

**Roger Motta Campello**

**ANÁLISE DA FIXAÇÃO DE CHUMBADORES EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO COM A UTILIZAÇÃO DE RESINA EPÓXI**

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2016

## Sumário

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA.....</b>	<b>4</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>25</b>
<b>METODOLOGIA DOS ENSAIOS .....</b>	<b>31</b>
<b>INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
<b>DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES ADESIVOS .....</b>	<b>40</b>
<b>CHUMBADORES ISOLADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>CHUMBADORES EM GRUPO.....</b>	<b>47</b>
<b>DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES GRAUTEADOS .....</b>	<b>52</b>
<b>FORMAS DE RUPTURA DOS CHUMBADORES GRAUTEADOS .....</b>	<b>54</b>
<b>DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES ISOLADOS .....</b>	<b>56</b>
<b>INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA AO BORDO .....</b>	<b>59</b>
<b>INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CHUMBADORES .....</b>	<b>59</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

## **INTRODUÇÃO**

Visando um processo de reparo eficiente, rápido e confiável deu-se início a este estudo tendo em vista a necessidade do desenvolvimento de pesquisas no que diz respeito à ancoragem de barras de aço em estruturas existentes de concreto, por intermédio de resina epóxi.

O método da colagem de armaduras com resina epóxi está sendo cada vez mais requerido, principalmente com a constante necessidade de readequar as estruturas antigas a novos usos e à recuperação e o reforço das estruturas novas, tendo em vista o aumento da agressividade do meio, à deficiência nos processos executivos, especialmente em virtude da velocidade com que os empreendimentos construtivos vêm sendo desenvolvidos e, sobretudo, devido à falta de manutenção. Tais necessidades acabam por gerar ou incorporar outras tecnologias no âmbito da engenharia civil, que, apesar de serem criadas por causas desfavoráveis, são sempre bem vindas para ao avanço tecnológico do setor.

## **MOTIVAÇÃO**

Contribuir para o avanço do conhecimento na área da recuperação e reforço estrutural, através do estudo e avaliação de um tema da construção civil que ainda encontra-se carente. Poucos estudos científicos foram encontrados na literatura técnica e métodos empíricos têm sido usados para a solução dos problemas na prática da engenharia civil.

## **OBJETIVO**

O principal objetivo do estudo refere-se à contribuição para o aumento do conhecimento científico de determinada prática empírica da construção civil, usada sobretudo na área do reforço e da recuperação estrutural.

O foco deste trabalho está na avaliação da capacidade de aderência de barras de armaduras coladas às estruturas de concreto, tendo por base ensaios laboratoriais.

## **APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA**

Inicialmente procedeu-se a uma revisão bibliográfica sobre o tema da aderência aço-concreto, cujo conhecimento já está consolidado, bem como ao tema da fixação de armaduras novas ao concreto existente e aos procedimentos utilizados hoje, na prática da recuperação estrutural.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### ***1. Características gerais***

O estudo da aderência envolve diversos parâmetros e tem a finalidade de determinar o comportamento dos materiais envolvidos na transmissão de esforços que se desenvolvem nas ligações. Esta ligação entre diferentes materiais é de grande importância para o concreto armado, visto que o seu funcionamento depende do trabalho em conjunto de materiais com características bastante diferentes, como o aço, material com alta ductilidade e elevada resistência mecânica e o concreto, material extremamente frágil e com baixa resistência à tração.

O comportamento de uma ligação depende principalmente das condições da interface dos materiais envolvidos, bem como do tipo de interação que ocorre nestas interfaces. No caso da ligação entre o aço e o concreto, pode-se identificar alguns mecanismos:

#### ***a. Adesão***

Esta é compreendida pela resistência direta entre dois materiais que se combinam quimicamente; trata-se da ligação intermolecular dos compostos envolvidos, seja por ações químicas, como reação de solidarização entre compostos ativos, ou físicas, mais comumente termo-fusão.

A característica de maior importância desta parcela da ligação é a capacidade adesiva entre os agentes solidarizantes. A superfície de contato entre eles influencia de maneira secundária na capacidade de aderência, como é o caso da rugosidade que melhora a interação química dos compostos ativos que agem na adesão.

### ***b. Atrito***

A parcela do atrito reflete a relação do coeficiente de atrito entre as superfícies de contato dos materiais envolvidos na resistência da aderência global do sistema. No concreto armado esta característica é percebida principalmente pelo envolvimento completo da barra de aço pela pasta de cimento, favorecendo seu enclausuramento e o aumento da força de atrito resistente que ocorre quando existe a tendência de movimento após o rompimento da adesão.

Quando considera-se a retração da pasta cimentícia circundante à barra de aço, ocorre aumento de pressão superficial do concreto na barra de aço, contribuindo para o aumento da força de atrito.

A rugosidade da barra e os componentes do concreto, tais como agregados miúdos e graúdos, ajudam no desenvolvimento de parcelas resistentes de atrito mais elevadas.

### ***c. Aderência mecânica***

Verificada na mecânica do engate que ocorre na ligação entre o aço e o concreto, esta parcela está compreendida na força de resistência desse engate. A mecânica da ligação pode ser considerada microscópica, como as ranhuras superficiais dos materiais que tendem a se encaixar (conceito semelhante ao da aderência por atrito) ou macroscópicas, como nervuras e saliências das barras de aço que funcionam como batentes ou anteparos aos deslocamentos relativos, no caso do concreto armado.

Esta parcela está relacionada principalmente com o efeito de cunha entre as irregularidades da superfície, e majoradas pela presença de nervuras nas barras de aço. O efeito de cunha provoca tensões de cisalhamento no concreto circundante, modificando a forma de ruptura e a conformação do estado de tensões presente na ligação.

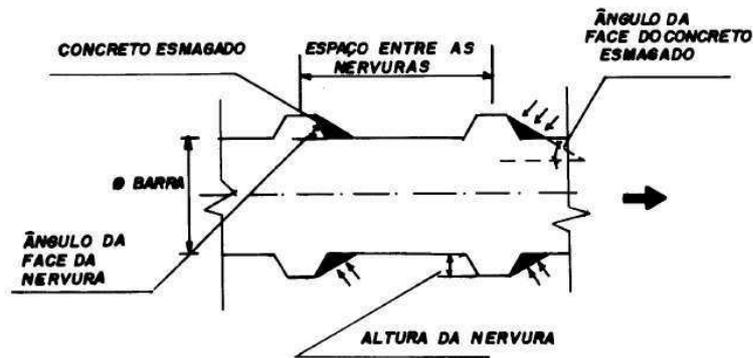


Figura 1 - Esforços solicitantes no concreto circundante à barra de aço na proximidade das nervuras Barbosa (2001).

## 2. Aderência Aço-Concreto

O comportamento da aderência entre a barra e o concreto circunvizinho tem importância decisiva quanto à capacidade de carga das estruturas de concreto armado, pois é com o estudo desse fenômeno de aderência é possível determinar-se os comprimentos de ancoragens e emendas de barras de aço. Além deste fenômeno, ocorre ainda o enrijecimento na peça de concreto armado devido à transferência de tensões do concreto para a armadura, definindo o controle da fissuração quando as tensões passam para o estágio 2, de acordo com (FERGUSON (1966), DUCATTI (1993), BARBOSA e MARTINS (1999) apud BARBOSA (2001).

Conforme descrito pelo ACI Committe 408 (2005) apud Reyes (2009), a tensão de aderência é função da transferência de esforços ao longo da interface barra-concreto, que se modificam de acordo com as solicitações impostas na peça de concreto armado.

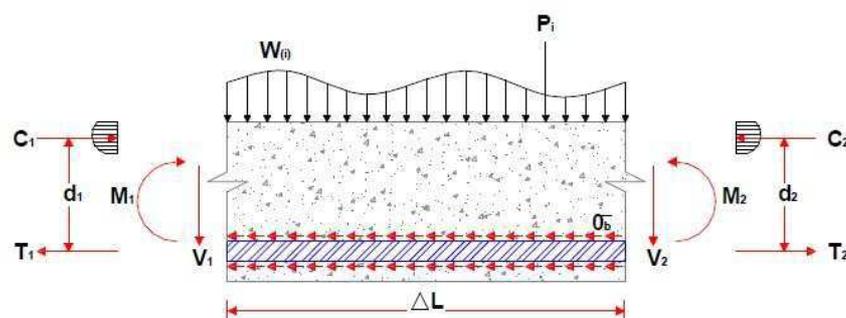


Figura 2 - Solicitações na estrutura e a transferência de esforços internos entre materiais. (Fernandes 2011)

De fato, num elemento de concreto armado, exemplificado na Figura 2, as solicitações de momento fletor e esforço cortante, geram tensões que são transmitidas do concreto para a barra de aço pela aderência. Através da equação de equilíbrio, a variação da força longitudinal ao longo da peça é dada pela seguinte equação:

$$\Delta F = T_1 - T_2 = \frac{M_1}{d_1} - \frac{M_2}{d_2} \quad (1)$$

A tensão desenvolvida na superfície aderente da barra devido à variação dos esforços é:

$$\tau_b = \frac{\Delta F}{Area} = \frac{\Delta F}{\phi \cdot \pi \cdot \Delta L} \quad (2)$$

Particularmente, a adesão entre o aço e o concreto é de baixa capacidade resistente, pois esta parcela rompe-se mesmo quando submetida a baixas tensões. Esta situação se verifica com o escorregamento ou deslizamento do aço (deslocamento da barra em relação ao concreto) logo no início do carregamento após rompimento da adesão química, conforme Figura 3.

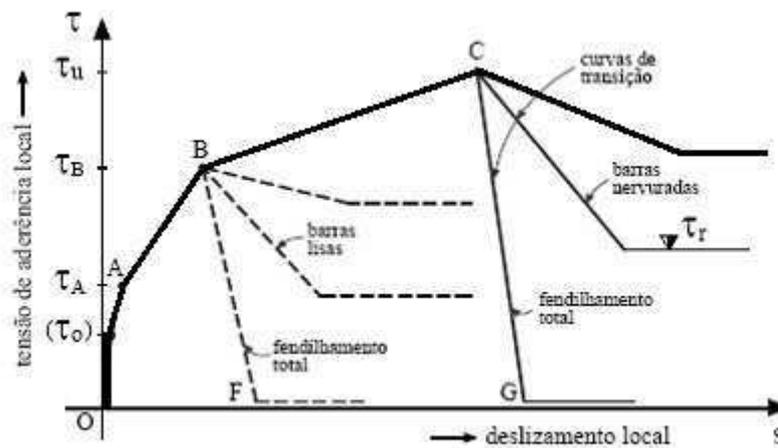


Figura 3 - Modelo Teórico da Curva de Aderência proposta por Tassios (1979) apud Reyes (2009), e Barbosa (2001).

Para melhor compreender o comportamento da ligação, segue análise do gráfico da Figura 3:

- Até a tensão  $\tau_0$  não ocorrem deslizamentos e diz-se que a união entre o concreto e a armadura se dá por adesão química. Posteriormente a este ponto, ao se romper esta adesão química, um deslocamento relativo ocorre provocando o surgimento de forças de atrito e engates mecânicos proporcionais com a rugosidade das superfícies. Quando a sollicitação ultrapassa a resistência do material mais frágil, no caso o concreto, ocorrem falhas, percebidas por microfissuras transversais internas, e na curva da Figura 3, pela inclinação em  $\tau_A$ , ocasionando os primeiros deslizamentos entre o aço e o concreto. Neste estágio ocorre a perda do comportamento elástico e o aumento da carga ocasiona deslizamentos maiores, aumentando os valores das tensões no trecho  $\tau_A - \tau_B$  e a perda de rigidez da peça.
- Com a continuidade do carregamento, para o caso de barras nervuradas, mantêm-se a engrenagem e o atrito (dessa vez, causado pela tendência da nervura de continuar se deslocando) aumentando a fissuração e a expectativa de fendilhamento, quando as características de confinamento não são suficientes. No caso de barras lisas, estas, nesse momento escorregam completamente perdendo sua capacidade de aderência.
- O colapso da ligação resulta por um fendilhamento total da peça de concreto, ou, quando existe confinamento suficiente resulta no deslizamento da barra de aço nervurada, demonstrada pela curva decrescente após  $\tau_u$  no ponto C. Este estágio geralmente ocorre após um deslizamento da ordem do comprimento equivalente à distância entre nervuras.

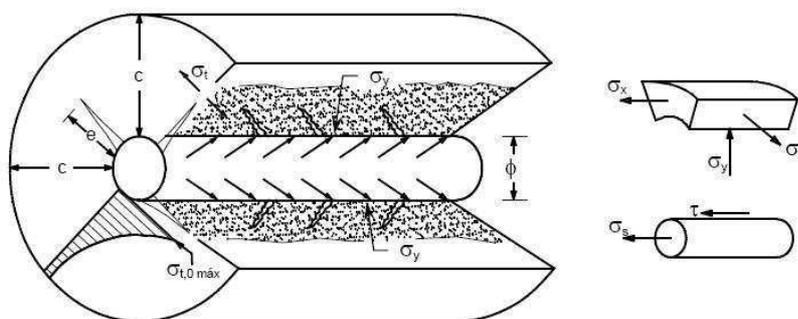


Figura 4 - Esquema de fissuras de fendilhamento, proposta por TASSIOS (1979), apud OLIVEIRA (2008).

Conforme o descrito por Goto (1971) apud Oliveira (2008), as características das fissuras formadas no concreto que envolve uma barra colocada no eixo de prismas de concreto armado são influenciadas pelo tipo da barra utilizada, lisa ou nervurada. Para as barras nervuradas, as fissuras influenciam ou determinam o mecanismo de aderência entre a barra e o concreto, produzindo fissuração radial, e longitudinal. No desenvolvimento deste fenômeno, primeiramente ocorrem microfissuras transversais na extremidade das nervuras, conforme apresentado pela Figura 4.

A pressão exercida pelas nervuras no concreto circundante é resistida pelas tensões de cintamento. A falha do sistema ocorre como demonstrado pela Figura 5, onde a característica de confinamento direciona o tipo de ruptura, ou seja, quando o concreto não resiste às tensões radiais impostas pelas nervuras da barra, ocorre ruptura por fendilhamento longitudinal, quando existe um confinamento adequado, por presença de armadura ou elevado cobrimento, a ruptura ocorre por cisalhamento longitudinal da superfície de concreto adjacente à barra de aço, caracterizando o arrancamento.

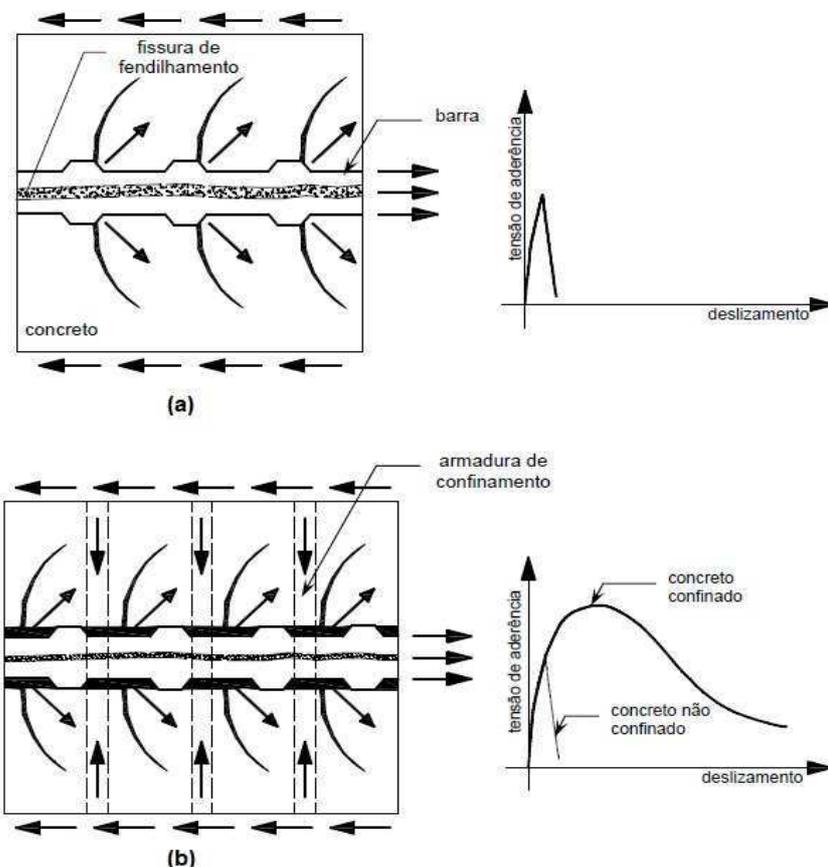


Figura 5 - Tipos de ruptura exposto por Oliveira (2008). (a) Ruptura por fendilhamento; (b) Ruptura por falha na aderência quando concreto confinado.

