aplicação do carregamento; adaptado de Neville (1997).

Bischoff *et al* (1995) realizaram estudos sobre o comportamento de corpos-de-prova cilíndricos carregados axialmente com força estática e de impacto. Os ensaios de impacto foram realizados por meio de um corpo atingindo o corpo-de-prova com uma velocidade conhecida. Os resultados dos ensaios mostram que durante a aplicação das forças de impacto houve um acréscimo na resistência à compressão simples de 50% a 60%, revelando que esse crescimento na resistência a altas taxas de deformação não depende da qualidade do concreto. Também foi

observado um aumento na deformação axial de 14% a 36% e um aumento na deformação volumétrica de 11% a 36% sendo que os modos de ruptura exibidos foram iguais.

Elfahal *et alii* (2005) conduziram um estudo sobre o efeito das dimensões de corpos-de-prova cilíndricos submetidos a carregamento axial de impacto em sua resistência. Os ensaios foram conduzidos utilizando-se quatro diferentes tamanhos de corpos-de-prova, sendo eles (diâmetro x altura): 75 mm x 150 mm, 150 mm x 300 mm, 300 mm x 600 mm e 600 mm x 1.200 mm. Cada tamanho de corpo-de-prova foi ensaiado com três velocidades: 0, 5 e 7 m/s. O carregamento foi realizado por meio de martelos diferentes no tipo, dimensões, massa e configuração de impacto. Os ensaios com a velocidade do martelo diferente de zero, foram realizados em duas séries: *hard impact* e *soft impact*. Nos ensaios *soft impact* foram utilizadas camadas de borracha no topo do corpo-de-prova e nos ensaios *hard impact* o martelo agia diretamente sobre o corpo-de-prova cilíndrico. Os resultados mostraram considerável aumento na resistência à compressão do concreto com corpos-de-prova 75 mm x 150 mm, entre 43% e 63% na situação *hard impact*, e 187% e 218% na situação *soft impact*.

2.8.2. Sistemas de Ancoragem

Collins *et alii*. (1989) estudaram os efeitos de forças dinâmicas em sistemas de ancoragem embutidos em concreto não-fissurado. Neste programa foram aplicadas forças de impacto à tração em onze tipos diferentes de sistemas de ancoragem embutidos em concreto. As forças foram aplicadas por um pulso triangular com tempo de carregamento de aproximadamente 250 ms. O critério de aplicação desses pulsos foi:

- Três pulsos foram aplicados até uma força máxima igual a 60% do escoamento específico;
- Se o chumbador se comportasse satisfatoriamente, mais três pulsos eram aplicados até uma força máxima igual a 80% da força de escoamento;
- Finalmente era aplicado um conjunto de três pulsos igual a 100% da força de escoamento.

Diante dos resultados obtidos, os autores concluíram que pinos de ancoragem sujeitos a carga de impacto não têm sua rigidez alterada, quando os mesmos possuem altura efetiva capaz de desenvolver a capacidade máxima do aço sob carregamento estático. Com isso, durante os estágios de carregamento não houve alteração na rigidez secante e não foram observadas fissuras ao redor do chumbador. Neste estudo não foi investigada a resistência máxima..

Rodriguez *et alii* (1997, 2001) realizaram um programa experimental onde foram testados diversos tipos de chumbadores. O carregamento foi aplicado por meio de um pulso de rampa até a ruptura. A Figura 2.17 mostra o pulso de rampa empregado nesses ensaios com tempo de aplicação de aproximadamente 100 ms.

Os resultados dos ensaios indicaram que o aumento da resistência à tração de sistemas de ancoragem é relacionado ao comprimento efetivo de ancoragem, função da relação entre os diâmetros do chumbador e do dispositivo de ancoragem, e do modo de ruptura apresentado pelo sistema. Quando ocorre falha pela ruptura do cone de concreto, a resistência ao carregamento dinâmico se apresenta superior à resistência ao carregamento estático. Neste caso, os ensaios mostraram que as resistências do chumbador e do concreto (material base) crescem juntas cerca de 25%. Este crescimento foi alcançado por meio dos resultados dos ensaios dinâmicos em comparação com os resultados para a força última estática estimados pelo método CCD (item 2.6.2). Com isso adotaram para consideração de efeitos dinâmicos a adição de um fator amplificador nas solicitações igual a 1,25.

