

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Bruno Nagel Oliveira

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO
DE CHUMBADOR DE EXPANSÃO ANCORADO EM DIFERENTES TRAÇOS DE
CONCRETO**

Santa Cruz do Sul

2019

Bruno Nagel Oliveira

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO
DE CHUMBADOR DE EXPANSÃO ANCORADO EM DIFERENTES TRAÇOS DE
CONCRETO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Eng. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2019

Bruno Nagel Oliveira

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO
DE CHUMBADOR DE EXPANSÃO ANCORADO EM DIFERENTES TRAÇOS DE
CONCRETO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso
de Engenharia Civil da Universidade de Santa
Cruz do Sul – UNISC, para obtenção do título
de Engenheiro Civil.

M. Sc. Henrique Luiz Rupp
Professor orientador – UNISC

M. Sc. Camila Crauss
Professora examinadora – UNISC

M. Sc. Lucas Alexandre Reginato
Professor examinador - UNISC

Santa Cruz do Sul
2019

DEDICATÓRIA

Quero em primeiro lugar, agradecer aos meus pais, Inácio e Cristine, que se empenharam em me proporcionar sempre as melhores condições, de estudos e de exemplo de caráter, para que eu pudesse alcançar meus objetivos tanto profissionais quanto pessoais. Gostaria de agradecer ainda aos meus irmãos, Thiago e Thais, que apesar da distância, sempre buscaram me incentivar e contribuir.

Ao meu companheiro Alisson Alievi, gostaria de agradecer pela atenção e incentivo no decorrer deste período, e também durante toda a graduação. Em todos os momentos bons ou ruins, tu foste meu porto seguro.

Aos meus filhos 'pets', Woody e Max, que durante toda a faculdade, ou parte dela, estiveram presentes em minha vida, e em momentos de tensão, foram essenciais para meu bem-estar.

Aos meus amigos em geral, ao qual não cito nomes, que percorreram todo esse caminho da graduação ao meu lado, o meu muito obrigado.

Aos meus colegas e amigos-irmãos, Arthur Görgen e Nicolas Meirelles, que foram essenciais no decorrer de toda a graduação, tanto na vida acadêmica quanto na vida pessoa. Agradeço pela ajuda e esforço na realização do meu ensaio experimental, pois sem vocês não seria possível.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas, Rafael Henn, Henrique Eicher e Lidiane Kist, que no decorrer da graduação e principalmente durante a execução do ensaio experimental, foram extremamente prestativos e solidários.

Ainda, agradeço ao meu professor e orientador Henrique Luiz Rupp, por todo esforço demonstrado em ajudar, no decorrer do último semestre.

RESUMO

O presente trabalho busca contribuir para o estudo de resistência ao cisalhamento de chumbador mecânico de expansão ancorado em diferentes resistências de concreto. Para tanto, devido a normatização do setor de ancoragens no Brasil ser precária, é de suma importância desenvolver modelos de cálculo confiáveis, para que possam ser amplamente utilizados para determinação dos valores de resistência ao cisalhamento. Visando obter dados para análise e comparação, e através do estudo dos modelos de cálculos e modelos teóricos, será desenvolvido um programa experimental, com a definição dos protótipos e posterior ensaio dos mesmos. Após a análise teórica e experimental, será realizada a comparação dos resultados, buscando obter conclusões acerca dos métodos de ruptura do concreto e do aço no cisalhamento, bem como da influência do concreto na resistência ao cisalhamento do chumbador. Desta forma, foram obtidos como resultados do ensaio experimental, quando comparados aos métodos teóricos, que o método experimental apresentou desempenho superior em relação a Norma Brasileira (ABNT NBR 8800:2008) e a Norma Canadense (CAN/CSA-A23.3-04), e resultado inferior em comparação ao catálogo técnico Âncora. Após a análise dos resultados, pode-se supor que devido a maior resistência do concreto, os chumbadores fixam-se de maneira mais eficiente, obtendo assim uma maior estabilidade e atingindo uma resistência ao cisalhamento mais alta.

Palavras-chave: ancoragem; expansão; chumbador; cisalhamento, concreto

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 – Ancoragem mecânica.	19
Figura 2 – Ancoragem por adesão.....	20
Figura 3 – Ancoragem por atrito.....	20
Figura 4 – Cargas solicitantes em chumbadores.....	21
Figura 5 – Chumbadores de pré-concretagem.....	22
Figura 6 – Chumbadores de pós-concretagem.....	23
Figura 7 – Ruptura do aço na tração.....	24
Figura 8 – Ruptura por cone de concreto.....	25
Figura 9 – Ruptura por escorregamento.....	26
Figura 10 – Ruptura do concreto por fendilhamento.....	27
Figura 11 – Ruptura lateral do concreto.....	27
Figura 12 - Ruptura do aço por corça cortante sem braço de alavanca.....	28
Figura 13 - Ruptura do aço por força cortante com braço de alavanca.....	28
Figura 14 - Ruptura do concreto por ‘Pry-out’.....	29
Figura 15 - Ruptura do concreto por ‘Break-out’.....	29
Figura 16 - Efeito de cunha.....	31
Figura 17 - Efeito de tamanho.....	31
Figura 18 - Efeito de disco.....	32
Figura 19 - Ancoragem em grupo e sobreposição de tensões.....	34
Figura 20 - Armadura adicional ou armadura de reforço.....	35
Figura 21 - Fissuração no concreto.....	36
Figura 22 - Vista superior para determinação de AVo	40
Figura 23 - Vista lateral para determinação de AVo	40
Figura 24 - Determinação de AV para elementos finos.....	41
Figura 25 - Determinação de AV para elementos robustos.....	42
Figura 26 – Vista superior para determinação de AN	47
Figura 27 - Vista lateral com altura de embutimento efetiva.....	47
Figura 28 - Vista superior para determinação de ANo	48
Figura 29 - Formas para moldagem dos blocos.....	54
Figura 30 - Areia exposta ao sol para secagem.....	56
Figura 31 - Figura da esquerda mostra a lavagem da brita e na direita a secagem ao sol.....	56

Figura 32 - Ensaio de abatimento de tronco de cone ou 'Slump'.	57
Figura 33 - Blocos de concreto moldados e identificados.	58
Figura 35 - Dispositivos de suporte prontos.	61
Figura 36 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço A.....	85
Figura 37 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço B.....	85
Figura 38 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço A.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente de modificação da resistência ao cisalhamento devido à fissuração.....	44
Tabela 2 – Valores do coeficiente cac, determinado através da altura efetiva de embutimento.....	50
Tabela 3 - Espaçamentos mínimos para chumbadores com carga de tração ou cisalhamento.	53
Tabela 4 - Traços de concreto utilizados.	55
Tabela 5 - Resistências médias dos traços A, B e C.....	69
Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração dos chumbadores.	71
Tabela 7 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço A.....	72
Tabela 8 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço B.....	73
Tabela 9 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço C.....	74
Tabela 10 - Cargas de ruptura média para os traços A, B e C.....	75
Tabela 11 - Cargas de ruptura média para os traços A, B e C.....	81
Tabela 12 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados experimentais.	83