De acordo com a idéia exposta pela Figura 5, a ruptura por fendilhamento limita a eficiência da aderência, pois ocorre falha no concreto antes de comprometer inteiramente a ligação como ocorre na curva em (b).

Segundo CEB (1990), a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento depende de alguns fatores principais, tais como a rugosidade da barra, a resistência do concreto, a posição e orientação da barra durante a concretagem, o estado de tensão, as situações de confinamento e o cobrimento apresentado pela peça em questão. Esta norma fornece uma curva estatística, que pode ser utilizada para avaliar o comportamento da aderência aço-concreto.

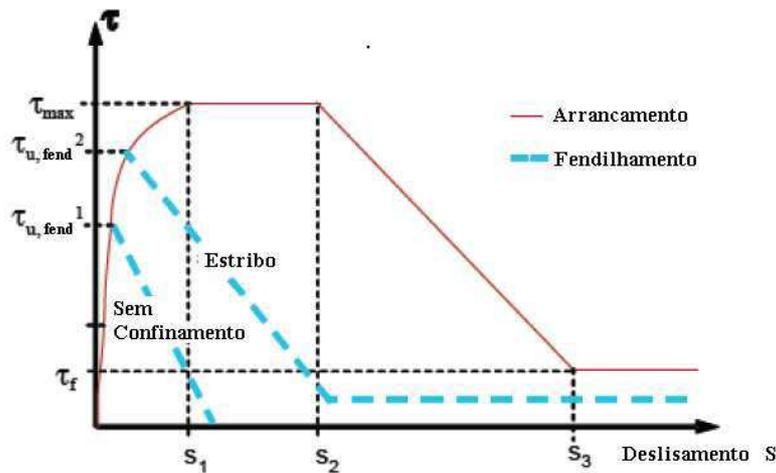


Figura 6 - Relação tensão de aderência x deslizamento, carregamento monotônico CM (2010).

A curva da Figura 6 refere-se ao comportamento da aderência entre a barra e o concreto e possui características semelhantes a curva apresentada na Figura 3, que representa o modelo proposto por Tassios (1979) apud Barbosa (2001). A curva, juntamente com as equações (3) à (6), descreve o modelo de cálculo de tensão de aderência entre o concreto e a barra de aço para o arrancamento e para o fendilhamento no modelo de ensaio adotado pelo FIB/CEB para carregamentos monotônicos.

$$\tau_0 = \tau_{\max} (s/s_1)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_1 \quad (3)$$

$$\tau_0 = \tau_{\max} \quad \text{para } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (4)$$

$$\tau_0 = \tau_{\max} (\tau_{\max} - \tau_f) (s-s_2)/(s_3 - \tau_f) \quad \text{para } s_2 \leq s \leq s_3 \quad (5)$$

$$\tau_0 = \tau_f \quad \text{para } s_3 < s \quad (6)$$

A aderência entre o concreto e o aço é de primordial importância para o funcionamento conjunto dos dois materiais e tem particular relevância em diversos fenômenos de resistência e de rigidez dos elementos de concreto armado e protendido. Estes fenômenos influenciam:

- o controle da abertura das fissuras em peças tracionadas e a limitação da deformação dos elementos sujeitos a flexão e/ou a tração, por mobilização do concreto entre fissuras - “tension stiffening effect”;
- a transferência progressiva das forças ao longo das barras para o concreto quando os esforços de flexão variam ao longo do elemento de concreto armado, contribuindo assim para o mecanismo de resistência ao esforço cortante;
- os mecanismos de transferência das forças das extremidades das barras, tracionadas ou comprimidas, para o concreto, fenômeno que se designa por ancoragem, e a transferência dessas forças entre barras por simples sobreposição dos mesmos no seio do concreto, proporcionando a emenda das barras.

O aço e o concreto possuem a mesma deformação ( $\delta_s = \delta_c$ ) enquanto a estrutura encontra-se comprimida ou não fissurada. Na região fissurada, a tensão é transmitida pelo aço, e o deslocamento do aço ( $\epsilon_s$ ) e do concreto ( $\epsilon_c$ ) são diferentes entre fissuras. Este caso é demonstrado pela Figura 7.

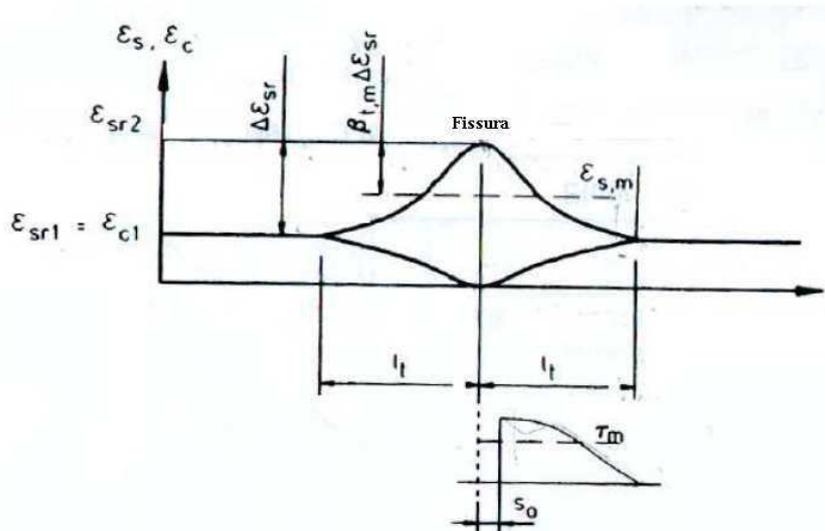


Figura 7 - Esquema do comportamento da tensão desenvolvida no aço e no concreto na proximidade de uma fissura, CEB (1990).

A Figura 7 mostra a variação da deformação do aço em relação à do concreto quando ocorre a fissura. Considerando a deformação do aço igual à do concreto na região não fissurada, e variável nas proximidades da fissura (comprimento  $l_i$ ), a tensão no concreto tende a cair até chegar a zero no ponto da fissura e a do aço tende a aumentar de forma a compensar a falta do concreto e dar continuidade à transmissão da tensão ao longo da peça fissurada.

No que diz respeito às diretrizes de cálculo, a norma brasileira, NBR6118 (2007), recomenda o uso da equação (3) para a determinação da resistência de aderência das barras, visando a verificação de segurança.

$$f_{bd} = n_1 \times n_2 \times n_3 \times f_{ctd} \quad (7)$$

Onde:

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 0,21 f_{ck}^{2/3} \quad n_1 = 1,0 \text{ para barras lisas}$$

$$n_1 = 1,4 \text{ para barras entalhadas}$$

$$n_1 = 2,25 \text{ para barras nervuradas}$$

$$n_2 = 1,0 \text{ para situações de boa aderência}$$

$$n_2 = 0,7 \text{ para situações de ma aderência}$$

$$n_3 = 1,0 \text{ para } \Phi < 32 \text{ mm}$$

$$n_3 = (132 - \Phi) / 100, \text{ para } \phi > 32 \text{ mm}$$

A partir destas equações, a NBR 6118 (2007) define o comprimento de ancoragem básico, dado por:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (8)$$

Onde:

$f_{yd}$  = Resistência de escoamento de cálculo do

aço  $\emptyset$  = Diâmetro da barra

A literatura técnica identifica fatores que e influenciam na capacidade de aderência entre o aço e o concreto. Dentre elas:

- A rugosidade da barra é uma das características mais relevantes, visto que esta oferece o engate entre o concreto endurecido e a barra de aço, que ao ser solicitada produz esforços nos concreto, mesmo após a adesão ser comprometida;
- A resistência do concreto influencia diretamente na capacidade de transmissão de esforços, visto que quanto mais resistente for o concreto, maior será a resistência de aderência do engate entre a barra e o concreto, ainda como expõem Ribeiro (1985), que quanto mais resistente o concreto, menores as possibilidades de fendilhamento, fenômeno ligado à resistência de tração.
- Outro fator de considerável importância é o teor de agregado presente na mistura. Quanto maior a quantidade deste, melhor a resistência de aderência, assim argumentam Leonhardt (1983) e Ribeiro (1985). Isto se deve ao comportamento de encaixe que o agregado provoca na massa de concreto. Logo, quando temos uma massa com alto teor de finos, esse encaixe fica reduzido, diminuindo o atrito entre a matriz de cimento e o agregado, de modo a afetar tanto a aderência concreto-concreto quanto a aderência aço-concreto;
- O posicionamento da armadura dentro do concreto oferece condições distintas para o comportamento da aderência. O sentido de concretagem que apresenta melhor comportamento é da barra na vertical ou com distâncias superiores a 60cm da borda superior das peças, (armaduras no fundo das formas possuem melhores condições de aderência que as superiores), assim como a espessura de cobertura que, se elevada, propicia ganho de resistência ao fendilhamento, segundo Ribeiro (1985). As armaduras transversais, também contribuem significativamente contra o fendilhamento e a favor do ganho de resistência por atrito e ao engate mecânico; funcionam como uma fretagem do concreto adjacente à barra de aço;
- O comprimento de ancoragem da barra no interior do concreto favorece uma melhor distribuição de tensões ao longo da interface aço-concreto, resultando em menores concentrações de tensões e elevando a resistência da aderência do conjunto;

- A NRB 6118 (2007) refere ainda a influência do diâmetro da armadura, afetando a resistência de aderência quando a bitola da barra ultrapassa 32mm. Alguns autores, Leonhardt (1977) e Ribeiro (1985) apud Felício (1995) indicam uma influência pouco relevante para tal condição, e que apenas deve ser alertado o fato da peça possuir comprimento de ancoragem e cobrimento proporcional ao diâmetro da armadura, bem como à distancia entre barras e feixes de barras de maneira a evitar acúmulo de tensões.

### **3. Aderência Resina-Concreto-Aço**

Neste caso, tem-se um conjunto de três materiais diferentes que devem atender a uma interação monolítica; assim como acontece no concreto armado, é necessário que o aço esteja aderido ao concreto. Devido à alta capacidade adesiva da resina epóxi, a ligação aço-resina-concreto tende a se comportar de maneira eficiente e com alto grau de resistência, quando comparada com a aderência aço-concreto.

Para tanto, é necessário que a resina possua capacidades elevadas de adesão tanto ao concreto quanto ao aço, bem como características de resistência à compressão e à tração compatíveis com os esforços inerentes à ligação.

O comportamento da ligação com resina ocorre de maneira um pouco diferente da verificada com o concreto, uma vez que a resina é um composto químico que apresenta uma alta capacidade de adesão tanto ao concreto quanto ao aço, além de elevada aquisição de resistência em curto espaço de tempo.

O mecanismo de adesão química que ocorre durante a colagem da resina com outros materiais pode ser entendido pela teoria de Shape-Shanhorme, descrita por Aguiar (1990), tida como a mais completa, pois além do fenômeno a molhagem das superfícies sólidas, consideram também as aderências mecânica, química, eletrostática, de difusão e de absorção. Esta teoria identifica a aderência pela ótica do espalhamento da cola sobre a superfície sólida, caracterizado pelo ângulo de contato entre a superfície sólida e a tangente à gota de líquido no ponto de interseção das fases solido-líquido, esta teoria relaciona a tensão superficial da cola com seu espalhamento sobre o sólido.

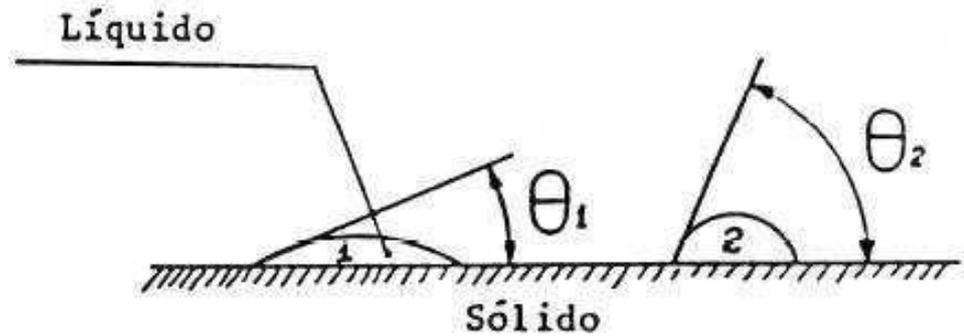


Figura 8 - Interação entre a superfície sólida e o material polimérico para diferentes materiais Aguiar (1990).

Se  $\theta_1 < \theta_2$ , o líquido 1 se espalha melhor sobre o sólido do que o líquido 2. Portanto, quanto menor for o ângulo de contato, maior é o espalhamento. A tensão superficial  $\sigma$  relaciona-se com o ângulo de contato, através da expressão:

$$\cos \theta = -a\sigma + b$$

onde  $a$  e  $b$  são coeficientes que dependem da natureza do líquido e do estado das superfícies.

Por outro lado, no gráfico da Figura 9, verifica-se que quanto menor for a tensão superficial maior é o espalhamento. Assim, para superfícies horizontais ou injeção de fissuras a escolha de uma cola com ângulo de contato e tensão superficial baixos é a mais indicada; no caso de superfícies inclinadas ou verticais tal escolha acarretaria no risco de perder demasiada cola e surgirem muitos vazios na interface cola/substrato.

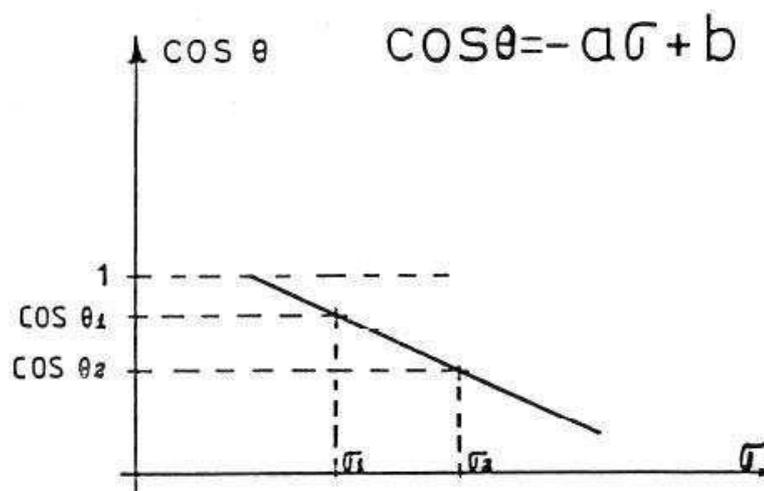


Figura 9 - Tensão de aderência em função do ângulo de contato Aguiar (1990).

A aderência mecânica entre uma cola e uma superfície rugosa é mais resistente do que em uma superfície lisa, devido não só a maior penetração da cola por entre as rugosidades, mas também por ter maior área de contato.

#### **4. Polímeros**

Os polímeros influenciam significativamente a indústria da construção civil, suas diferentes propriedades permitem uma aplicabilidade em vários segmentos; suas principais aplicações, segundo AGUIAR (1990), são:

- Revestimento de pavimentos – apresentam elevada resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica contribuindo para isolamento térmico; não sofrem variação volumétrica por umidade e ainda podem assumir diversas formas de acordo com a necessidade, mantendo sua integridade e capacidade de resistência;
- Acabamentos de Interiores – apresentam elevada resistência quando comparados a outros materiais. Estes possuem diversidade quanto a textura, moldes, cores, brilho, decoração, dentre outras, e ainda são fáceis de manipular;
- Canalizações – nesse âmbito, pode-se dizer que os polímeros criaram uma revolução tecnológica quanto às instalações hidráulicas, praticamente todos os sistemas hidráulicos foram substituídos por materiais poliméricos, principalmente devido ao custo ser inferior, a praticidade de instalação e manutenção, resistência quanto à corrosão, flexibilidade e leveza, implicando em reduções de manutenção;
- Colas e vedações – quanto a característica adesiva, os polímeros ofereceram pela primeira vez uma capacidade confiável de aderência por adesão química, e ainda uma gama de aplicações, válida para diferentes tipos de materiais. Além das características de boa aderência e sua flexibilidade estrutural em forma de borracha, agregou-se ainda sua capacidade de vedação, principalmente aplicada na construção civil para juntas, quando se faz necessário um grau de impermeabilidade. As colas são polímeros termorrígidos, enquanto que os mastiques se enquadram em termoplásticos.