Considerando este aumento na resistência dos chumbadores, Norris *et alii* (1959) afirmam que uma barra de aço carregada axialmente com força dinâmica tem suas propriedades mecânicas aparentemente afetadas pela taxa de carregamento imposto, tais como:

- A tensão de início escoamento sofre um aumento.
- A deformação específica de início de escoamento aumenta.
- O módulo de elasticidade permanece constante.
- A deformação na qual o enrijecimento se inicia, também aumenta.
- A resistência última tem um pequeno aumento.

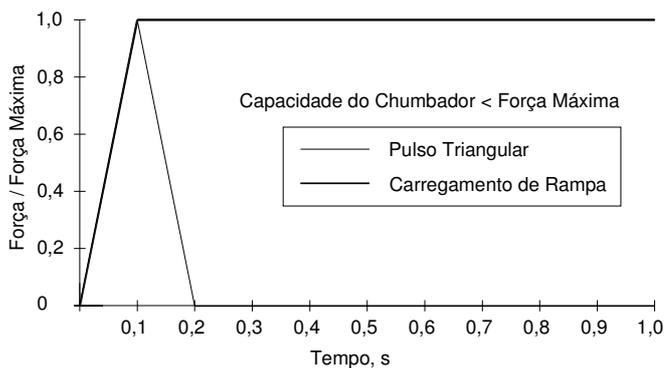


Figura 2.17 – Pulso de rampa tipo para carregamento dinâmico; adaptado de Rodriguez *et alii* (1995).

Shirvani *et alii* (2004), baseados em resultados experimentais, afirmam que para sistemas de ancoragem, a força máxima de impacto e o respectivo deslocamento dos chumbadores em situações normais de funcionamento, são no mínimo iguais aos da força aplicada estaticamente. Se durante a aplicação da força de impacto, com um ou vários pulsos, o chumbador não se romper, a força de ruptura medida num ensaio estático subsequente não é afetada.

Hunziker (1999) *apud* Salim *et alii* (2005) estudou o efeito de carregamentos de impacto. Foram testados mais de 100 chumbadores embutidos em concreto fissurado com tempo máximo de carregamento de aproximadamente 80 ms. Neste estudo ficou constatado que chumbadores de expansão controlados por torque têm, frequentemente, um melhor desempenho em situações de forças de impacto devido à capacidade de reajuste do mecanismo no concreto após um incremento de movimento inicial. O crescimento da resistência depende da intensidade do carregamento. A resistência máxima à força de impacto mostrou um crescimento superior a quatro vezes a capacidade estática do sistema.

Salim *et alii* (2005) estudaram a capacidade de chumbadores de expansão submetidos a carregamento estático e de impacto e comparação com as cargas previstas pelo método CCD. Observaram que a resistência última à carga dinâmica é característica para cada sistema. Em chumbadores de expansão controlados por torque houve aumento da resistência de 21%. Em chumbadores de segurança observaram aumento da resistência de 14%. Os chumbadores de expansão por cunha apresentaram redução na resistência, apresentando 67% do

previsto para carga estática e 39% para carga dinâmica. Os chumbadores de parafuso com rosca também apresentaram resistência de 93% do previsto.

Herzbruch (1994) investigou o comportamento de sistemas de ancoragem de pré-concretagem embutidos em concreto não-fissurado sujeitos à carga de impacto à tração com determinadas taxas de armaduras. Para a aplicação do carregamento, desenvolveu um aparato conforme esquematizado na Figura 2.18. O corpo-de-prova era conectado à viga por meio de um dispositivo deslocável. Na extremidade livre havia uma condição na qual agia a força de impacto causada pela ação de um corpo de massa conhecida com uma velocidade diferente de zero. A Figura 2.19 esquematiza os efeitos dinâmicos observados, causados pelo esquema ilustrado na Figura 2.18.