LISTA DE ABREVIATURAS

ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta Resistência Inicial
CAN	Canadian
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
CP-V	Cimento Portland V
CSA	Canadian Standards Association
kgf	Quilograma força
kgf.m	Quilograma força por metro
mm	Milímetro
kN	Quilo Newton
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	Área da seção transversal do chumbador.
A_N	Área projetada de falha de concreto de um chumbador, para cálculo da resistência de tração.
A_{No}	Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência em tração, quando não limitada pela distância de borda ou espaçamento.
A_{se}	Área transversal efetiva do chumbador.
A_V	Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento.
A_{Vo}	Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento, sem influência de borda, espaçamento ou espessura dos elementos.
c_{ac}	Distância crítica de borda.
c_{min}	Menor distância de borda.
c_1	Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção. Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.
c_2	Distância do centro de um eixo de ancoragem até a borda de concreto na direção ortogonal a c_1 .
d_o	Diâmetro externo do chumbador ou diâmetro do eixo do pino do chumbador.
f'_c	Resistência à compressão específica do concreto.
f_{ub}	Resistência à tração do aço o chumbador.
f_{ut}	Resistência à tração específica do aço do chumbador.
$F_{v,Rd}$	Resistência ao cisalhamento do aço do chumbador.
f_y	Resistência à deformação específica do aço do chumbador.
h	Espessura do elemento em que o chumbador é ancorado, medida paralelamente ao eixo de ancoragem.
h_{ef}	Profundidade efetiva de embutimento do chumbador.
k	Coefficiente de resistência à ruptura por 'Break-out'.

k_{cp}	Coeficiente de resistência à ruptura por 'Pry-out'
l	Comprimento de suporte do chumbador para cisalhamento, não excedendo $8d_o$; h_{ef} para chumbadores com rigidez constante ao longo de toda a extensão da seção embutida, como chumbadores de pós-concretagem com um invólucro tubular ao longo de toda a extensão da profundidade de embutimento; $2d_o$ para chumbadores de expansão controlados por torque.
n	Número de chumbadores em um grupo de ancoragem.
N_{br}	Resistência fatorada ao 'Break-out' do concreto de um único chumbador na tração, considerando concreto fissurado.
N_{cbr}	Resistência fatorada ao 'Break-out' do concreto de um único chumbador na tração.
R	Fator de modificação de resistência.
V_{br}	Resistência fatorada ao 'Break-out' do concreto de um único chumbador no cisalhamento, considerando concreto fissurado.
V_{cbr}	Resistência fatorada ao 'Break-out' do concreto de um único chumbador no cisalhamento.
V_{cpr}	Resistência fatorada ao 'Pry-out' do concreto de um único chumbador.
V_{sr}	Resistência fatorada no cisalhamento de um único chumbador, conforme a resistência do aço.
ϕ_c	Fator de resistência do concreto para concreto, cujo valor de $\phi_c = 0,65$
ϕ_s	Fator de resistência do aço para reforço.
$\psi_{c,N}$	Fator de modificação para a resistência na tração devido as fissurações.
$\psi_{cp,N}$	Fator de modificação para resistência de ruptura do concreto por 'Break-out' devido a falha de divisão prematura.
$\psi_{c,V}$	Fator de modificação para resistência em cisalhamento devido a fissuração.
$\psi_{ed,N}$	Fator de modificação para resistência na tração para considerar distâncias de borda menores que $1,5h_{ef}$.

$\psi_{ed,v}$

Fator de modificação para resistência no cisalhamento para considerar distâncias de borda menores que $1,5c_1$.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Mecanismos de transferência de carga	19
2.1.1 Ancoragem mecânica	19
2.1.2 Ancoragem por adesão	20
2.1.3 Ancoragem por atrito	20
2.2 Cargas solicitantes	21
2.3 Chumbadores com ancoragem pré concretagem	21
2.4 Chumbadores com ancoragem pós concretagem	22
2.5 Configurações de ruptura	23
2.5.1 Ruptura do aço	23
2.5.2 Ruptura do cone de concreto	24
2.5.3 Ruptura por escorregamento	25
2.5.4 Ruptura por fendilhamento	26
2.5.5 Ruptura lateral do concreto (<i>blow-out</i>)	27
2.5.6 Ruptura do aço por força cortante sem braço de alavanca	28
2.5.7 Ruptura do aço por força cortante com braço de alavanca	28
2.5.8 Ruptura do concreto por ‘Pry-out’	29
2.5.9 Ruptura do concreto por ‘Break-out’	29
2.6 Fatores que influenciam a capacidade de carga de ancoragem	30
2.6.1 Proximidade da borda	30
2.6.2 Efeito de cunha	30
2.6.3 “Size effect”	31
2.6.4 Efeito de disco	32
2.6.5 Relação entre o diâmetro do chumbador e a altura de embutimento	32
2.6.6 Aderência	32

2.6.7 Posição e orientação da ancoragem.....	33
2.6.8 Ancoragem em grupo.....	34
2.6.9 Armadura adicional	34
2.6.10 Concreto fissurado.....	35
2.6.11 Excentricidade da carga.....	36
2.6.12 Solda.....	36
2.7 Métodos de cálculo.....	36
2.7.1 ABNT 6118:2014.....	36
2.7.2 CAN/CSA-A23.3-04.....	37
2.7.2.1 Resistência do aço ao cisalhamento	37
2.7.2.1.1 Resistência do aço do chumbador ao cisalhamento.....	37
2.7.2.1.2 Fator de resistência R	38
2.7.2.2 Resistência do concreto ao cisalhamento	39
2.7.2.2.1 Resistência do concreto na ruptura de borda por cisalhamento	39
2.7.2.2.1.1 Determinação de AV_o	39
2.7.2.2.1.2 Determinação de AV	41
2.7.2.2.1.3 Determinação de V_{br}	42
2.7.2.2.1.4 Verificação de c_1 a ser utilizado.....	43
2.7.2.2.1.5 Fator de modificação dos efeitos de borda.....	43
2.7.2.2.1.6 Fator de modificação da resistência ao cisalhamento devido à fissuração.....	44
2.7.2.2.2 Ruptura do concreto devido ao braço de alavanca	45
2.7.2.2.2.1 Coeficiente de ruptura.....	45
2.7.2.2.2.2 Resistência do concreto na ruptura de borda por tração	45
2.7.2.2.2.2.1 Determinação do AN	46
2.7.2.2.2.2.2 Determinação de AN_o	47
2.7.2.2.2.2.3 Fator de modificação dos efeitos de borda.....	48