## 5. Propriedades dos Polímeros

Por se tratar de um componente obtido quimicamente através de uniões de hidrocarbonetos, pode-se esperar uma larga variedade de tipos de estruturas moleculares, as quais derivam diferentes propriedades e características físico-químicas, que podem ser divididas da seguinte maneira:

- Termorrígidos – São aqueles que quando submetidos a uma dada temperatura e pressão amolecem e fluem, podendo ser moldados. Ao reagirem quimicamente, formam ligações cruzadas entre as cadeias, e se solidificam. Novas aplicações de temperatura e pressão não exercem influência no material, tornando-os infusíveis, insolúveis e não recicláveis.

Tabela 1 – Tipos e aplicações dos polímeros termorrígidos Souza (2009)

Termorrígidos	Aplicações
epóxi	Adesivos para concreto e metais, injeção de fissuras, compósitos de fibras de vidro e carbono
poliéster	fabricação de tanques e piscinas de fibras de vidro, tubulações de esgoto, aditivos para concretos, vernizes, tintas eletrostáticas para proteção de estruturas metálicas
poliuretano	acessórios elétricos, vedação, isoladores, vernizes para madeira
resinas fenólicas (polidimetil- siloxano) ou silicones	tintas com hidrofugantes

- Termoplásticos – São aqueles que quando submetidos a uma dada temperatura e pressão amolecem e fluem, podendo ser moldados. Podem ser remodelados quando novas temperaturas e pressões são aplicadas, o que permite que sejam reciclados.

Tabela 2 – Tipos e aplicações dos polímeros termoplásticos Souza (2009).

Termoplásticos	Aplicações
Polietileno	embalagens, brinquedos, revestimentos de pistas esportivas, vasilhames, lona plástica
Polipropileno	carcaças de eletrodomésticos, seringas e injeção, peças estruturais, tubos e conexões, fibras para controle de retração e aumento de resistência à tração de concretos.
Poliestireno expandido (EPS) ou isopor	empregado em isolamento térmico de coberturas, preenchimento de juntas de dilatação, em lajes nervuradas, fabricação de concreto leve.
Policloreto de vinila (PVC)	tubulações hidrosanitárias, esquadrias de portas e janelas, revestimentos de cabos e fios elétricos, tintas para estruturas metálicas
Poliacetato de vinila (PVA), látex	tintas para concretos e adesivos do tipo cola branca
Polimetilmetacrilato ou acrílico	Tintas para concreto, placas de sinalização de tráfego, calotas e janelas e avião, lanternas de carro, lentes para projetores, luminárias, painéis
Policarbonato	na substituição do vidro em coberturas e fechamentos translúcidos, chapas compactas e alveolares, telhas
Politetrafluoretileno (PTFE) ou teflon	mantas de tensoestruturas (entra como matriz de fibras de vidro), aparelhos de apoio de pontes

- Elastômeros – também chamados de borrachas, são materiais que na temperatura ambiente podem apresentar deformações muitas vezes superiores ao seu comprimento original, com uma recuperação elástica total quando a tensão é retirada.

Tabela 3 – Tipos e aplicações dos Elastômeros Souza (2009).

Elastômeros	Aplicações
Estireno-butadieno (SBR)	fabricação de concreto polímero
Policloropreno ou neoprene	aparelhos de apoio de pontes, viadutos e outros
Isobutileno-isopreno ou borracha butílica	mantas poliméricas para impermeabilização e estruturas
Borracha de nitrila	vedações

Em geral, os polímeros apresentam elevadas resistências mecânicas, massa volumétrica, ductilidade, tenacidade, dureza, resistência ao choque, resistência ao desgaste, resistência ao atrito e durabilidade elevada. Quanto às características visuais óticas, podem ser muito transparentes ou opacos e permitem colorir-se facilmente. Podem apresentar baixas permeabilidades ao vapor d'água.

Entretanto, apesar de possuir baixa condutividade térmica, seu elevado coeficiente de dilatação térmica, aproximadamente de 1,5 a 20 vezes a do aço e do concreto, pode causar incompatibilidade quando utilizado juntamente com outros materiais na construção civil.

Quanto à resistência mecânica, este material pode sofrer grandes deformações por fluência, característica que preocupa quando se procede na utilização de adesivos poliméricos com elevada resistência para transferência de esforços, como indica RIBEIRO (1985).

Alguns polímeros são resistentes a sais, ácidos e álcalis, tendo grande uso em indústrias e estações de tratamento de esgotos, que caracterizam ambientes altamente agressivos. Entretanto, quanto a raios ultravioleta, estes aceleram o processo de envelhecimento dos polímeros e sua decomposição através de reações de oxidação.

Estes adesivos químicos apresentam grande versatilidade para aplicação na construção civil, sendo algumas delas listadas abaixo.

- Capacidade de adesão em larga variedade de materiais, permitindo compatibilidade entre deferentes tipos de materiais;

- Elevada capacidade resistente, contribuindo para o uso em diversas situações de carga e diversos estados de tensões;
- Esse tipo de adesivo não gera expansões volumétricas no processo de cura, evitando fissuração do material de base;
- São materiais no estado de gel ou fluido, que podem assumir formas geométricas variadas e solidificam de maneira eficiente em diversos ambientes;
- Alguns possuem ainda capacidade tixotrópica, e permitem a utilização em diferentes situações, evitando a formação de bolhas de ar ou problemas com perda de material de preenchimento quando instalados em tetos.

## **6. Polímeros como cola**

Os tipos mais utilizados de polímeros são os fenólicos, o epóxi, os poliuretanos e os poliésteres. Seu uso varia de acordo com os materiais a serem colados e o ambiente que irá atuar.

Polímeros bi-componentes são diferentes de polímeros catalisados. Nos bi-componentes, os Poliuretanos e Epoxídicos, a proporção da mistura oferece resultados muito diferentes, estes constituintes devem ser cuidadosamente misturados com a proporção ideal e homogeneizados completamente durante a mistura para obtenção das características desejadas após o seu endurecimento. Quanto aos catalisados, neste caso os poliésteres, a adição do catalisador tem baixa influencia na propriedade deste após endurecido, controlando apenas a velocidade de reação.

De acordo com Aguiar (1990), para o caso de recuperação estrutural e reparos com colas poliméricas, os do tipo epóxi apresentam-se mais vantajosos, tanto para ambientes internos quanto externos.

## **7. Resina Epóxi**

A resina epóxi é um polímero do tipo termorrígido cuja polimerização dá-se pela reação de dois componentes, a resina ou base e um endurecedor. Esta reação dá-se com aumento de viscosidade e é exotérmica. As características principais da resina epóxi, são:

- excelentes qualidades adesivas. Aderem a quase todos os materiais de

construção;

- altamente resistentes ao ataque dos ácidos, óleos, álcalis e solventes;
- em geral, apresentam baixa retração, rápido endurecimento e alto grau de impermeabilização.

Suas propriedades podem ser modificadas por uma infinidade de agentes, a fim de melhorar o sistema, como: diluentes, aceleradores ou retardadores do endurecimento, cargas para redução da retração e da fluência, pigmentos, etc.

Portanto o material epóxi utilizado no âmbito da construção civil não está em sua condição físico-química natural, esse material possui aditivos e adições que o modificam para tornar mais eficiente seu uso e aumentar sua trabalhabilidade.

Segundo Aguiar (1990), as resinas epóxi possuem, em sua grande maioria, as seguintes características:

- Aditivos – São considerados produtos que influenciam quimicamente nas características do material base, ou seja, ingredientes reativos.
  - Solventes – Melhoram a trabalhabilidade, geralmente reativos (preferíveis), entretanto podem ser inertes. Atuam também na fluidez da mistura final do epóxi;
  - Plastificantes – Influem na diminuição da fragilidade da resina depois de endurecida, influenciando no módulo de elasticidade;
  - Aceleradores – Interferem na velocidade de polimerização, que se traduz na velocidade de pega da resina e do pot life (tempo de trabalhabilidade). Os aceleradores também se relacionam com os catalisadores, responsáveis pelo início do processo de endurecimento da resina, ou seja, início da reação de pega. É comum que estas resinas sejam do tipo bi-componentes, facilitando sua utilização.
- Adições – São os materiais inertes que afetam a resina. Geralmente constituídos por fibras minerais, de origem calcária ou silicosa, incluídas na mistura para provocar diminuição da retração, da dilatação térmica, ganho de elasticidade, aumento no tempo de polimerização e ainda redução de custo, visto que diminui a necessidade de polímeros para um determinado volume de resina.

Para as fibras de origem silicosa, o índice de finura é muito relevante, já nas cargas calcárias, tanto a quantidade quanto à finura oferecem menos influência na resistência à compressão da resina endurecida. A quantidade máxima de carga mineral adicionável varia com o tipo de epóxi e o mineral em questão. A quantidade de carga adicionável decresce na medida que a finura aumenta. As adições não influenciam na resistência à tração.

Tabela 4 - Comparação entre sistemas de reparação Allen et al (1987).

	Sistemas cimentícios	Sistemas de resina epóxi
Resistencia a Compressão (Mpa)	20-70	55-110
Módulo de Elasticidade à compressão (GPa)	20-35	0,5-20
Resistencia á tração (Mpa)	1,5-3,5	9-20
Deformação de ruptura ( $\times 10^{-3}$ )	2-3,5	0-15
Coeficiente de dilatação $^{\circ}C$ ( $\times 10^{-6}$ )	7-12	10-30
Absorção de água (% peso)	5-15	0-2
Temperatura máxima de serviço ( $^{\circ}C$ )	300	40-80
Tempo de desenvolvimento da resistência, a $20^{\circ}C$	1-4 semanas	6-48 horas

### **8. Normalização e uso de ancoragens com chumbadores adesivos**

Chumbadores são elementos de aço usados para transferir ao concreto forças de tração, de compressão, de corte ou corte associado com tração ou com compressão e, atualmente, são cada vez mais utilizados em ligações de peças pré-moldadas de concreto, em ligações entre peças de aço e de concreto, em reforços

de estruturas e de fundações, na implantação de arranques de pilares, em acréscimos em estruturas já prontas, etc.

Os chumbadores podem ser basicamente de dois tipos: moldados in-loco, ou seja, instalados na peça antes da concretagem, e pós-instalados, isto é, aqueles que são assentados em furos feitos no concreto. Quanto ao seu sistema de fixação, distinguem-se os pós-instalados fixados por dispositivos mecânicos do próprio chumbador, por adesivos sintéticos ou grautes, que estabelecem a aderência entre o chumbador e o concreto.

No que diz respeito aos chumbadores adesivos, verifica-se até hoje, carência de normalização e de informação técnica para os projetistas. Segundo o artigo de Wollmershauser et al, até 1995 não existiam critérios de qualificação e teste para ancoragem por adesivos. O primeiro modelo, AC01, "Critério de Aceitação para Ancoragens Expansivas em Elementos de Concreto e Madeira" (Acceptance Criteria for Expansion Anchors in Concrete and Masonry Elements) foi reconhecido pela Conferencia Internacional de Validação Oficial de Serviços Construtivos (ICBO ES - International Conference of Building Officials Evaluation Service), que em 1995 foi substituído pelo AC58, "Critério de Aceitação para Ancoragens Adesivas em Concreto e Madeira" (Acceptance Criteria for Adhesive-Bonded anchors in Concrete and Masonry). Este documento continha os primeiros métodos para realização de testes baseados na ASTM E1512 ("Métodos para Teste de Desempenho em Aderência de Ancoragens Adesivas") e no critério para aceitação e qualificação de ancoragem por adesivos para uso estrutural de acordo com os parâmetros do Código de Uniformização de Construção (UBC - Uniform Building Code).

Em 2006, o "Critério para Aceitação de Ancoragens Adesivas Instaladas em Elementos de Concreto Endurecido", AC308 (Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements) passou a incluir o Anexo D do ACI 318-05 e ACI 355.2-04, que finalmente fornecia parâmetros completos para o dimensionamento de ancoragens adesivas pós-instaladas, assim como para os de fixação mecânica.

Em Novembro de 2009 entrou em vigor uma versão atualizada da AC308 que define, além dos procedimentos de projeto dos chumbadores adesivos, procedimentos de ensaio para avaliação de sua capacidade de carga e controle de qualidade.

As barras de aço que constituem os chumbadores podem ser lisas,

nervuradas ou rosqueadas. Essas barras, nos chumbadores grauteados, podem ter, opcionalmente, um elemento auxiliar de ancoragem na extremidade (headed anchors), assim como uma rosca na extremidade da barra rosqueada.

No Brasil, a norma NBR 14827 (2002), prescreve os métodos para a determinação da resistência à tração e ao cisalhamento de chumbadores de pré-concretagem ou de pós-concretagem, instalados em membros estruturais de concreto ou alvenaria. Esta norma não abrange ensaios combinados ou simultâneos de tração e cisalhamento, nem como ensaios de torção.

A norma brasileira não aborda problemas de segurança associados a seu uso, e transfere para o usuário a responsabilidade de estabelecer práticas apropriadas de segurança e de a aplicabilidade de regulamentos e limitações antes do uso.

Conforme esclarece Laranjeiras (2008), os furos no concreto dos chumbadores adesivos são sempre menores do que 1,5 vezes o diâmetro da barra, geralmente 1,2 vezes, de acordo com as especificações dos fornecedores dos adesivos, enquanto que os furos dos chumbadores grauteados são sempre iguais ou maiores do que 1,5 vezes o diâmetro da barra. A presença de agregados finos, inertes, nos grautes associada às demais diferenças físicas entre os adesivos estruturais e os grautes, exige diâmetros maiores nos chumbadores grauteados.

Os chumbadores adesivos utilizam resinas epóxis ou poliésteres ou sistemas híbridos, associados a agentes catalisadores. No Brasil, dispõe-se de resinas adesivas para esse fim, fornecidas isoladas, sem o chumbador – como, por ex., os “Compound Adesivo” da VEDACIT; os “Sikadur” da SIKA; os “Lokfix” da ANCHORTEC; os “Concresive” da DEGUSSA – e de resinas fornecidas com o chumbador, identificados no mercado por “chumbadores químicos” – como, por ex., os da FISCHER, da ÂNCORA, da HILTII – caso este em que o fornecedor especifica diâmetro dos furos e capacidade de carga prevista para o chumbador.

Os furos dos chumbadores adesivos devem estar limpos e secos, antes da aplicação da resina, pois a presença de água na interface da resina com o concreto prejudica as reações químicas entre o adesivo e o concreto. Após injetado o adesivo, o chumbador é introduzido no furo e a cura se completará em horas, a depender do produto.

Os chumbadores grauteados utilizam dois tipos diferentes de graute: (a) à base de polímeros, nos quais o aglomerante é uma resina epóxi, ou (b) à base de

cimento, aglomerante hidráulico. A diferença do graute sintético para os adesivos sintéticos é que o graute tem a adição de agregados inertes, finos. São exemplos os grautes poliméricos, base epóxi: o “Conbextra EPR” da ANCHORTEC; “Sikadur 42” da SIKA; “Masterflow 211” da DEGUSSA, entre outros. Entre os grautes cimentícios, são exemplos: o “Fosgrout Plus” da ANCHORTEC; os “Sikagrout” da SIKA; O “Masterflow 320 Grout” da DEGUSSA.

Os chumbadores adesivos e os grauteados estão sendo questionados no meio técnico internacional, porque, como refere Wollmershauser et al, em seu artigo, apenas recentemente com a ocorrência de um acidente em um túnel de uma rodovia em Boston/EUA. O revestimento do teto do túnel entrou em colapso, aonde se percebeu a falta de estudos específicos e direcionados para o comportamento desses adesivos, principalmente quanto ao estudo de longo prazo, visto que o fato gerador do acidente mencionado acima, foi identificado como falha por deformação lenta em chumbadores submetidos à carga contínua de tração. Essa avaliação gerou na comunidade de construtores e projetistas a necessidade de reconsiderar a qualificação, dimensionamento e utilização desses chumbadores em uso que afetem a segurança de utilização do produto final.

Como a maioria das aplicações de chumbadores a tração incluem carregamentos permanentes, essa questão de ruptura por fluência dos adesivos sintéticos merece atenção especial em novos estudos.

## **CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS**

### **9. Mecanismo de aderência Aço x Concreto**

O mecanismo de aderência aço x concreto vem sendo estudado há muitos anos, como pode ser observado nos vários trabalhos publicados sobre o tema. De modo geral, são realizados ensaios de arrancamento, que consistem basicamente de uma armadura parcialmente envolvida em concreto, na qual é aplicada uma força de tração em uma de suas extremidades, medindo-se na outra o deslocamento relativo que ocorre entre o aço e o concreto adjacente. A carga é aumentada, em patamares pré-estabelecidos, até a ruptura da ligação. Os resultados dos ensaios de arrancamento permitem plotar um diagrama da variação

da tensão média de aderência ao longo do comprimento embebido, com o deslocamento medido.