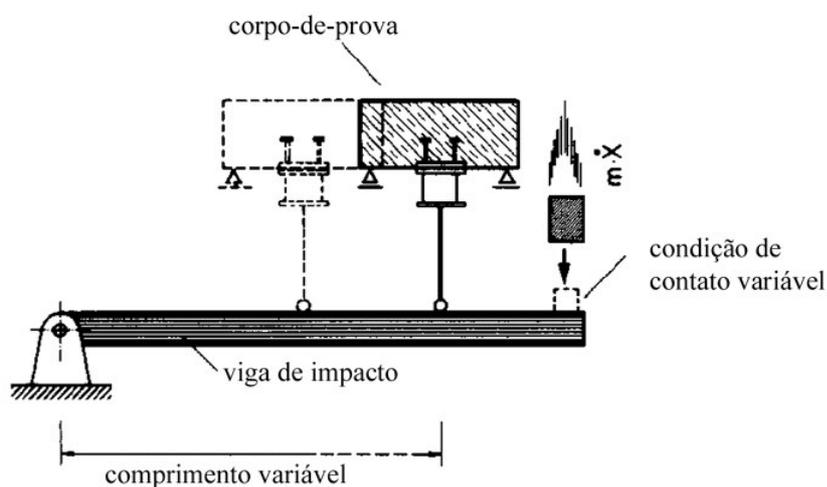


Figura 2.18 – Esquema de aplicação de carga de impacto adotado por Herzbruch; adaptado de Herzbruch (1994).

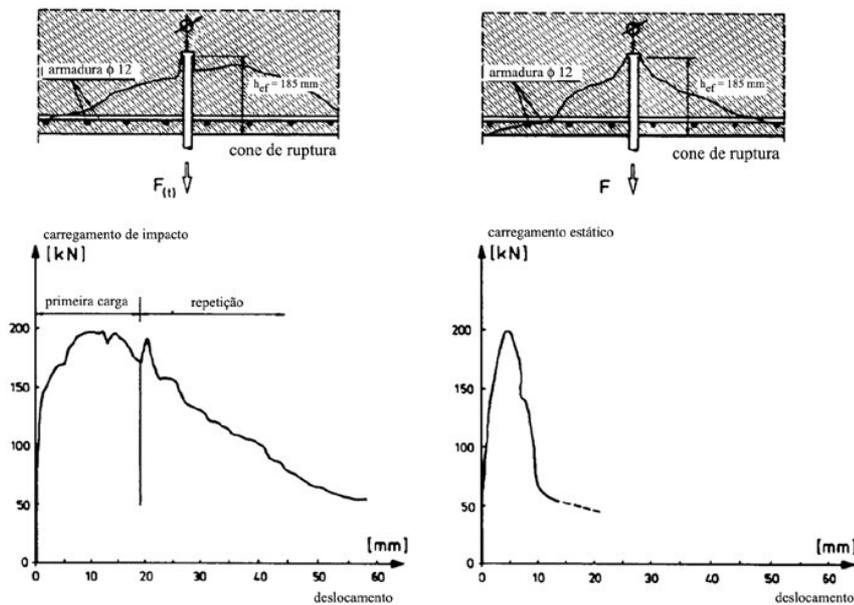


Figura 2.19 – Curvas força x deslocamento obtidas experimentalmente: (a) carregamento de impacto; (b) carregamento estático; adaptado de Herzbruch (1994).

2.9. Fundamentos de Dinâmica

2.9.1. Energia de Deformação e Energia Cinética

Energia de Deformação

O concreto em si é um material frágil, mas em alguns sistemas estruturais, como em sistemas de ancoragem mecânica, o dimensionamento é realizado para que apresentem um comportamento dúctil. Esta ductilidade é proveniente da deformação inelástica do chumbador, permitindo a utilização da capacidade total de deformação do concreto seja alcançada, e consumindo uma quantidade substancial de energia de deformação antes da ruptura. Por exemplo, quando uma barra de aço é solicitada estaticamente à tração por uma força que cresce gradualmente, é produzida uma deformação na mesma. Quando isto ocorre, parte da energia potencial da força se transforma em energia potencial de deformação armazenada na barra.

Se a barra solicitada permanece entre os limites de proporcionalidade (Lei de Hooke), o trabalho produzido será totalmente transformado em energia potencial. Esta energia potencial pode ser recuperada ao se descarregar gradualmente esta barra. Se a força aplicada exceder os limites de

proporcionalidade ocorre a deformação inelástica. Para o caso de barras de aço, a magnitude desta deformação inelástica está relacionada à sua ductilidade.