2.7.2.2.2.4 Fator de modificação de resistência na tração devido a fissuração	48
2.7.2.2.2.5 Fator de modificação devido a divisão prematura do concreto	49
2.7.2.2.2.6 Determinação do <i>Nbr</i>	50
2.7.3 ACI 318-14	50
2.7.4 ABNT NBR 8800:2008	51
3 METODOLOGIA	52
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
4.1 Blocos de Concreto	53
4.1.1 Formas	54
4.1.2 Traço do concreto	54
4.1.3 Concreto	55
4.2 Suporte	59
4.3 Chumbadores	61
4.4 Procedimentos de preparação do ensaio	63
4.5 Equipamento de ensaio	65
4.6 Realização do ensaio	65
4.6.1 Corpos de prova	66
4.6.2 Blocos de concreto com chumbadores	66
5 RESULTADOS	68
5.1 Método Experimental	68
5.1.1 Corpos de prova	68
5.1.2 Blocos	70
5.1.3 Chumbadores	70
5.1.3.1 Ensaio de escoamento do aço	70
5.1.3.2 Ensaio de cisalhamento dos chumbadores	71
5.1.3.2.1 Blocos com concreto traço A	72

5.1.3.2.2 Blocos com concreto traço B	73
5.1.3.2.3 Blocos com concreto traço C	74
5.2 Método teórico	75
5.2.1 Método CAN/CSA-A23.3-04	75
5.2.1.1 Concreto	75
5.2.1.1.1 Resistência de ruptura 'Break-out'	75
5.2.1.1.2 Ruptura do concreto 'Pry-out'	77
5.2.1.2 Chumbadores	80
5.2.1.2.1 Norma CAN/CSA-A23.3-04	80
5.2.1.2.2 ANBT NBR 8800:2008	81
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	82
6.1 Concreto	82
6.2 Chumbadores	82
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	87
7.1 Conclusões	87
7.2 Sugestões para futuros trabalhos	88

1 INTRODUÇÃO

A ancoragem consiste na fixação de uma peça de aço no concreto, evitando seu escorregamento, ocorrendo assim a transferência de esforços entre os dois elementos, de modo que suas deformações sejam compatibilizadas. A ancoragem por aderência é a mais comum, e funcionamento parte da interação entre concreto e aço, de forma que a peça a qual se quer ancorar deve ter um comprimento mínimo para que se evite o escorregamento, para que ocorra a transferência de esforços do aço para o concreto. Um segundo método de ancoragem é a química, que se dá através do uso de resinas epóxi, sendo esta colocada nas duas partes que serão aderidas (concreto/aço, concreto/concreto), formando uma película de aderência entre os materiais. Já a ancoragem mecânica, ocorre por meio de um elemento metálico chamado “parabolt”, que consiste em um chumbador mecânico de expansão fixado ao concreto por meio de torque ou percussão, gerando a expansão do chumbador e sua fixação ao substrato.

Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo contribuir para o estudo da resistência ao cisalhamento de chumbadores de expansão quando ancorados em concreto de diferentes resistências. Para tanto, serão definidos os modelos de cálculo e os modelos teóricos a serem utilizados, bem como ocorrerá a definição dos protótipos que farão parte do programa experimental. Através do ensaio dos protótipos desenvolvidos no programa experimental, ocorrerão as análises teóricas, de acordo com os modelos definidos anteriormente, bem como a análise experimental baseado nos protótipos. Por fim, foram comparados os resultados, buscando obter conclusões acerca dos métodos de ruptura do concreto e do aço no cisalhamento e interações entre o chumbador e concreto, bem como da influência do concreto na resistência ao cisalhamento do chumbador.

Os sistemas de ancoragem são amplamente utilizados em obras de reforço e fixação de elementos em estruturas, como: fixação de máquinas e equipamentos; elevadores, plataformas, pontes rolantes; estruturas metálicas; sistemas de armazenamento e movimentação; guarda-corpos, corrimões e apoios. Com a crescente demanda por estes elementos, surgiram nos últimos anos novas fábricas de chumbadores, gerando maior concorrência de mercado e queda nos preços destes elementos, tornando-os assim, ainda mais conhecidos e utilizados no mercado nacional. Desta forma, a determinação dos valores de resistência é de extrema

importância para o correto dimensionamento dos chumbadores. Entretanto, não existem normas que regulamentem os modelos de cálculos que devem ser utilizados para determinar a resistência do chumbador à tração e cisalhamento, por exemplo. Portanto, é de suma importância desenvolver modelos de cálculo confiáveis, para que possa ser amplamente utilizado para determinação de tais valores, visando evitar o superdimensionamento, e conseqüentemente gastos desnecessários, bem como o subdimensionamento, colocando em risco as estruturas e a vida de pessoas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ancoragem consiste basicamente na fixação de algum elemento em estruturas de concreto ou alvenaria. Atualmente, podemos classificar os sistemas de ancoragem em dois tipos: elementos de ancoragem pré concretagem e elementos de ancoragem pós concretagem. No primeiro caso, os elementos são posicionados no local onde permanecerão após o ganho de resistência do concreto, solidarizando o chumbador ao concreto. No segundo caso, os chumbadores são inseridos no concreto após o mesmo já ter enrijecido, através de perfuração ou energia de cravação (MARTINS, 2006).

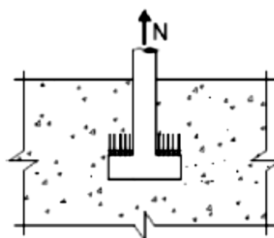
2.1 Mecanismos de transferência de carga

A carga é transferida utilizando mecanismos de transferência de carga, que na ancoragem podem ser de três tipos: mecânica, por adesão e por atrito. Estes itens são descritos a seguir.

2.1.1 Ancoragem mecânica

Neste tipo de ancoragem, a aderência ocorre devido à conformação superficial das barras ou chumbadores, que devido à corrosão ou ao seu processo de fabricação, acabam por gerar uma superfície com certa rugosidade. No caso das barras de aço, em seu processo de fabricação são criadas nervuras, a fim de aumentar a rugosidade superficial (PINHEIRO, MUZARDO, 2003).

Figura 1 – Ancoragem mecânica.

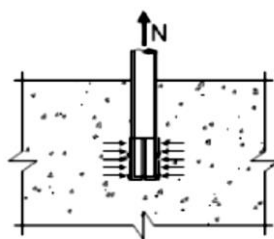


Fonte: Bemfica (2016).

2.1.2 Ancoragem por adesão

Este tipo de ancoragem é caracterizado por uma resistência à separação dos materiais em função de suas ligações físico-químicas. Pode se dar na interface do aço com o concreto em elementos pré concretados, ou através da adesão química, onde a resina faz a ponte entre o aço e o concreto, em elementos pós concretados (PINHEIRO, MUZARDO, 2003).