No início do ensaio, ou seja, para os primeiros carregamentos, a adesão química combinada com a interação mecânica previnem o escorregamento. Após o rompimento da adesão química e, no caso de armadura de aderência normal, inicia-se o deslizamento devido às deformações diferenciadas entre o aço e o concreto. Com o aumento das tensões tangenciais desenvolve-se uma micro-fissuração do concreto junto à armadura, acarretando a ruptura da aderência, o que conduz ao seu arrancamento.

Caso não exista um confinamento adequado, as fissuras acabam por atingir a superfície do cobrimento provocando a ruptura brusca do concreto. É o que se conhece na literatura como ruptura por fendilhamento do concreto. Por outro lado, se houver um grande confinamento, a tensão de aderência pode ainda ser elevada, vindo finalmente a extinguir-se por corte do concreto ao longo das nervuras, o que é conhecido como ruptura por arrancamento.

## **10. Mecanismo de aderência Aço x Resina Epóxi x Concreto**

Contrariamente ao caso anterior, ainda existem muito poucos estudos sobre os mecanismos de aderência das armaduras coladas ao concreto com resina epóxi. Souza realizou ensaios de arrancamento em corpos-de-prova cuja ligação se fazia com e sem resina. Ao comparar-se os resultados entre os dois tipos de ligação, foi constatado o grande poder adesivo da resina epóxi, chegando-se a obter uma capacidade de carga aumentada em até 100% nos espécimes colados com resina, em relação à ligação aço x concreto.

## **11. Caracterização dos materiais**

### **a. Concreto**

Para a caracterização do concreto foram moldados cilindros de 150x300 mm, ensaiados aos 28 dias e aos 150 dias, idade que caracteriza o início dos ensaios de arrancamento. O valor médio verificado para a resistência à compressão aos 28 dias foi de  $f_{cm,28} = 24$  MPa e aos 150 dias  $f_{cm,150} = 32$  MPa. O valor médio verificado para a resistência à tração aos 150 dias foi de  $f_{ctm,150} = 2,6$  MPa.

### **b. Aço**

Nos modelos estudados foram utilizadas barras de aço do tipo CA 50A com diâmetros de 10; 12,5 e 16 mm. Os ensaios de tração realizados indicaram, respectivamente, os seguintes valores para a tensão de escoamento ( $f_{sy}$ ): 620 MPa; 600 MPa e 660 MPa.

### **c. Resina Epóxi**

Foi utilizada uma resina epóxi de uso corrente na construção civil, fornecida por uma grande empresa multinacional. Nenhum ensaio de caracterização foi realizado neste caso.

## **12. Concepção e geometria dos modelos**

Inicialmente verificou-se que a adoção do modelo normalizado pela RILEM Pull-Out test para o ensaio de arrancamento não se aplicaria ao estudo, por pelo menos três pontos inconvenientes:

- padronização da composição do concreto;
- fixação do comprimento de aderência igual a cinco vezes o diâmetro da barra;
- dificuldade de adaptação das condições de ancoragem com resina a esse corpo-de-prova, uma vez que parte da armadura é envolvida por um tubo plástico que tem por objetivo eliminar a aderência neste trecho.

A configuração geométrica do modelo, apresentada na Figura 10, além de minimizar a influência da reação da mesa de apoio da máquina de ensaio, teve por finalidade principal viabilizar a colagem das armaduras com resina epóxi.

Para que se pudesse comparar os modelos com diferentes armaduras, optou-se por ajustar as suas dimensões proporcionalmente aos seus diâmetros. Pela mesma razão, manteve-se o comprimento de aderência  $l$  proporcional ao diâmetro da armadura. Além disso, foram estudados quatro comprimentos para cada diâmetro:  $5 \phi$  ;  $7,5 \phi$  ;  $10 \phi$  e  $12,5 \phi$ , onde  $\phi$  é o diâmetro nominal da barra, assumindo valores iguais a 10; 12,5 e 16 mm. Adotou-se um cobrimento de armadura igual a três vezes o diâmetro da barra de aço ( $c/\phi = 3$ ), uma vez que segundo Jirsa, Lutz e Gergeley, para valores de  $c/\phi$  acima de 2,5 o concreto envolvente passa a ter pouca ou nenhuma influência sobre o comportamento da

aderência.

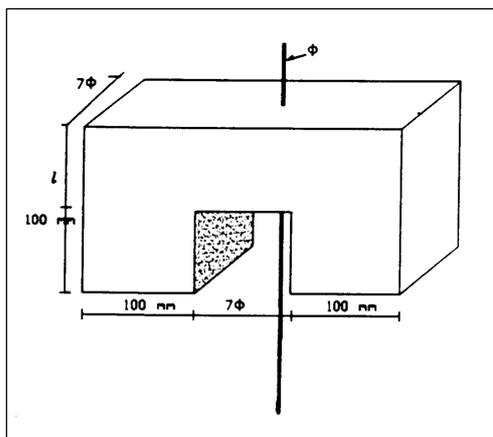


Figura 10 - Modelo experimental adotado - Souza e Felício (2001)

Desta forma, obteve-se doze modelos de dimensões diferentes. Para cada modelo foram executados seis corpos-de-prova, sendo três do tipo SR (Sem Resina) e três do tipo CR (Com Resina). Os modelos do tipo SR tinham a armadura posicionada no momento da concretagem; os do tipo CR foram concretados sem a armadura, sendo esta colada posteriormente com a resina, cujo procedimento será descrito mais adiante.

Os corpos-de-prova eram identificados pelo seu número, que variava de 1 a 72, pelo modelo correspondente e pela sua condição de aderência, conforme indica a Tabela 5.

### **13. Preparação dos corpos-de-prova**

A colocação do concreto nas formas foi feita manualmente, em três camadas, com lançamento do concreto perpendicular à posição da armadura (concretagem horizontal).

O adensamento ocorreu através de mesa vibratória, após a colocação de cada camada, a fim de assegurar uma melhor concretagem, eliminando ao máximo os vazios do concreto.

Após o término da concretagem, os corpos-de-prova foram armazenados numa área reservada e cobertos com tiras de plástico, a fim de dificultar a evaporação prematura da água do concreto, antes que as reações químicas se processassem, permanecendo assim por quarenta e oito horas.

Findo este prazo, procedeu-se a desmoldagem cuidadosa dos

exemplares, de modo a não se exercer qualquer tipo de esforço sobre a barra ou qualquer dano ao concreto.

A seguir, os corpos-de-prova foram regados com água e cobertos com o plástico para conservá-los sempre úmidos. Esta operação foi feita diariamente durante sete dias, a fim de se retardar a perda de água e a retração do concreto, de modo a evitar a ocorrência de fissuração prematura nos exemplares.

Após este prazo, os corpos-de-prova foram transportados e armazenados no local dos ensaios. O início de cada série de ensaios, definida pela etapa de concretagem, ocorreu cento e cinquenta dias após a sua execução.

Tabela 5 - Características dos modelos experimentais - Souza e Felício (2001)

Modelo	Condições de Aderência	Corpo de Prova	Comprimento de Aderência l	Diâmetro da barra $\phi$ (mm)
1	SR CR	1-2-3 4-5-6	5 $\phi$	10
2	SR CR	7-8-9 10-11-12	7,5 $\phi$	10
3	SR CR	13-14-15 16-17-18	10 $\phi$	10
4	SR CR	19-20-21 22-23-24	12,5 $\phi$	10
5	SR CR	25-26-27 28-29-30	5 $\phi$	12,5
6	SR CR	31-32-33 34-35-36	7,5 $\phi$	12,5
7	SR CR	37-38-39 40-41-42	10 $\phi$	12,5
8	SR CR	43-44-45 46-47-48	12,5 $\phi$	12,5
9	SR CR	49-50-51 52-53-54	5 $\phi$	16
10	SR CR	55-56-57 58-59-60	7,5 $\phi$	16
11	SR CR	61-62-63 64-65-66	10 $\phi$	16
12	SR CR	67-68-69 70-71-72	12,5 $\phi$	16

A fixação das armaduras aos corpos-de-prova do tipo CR foi feita do seguinte modo:

### **a. Execução dos furos nos corpos-de-prova**

Para que a espessura da camada de resina não fosse mais uma variável a ser considerada na análise de resultados, procurou-se manter uma proporcionalidade entre o diâmetro do furo e o diâmetro da barra correspondente.

Os furos nos corpos-de-prova foram feitos com furadeira elétrica de impacto e brocas de vídea, cujos diâmetros variavam entre 1/2" e 7/8". Devido à padronização dos diâmetros das brocas, esta proporcionalidade não foi tão absoluta, chegando-se a uma relação  $\phi$  furo /  $\phi$  barra entre 1,3 e 1,4 especificada, na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre os diâmetros dos furos e os diâmetros das armaduras - Souza e Felício (2001)

Diâmetro da barra $\phi_b$ (mm)	Diâmetro do furo $\phi_f$ (mm)	$\phi_f - \phi_b$	Relação $\phi_f / \phi_b$
10	13,0	3,0	1,3
12,5	16,2	3,7	1,3
16	22,2	6,2	1,4

Os furos atravessavam toda a extensão do comprimento de aderência, o que se fazia gradualmente, de forma a não permitir a sua excentricidade.

A limpeza do furo era feita por um pano umedecido com acetona e envolvido em um pedaço de arame, a fim de remover todo o pó e gordura existentes em seu interior ou em sua parede.

### **b. Limpeza das Armaduras**

As armaduras já cortadas nos comprimentos pré-estabelecidos foram limpas com acetona para a remoção de toda e qualquer impureza que pudesse prejudicar a sua aderência.

### **c. Preparação da Resina Epóxi**

Após a limpeza dos corpos-de-prova e das armaduras, procedeu-se a homogeneização dos componentes A e B da resina epóxi em separado e, em seguida, a mistura manual de ambos em sua totalidade.

#### ***d. Colagem das Armaduras***

Findo o preparo da resina, os corpos-de-prova foram posicionados de forma a terem seus furos preenchidos com o auxílio da gravidade. A extremidade inferior do orifício era vedada com isopor, a fim de se evitar a saída do material e a resina era então colocada. Em seguida, introduzia-se a armadura lentamente até sua posição final (10cm acima do topo do corpo-de-prova), sempre com movimentos giratórios para garantir um melhor preenchimento e o mínimo possível de vazios. Posteriormente, completava-se o furo com a resina e vedava-se esta extremidade.

Os corpos-de-prova eram então colocados na posição horizontal, com as armaduras sempre apoiadas em calços de madeira para que fosse mantida a horizontalidade das mesmas, permanecendo nesta posição por pelo menos sete dias, até a cura final da resina.

### **METODOLOGIA DOS ENSAIOS**

A montagem do ensaio foi adequada para permitir a aplicação de uma carga de tração em uma das extremidades da armadura e obter-se o deslocamento relativo entre a armadura e o concreto na outra extremidade.

Como equipamento de ensaio utilizou-se uma prensa AMSLER de até 1000 kN e um deflectômetro MITUTOYO com precisão de 0,01 mm e curso de 10 mm. Os corpos-de-prova eram apoiados sobre a mesa de reação da máquina, vazada na sua parte central, que possibilitava o encaixe e a fixação da barra.

Seguindo o procedimento usual em ensaios de arrancamento, a força de tração era aplicada a uma das extremidades da barra presa por uma garra de fixação, através de um sistema hidráulico. Os deslocamentos relativos eram registrados no deflectômetro fixado à extremidade oposta da barra.

A carga era então aplicada de forma lenta e contínua. O carregamento era efetuado em pequenos patamares que variavam de 0,5 a 2,0 kN, conforme a previsão de carga máxima para cada modelo ensaiado. O ensaio era encerrado quando a barra perdia a capacidade de absorver carregamento adicional, ou seja, era atingida a carga de ruptura.

## INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para cada modelo estudado foi plotado um gráfico Carga aplicada x Deslocamento, sendo adotada a média entre os resultados dos ensaios dos três corpos-de-prova correspondentes. Além disso, durante a execução dos ensaios foram observados a evolução da fissuração e o modo de ruptura, como descrito nos itens a seguir:

### 14. *Evolução da fissuração e modo de ruptura dos modelos do Tipo SR (Sem Resina)*

Nenhuma fissura visível foi verificada até que a barra começasse a se deslocar em relação ao concreto, ou seja, até que o deflectômetro registrasse alguma deformação. A partir daí, o estágio seguinte caracteriza-se por deslocamentos que cresciam lentamente, à medida em que a carga aumentava (2º estágio). Em um terceiro estágio, a carga continuava a ser aumentada na mesma velocidade enquanto os deslocamentos ocorriam mais rapidamente (3º estágio), até que o corpo-de-prova perdesse sua capacidade de absorver qualquer acréscimo de carga, o que acusava a sua ruptura. Entre o 3º e 4º estágios, todos os corpos-de-prova observados apresentavam uma fissura longitudinal que se propagava de baixo para cima paralelamente à armadura. Todos os corpos-de-prova romperam por fendilhamento. A Figura 11 representa a forma esquemática do comportamento descrito anteriormente.

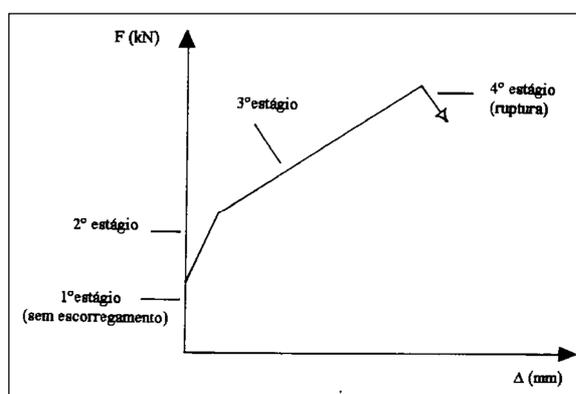
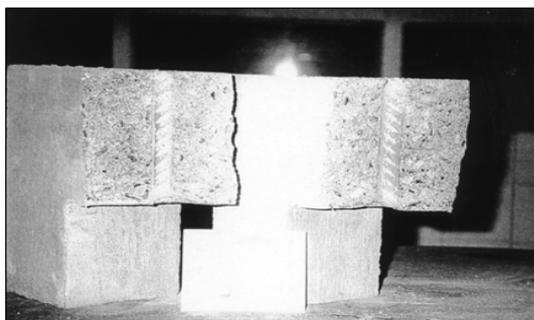


Figura 11 – Curva característica em forma esquemática do comportamento dos modelos do Tipo SR. Souza e Felício (2001)

Em relação ao aspecto da superfície de ruptura, as marcas das nervuras deixadas pela armadura ora se apresentavam bem nítidas, ora se apresentavam menos marcadas, o que significava um menor ou maior trabalho das nervuras, embora não tenha ocorrido nenhuma ruptura por corte ao longo das nervuras. As armaduras após a ruptura permaneciam limpas ou sujas de concreto, conforme um menor ou maior trabalho das nervuras. Observe as fotos das Figuras 12 e 12 - A, ambas referentes ao corpo-de-prova 55; Modelo 10 ( $l = 7,5 \phi$ ,  $\phi = 16 \text{ mm}$ ), Tipo SR.



Figura 12 - Configuração de ruptura, Tipo SR. Souza e Felício (2001)



12-A - Aspecto da superfície fissurada, Tipo SR. Souza e Felício (2001)

Observando-se os gráficos apresentados nas Figuras 14 a 16, verifica-se que a carga máxima atingida nos ensaios para um determinado diâmetro, é tanto maior quanto maior for o comprimento mergulhado. O mesmo comportamento foi observado em relação à força de adesão.

Quanto aos deslocamentos de ruptura, verifica-se que, de modo geral e, para um dado diâmetro, maiores comprimentos de aderência acarretam maiores valores de deslocamentos.