A Figura 2.20(a) mostra uma curva tipo tensão vs deformação específica para o caso de barras solicitadas à tração, donde a energia de deformação específica armazenada pela barra, dada pela expressão (2.8), é igual a área sob a curva da Figura 2.20(a), entre $\varepsilon = 0$ e $\varepsilon = \varepsilon_1$.

$$W = E_{def} = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon \quad (2.8)$$

onde E_{def} é a energia de deformação acumulada no elemento, σ é a tensão aplicada no elemento e ε é a deformação específica gerada pela tensão aplicada.

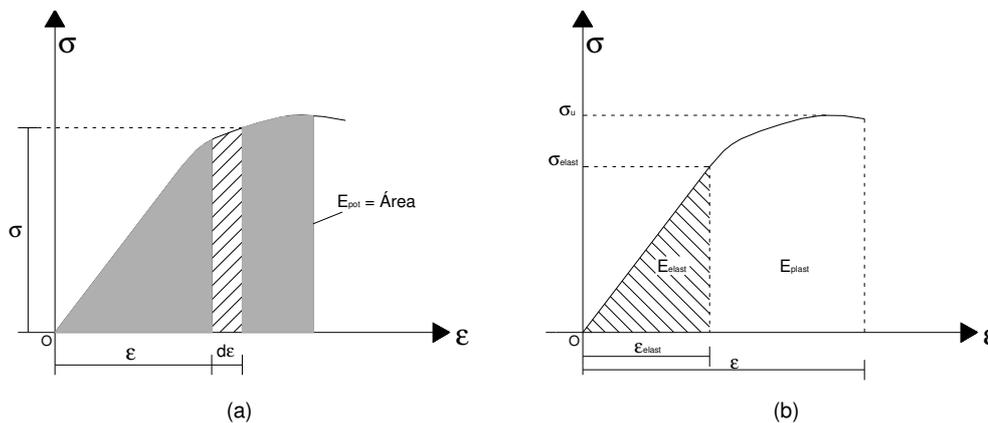


Figura 2.20 – Digramas tipo tensão vs deformação específica: a) energia potencial de deformação; b) energia potencial elástica.

No caso de deformação elástica, a parte do diagrama tensão-deformação específica correspondente à máxima energia de deformação armazenada sem deformação plástica, é representada pela área hachurada da Figura 2.20(b), onde a energia potencial de deformação de um material em regime elástico é dada por:

$$E_{elast} = \frac{1}{2} \sigma_{elast} \varepsilon_{elast} \quad (2.9)$$

onde E_{elast} é a energia de deformação elástica, σ_{elast} é a tensão aplicada no regime elástico e ε_{elast} é a deformação elástica.

Os conceitos de trabalho e deformação podem ser bastante úteis na determinação dos efeitos de carregamento de impacto em membros estruturais, pois da lei da conservação de energia, tem-se que a energia gerada pelo impacto pode ser adotada e transformada, como um meio de simplificação e a favor da segurança, como igual à energia potencial de deformação armazenada no elemento que recebeu o impacto.

Energia Cinética

Um corpo em queda livre desenvolve uma certa velocidade e ao entrar em contato com outro corpo, esta velocidade se anula durante um intervalo de tempo muito pequeno, podendo ser medido no campo dos centésimos ou milésimos de segundo. A velocidade de um corpo em queda livre é calculada pela expressão:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.10)$$

onde v é a velocidade do corpo no momento do impacto expressa em m/s , g é a aceleração da gravidade expressa em m/s^2 , e h é a altura de queda do corpo expressa em m .

Durante o movimento de queda livre o corpo acumula energia cinética. Essa energia acumulada está relacionada à sua massa e à sua velocidade no momento do fim do movimento, sendo dada pela expressão (2.11). No caso de um corpo se chocando na extremidade em balanço de uma viga bi-apoiada (Figura 2.21), a energia cinética acumulada será totalmente transferida à viga somente no momento em que percorrer a distância $(h + \delta)$, onde δ é a flecha na extremidade da viga.

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.11)$$

onde E_{cin} é a energia cinética acumulada pelo corpo em movimento, m é a massa do corpo em movimento.