Figura 2 – Ancoragem por adesão.

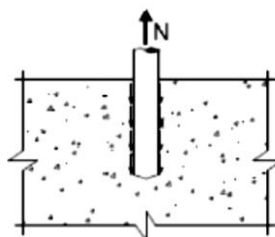


Fonte: Bemfica (2016).

2.1.3 Ancoragem por atrito

A ancoragem por atrito depende da rugosidade superficial da barra e da pressão exercida pelo concreto sobre a barra, em virtude da retração (PINHEIRO, MUZARDO, 2003).

Figura 3 – Ancoragem por atrito.

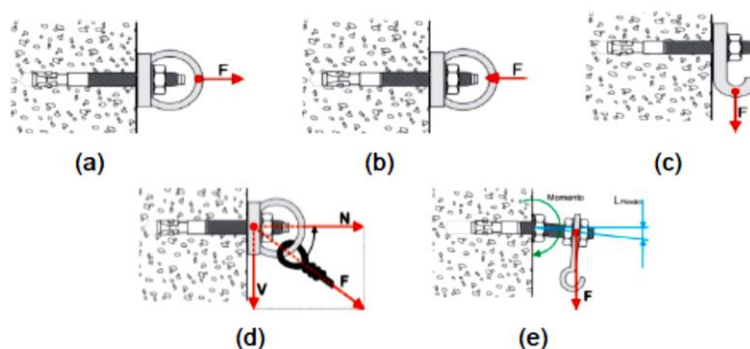


Fonte: Bemfica (2016).

2.2 Cargas solicitantes

Os esforços que agem sobre um sistema de fixação de ancoragem, podem acontecer de forma isolada ou combinada, sendo eles: (a) tração, (b) compressão, (c) cisalhamento, (d) combinação de forças e (e) flexão.

Figura 4 – Cargas solicitantes em chumbadores.



Fonte: ABECE (2018).

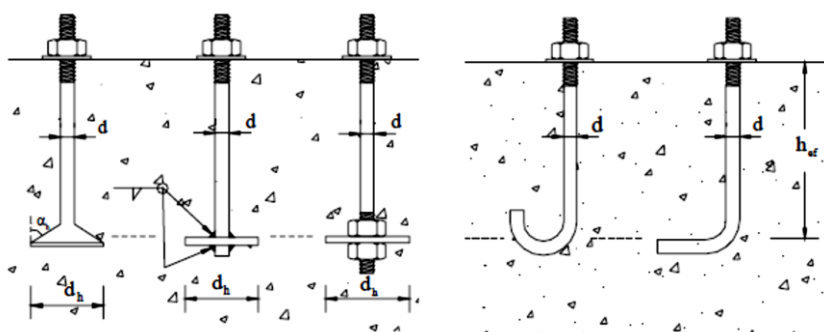
2.3 Chumbadores com ancoragem pré concretagem

Uma vantagem que se deve levar em conta na escolha do método de ancoragem a ser utilizado, é que a ligação entre os dois materiais – aço e concreto – ocorre de forma monolítica, ou seja, com pouca possibilidade de formação de juntas de concretagem, que acabam por diminuir a resistência da ancoragem. Outra vantagem é que este método pode ser utilizado em elementos estruturais com altas taxas de armadura, uma vez que é possível escolher a localização do chumbador.

No entanto, exige cuidado durante a instalação dos chumbadores nas formas, sendo necessário uso de gabaritos bem fixados, a fim de evitar deslocamentos durante a realização da concretagem, uma vez que após enrijecida a estrutura, não é possível realizar modificações na posição dos chumbadores (MARTINS, 2006).

Os chumbadores de pré concretagem podem ser encontrados em dois modelos em relação a extremidade que fica embutida no concreto: dispositivo em forma de cabeça ou em forma de gancho, conforme demonstrado na figura (MARTINS, 2006).

Figura 5 – Chumbadores de pré-concretagem.



Fonte: Martins (2006).

2.4 Chumbadores com ancoragem pós concretagem

O sistema de ancoragem pós concretagem pode ser dividido em dois grupos. No primeiro, estão os chumbadores que são instalados em uma cava deixada durante a concretagem. Neste método, uma barra ou perfil metálico é afixado dentro da cava durante a concretagem, garantindo a ancoragem. Posteriormente, após posicionado o chumbador, é realizada a concretagem da cava. Com o objetivo de evitar problemas como juntas de concretagem, devido a diferentes idades do concreto, é necessário a utilização do perfil metálico, conforme citado acima (MARTINS, 2006).

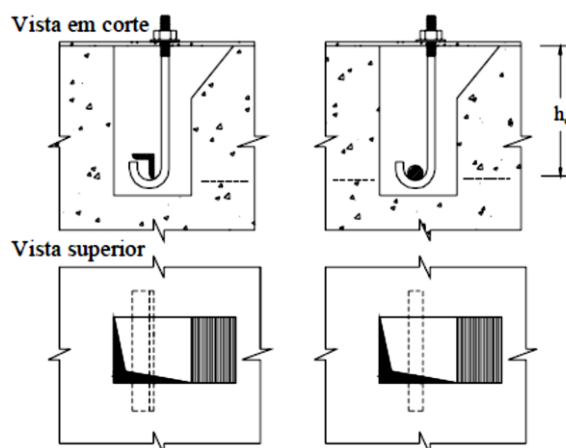
No segundo grupo, os chumbadores são instalados no elemento através da realização de furos no concreto, energia de cravação ou aderência química. O chumbador de expansão, que será estudado neste trabalho, a transferência de cargas se dá principalmente pela expansão radial da ponta do chumbador, que exerce força de atrito contra as faces do furo do substrato (MARTINS, 2006).

No chumbador de segurança (em inglês, *undercut*), a transferência de carga se dá pela expansão da extremidade de um tubo metálico dentro do qual a barra está inserida, garantindo assim, maior segurança em relação ao chumbador anterior, uma vez que há maior garantia de expansão do dispositivo (MARTINS, 2006).

Na ancoragem por aderência química, a resistência é obtida através de um composto químico, em geral, resina epóxi, que é colocada entre as faces do furo e a parte embutida do chumbador (MARTINS, 2006).

Neste trabalho, serão analisados chumbadores de pós concretagem, com foco na resistência de chumbadores de expansão ao esforço cisalhante.

Figura 6 – Chumbadores de pós-concretagem.



Fonte: Martins (2006).

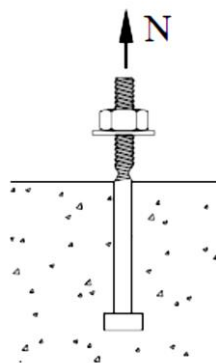
2.5 Configurações de ruptura

A resistência de ancoragem pode variar de acordo com as características do aço e concreto utilizados, assim como as características geométricas dos chumbadores e do elemento de concreto. Tais fatores determinam quais tipos de ruptura podem ocorrer e qual carregamento poderá provocá-la. Abaixo, são apresentadas rupturas de tração e cisalhamento.