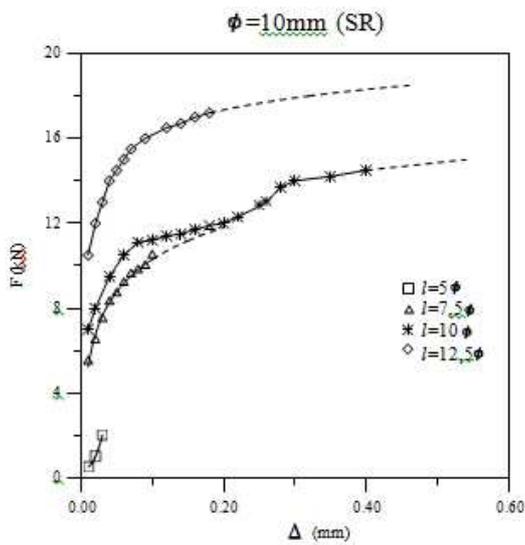


Figura 13 - Força aplicada x deslocamento  
 $\phi = 10 \text{ mm SR}$

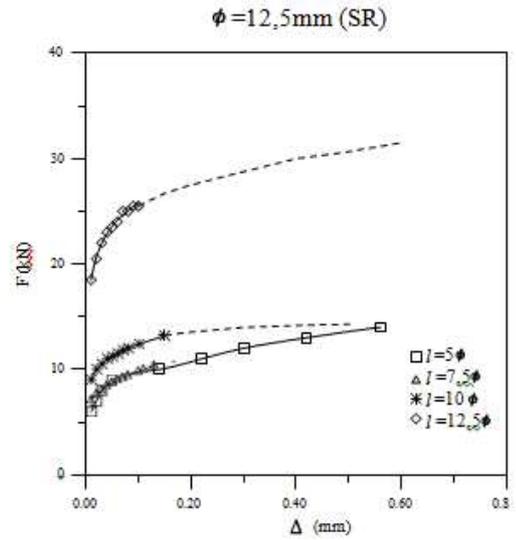


Figura 14 - Força aplicada x deslocamento  
 $\phi = 12,5 \text{ mm SR}$

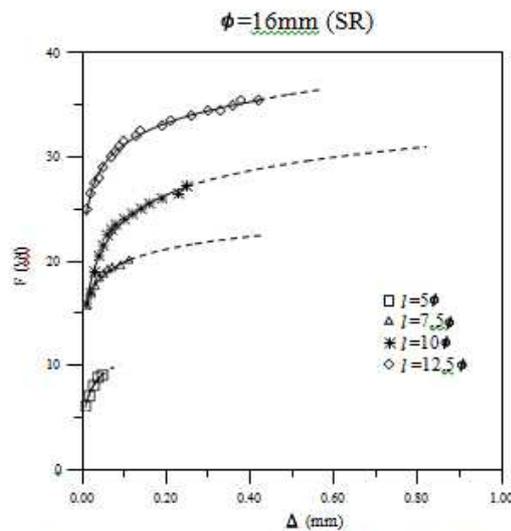


Figura 15- Força aplicada x deslocamento -  $\phi = 16 \text{ mm SR}$

Souza e Felício (2001)

Como se pode observar na Tabela 7, e desconsiderando  $l = 5\phi$ , o aumento do comprimento de aderência, tendo em vista um determinado diâmetro, não acarretou no aumento da tensão máxima de aderência.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios para os corpos-de-prova com Ligação sem resina - Souza e Felício (2001)

$\phi = 10 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{\text{rupt}}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	2,0	1,3	0,5	0,03	fendilhamento
7,5 $\phi$	11,8	5,0	5,5	0,20	fendilhamento
10 $\phi$	15,0	4,8	7,0	0,54	fendilhamento
12,5 $\phi$	18,5	4,7	10,5	0,46	fendilhamento
$\phi = 12,5 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{\text{rupt}}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	14,0	5,7	6,0	0,56	fendilhamento
7,5 $\phi$	11,0	3,0	7,0	0,19	fendilhamento
10 $\phi$	14,3	2,9	9,0	0,51	fendilhamento
12,5 $\phi$	31,5	5,1	18,5	0,60	fendilhamento
$\phi = 16 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{\text{rupt}}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	10,0	2,5	6,0	0,09	fendilhamento
7,5 $\phi$	22,5	3,7	15,6	0,43	fendilhamento
10 $\phi$	31,0	3,9	16,0	0,82	fendilhamento
12,5 $\phi$	36,5	3,6	25,0	0,57	fendilhamento

### 15. *Evolução da fissuração e modo de ruptura dos modelos do Tipo CR (Com Resina)*

Da mesma forma que os exemplares do tipo SR, os do tipo CR também não apresentaram nenhuma fissuração prévia. No primeiro estágio houve uma pequena diferença, visto que em alguns modelos os deslocamentos iniciais se deram para cargas bem superiores aos do tipo SR correspondentes. No estágio seguinte os deslocamentos ocorreram bem lentamente, à medida em que a carga aplicada aumentava. O terceiro estágio foi pouco observado nos exemplares ensaiados. Para este tipo de ligação, a ruptura acontecia na maioria das vezes de forma brusca, ou seja, sem um aumento maior do deslocamento para uma dada variação de carregamento.

Observando-se a evolução da fissuração externa de cada exemplar no momento do ensaio, visualizava-se o aparecimento de uma ou mais fissuras na face frontal dos corpos-de-prova, ora paralelas à armadura, ora inclinadas partindo da parte inferior da face, em direção ao topo do corpo-de-prova próximo à armadura.

Após a ruptura total do corpo-de-prova, estes deixavam sempre um volume de concreto aderido à armadura, o que caracterizava um corte no concreto. Às vezes esse corte era paralelo à barra, outras vezes se dava em forma de cone, tendo sua base maior sempre na parte inferior, podendo ou não, num caso e no outro, envolver parte ou a totalidade do comprimento de aderência. Isto caracterizava a ruptura por arrancamento, como pode ser visto nas fotos das Figuras 16 e 17.

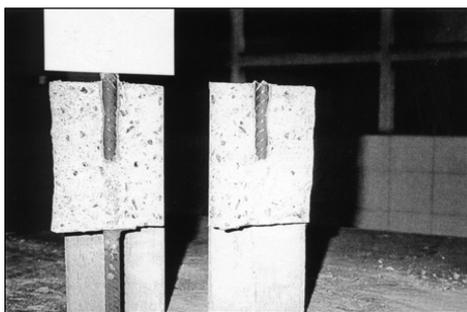


Figura 16 - Corpo-de-prova 41; Modelo 7 ( $l = 10 \phi$ ,  $\phi = 12,5 \text{ mm}$ ), Tipo CR. Souza e Felício (2001)

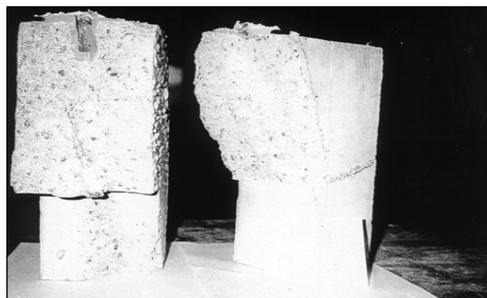


Figura 17 - Corpo-de-prova 64; Modelo 11 ( $l = 10 \phi$ ,  $\phi = 16 \text{ mm}$ ), Tipo CR. Souza e Felício (2001)

Do mesmo modo que ocorreu com os modelos da ligação sem resina, observa-se nos gráficos das Figuras 18 a 20 que tanto os valores da força máxima atingida na ruptura, como os da força de adesão aumentaram com o aumento do comprimento de aderência.

Em relação à técnica utilizada para preenchimento dos furos com resina, verificou-se em alguns corpos-de-prova, após a ruptura, a presença de pequenas bolhas de ar entre o concreto e o aço. Entretanto, tal efeito não acarretou perdas significativas da aderência. Isto foi verificado por Chung em sua pesquisa, quando injetava resina epóxi em fissuras de aderência, onde observou que apesar da

dificuldade no preenchimento de todas as fissuras, essa reparação promovia sempre um ganho adicional de resistência, afirmando ainda, que apesar desta dificuldade, a resistência de aderência do concreto reparado não foi menor do que a resistência do concreto original. De forma análoga, Souza também verificou esse efeito; ao estudar o desempenho das armaduras coladas com resina epóxi, observou que a existência de algumas bolhas de ar verificadas entre o concreto e o aço após a ruptura, não acarretou perdas significativas da resistência da ligação.

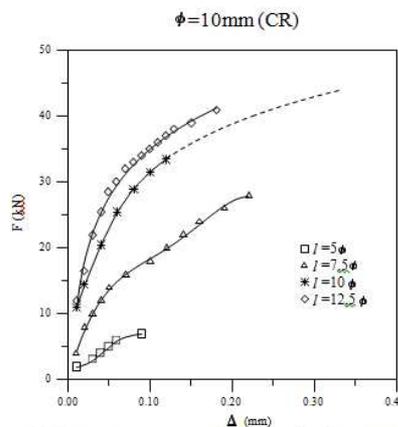


Figura 18 - Força aplicada x deslocamento

$\phi = 10 \text{ mm CR}$

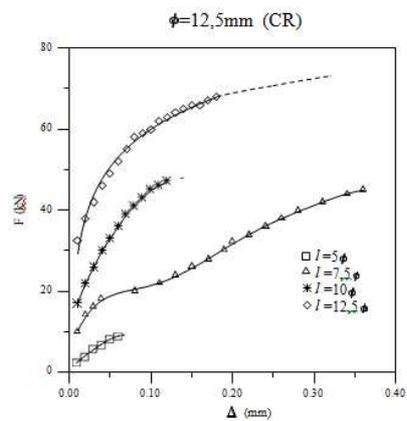


Figura 19 - Força aplicada x deslocamento

$\phi = 12,5 \text{ mm CR}$

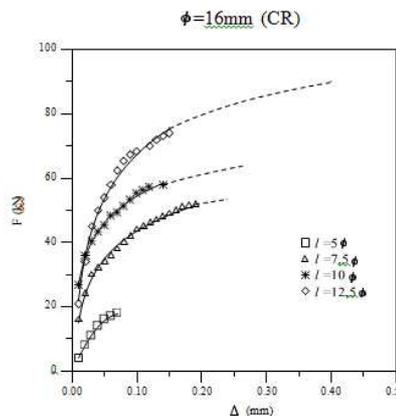


Figura 20 - Força aplicada x deslocamento -  $\phi = 16 \text{ mm CR}$

Souza e Felício (2001)

Quanto à forma de ruptura houve várias configurações, conforme descrito na Tabela 8. Observa-se que para os diâmetros  $\phi=10\text{mm}$  e  $\phi=12,5\text{mm}$ , a ruptura deu-se predominantemente no concreto na parte inferior do corpo-de-prova e na parte superior, na ligação. Para o diâmetro  $\phi = 16 \text{ mm}$  as rupturas ocorreram sempre no concreto, para qualquer valor do comprimento de aderência. Essa variação no

tipo de ruptura pode ter sido influenciada pela variação na espessura da camada de resina epóxi, conforme indicado na Tabela 6.

No que se refere à tensão máxima de aderência, não se considerando  $l = 5\phi$ , observa-se uma grande proximidade entre seus valores, independentemente do comprimento de aderência ou do diâmetro da barra. Para  $l = 5\phi$ , embora semelhantes para todos os diâmetros estudados, estes valores são bem mais baixos que aqueles registrados nos demais comprimentos de aderência.

Quanto aos deslocamentos máximos, não se observa nitidamente alguma relação entre estes e a carga máxima de ruptura, embora seja possível verificar que para  $\phi = 16$  mm houve um aumento desses valores, com o aumento do comprimento de aderência. Cabe observar que neste caso as rupturas ocorreram todas no concreto, o que permite intuir que os deslocamentos, para os modelos com resina, estejam relacionados com a configuração da ruptura. De outra forma, os deslizamentos na ligação sem resina são medidos entre o aço e o concreto circundante, enquanto que na ligação com resina os mesmos se dão entre a armadura e uma seção qualquer do corpo-de-prova definida na configuração de ruptura.

## **16. Comparações entre os modelos dos Tipos SR e CR**

Os gráficos apresentados nas Figuras 21 a 23 e as Tabelas 7 e 8 auxiliam nesta análise:

- Para um dado modelo, o valor da força máxima atingida na ruptura para o tipo CR foi maior que o valor da força máxima atingida na ruptura para o correspondente do tipo SR. Isto só não aconteceu com o modelo 5 ( $l = 5\phi$ ;  $\phi = 12,5$  mm).
- Os valores da tensão máxima de aderência para os modelos do tipo CR foram superiores aos correspondentes do tipo SR, com exceção do modelo 5 ( $l = 5\phi$ ;  $\phi = 12,5$  mm).
- Em relação à força de adesão, deve-se observar que estes valores, no caso de ligação SR representam o rompimento da aderência química, ou seja, da adesão da ligação e, conseqüentemente, o início do deslocamento da barra em relação ao concreto envolvente. Entretanto, a força de adesão para os modelos

do tipo CR, cujo mecanismo de aderência difere em muito da ligação SR, significa o início do deslocamento da barra em relação a uma seção qualquer definida na configuração de ruptura do corpo-de-prova. Esta ruptura é normalmente direcionada para fora da ligação, que neste caso deixou de ser a parte mais frágil, devido ao grande poder de adesão da resina epóxi.

A ruptura dos modelos do tipo CR foram, de modo geral, mais bruscas que nos modelos correspondentes do tipo SR, ocorrendo com maiores cargas e menores deslizamentos.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios para os corpos-de-prova com Ligação com resina - Souza e Felício (2001)

$\phi = 10 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{máx}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{rupt}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	7,0	4,5	2,0	0,09	parte na carepa do aço parte no concreto
7,5 $\phi$	28,0	11,9	4,0	0,22	parte na carepa do aço parte no concreto
10 $\phi$	44,0	14,0	11,0	0,33	parte na carepa do aço parte no concreto em cone
12,5 $\phi$	41,0	10,4	12,0	0,18	parte na carepa do aço parte no concreto
$\phi = 12,5 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{máx}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{rupt}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	9,2	3,7	2,0	0,07	no concreto paralelo à armadura
7,5 $\phi$	45,0	12,2	10,0	0,36	parte na carepa do aço parte no concreto em cone
10 $\phi$	48,0	9,8	17,0	0,15	parte na carepa do aço parte no concreto em cone
12,5 $\phi$	73,0	11,9	32,5	0,32	parte na carepa do aço parte no concreto
$\phi = 16 \text{ mm}$					
l (mm)	F <sub>máx</sub> (kN)	$\tau_{máx}$ (MPa)	F <sub>ades</sub> (kN)	$\Delta_{rupt}$ (mm)	Tipo de ruptura
5 $\phi$	18,0	4,5	4,0	0,07	no concreto paralelo à armadura
7,5 $\phi$	53,4	8,8	16,0	0,24	no concreto em cone
10 $\phi$	64,0	8,0	27,0	0,27	no concreto em cone
12,5 $\phi$	90,0	8,9	21,0	0,40	no concreto em cone

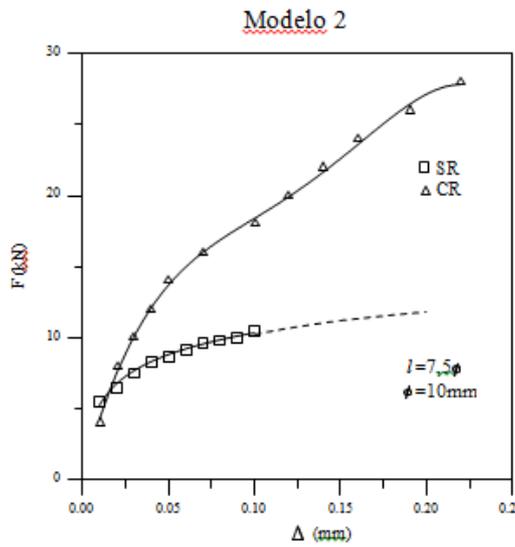


Figura 21: Força aplicada x deslocamento- Modelo 2, tipos SR e CR.

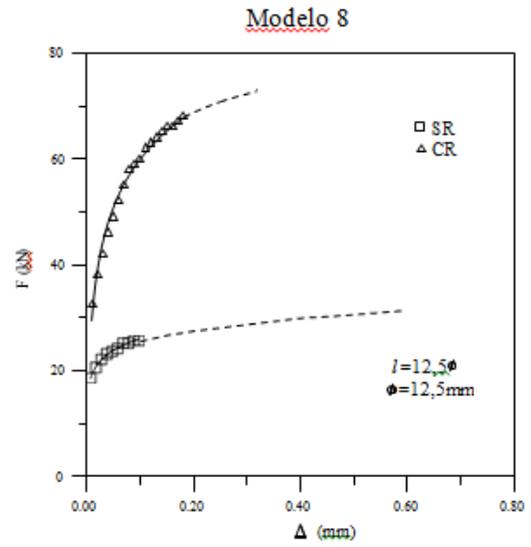


Figura 22: Força aplicada x deslocamento- Modelo 8, tipos SR e CR.