Neste caso a expressão (2.11) pode ser igualada a expressão (2.12).

$$E_{cin} = P(h + \delta) \quad (2.12)$$

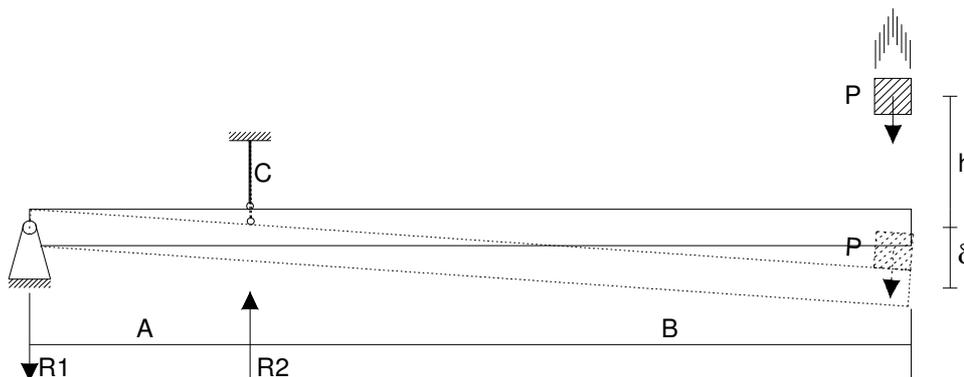


Figura 2.21 - Viga bi-apoiada com extremidade em balanço.

2.9.2. Fator Dinâmico

Em problemas de engenharia, as tensões e as deformações dinâmicas geralmente são obtidas fazendo-se uso da teoria elástica de impacto admitindo que:

- A energia cinética acumulada por um corpo em movimento, ao se chocar com outro corpo se transforma totalmente em energia potencial de deformação no corpo que recebeu o impacto;
- A distribuição de tensões e deformações no corpo que recebeu o impacto permanece similar àquelas do carregamento estático.

O grau de desaceleração cria uma considerável força de inércia e sua magnitude é o que determina a ação de impacto. Contudo torna-se difícil de ser estabelecida teoricamente uma lei que governe esta variação de velocidade e a magnitude desta força de inércia. De uma forma simplificada e aproximada, a análise da força de impacto pode ser realizada com as seguintes considerações:

- Durante ou logo após o impacto não ocorre dissipação de energia, isto é, não ocorre escoamento (deformação plástica);
- É desprezada a perda de parte da energia dissipada em calor e movimento vibratório;
- Considera-se que a transmissão dos efeitos normais ou amplificadas seja instantânea;

- As solicitações e seus respectivos deslocamentos e deformações são proporcionais (Lei de Hooke);
- O trabalho de deformação correspondente à deformação máxima é considerado igual à energia cinética acumulada pelo corpo em movimento.

De acordo com a Resistência dos Materiais, ao considerar a aplicação dinâmica de forças deve ser acrescentado um fator dinâmico. Quando isto ocorre todos os efeitos da ação deste carregamento são amplificados (tensões, deformações, flechas, etc.) sendo multiplicados por este fator dinâmico. O fator dinâmico é dado por:

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta}} \quad (2.13)$$

A expressão (2.13) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \frac{E_{cin}}{E_{def}}} \quad (2.14)$$

Ao se considerar o caso em que a altura de queda h é igual a zero, isto é, o corpo não apresenta velocidade inicial, não há energia cinética acumulada, e o fator dinâmico para esta condição é obtido pela expressão (2.13), e, fazendo-se $h = 0$, tem-se $\phi = 2$.

Admitindo que ocorra uma transferência total da energia cinética acumulada para a estrutura durante o movimento de queda livre do corpo, o dimensionamento é realizado com uma margem de segurança bastante grande (Silva Jr., 1972). Porém, na prática somente uma parte da energia cinética acumulada pelo corpo se transfere à estrutura.

2.9.3. Forças de Impacto

Quando um determinado carregamento é aplicado e sua taxa de aplicação é consideravelmente pequena, esta força é admitida como quase-estática. Porém,

muitas das solicitações a que sistemas estruturais são submetidos são de natureza dinâmica.