2.5.1 Ruptura do aço

O aço é considerado um elemento dúctil, alcançando grandes deformações antes do seu rompimento. O comportamento do aço está relacionado a sua resistência e rigidez, grau de absorção e dissipação de energia do chumbador e sua capacidade de deformação.

Este tipo de ruptura ocorre quando o aço atinge sua tensão de escoamento antes da ruptura do concreto, no entanto, sem sofrer nenhuma interferência da distância do chumbador até a borda da estrutura e o comprimento de embutimento do elemento no concreto (BEMFICA, 2016).

Figura 7 – Ruptura do aço na tração.

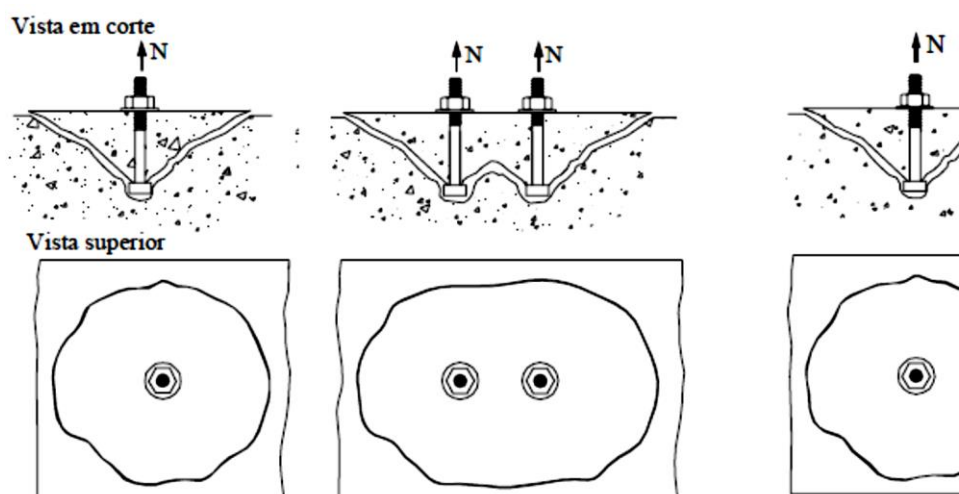
Fonte: Martins (2006).

2.5.2 Ruptura do cone de concreto

Segundo Bemfica (2016), este tipo de ruptura ocorre quando as tensões solicitantes de tração aplicadas a estrutura ultrapassam a tensão de ruptura do concreto a tração, ocorrendo assim, o arrancamento do concreto em forma de cone, conforme figura. Ainda, conforme Martins (2006), a ruptura do cone inicia na cabeça do chumbador e se prolonga até a face superior do concreto. No caso de chumbadores com espaçamento pequeno, pode haver superposição dos cones individuais, formando então, um cone único para todos os chumbadores envolvidos, e para o caso de chumbadores próximos a bordas livres, a rompimento será limitado por esta borda.

A ruptura em forma de cone exige uma carga para que ocorra seu rompimento, e esta carga é influenciada pela resistência do concreto a tração e pelo tamanho da massa de concreto mobilizada para resistir a tal carga. Portanto, quanto maior a profundidade do embutimento do chumbador, maior será o valor da carga para que ocorra o rompimento em cone. Também podem influenciar negativamente na resistência da ancoragem, a proximidade de chumbadores entre si ou a proximidade de chumbadores a uma borda livre.

Figura 8 – Ruptura por cone de concreto.



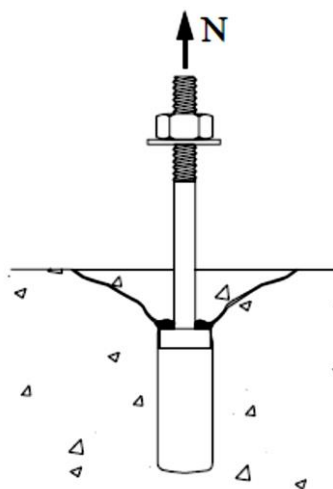
Fonte: Martins (2006).

2.5.3 Ruptura por escorregamento

De acordo com Martins (2006), este tipo de ruptura é caracterizado pelo esmagamento do concreto sobre a cabeça do chumbador, seguido pela formação de cone de ruptura entre a cabeça do chumbador e a superfície do elemento de concreto. Geralmente, ocorre nos casos onde a tensão desenvolvida na cabeça do chumbador é muito alta em função da pequena relação entre o diâmetro da cabeça e o diâmetro do chumbador, em chumbadores com grandes profundidades de embutimento. A probabilidade deste tipo de ruptura diminui quando se aumenta o diâmetro da cabeça do chumbador.

Ainda segundo Bemfica (2016), a ruptura por escorregamento pode ser vista em concreto com baixa resistência onde a ancoragem de expansão possui embutimento de chumbador moderado a profundo. Este tipo de ruptura pode ocorrer de duas formas. Primeiro, é o escorregamento interno do chumbador, quando o atrito entre concreto e chumbador é superior ao atrito entre os elementos que compõem o concreto. Segundo, é o escorregamento entre o corpo do chumbador e o elemento de concreto. Os principais fatores que influenciam neste tipo de ruptura são: a qualidade do chumbador, o atrito entre o furo e o chumbador e a força de expansão para ancoragem de expansão.

Figura 9 – Ruptura por escorregamento.



Fonte: Martins (2006).

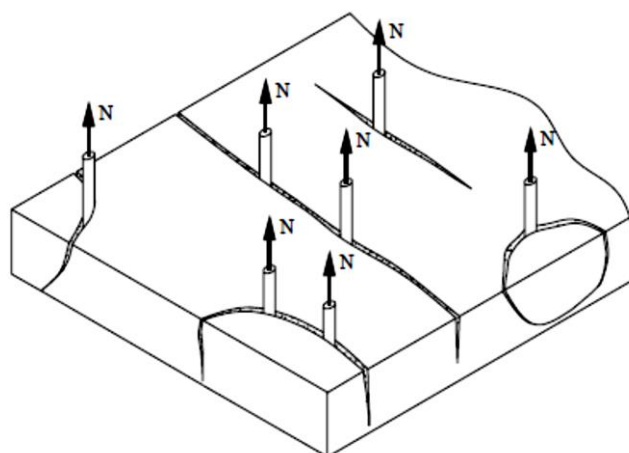
2.5.4 Ruptura por fendilhamento

Segundo Bemfica (2016), a ruptura por fendilhamento ocorre devido a uma acentuada elevação da tensão de tração que provém do elemento de ancoragem, dividindo o concreto em partes, devido a pequena dimensão da peça de concreto ou pela proximidade de dois ou mais chumbadores dispostos em linha.