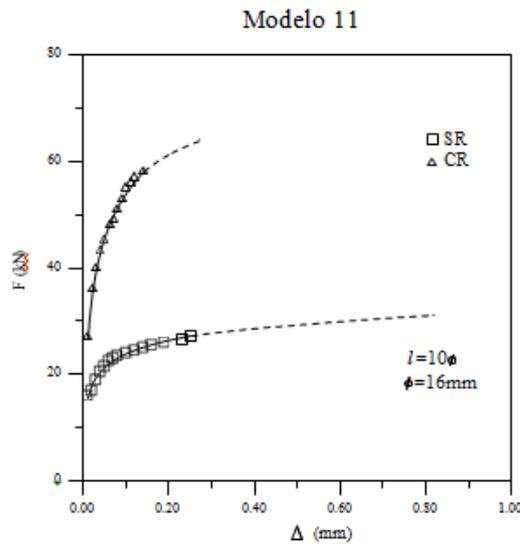


Figura 23: Força aplicada x deslocamento- Modelo 11, tipos SR e CR.

Souza e Felício (2001)

## DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES ADESIVOS

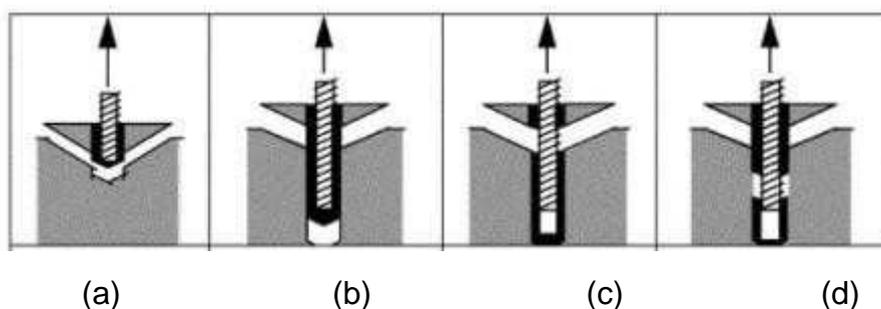
### 17. Fundamentos

A análise feita refere-se apenas aos chumbadores instalados em furos feitos no concreto, com aderência garantida por adesivos estruturais, sintéticos,

designados de chumbadores adesivos ou de adesão, ou com aderência através de grautes, designados chumbadores grauteados, submetidos a forças de tração. A razão desse destaque é que são esses os mais usados entre nós, sem procedimentos consolidados na prática de projeto.

Será tratado, inicialmente, o dimensionamento dos chumbadores adesivos, isolados ou em grupos, e, posteriormente, o dimensionamento dos chumbadores grauteados, isolados ou em grupos.

As formas de ruptura dos chumbadores adesivos, isolados, que fundamentam os respectivos critérios de dimensionamento, são as indicadas na figura de Laranjeiras (2008) abaixo.



Na figura (a), a ruptura se dá por arrancamento de um cone de concreto, própria de chumbadores curtos e de grande diâmetro, não havendo ruptura das ligações do chumbador com a peça, mas sim ruptura do próprio concreto. Essa forma de ruptura é de caráter excepcional nos chumbadores adesivos ou grauteados, sendo mais própria de chumbadores moldados in-loco (ou de pré-concretagem).

Na figura (b), a ruptura se dá na ligação adesivo-concreto. Na (c), a ruptura, por sua vez, é da ligação chumbador-adesivo e, na figura (d), há uma associação de rupturas adesivo-concreto e adesivo-chumbador. Em todos esses casos, há um arrancamento de um cone superficial de concreto. É difícil distinguir, segundo os pesquisadores (Cook e outros), entre as formas de ruptura (b), (c) e (d), fato que os levou a considerar que a resistência à aderência de um chumbador adesivo pode ser descrita com suficiente precisão, adotando-se um modelo de cálculo com variação uniforme de tensões de aderência, referida ao diâmetro do próprio chumbador.

A resistência média da aderência dos adesivos estruturais com os

chumbadores, mesmo adequadamente injetados, varia muito. Ensaios (Cook e outros) com 20 produtos diferentes identificaram resistências médias de aderência,  $f_{bm}$ , entre 2,3 a 19,5 MPa. Outros fatores influenciam, diferentemente, a eficiência dos adesivos, tais como sua sensibilidade à limpeza e à presença de umidade no furo, a aumentos de temperatura e à fluência sob cargas permanentes. Além disso, a presença de fissuras de aberturas aceitáveis no concreto reduz (Elighausen e outros) a resistência da aderência em cerca de 50% do valor determinado em regiões não fissuradas.

Do acima exposto, infere-se que a aplicação de um procedimento de dimensionamento, qualquer que seja, dentro do modelo de segurança de nossas Normas, dependerá do conhecimento do valor da resistência à aderência característica do adesivo ( $f_{bk}$ , referida a quantil de 5%), ajustada, por coeficientes parciais de segurança ( $\gamma_m$ ), aos fatores de influência desfavorável, mencionados, de modo a fornecer a resistência de cálculo do adesivo ( $f_{bd} = f_{bk} / \gamma_m$ ).

Não dispomos de uma norma nacional de ensaio padronizado para determinação da resistência de aderência ( $f_{bm}$  e  $f_{bk}$ ) de um produto adesivo, mas já existe a respeito a Norma internacional ICC-ES AC-308:2008. A Norma NBR 14827:2002 (*Chumbadores instalados em elementos de concreto ou alvenaria – Determinação de resistência à tração e ao cisalhamento*), baseada na ASTM E-488:1996, refere-se a ensaios de chumbadores em seu conjunto, incluídos todos os seus parâmetros de influência, sem isolar a influência do adesivo, e portanto não se presta a uma eventual classificação por resistência dos adesivos, como temos para os concretos.

As bases do dimensionamento que se seguem têm referência um artigo de Rolf Elighausen e outros (Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors. ACI Structural Journal, Nov-Dec 2006, p.822-31), e resultam de uma investigação coletiva (americana-alemã), ao longo de diversos anos de estudos, aferidas por extensivo banco de dados experimentais com mais de 400 ensaios de chumbadores adesivos em grupo e outras centenas de ensaios em chumbadores adesivos isolados e na borda das peças.

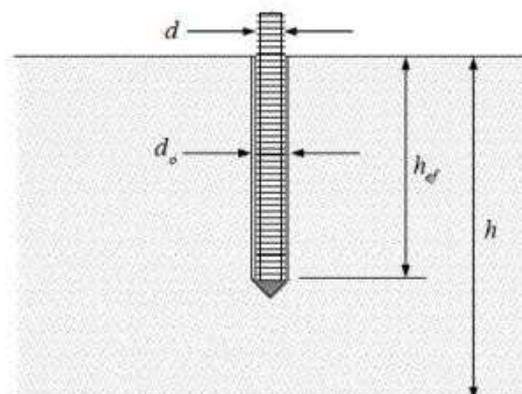
Foi adotado como referência, no dimensionamento dos chumbadores adesivos, a Norma Internacional AC308 - Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements, do ICC-ES (International Code Council – Evaluation Service), aprovada em maio 2008, e com entrada em vigor em junho

2008. Essa Norma define além dos procedimentos de projeto dos chumbadores adesivos, procedimentos de ensaio para avaliação de sua capacidade de carga e controle de qualidade.

O procedimento de projeto do AC308 tem as limitações seguintes:

- o diâmetro do chumbador ( $d$ ) não deve ser menor do que 6mm;
- o diâmetro do furo ( $d_o$ ) deve ser inferior a  $1,5.d$ ;
- o comprimento mínimo de embutimento do chumbador ( $h_{ef}$ ), em mm, deve respeitar a tabela de Laranjeiras (2008) abaixo:

d, mm	$\leq 10$	12.5	16	20	25	32
hef, min	60	70	80	90	100	130



Laranjeiras (2008)

- o comprimento máximo do embutimento  $h_{ef}$  não deve exceder  $20.d$ ;
- os concretos deverão estar entre as classes de resistência C20 a C50;

## CHUMBADORES ISOLADOS

A resistência do chumbador isolado, devidamente afastado das bordas da peça e em região sem fissuração prevista, assim como, por exemplo, em blocos ou pilares - é a resistência básica, ao se considerar a influência da distância ao bordo e dos chumbadores em grupo.

A expressão da resistência básica de aderência dos chumbadores adesivos utiliza o modelo proposto por Cook e outros, aferido em mais de 400 ensaios disponíveis em um banco de dados internacional, de distribuição uniforme das tensões de aderência ao longo do comprimento de embutimento  $h_{ef}$  :

$$N_{a0} = f_{bd} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef}$$

Onde:

- $N_{a0}$  – força de ruptura da aderência ou capacidade de carga do chumbador isolado, em N
- $f_{bd}$  – resistência de aderência de cálculo do adesivo, em MPa ( $N/mm^2$ );  $d$  – diâmetro nominal do chumbador, em mm;
- $h_{ef}$  – embutimento do chumbador, em mm.

A dificuldade na aplicação dessa expressão é a definição do valor de  $f_{bd}$  a ser adotado no projeto, frente à variabilidade de resistência dos produtos adesivos, e à sensibilidade do produto aos fatores de influência já mencionados (limpeza do furo, umidade, etc.).

A proposição é a de especificar em projeto, um valor mínimo aceitável de  $f_{bd}$  para todos os produtos disponíveis no mercado. Desse modo, o adesivo que for usado na obra deverá satisfazer essa resistência, a ser aferida, na própria obra, por prova de carga conforme procedimento de nossa NBR 14827.

Nos resultados de Cook e outros, os adesivos de base epóxi apresentaram resistências bem maiores do que os de base poliéster, com menor variabilidade. Seria indicativo para preferência, nas especificações de projeto, pelos adesivos base epóxi.

Considerando que  $f_{bd} = f_{bk} / \gamma_m$ , temos de definir os valores de  $f_{bk}$  e  $\gamma_m$ . Na análise comparativa de 20 adesivos diferentes, Cook e outros (*ACI Structural Journal, Jan-Feb 2001*) identificaram que a maioria dos produtos atinge uma resistência média de 12MPa, com coeficiente de variação inferior a 20%. Conservativamente, adota-se um valor médio de 10MPa, que conduz a

$$f_{bk} = 10(1-1,65.0,2) = 6,7 \text{ Mpa}$$

O valor de  $\gamma_m$  que expressará as incertezas da sensibilidade do adesivo aos fatores já citados, pela proposição inicial, teria também um valor único para todos os produtos. Segundo o ACI 318 e AC308, esse coeficiente seria  $\gamma_m = 1/0,75 = 1,33$ . Será adotado um valor de  $\gamma_m = 1,4$ . Com isso,

$$f_{bd} = 6,7/1,4 = 4,8 \text{ MPa, aproximadamente, } f_{bd} = 5 \text{ MPa.}$$

Para termos uma idéia comparativa desse valor com a resistência da aderência de cálculo das barras de aço nervuradas no concreto, segundo a NBR 6118:2003 9.3.2.1, em região de boa aderência:

C	20	25	30	35	40	50
5/f <sub>bd</sub>	2,01	1,73	1,53	1,38	1,27	1,09

Laranjeiras (2008)

Vê-se, pelos valores da tabela acima, que o valor sugerido de 5 MPa para a resistência de cálculo é 1,5 vezes o valor dessa resistência de um concreto C30, em situação de boa aderência.

Desse modo, a resistência básica de um chumbador adesivo isolado, para efeito de projeto (no desconhecimento do adesivo que será usado), seria:

$$N_{a0} = 5 \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef}$$

$$N_{a0} = 15,7 \cdot d \cdot h_{ef} \quad (\text{unidades N, mm}) \quad \text{ou} \quad h_{ef} = N_{a0} / (15,7 \cdot d)$$

Abaixo, seguem exemplos numéricos:

Deseja-se calcular qual a força de tração, em serviço, que se pode aplicar em um chumbador isolado, constituído de uma barra nervurada CA-50,  $\varnothing 20$ , utilizando um embutimento máximo de  $20\varnothing$ , segundo a AC308, ou seja  $20 \cdot 20 = 400\text{mm}$ :

$$N_d = N_{a0} = 15,7 \cdot 20 \cdot 400 = 125.600 \text{ N} = 125,6 \text{ kN}$$

Essa força corresponde a uma tensão na barra

$$\sigma_s = 125.600/314 = 400 \text{ MPa} < f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

Logo, a força máxima de tração, em serviço, que pode ser aplicada é:  $N_k = 125,6 / 1,4 = \sim 90 \text{ kN}$

A resistência do chumbador pode ser afetada desfavoravelmente pela sua

proximidade do bordo da peça onde está implantado. Haverá uma distância, medida do eixo do chumbador ao bordo (ou face) da peça, identificada como distância crítica,  $c_{cr}$ , a partir da qual esse fator não tem mais influência na resistência do chumbador. Desse modo, caso a distância do eixo da barra a qualquer dos bordos da peça,  $c$ , seja menor do que  $c_{cr}$ , esse efeito deve ser considerado.

Nos chumbadores adesivos, segundo a Norma AC308 (com justificativas teóricas e experimentais no artigo de Eligehausen e outros, *ACI Structural Journal*, Nov-Dec 2006),  $c_{cr}$  é dado pela expressão:

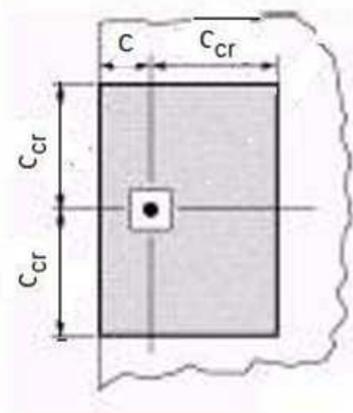
$$c_{cr} = 10 \cdot d \cdot (f_{bd} / 10)^{1/2} \leq 1,5 \cdot h_{ef} \quad (\text{unidades N, mm})$$

Caso vocês concordem com a adoção, na etapa de projeto, de  $f_{bd} = 5$  MPa, temos:  $c_{cr} = 7 \cdot d \leq 1,5 \cdot h_{ef}$

Caso  $c < c_{cr}$ , a resistência do chumbador isolado passa a ser:

$$N_a = (A/A_o) \cdot \Psi_C \cdot N_{a0}$$

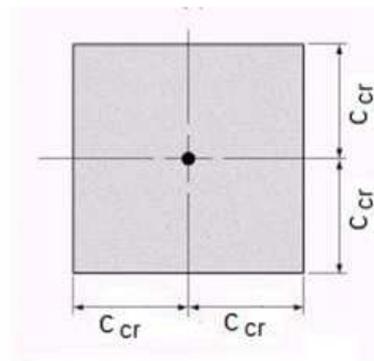
Onde os valores das áreas  $A$  e  $A_o$  são determinados conforme as indicações das figuras abaixo.



Área A

$$A = (c + c_{cr}) \cdot 2c_{cr}$$

$$A_o = (2c_{cr})^2$$



Área  $A_o$

Laranjeiras (2008)

O coeficiente  $\Psi_c$  é dado pela expressão:

$$\Psi_c = [0,7 + 0,3.(c / c_{cr})] \leq 1,0$$

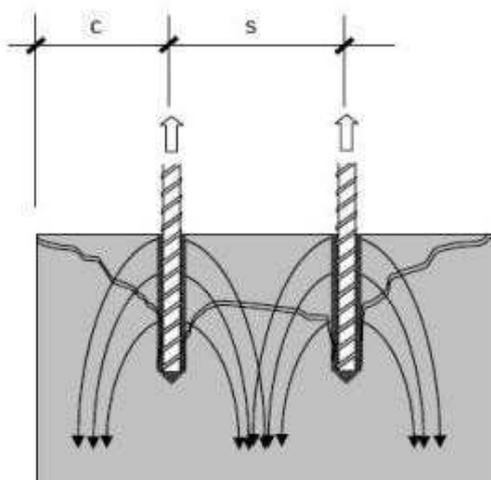
Nessa expressão, adotar para  $c$  o menor dos valores de  $c$  existentes, se for o caso.

Se na expressão de  $N_a$ , substituir  $N_{ao}$  pela expressão de minha proposição da última msg, temos:

$$N_a = (A/A_o) \cdot \Psi_c \cdot 15,7 \cdot d \cdot h_{ef} \quad (\text{unidades N, mm})$$

### CHUMBADORES EM GRUPO

A resistência do chumbador pode também ser afetada desfavoravelmente quando usamos múltiplos chumbadores, espaçados entre si de uma distância inferior à distância crítica, a partir da qual o desempenho de cada chumbador não é afetado por chumbadores vizinhos, comportando-se como chumbador isolado. A figura que se segue identifica a distância  $c$  de um chumbador ao bordo da peça e a distância  $s$  entre dois chumbadores vizinhos.