O que diferencia basicamente um carregamento estático de um carregamento dinâmico além das forças de inércia são as forças de amortecimento. As forças de amortecimento têm menos importância na resposta de uma estrutura submetida à carga de impacto, porque não conseguem dissipar quantidade significativa de energia do sistema num curto espaço de tempo.

Um carregamento de impacto pode ser definido como a transmissão de energia cinética a um sistema num tempo relativamente pequeno em comparação com o período natural do sistema. De modo geral, forças de impacto que podem ser ocasionadas por rajadas fortes de vento, explosões, choque de automóveis e aeronaves, e ação sísmica, são consideradas transientes consistindo em um único e principal pulso (Figura 2.22), donde pode-se obter a força máxima e o tempo de duração.

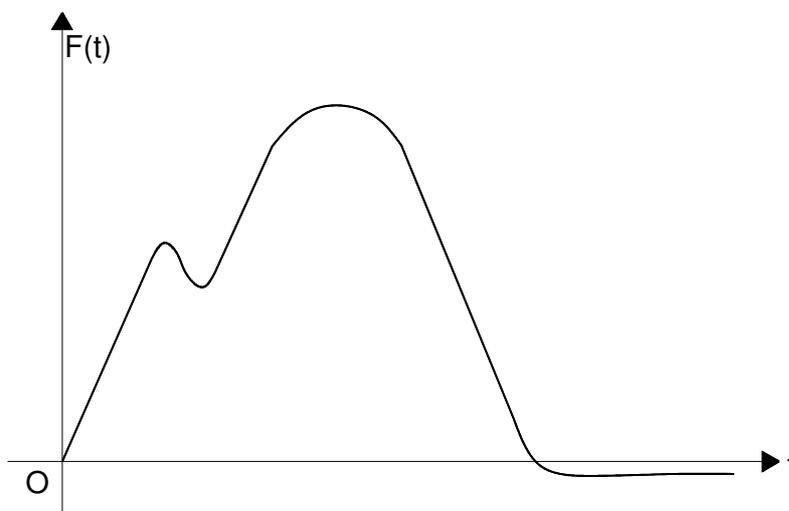


Figura 2.22 - Resposta de uma carregamento impulsivo arbitrário.

A magnitude das ações dinâmicas e sua relação com o tempo dependem do tipo de excitação aplicada ao sistema e das propriedades dinâmicas deste. Ressalta-se que sob carga de impacto, muitos materiais que apresentam comportamento dúctil quando submetidos a carregamento estático podem apresentar comportamento frágil. Este comportamento é devido à impossibilidade da redistribuição de tensões durante um período muito curto de deformação. Para carregamentos de curta duração, com tempo de aplicação do carregamento inferior

a $1/4$ do período natural do sistema, a ação dinâmica máxima depende principalmente da magnitude total do impulso imposto, sem ser influenciado pela forma como o impulso é aplicado. Tem-se que a máxima ação possível para uma carga súbita é duas vezes sua ação estática (Clough, 1993).

2.9.4. Período Natural

Após a aplicação de um pulso numa estrutura, a energia absorvida pelo sistema é dissipada sob a forma de movimento vibratório. Os fatores que alteram a natureza dessa vibração são: a geometria, as propriedades elásticas, e a densidade da peça analisada.

2.9.5. Propagação de Ondas

A resposta dinâmica de uma barra uniforme com carregamento axial aplicado subitamente pode ser interpretada como a propagação de ondas de tensão e deformação ao longo de seu comprimento. Esse mecanismo pode ser entendido pela consideração da propagação de ondas em dois instantes de tempo, $t = 0$ e $t = \Delta t$ (Figura 2.23). Considerando a nova posição da onda incidente, tem-se que a amplitude e forma na segunda posição são as mesmas da primeira. Com isso, conclui-se que a onda avança uma distância $V\Delta t$ durante um tempo Δt . A velocidade de propagação da onda é inerente às propriedades do elemento, sendo dada pela expressão (2.15). Por similaridade, o termo $f_2(x)$ representa uma forma de onda refletida em direção oposta à onda incidente (Figura 2.24).

$$V = \sqrt{\frac{EA}{\bar{m}}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.15)$$

onde V é a velocidade de propagação de onda no material, E é o módulo de elasticidade do material, A é a área da seção transversal do elemento, \bar{m} é massa do material por unidade de comprimento, e ρ é a massa específica do material.