Já Martins (2006), afirma que o mecanismo de ruptura por fendilhamento não é bem conhecido e a carga última associada não é fácil de ser obtida. O fendilhamento é relevante nos sistemas de ancoragem onde a transferência de carga ao concreto se dá por ancoragem mecânica ou por atrito. A superfície de ruptura tem início na região de transferência de cargas prolongando-se até a borda mais próxima em um plano predominantemente vertical.

Conforme os dois autores afirmam, para evitar este tipo de ruptura procura-se aumentar a distância do chumbador para a borda, aumentar o espaçamento entre os chumbadores, aumentar a espessura do bloco de concreto ou mesmo, através da colocação de armadura.

Figura 10 – Ruptura do concreto por fendilhamento.



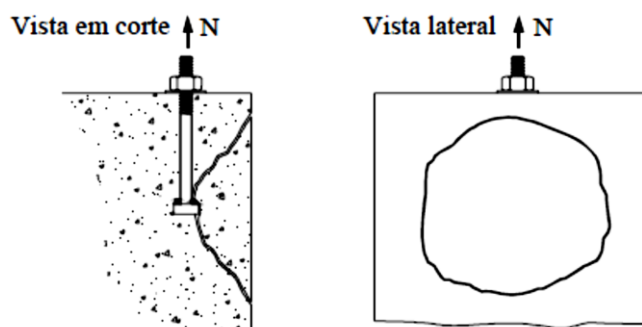
Fonte: Martins (2006).

2.5.5 Ruptura lateral do concreto (*blow-out*)

Conforme afirma Bemfica (2016), a ruptura lateral ocorre quando o chumbador está muito próximo a uma borda livre da uma estrutura de concreto, e devido ao cobrimento não ser suficiente para suportar as tensões que se desenvolvem na região da cabeça do chumbador.

Ainda, segundo Martins (2006), esse tipo de ruptura algumas vezes é acompanhada pelo fendilhamento do concreto na seção vertical, entre o chumbador e a borda livre. A resistência a ruptura lateral é influenciada pela resistência do concreto a tração, da distância do chumbador para a borda livre e do diâmetro da cabeça do chumbador. Para evitar este tipo de ruptura, deve-se utilizar uma armadura de confinamento apropriada em torno da cabeça do chumbador.

Figura 11 – Ruptura lateral do concreto.

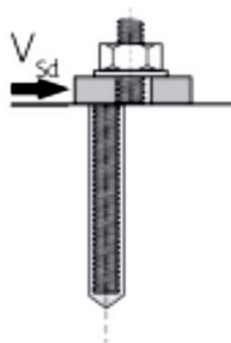


Fonte: Martins (2006).

2.5.6 Ruptura do aço por força cortante sem braço de alavanca

Neste modo de ruptura a falha se caracteriza pelo rompimento da seção metálica do chumbador, exclusivamente pela ação do esforço cortante, ou seja, sem um braço de alavanca que gere momento fletor.

Figura 12 - Ruptura do aço por força cortante sem braço de alavanca.

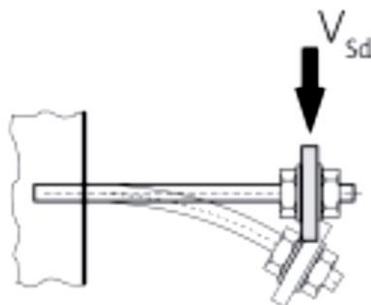


Fonte: ABECE (2018).

2.5.7 Ruptura do aço por força cortante com braço de alavanca

Neste modo de ruptura, a falha é caracterizada pelo rompimento da seção metálica do chumbador devido à combinação da ação dos esforços cortante e momento fletor, este último, devido ao braço de alavanca do chumbador, que acaba por gerar este tipo de esforço sobre o aço.

Figura 13 - Ruptura do aço por força cortante com braço de alavanca.

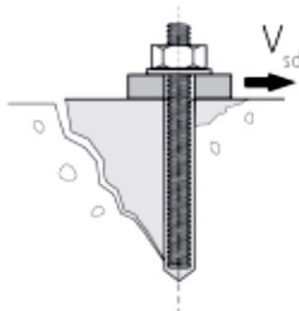


Fonte: ABECE (2018).

2.5.8 Ruptura do concreto por 'Pry-out'

Este tipo de falha é caracterizado pela formação de uma cunha de concreto na porção oposta ao sentido da força cortante, ou seja, uma fissura que começa na profundidade de embutimento do chumbador no concreto, e se estende até a superfície do concreto, conforme a figura.

Figura 14 - Ruptura do concreto por 'Pry-out'.

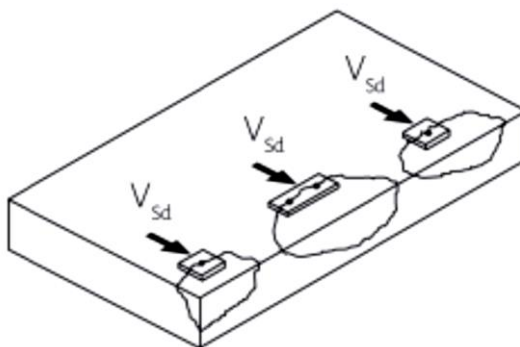


Fonte: ABECE (2018).

2.5.9 Ruptura do concreto por 'Break-out'

Esta falha se caracteriza pela ruptura da borda do elemento de concreto. Desta forma, este modo de ruptura lembra o fendilhamento, que ocorre por meio da ação de forças de tração sobre o chumbador, que acaba por fraturar o concreto. Porém, diferente deste, a ruptura de borda ocorre devido a forças de cisalhamento que agem sobre o chumbador, de forma a criar este defeito.

Figura 15 - Ruptura do concreto por 'Break-out'.



Fonte: ABECE (2018).

2.6 Fatores que influenciam a capacidade de carga de ancoragem

São muitos os fatores que podem influenciar a capacidade final de carga de uma ancoragem, muitos desses fatores são obtidos através de ensaios experimentais. A seguir são listados os principais fatores.