Laranjeiras (2008)

É intuitivo perceber que a distância crítica  $s_{cr}$  entre dois chumbadores é o dobro da distância crítica  $c_{cr}$  de um chumbador à face da peça. Portanto,

$$s_{cr} = 2 \cdot c_{cr} = 20 \cdot d \cdot (f_{bd} / 10)^{1/2} \leq 3 \cdot h_{ef} \quad (\text{unidades N, mm})$$

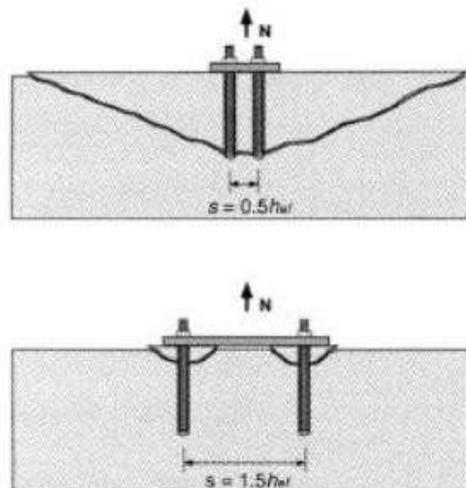
Para  $f_{bd} = 5 \text{ MPa}$ , conforme proposto:

$$s_{cr} = 14 \cdot d \leq 3 \cdot h_{ef}$$

Identifica-se que, para um chumbador adesivo oferecer resistência como um chumbador isolado ( $N_{ao}$ ) é necessário que diste do bordo da peça de  $7 \cdot d$  e, do chumbador mais próximo, de  $14 \cdot d$ . Caso contrário, sua capacidade de carga será reduzido. Não confundir o comportamento dos chumbadores sob tração, que têm formas de ruptura e modelos específicos de cálculo, com o comportamento dos comprimentos de ancoragem das barras tracionadas em um tirante ou viga de concreto.

A redução da resistência de chumbadores em grupo, distantes entre si de  $s < s_{cr}$ , conforme prescreve a Norma A308, resulta de investigações teóricas e experimentais, que se encontram sintetizadas no artigo de Eligehausen e outros, já citado, sendo fundamental a identificação das suas diversas formas de ruptura.

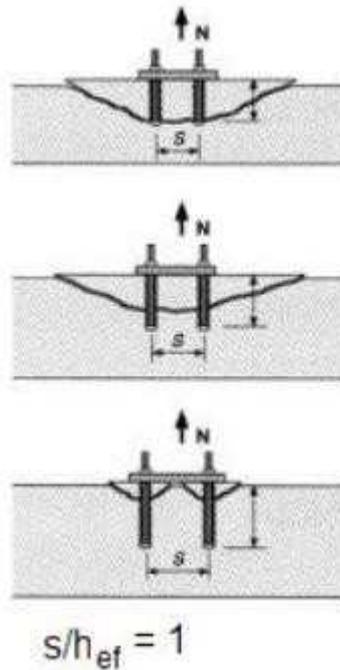
As figuras a seguir ilustram formas de rupturas de grupos de quatro chumbadores, observadas em ensaios.



Laranjeiras (2008)

Observa-se, na figura acima, em que  $h_{ef}$  foi mantido constante e variou-se a distância entre os chumbadores, O modo de ruptura mudou do arrancamento do

cone de concreto, iniciando na ponta dos chumbadores, para o arrancamento dos próprios chumbadores, com cones menores de concreto, espaçados. Já na figura abaixo as três figuras têm grupo de chumbadores com a mesma relação  $(s / h_{ef}) = 1$ , porém aumentando o embutimento  $h_{ef}$ .



Laranjeiras (2008)

O modo de ruptura modificou-se (de cima para baixo) de um arrancamento de um cone de concreto, iniciando-se nas pontas dos chumbadores, passando por rupturas parciais de arrancamento dos chumbadores e do concreto, para arrancamentos individuais dos chumbadores com cone pequenos de concreto, na superfície. Essa mudança ocorre porque a força que se consegue introduzir no concreto por aderência cresce linearmente com  $h_{ef}$ , enquanto que a resistência ao arrancamento do cone de concreto cresce linearmente com  $h_{ef}$ , enquanto que a resistência ao arrancamento do cone de concreto cresce na proporção de  $(h_{ef})^{1,5}$ . Interessante que as formas de ruptura identificados nas análises numéricas encontraram essa confirmação nos ensaios.

Com base nesse conhecimento teórico e experimental do comportamento dos chumbadores múltiplos (em grupo, associados), estabeleceram os investigadores (EUA e Alemanha), em trabalho coletivo, procedimento de projeto, incorporado à recente Norma internacional A308, já citada.

Segundo esse procedimento, as influências reveladas pelas formas de ruptura, função dos parâmetros identificados, na capacidade de carga de um chumbador em grupo, podem ser sintetizadas em uma expressão numérica, conforme esclareço a seguir.

A capacidade de carga de um grupo de  $n$  chumbadores para resistir a uma força axial centrada (coaxial com o eixo que contém o CG geométrico das barras), é expressa por:

$$N_{ag} = (A/A_0) \cdot \Psi_c \cdot \Psi_g \cdot N_{ao}$$

Onde:

$N_{ag}$  – é a capacidade de carga (ELU) do grupo de  $n$  chumbadores, tendo em conta as influências de cobrimento e distância entre os mesmos, em N;

$A$  – a área que circunscribe os chumbadores a distâncias dos eixos das barras iguais a  $c \leq c_{cr}$ , conforme se esclarece no exemplo numérico, em  $\text{mm}^2$ ;

$A_0$  – continua sendo a área que circunscribe um chumbador isolado e igual a  $(2 \cdot c_{cr})^2$ , em  $\text{mm}^2$ ;

$\Psi_c$  – coeficiente que tem em conta  $c < c_{cr}$  (adimensional);

$\Psi_g$  - coeficiente que tem em conta  $s < s_{cr}$  (adimensional);

$N_{ao}$  – capacidade de carga de um único chumbador isolado, em N.

O cálculo de  $\Psi_g$  é um tanto elaborado, em virtude das diferentes possibilidades de formas de ruptura, conforme se vê abaixo.

$$\Psi_g = \Psi_{go} + [(s/s_{cr})^{1/2} \cdot (1 - \Psi_{go})]$$

Onde:

$\Psi_{go} = n^{1/2} - (n^{1/2} - 1) \cdot (f_{bd} / f_{bdmax})^{1,5}$  P 1,0  $f_{bd} = 5$  MPa, segundo nossa sugestão

$$f_{bdmax} = 4,7 \cdot (f_{cd} \cdot h_{ef})^{1/2} / d \text{ (unidades N, mm)}$$

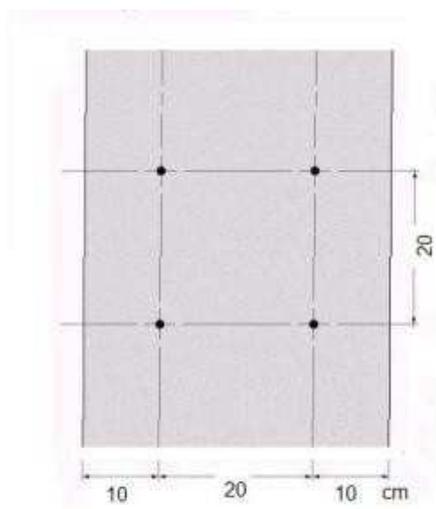
nessa expressão:

$n$  – nº de chumbadores em grupo (com  $s > s_{cr}$ );

$f_{cd}$  – a resistência à compressão de cálculo do concreto da peça onde serão instalados os chumbadores, em MPa ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

## 18. Exemplo numérico

Dados: Seja um grupo de 4 chumbadores, que se pretende instalar na face de um pilar com largura de  $400 \times 800 \text{ mm}^2$ , de concreto armado, concreto C30. Pretende-se saber qual o valor da força de tração axial, em serviço, que pode ser aplicada, no caso desses chumbadores estarem dispostos, simetricamente, nos 4 vértices de um quadrado com  $200 \text{ mm}$  de lado, com cobrimentos em relação às faces laterais do pilar iguais a  $100 \text{ mm}$ , conforme figura abaixo.



Laranjeiras (2008)

Serão usados chumbadores do tipo adesivo, constituídos de barras de aço nervuradas, CA-50,  $\varnothing 20$ , com  $400 \text{ mm}$  de embutimento, instaladas em furos feitos no pilar com  $\varnothing 25 \text{ mm}$  ( $1,25d$ ) e fixadas ao concreto com auxílio de resina epóxi.

### Resolução:

A capacidade de carga no ELU de um chumbador desse, isolado, já foi determinada no exercício anterior. Assim, são dados:

$$n=4; d=20\text{mm}; h_{ef}=400\text{mm}; c = 100\text{mm}; s=200\text{mm};$$

$$N_{ao} = 125.600 \text{ N};$$

Adotado para a resistência de aderência de cálculo da resina epóxi:  $f_{bd} = 5 \text{ MPa}$  ( $5 \text{ N/mm}^2$ ), e para a resistência à compressão de cálculo do concreto:  $f_{cd} = 30/1,4 = 21,4 \text{ MPa}$ .

a) o cobrimento desses chumbadores  $c=100\text{mm} < c_{cr} = 7.\varnothing = 140\text{mm}$ ;

b) a distância entre chumbadores  $s=200\text{mm} < s_{cr} = 14.\varnothing = 280\text{mm}$ .

*Cálculos:*

$$A = (c+s+c) \cdot (c_{cr}+s+ c_{cr}) = (100+200+100) \cdot (140+200+140) = 192.000 \text{ mm}^2; A_o = (2 \cdot c_{cr})^2 = 2 \cdot 140^2 = 78.400 \text{ mm}^2 \quad (A < 4 \cdot A_o)$$

$$A/A_o = 2,45$$

$$\Psi_c = (0,7+0,3 \cdot c/c_{cr}) = 0,7+0,3 \cdot 100/140 = 0,914 < 1,0$$

$$f_{bdmax} = 4,7 \cdot (f_{cd} \cdot h_{ef})^{1/2} / d = 4,7 \cdot (21,4 \cdot 400)^{1/2} / 20 = 21,8 \text{ MPa}$$

$$\Psi_{go} = n^{1/2} - (n^{1/2} - 1) \cdot (f_{bd} / f_{bdmax})^{1,5} = (4)^{1/2} - (4^{1/2} - 1) \cdot (5/21,8)^{1,5} = 1,89 > 1,0$$

$$\Psi_g = \Psi_{go} + (s/s_{cr})^{1/2} \cdot (1 - \Psi_{go}) = 1,89 + (200/280)^{1/2} \cdot (1 - 1,89) = 1,14$$

$$N_{ag} = (A/A_o) \cdot \Psi_c \cdot \Psi_g \cdot N_{ao}$$

$$N_{ag} = 2,45 \cdot 0,914 \cdot 1,14 \cdot 125.600 = 2,55 \cdot 125.600 = 319.976 \text{ N} \sim 320 \text{ kN}$$

Como se os cobrimentos  $c < c_{cr}$  e  $s < s_{cr}$  reduziram a capacidade de carga do grupo de 4 chumbadores para  $2,55/4 = 64\%$  (redução de 36%).

Por fim, a capacidade de carga em serviço desse grupo de chumbadores é  $N_k = 320 / 1,4 = 228,5 \text{ kN}$ .

## **DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES GRAUTEADOS**

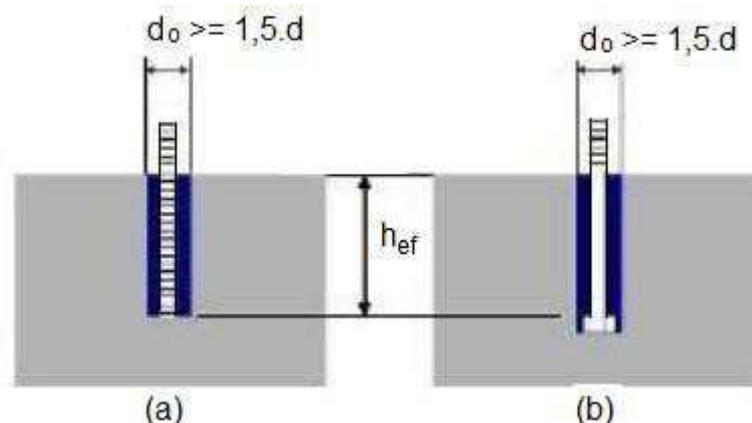
### **19. Fundamentos**

Os chumbadores grauteados, assim como os adesivos, incluem-se no grupo de chumbadores pós-instalados ou de pós-concretagem, que são implantados em furos feitos no concreto e fixados a este por aderência. No caso dos adesivos, com auxílio de resinas poliméricas, e, no caso dos grauteados, através de grautes. Entre os chumbadores pós-instalados, tem-se ainda os mecânicos que, como seu nome indica, são fixados ao concreto por ação mecânica, distinguindo-se os de expansão e os de reação. O outro grupo de chumbadores, nessa classificação, é o dos moldados in-loco ou de pré-concretagem, implantados no concreto antes da concretagem.

O dimensionamento dos chumbadores de pré-concretagem e dos de pós-concretagem mecânicos, têm amparo em procedimentos normatizados, como os da norma ACI 318. Já o dimensionamento dos chumbadores aderentes (adesivos e grauteados), pela sua maior complexidade, ao incluir a diversidade das resinas e grautes, tem se mantido órfão de procedimentos consolidados em Normas, apesar de seus mais de 20 anos de uso. Em 2008, o dimensionamento dos chumbadores adesivos teve inclusão na Norma internacional AC308 (ICC-ES).

Uma diferença importante entre os chumbadores adesivos e os grauteados é que, nos adesivos, os furos no concreto têm, geralmente, diâmetro 20% a 25% maior do que o diâmetro  $d$  do chumbador, sempre menor do que  $1,5.d$ , enquanto que os furos dos chumbadores grauteados têm diâmetro pelo menos 50% maiores do que  $d$ . Essa maior diferença entre os diâmetros do furo e do chumbador permite distinguir claramente, nos chumbadores grauteados sob tração, as rupturas na interface graute-chumbador das rupturas na interface graute-concreto, com influência no procedimento de cálculo.

Essa possibilidade de fazer uso de furos de maior diâmetro possibilita o uso de engrossamento das extremidades dos chumbadores, semelhantes a uma porca, como elementos de ancoragem, designados, em inglês, de *headed anchors*. Desse modo, os chumbadores grauteados podem ser do tipo sem ou com esse ressalto na extremidade, conforme ilustra a figura de Laranjeiras (2008) abaixo.



Na figura (a), vê-se um chumbador simples – barra nervurada (*deformed bar*) ou rosqueada (*threaded*); na (b), um chumbador com ressalto na extremidade – barra lisa (*smooth bar*).

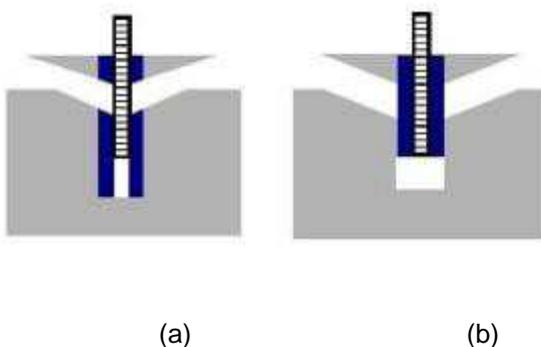
Esses furos podem ser feitos por impacto, com auxílio de martelotes, ou por rotativa, com auxílio de furadeiras. Resultados experimentais indicaram maior dispersão na resistência dos chumbadores grauteados em furos feitos com martelotes do que naqueles feitos com furadeiras.

Os grautes, por sua vez, podem ser à base de polímeros (epóxi ou poliéster) ou à base de cimento, com adição de agregados finos, em qualquer dos casos. Os grautes poliméricos, injetados, normalmente, em furos secos e limpos, atingem sua resistência de projeto ao fim de 24h, enquanto que os grautes cimentícios, injetados em furos úmidos e saturados, só atingem sua resistência, geralmente, após 14 dias de idade.

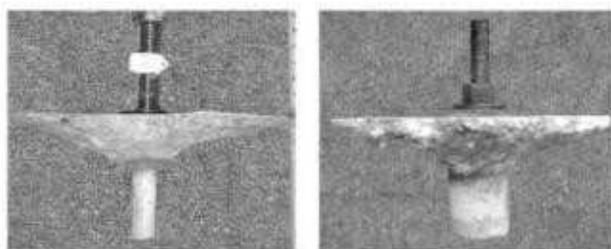
Os resultados indicam que grautes poliméricos e cimentícios atingem resistências de aderência equivalentes (valores médios da ordem de 20MPa), havendo no entanto variabilidade entre produtos diversos. Os grautes poliméricos apresentaram-se mais sensíveis, com redução de resistência, quando os furos não estão devidamente limpos e secos e a temperaturas mais elevadas do que a ambiente ( $>50^{\circ}\text{C}$ ).