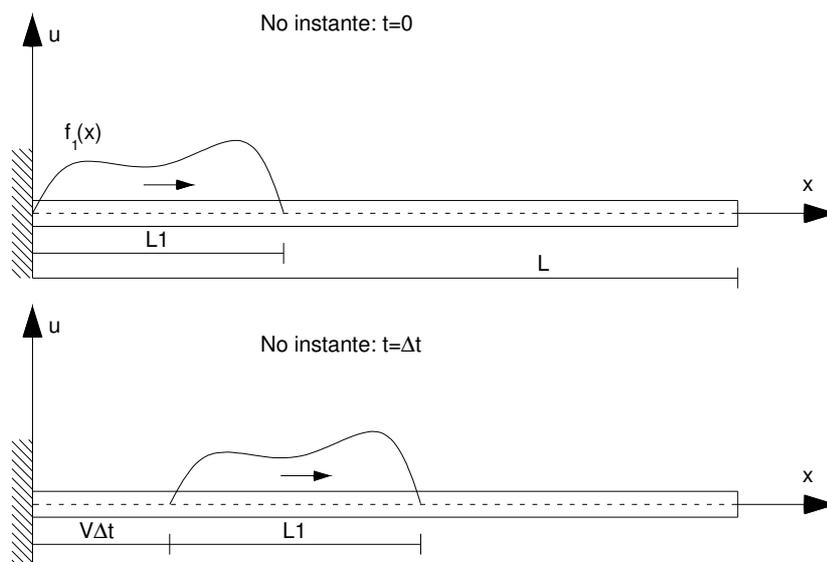


Figura 2.23 – Propagação de ondas durante um intervalo de tempo (Clough, 1993).

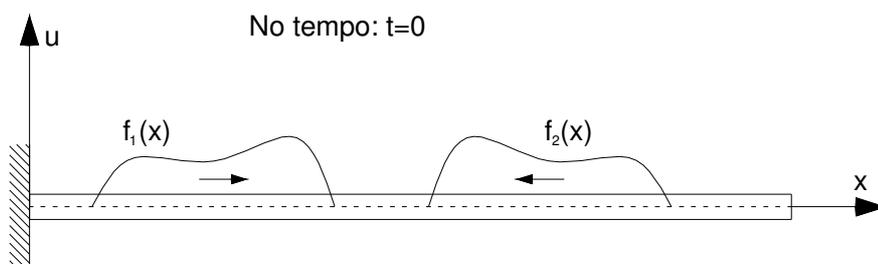


Figura 2.24 – Ondas incidente e refletida ao longo do comprimento de uma barra (Clough, 1993).

A forma de uma onda que se propaga ao longo de uma barra uniforme é controlada pelas condições de contorno desta, e pela continuidade de suas propriedades. Se uma barra uniforme apresenta numa das extremidades um apoio fixo, por exemplo, no momento em que uma onda incidente alcança o fim da barra, a onda é refletida com mesma forma e sinal. No caso onde há descontinuidade nas propriedades da barra, a onda incidente que chega na interface de descontinuidade cria uma onda refletida que se propaga em direção oposta, e no mesmo instante é criada uma onda transmitida que se propaga além da interface de descontinuidade. Para satisfazer as condições de continuidade em termos de força, tem-se:

$$F_I + F_R = F_T \quad (2.16)$$

onde F_I é a força incidente, F_R é a força refletida, e F_T é a força transmitida.

Com as relações constitutivas, encontram-se as forças refletida e transmitida em função da força incidente na interface de descontinuidade:

$$\begin{aligned} F_R &= \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} F_I \\ F_T &= \frac{2\alpha}{\alpha + 1} F_I \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde α é a relação entre as propriedades das duas barras, dada por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_2 E_2 A_2}{m_1 E_1 A_1}} \quad (2.18)$$

sendo m_1 e m_2 são as massas das barras 1 e 2, respectivamente, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade das barras 1 e 2, respectivamente, e A_1 e A_2 são as áreas das seções transversais das barras 1 e 2, respectivamente.