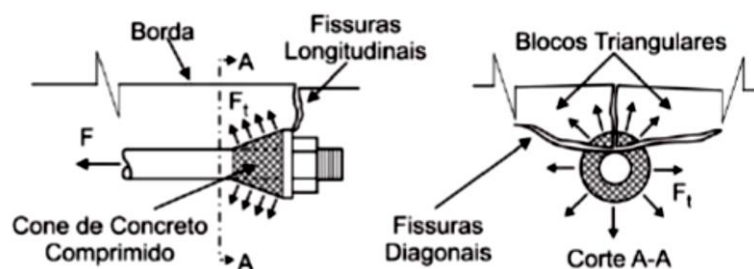
2.6.1 Proximidade da borda

Segundo Bemfica (2016), a capacidade de carga de ancoragem é reduzida a medida que a fixação do chumbador se aproxima da borda livre, devido ao fato da tensão do cone de ruptura ser interrompido pela lateral do bloco, de modo a interferir na transferência de carga, causando a ruptura da estrutura de ancoragem. Esta ruptura também ocorre devido a ancoragens profundas, situadas muito próximas a uma borda livre do bloco de concreto, devido ao aumento do nível de tensões na cabeça do chumbador, alterando assim o modo de ruptura de cone de concreto para uma ruptura lateral. Quando da instalação dos chumbadores de expansão ou na perfuração para a instalação de chumbadores de pós-concretagem, a força de fendilhamento sobre a peça de concreto pode ocasionar fissuras. Deste modo, deve-se uma distância mínima da borda livre maior nas ancoragens pós-concretagem do que nas de pré-concretagem.

2.6.2 Efeito de cunha

Segundo Meira (2005) *apud* Bemfica (2016), pode ocorrer uma ação de cunha que se manifesta devido à compressão de um cone de concreto na parte superior do dispositivo de ancoragem, semelhante a uma cunha. Quando uma força F é aplicada ao chumbador, transfere-se para o concreto, que acaba por criar fissuras diagonais devido a forças radiais de tração e o surgimento de fissuras longitudinais a partir da cabeça do chumbador devido a forças de tração circunferenciais.

Figura 16 - Efeito de cunha.

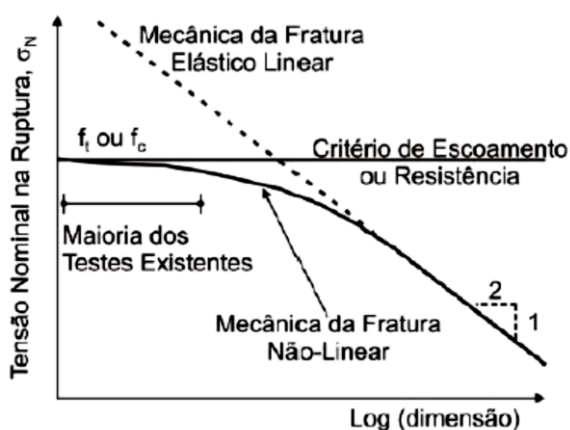


Fonte: Meira (2005) *apud* Bemfica (2016).

2.6.3 “Size effect”

Segundo Bazant (1984) *apud* Bemfica (2016), existem dois tipos de teorias para dimensionar uma carga de ruptura de um elemento estrutural, neste caso, de um chumbador. A teoria da resistência, ou conceito das superfícies de ruptura, está diretamente associada a tensões ou deformações calculadas pelas forças elásticas, plásticas ou visco-plásticas. A outra teoria é a da mecânica da fratura linear elástica, onde o consumo de energia por unidade de incremento do comprimento da fissura serve como critério de ruptura. Na imagem a seguir pode-se visualizar a curva de tensão nominal de ruptura pelo logaritmo da dimensão do elemento estrutural. Esta curva representa a influência do “size effect” em um elemento do concreto. A melhor representação dessa curva é uma transição entre o critério de resistência ou escoamento e a mecânica da fratura elástico linear.

Figura 17 - Efeito de tamanho.

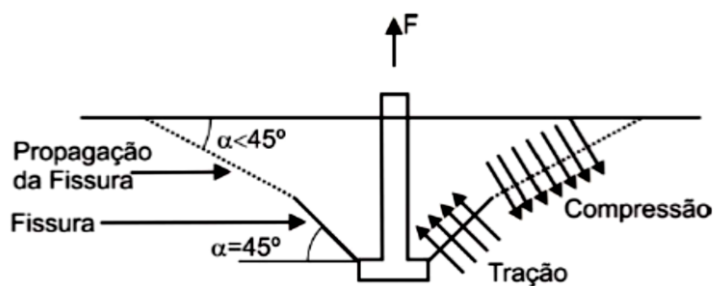


Fonte: Bazant (1984) *apud* Bemfica (2016).

2.6.4 Efeito de disco

Conforme afirma Jermann (1993) *apud* Bemfica (2016), este efeito pode ser observado quanto à orientação do plano principal de tensões, caso o concreto não possua tensão transversal atuando perpendicular à força de arrancamento. Deste modo, a fissura expande na direção da superfície. Já a parte não fissurada, que se situa na superfície de compressão, flete como um disco ao redor do perímetro do chumbador, ocasionando uma mudança no plano de inclinação de ruptura, conforme figura.

Figura 18 - Efeito de disco.



Fonte: Jermann (1993) *apud* Bemfica (2016).

2.6.5 Relação entre o diâmetro do chumbador e a altura de embutimento

Conforme Meira (2005) *apud* Bemfica (2016), a análise de resultados experimentais verificou se há influência do diâmetro do chumbador no cone de ruptura do concreto, no deslocamento e no modo de ruptura. Dessa análise, foi verificado que com uma maior relação entre a altura de embutimento e os diâmetros do dispositivo, foi obtido um comportamento mais rígido, com maior resistência ao arrancamento e menos deslocamento.

2.6.6 Aderência

Conforme Bemfica (2016), os chumbadores devem ser posicionados de modo a permitir que os esforços aos quais estejam sofrendo sejam transmitidos para a estrutura de concreto, sendo por meio de aderência ou de dispositivos mecânicos, ou a combinação dos dois.

Ainda, segundo Meira (2005) *apud* Bemfica (2016), analisa o efeito da aderência entre o aço da haste do pino e o concreto, no comportamento de ancoragem. Para tanto, foi feita uma suposição de que as forças de reação poderiam ser sobrepostas. No cálculo do aumento de carga de ruptura, é suposto que existe uma ligação entre a força necessária para alcançar a tensão de escoamento da barra e o comprimento de uma barra reta, ancorada por aderência. Analisando tais ensaios, ficou constatado que a força estimada entre o aço e o concreto apresentava resultados acima dos obtidos. Desta forma, ocorria um aumento na resistência de ancoragem, um aumento na rigidez inicial do pino e uma redução no deslocamento, com aumento do comprimento aderente.

2.6.7 Posição e orientação da ancoragem

Bemfica (2016), afirma que existe uma relação entre a posição da ancoragem no substrato de concreto e sua orientação em relação a direção em que ocorre o lançamento do concreto, conseqüentemente, afetando a capacidade de carga do chumbador. Este fenômeno ocorre devido a dois fatores principais: acomodação e sedimentação.

A acomodação ocorre quando as partículas finas do concreto, areias e cimento, vazam através da forma, afetando a região onde ocorre, devido ao fato da criação de vazios ao redor dos agregados graúdos, enfraquecendo-a.