### **FORMAS DE RUPTURA DOS CHUMBADORES GRAUTEADOS**

Os chumbadores grauteados, simples, submetidos a tração, apresentam formas de ruptura semelhantes às dos adesivos: ruptura da aderência na interface graute- chumbador ou na interface graute-concreto, conforme ilustram as figuras e fotos abaixo. Em alguns casos, ocorre simultaneamente arrancamento de um cone de concreto, superficial, conforme também ilustrado por Laranjeiras (2008).



Na figura (a), vê-se uma situação de ruptura da aderência entre o chumbador e o graute, com arrancamento de um tampão (plug) de graute e concreto. Na figura (b), uma situação de ruptura da aderência entre o graute e o concreto. O arrancamento do cone superficial de concreto não ocorre sempre, necessariamente. Nas fotos (c) e (d), respectivamente, as mesmas formas de ruptura.



(c)

(d)

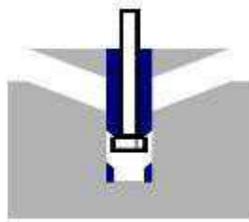
Laranjeiras (2008)

Na foto abaixo, um caso de ruptura na interface graute-concreto, sem arrancamento do cone superficial.

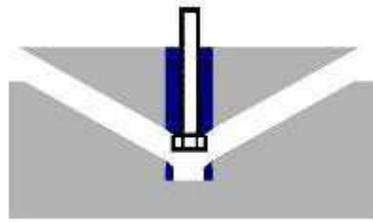


Laranjeiras (2008)

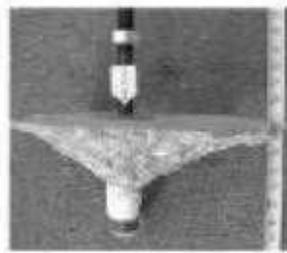
A presença do ressalto na extremidade do chumbador impossibilita a ruptura na interface graute-chumbador, aumentando a possibilidade de ruptura na interface graute-concreto. A existência atual de grautes capazes de desenvolver grande aderência com o concreto favorece a viabilidade de ruptura por arrancamento do cone de concreto, formado a partir do ressalto, conforme ilustram as figuras e fotos que se seguem.



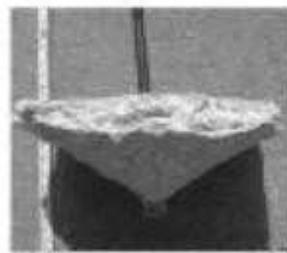
(e)



(f)



(g)



(h)

Laranjeiras (2008)

A figura (e) e foto (g), ilustram rupturas de chumbador com ressalto na interface graute-concreto, e, a figura (f) e foto (h), rupturas por arrancamento do cone de concreto.

### DIMENSIONAMENTO DOS CHUMBADORES ISOLADOS

No dimensionamento dos chumbadores grauteados, será utilizado como referência o documento oficial do Departamento de Transportes do Estado da Flórida, elaborado na Universidade da Flórida, por Ronald A. Cook e J. L. Burz, Design Guidelines and Specifications for Engineered Grouts 2003.

Os chumbadores isolados, simples (sem ressalto), sob força de tração podem apresentar duas formas de ruptura, conforme já visto, podendo cada uma delas ser descrita por uma equação respectiva, sob a hipótese de distribuição uniforme de tensões de aderência ao longo do comprimento  $h_{ef}$ :

- no caso de ruptura na interface graute-chumbador:

$$N_{a0} = f_{bd} \cdot \pi \cdot d$$

Onde

- $N_{a0}$  – força de ruptura da aderência ou capacidade de carga do chumbador isolado, em N
- $f_{bd}$  – resistência de aderência de cálculo do graute com o chumbador, em MPa ( $N/mm^2$ );
- $d$  – diâmetro nominal do chumbador, em mm;  $h_{ef}$  – embutimento do chumbador, em mm.

- no caso de ruptura na interface graute-concreto:

$$N_{a0} = f_{bd0} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot h_{ef}$$

onde

- $f_{bd0}$  – resistência de aderência de cálculo do graute com o concreto, em MPa ( $N/mm^2$ );
- $d_0$  – diâmetro nominal do furo, em mm;

Prevalecerá, no dimensionamento, o menor dos dois valores.

Para definição dos valores de  $f_{bd}$  e  $f_{bd0}$ , será utilizado o mesmo critério do dimensionamento dos chumbadores adesivos. Será estabelecido um valor mínimo aceitável de  $f_{bd}$  e  $f_{bd0}$  para todos os produtos disponíveis no mercado. Desse modo, o adesivo que for usado na obra deverá satisfazer essa resistência, a ser aferida, na própria obra, por prova de carga conforme procedimento da NBR 14827.

Zamora e outros (*ACI Structural Journal*, Mar-Apr 2003, p.222-9), com base em seus 114 ensaios e extenso banco de dados, propõem os seguintes valores característicos:

$$f_{bk} = 18 \cdot (1 - 1,65 \cdot 0,13) = 14,1 \text{ MPa}$$

$$f_{bk0} = 8 \cdot (1 - 1,65 \cdot 0,15) = 6,0 \text{ MPa}$$

resultando:

$$f_{bd} = 14,1 / 1,4 = 10 \text{ MPa}$$

$$f_{bd0} = 6,0 / 1,4 = 4,3 \text{ MPa}$$

(Observação: Nos chumbadores adesivos, encontra-se  $f_{bd} = 4,8$  MPa. Nesses chumbadores, dada a pequena diferença entre  $d$  e  $d_0$ , não se consegue distinguir entre as duas formas de ruptura. Isso explica o baixo valor de  $f_{bd}$ , representativo da ruptura adesivo- concreto.)

Esses valores substituídos nas expressões acima fornecem:

$$N_{a0} = 31,4. d. h_{ef}$$

$$N_{a0} = 13,5. d_0. h_{ef}$$

Prevalecerá o menor dos valores, no dimensionamento. Comparando-se essas duas expressões, conclui-se que, até valores de  $d_0/d = 2,3$ , prevalece, no dimensionamento, a segunda equação (ruptura na interface graute- concreto), e, para valores dessa relação acima de 2,3, prevalece a primeira equação (ruptura na interface graute-chumbador).

Os chumbadores isolados, com ressalto, sob força de tração, podem apresentar duas formas de ruptura, sendo uma a ruptura da aderência na interface graute-concreto e a outra a ruptura por arrancamento do cone de concreto, representadas, numericamente, pelas equações que se seguem, em unidades N, mm.

- no caso de ruptura na interface graute-concreto:

$$N_{a0} = 13,5. d_0. h_{ef}$$

- no caso de arrancamento do cone de concreto (com início a partir do ressalto):

$$N_{a0} = 12,6. (f_{cd})^{0,5}. (h_{ef})^{1,5}$$

Identifica-se, na última expressão, que a capacidade do chumbador não depende do diâmetro do mesmo, nem do diâmetro do furo, mas da resistência do concreto à tração (representada em função de  $f_{cd}$ ) e do comprimento do chumbador. Para um concreto usual C30, essa expressão ganha a forma:

$$N_{a0} = 58,3. (h_{ef})^{1,5} \quad (h_{ef} \text{ em mm e } N_{a0} \text{ em Newtons}).$$

Para efeito de dimensionamento, prevalecerá o menor dos dois valores.

## INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA AO BORDO

No caso dos chumbadores grauteados, sem ou com ressalto, as Diretrizes do Departamento de Transportes da Flórida (documento adotado como referência), para ter em conta a influência desfavorável de distâncias do eixo do chumbador ao bordo da peça,  $c$ , inferiores à distância crítica,  $c_{cr}$ , recomenda a seguinte expressão:

$$N_a = \Psi \cdot N_{a0}$$

Onde:

$$\Psi = 0,7 + 0,3 \cdot c/c_{cr} \quad (c < c_{cr}) \quad \text{Distinguindo-se:}$$

- no caso de ruptura na interface graute-chumbador, expressão

$$N_{a0} = 31,4 \cdot d \cdot h_{ef}, \quad c_{cr} = 7 \cdot d$$

- no caso de ruptura na interface graute-concreto, expressão

$$N_{a0} = 13,5 \cdot d_o \cdot h_{ef}, \quad c_{cr} = 5 \cdot d_o$$

- no caso de arrancamento do cone de concreto, expressão

$$N_{a0} = 12,6 \cdot (f_{cd})^{0,5} \cdot (h_{ef})^{1,5} \quad c_{cr} = 1,5 \cdot h_{ef}$$

O menor de valor entre os  $N_a$  calculados prevalecerá no dimensionamento.

## INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CHUMBADORES

Quando o espaçamento  $s$  entre chumbadores é inferior ao espaçamento crítico  $s_{cr} = 2 \cdot c_{cr}$ , a capacidade de carga do grupo de chumbadores, segundo o documento de referência, deve ser calculada pela expressão:

$$N_{ag} = (A/A_o) \cdot N_{a0}$$

onde  $A$  e  $A_o$  têm as mesmas definições fornecidas para os chumbadores adesivos, ou seja,

$A$  – a área que circunscreve os chumbadores a distâncias dos eixos das

barras iguais a  $c \leq c_{cr}$ , em  $\text{mm}^2$ ;

$A_0$  – a área que circunscribe um chumbador isolado e igual a  $(2 \cdot c_{cr})^2$ , em  $\text{mm}^2$ .

Os valores de  $c_{cr}$  pode assumir as expressões  $7d$ ,  $5d_0$  ou  $1,5h_{ef}$ , a depender do tipo de ruptura considerado, conforme esclareci acima.

O menor dos valores de  $N_{a0}$  calculados prevalecerá no dimensionamento.

Caso as distâncias aos bordos  $c$  e espaçamentos  $s$  sejam menores do que seus respectivos valores críticos ( $c_{cr}$ ,  $s_{cr}$ ), a expressão resistência de cálculo do chumbador será reescrita sob a forma:

$$N_{ag} = (A/A_0) \cdot \Psi \cdot N_{a0}$$

## CONCLUSÕES

- Em relação à geometria dos modelos do tipo SR, todos os corpos-de-prova romperam por fendilhamento. Conforme o esperado, a forma de ruptura não variou entre os modelos ensaiados, tendo em vista a proporcionalidade imposta às grandezas do modelo experimental em relação ao diâmetro da armadura.
- Em relação à geometria dos modelos do tipo CR, as análises efetuadas ao longo do trabalho não foram suficientes para permitir conclusões significativas. As dimensões dos modelos, embora proporcionais ao diâmetro da armadura utilizada, parecem ter sido insuficientes para o estudo do mecanismo de aderência.
- Durante toda a interpretação dos resultados verificou-se que o comprimento de aderência  $l = 5\phi$  mostrou-se pouco significativo.
- A espessura da camada de resina epóxi na ligação parece ter influenciado nos resultados. Embora a relação  $\phi_{\text{furo}} / \phi_{\text{barra}}$  seja aproximadamente igual para os três diâmetros estudados, o valor absoluto da diferença ( $\phi_f - \phi_b$ ) pode ter sido mais significativo para o efeito.
- Nos modelos do tipo sem resina, observa-se que, de modo geral e, para um dado diâmetro, maiores comprimentos de aderência acarretam maiores valores das cargas máximas, maiores deslocamentos e tensões de aderência bem próximas.
- O mesmo ocorre com os modelos do tipo com resina, com exceção dos deslocamentos, que neste caso parecem depender da configuração da ruptura ocorrida no corpo-de-prova.
- Os resultados desses ensaios mostraram que o aumento da resistência da aderência promovido pela utilização da resina epóxi na ligação, deve-se a sua grande capacidade de adesão. Tal fato já foi observado por Aggour, Arnaud e Lorrain e também por Souza, em estudos desenvolvidos a respeito da utilização da resina epóxi na ligação aço - concreto.
- Embora pouco se conheça sobre o mecanismo de aderência das armaduras coladas com resina epóxi, é possível verificar através dos resultados encontrados neste trabalho que este é bem diferente do mecanismo de aderência

aço-concreto. Observa-se que enquanto a aderência mecânica é grande contribuinte no mecanismo de aderência aço-concreto devido ao trabalho das nervuras, no caso de aço-resina-concreto a adesão da resina epóxi e o atrito desenvolvido entre as superfícies de corte são os grandes responsáveis pela eficácia desta técnica.

- Percebe-se também que para os modelos do tipo SR, o início do escorregamento da barra corresponde à perda de adesão, ou seja, à ruptura da aderência química entre o aço e o concreto. Entretanto, nos modelos do tipo CR a ligação é fortalecida pela resina epóxi e o escorregamento da barra, neste caso, não é condicionado à ruptura da ligação propriamente dita e sim, à configuração da ruptura do corpo-de-prova.
- Com referência à forma de ruptura, pode-se verificar que nos modelos do tipo CR foram, de modo geral, mais bruscas do que nos modelos correspondentes do tipo SR, o que significa que a resina epóxi aumenta a rigidez da ligação aço-concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN,R.T.L.; EDWARDS,S.C. (1987) "Repair of Concrete Structures", Blackie & Son Ltd, London, 204pp.

ARCELORMITAL, Empresa produtora de aço, laminados e trefilados. Desenvolve o vergalhão Belgo 50-Soldável.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118 (2003). Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14168 (2002). Chumbadores Instalados em Elementos de Concreto ou Alvenaria – Determinação de Resistência à Tração e ao Cisalhamento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739 (2007). Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222 (2011). Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7480 (2007). Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248 (2003). Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

ABNT – NBR 14827 (2002) – Chumbadores Instalados em Elementos de Concreto ou Alvenaria – Determinação de resistência à tração e ao cisalhamento. 15 p.

AGUIAR, J. L. BARROSO DE. (1990). Contribuição para o estudo da aderência entre polímeros e betão. Tese de Doutorado – Universidade do Minho – Braga – Portugal.

COOK, RONALD A.; KONZ, ROBERT C. (2001). Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. ACI Structural Journal - January-February

BARBOSA, MARIA TERESA GOMES. (2001). Avaliação do Comportamento de Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro – RJ – 2001

ELIGEHAUSEN, R.; SILVA, J. (2008). The assessment and design of adhesive anchors in concrete for sustained loading. Artigo

GARZÓN REYES, FREDY ENRIQUE. (2009). Análise da Aderência entre Barras de Aço e Concreto (CC, CAA, CAAFA) sob influencia de aços monotônicas e cíclicas. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – USP – São Carlos – SP.

ICC-ES – AC308 (2009). Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements. 125 p. download em: <http://www.icc-es.org/Criteria/>

LARANJEIRAS, ANTONIO CARLOS REIS, (2008) Chumbadores. Notas Técnicas.

LEONHARDT, FRITZ; MONNING, E. (1983). Construções de concreto: Vol. 5 – Concreto Protendido. Tradução João Luis Escosteguy Merino. Editora Interciência 316p – Rio de Janeiro.

RIBEIRO, J. L. DUARTE (1985). Análise Experimental dos Fatores que Influenciam a Aderência de Barras Nervuradas. Porto Alegre, 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRS

SIKADUR 32<sup>®</sup>, Adesivo Epóxi Bi-componente fluido. Fabricante SIKA<sup>®</sup>.

WOLLMERSHAUSER, RICHARD E.; MATTIS, LEE. – Understanding Adhesive Anchor Installation and Inspection. Artigo. Estados Unidos.

CHUNG, H.W. (1981). Epoxy Repair of Bond in Reinforced Concrete Members. ACI Journal, n. 78-7, p.79-82, Jan./Feb. 1981.

ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08), 2008, 471 p.

ICC-ES – AC308 (2008). Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements. 125 p.

R.A. Cook and J.L. Burtz (2003). Design Guidelines and Specifications for Engineered Grouts. University of Florida. 129 p.

NASCIMENTO, EDSON CARLOS DO (2003). Ancoragem com

Chumbadores. Revista Techné. Nº 80, Nov.2003.

ACI (2007). Adhesive Anchors in Concrete under Sustained Tensile Loads. ACI Concrete International, Dec.2007, p.30-1

R. ELIGEHAUSEN and J. SILVA (2008) The Assessment and Design of Adhesive Anchors in Concrete for Sustained Loading. HILTI. Jan.2008, 20 p.

FERNANDES DENNIS VIDEIRA (2011), Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi. Rio de Janeiro, 162 p. Dissertação (pós graduação em Engenharia Civil) – UERJ.

SOUZA, REGINA H.F. e FELÍCIO, MÁRCIA D. (2001). Avaliação Experimental da Ligação de Armaduras Coladas ao Concreto com Resina Epóxi. Rio de Janeiro, Revista Engenharia - Estudo e Pesquisa. Editora Interciência, v. 4, n. 1, p. 9-18