Considerando-se a Figura 2.25, o fator α define o caráter da descontinuidade na interface entre as duas barras e controla a amplitude das forças refletidas e transmitidas. Por exemplo, para aumento da rigidez da barra 2, o valor de α aumenta e a força refletida tem o mesmo sinal da força incidente. Para redução dessa rigidez, o valor de α se torna menor que um, e a força refletida apresenta sinal oposto à força incidente. Considerando que as duas barras são rígidas, o tempo de carregamento até se alcançar um valor de força equivalente a um carregamento estático deve ser maior que o tempo necessário para que a onda de força normal alcance a interface de descontinuidade $\left(\frac{L}{V}\right)$, ou menor que

$$\left(\frac{2\alpha}{\alpha + 1}\right) \frac{L}{V}, \text{ ou seja:}$$

$$\frac{L}{V} < \Delta t < \left(\frac{2\alpha}{\alpha+1} \right) \frac{L}{V} \quad (2.19)$$

onde L é o comprimento do pino de ancoragem.

Se o tempo de carregamento for menor que o tempo que a onda leva para chegar na interface de descontinuidade, essa onda de força será transmitida com uma amplitude igual à força máxima estática amplificada de $\left(\frac{2\alpha}{\alpha+1} \right)$ e será refletida com uma amplitude igual à força máxima estática multiplicada de $\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)$.

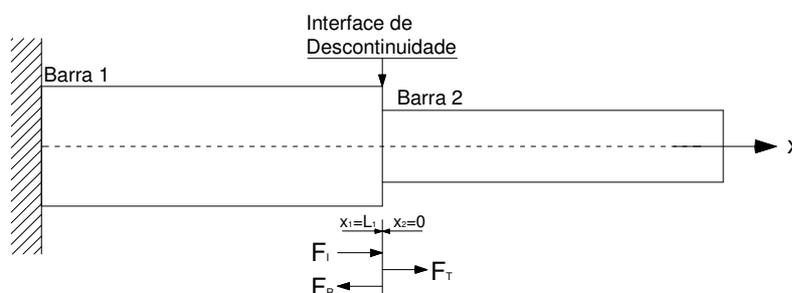


Figura 2.25 – Reflexão e transmissão de ondas na descontinuidade.

Quando um chumbador embutido em concreto (Figura 2.25) é carregado axialmente com força de impacto, antes que ocorra ruptura quer seja pela ruptura do chumbador, quer seja pela ruptura do cone de concreto, a força aplicada se propaga no chumbador e no concreto. Por exemplo, a onda incidente se propaga e se transforma em onda transmitida e refletida. Essa onda refletida se transforma em onda incidente, se propagando novamente no elemento, até que o sistema de ancoragem chegue à ruptura por qualquer modo de ruptura, ou até que o impulso termine. O intervalo em que cada ciclo se completa depende das características de cada material.

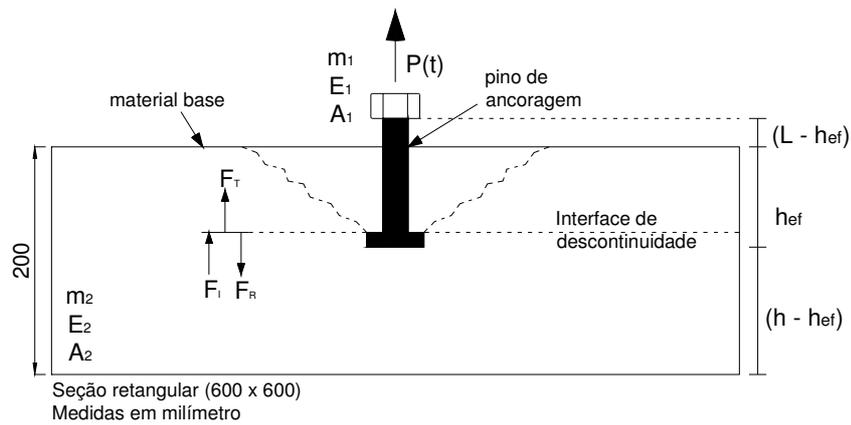


Figura 2.26 – Reflexão e transmissão de ondas num sistema de ancoragem.