Já na sedimentação, as partículas mais densas, que são os agregados, como a brita e areia, acabam por sedimentar, ou seja, por serem mais pesadas, tais partículas descem e se acomodam no fundo da forma, enquanto que na parte superior ficam a água e o ar. Deste fato, pode-se observar que a relação água/cimento na parte superior do elemento de concreto será maior que na parte inferior, e conseqüentemente, a resistência será menor.

Desta forma, a sedimentação sempre irá influenciar na resistência da carga de ruptura, independentemente de onde se faça o posicionamento do pino de ancoragem. Na parte superior do elemento de concreto, os resultados da resistência da carga de ancoragem suportada serão menores do que na parte inferior do elemento.

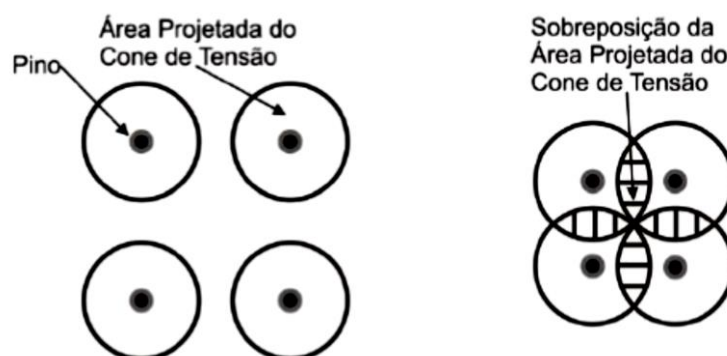
Outro fator de influência é a fissuração que ocorre na parte superior do elemento de concreto, devido a sua retração durante o seu endurecimento. Isto acaba por gerar uma menor resistência do elemento de concreto na parte fissurada.

2.6.8 Ancoragem em grupo

Bemfica (2016) mostrou que ocorre uma diminuição da capacidade de carga final de chumbadores posicionados em grupos, devido ao fato de ocorrer uma sobreposição dos cones de ruptura de cada elemento. Desta forma, a capacidade máxima de cada ancoragem só será atingida quando os elementos estiverem a uma distância mínima entre si, de modo a evitar a sobreposição dos cones de tensão, pois assim, os elementos de ancoragem trabalham de forma individual, conseguindo alcançar sua carga máxima de ruptura.

Essa distância a ser considerada entre os elementos de ancoragem varia de acordo com o estudo a qual se está analisando, existindo diferentes métodos de cálculo, pois considera-se diferentes ângulos do cone de ruptura, resultando assim, em diferentes valores de distâncias.

Figura 19 - Ancoragem em grupo e sobreposição de tensões.



Fonte: Meira (2005) *apud* Bemfica (2016).

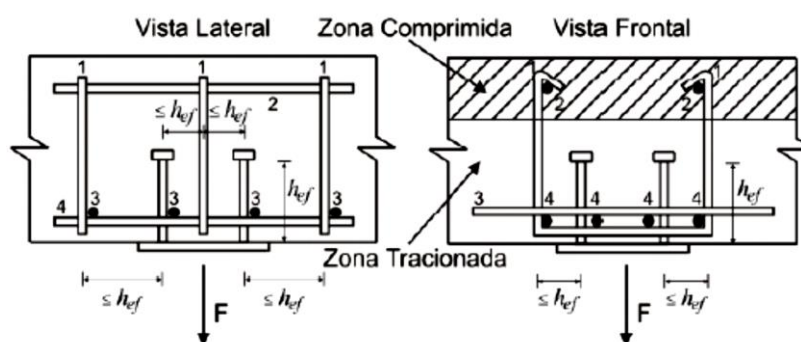
2.6.9 Armadura adicional

Bode e Roik (1987) *apud* Bemfica (2016), relatam em seus estudos que a capacidade final de ancoragem pode ser influenciada pelo uso de armadura adicional.

Este tipo de armadura tem o objetivo de promover a estrutura um comportamento mais dúctil, prevenindo assim a propagação de fissuras.

Ainda que não aumente significativamente a capacidade final da ancoragem, o seu uso melhora o comportamento do elemento base quanto a sua ductibilidade, porém ainda apresenta um cone de tensões semelhante ao do concreto sem armadura adicional. A armadura adicional é utilizada para transmitir o esforço solicitado pelo chumbador da zona tracionada para a zona comprimida, conforme figura.

Figura 20 - Armadura adicional ou armadura de reforço.



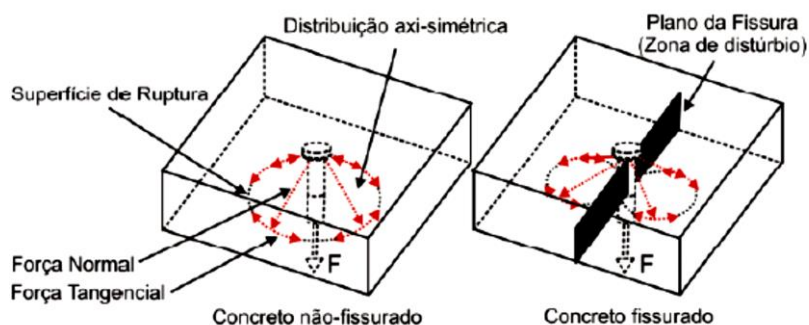
Fonte: CEB Bulletin nº233 (1977) *apud* Bemfica (2016).

2.6.10 Concreto fissurado

Segundo Elgehausen *et al.* (1988) *apud* Bemfica (2016), as fissuras existentes no concreto influenciam a carga resistente final de ancoragem, através da criação de uma zona de distúrbios no estado de tensões, impedindo assim a transferência de carga na forma axi-simétrica, conforme figura. Desta forma, diminui-se a área da superfície disponível para a transmissão de esforços.

Pode-se concluir então que as ancoragens atraem fissuras ou até mesmo induzem a sua formação. Portanto, para um correto dimensionamento das ancoragens, deve-se basear na hipótese de o concreto estar fissurado.

Figura 21 - Fissuração no concreto.



Fonte: Eligehausen e Balogh (1995) *apud* Bemfica (2016).

2.6.11 Excentricidade da carga

Bemfica (2016) afirma que pesquisas com grupos de ancoragem não era considerado o efeito da excentricidade da carga, de modo a adotar como se na realidade a carga estivesse sempre no mesmo eixo do centro do grupo de ancoragem.

Assim, novos estudos foram realizados, buscando analisar este efeito em ancoragens, resultando então em modificações de alguns fatores relacionados a realização de cálculos para o dimensionamento de ancoragens.

2.6.12 Solda

Bemfica (2016) afirma que quando ocorre um grande aumento de temperatura gerada pela solda, conseqüentemente ocorre também uma queda de resistência que pode chegar a 25%, quando se trata de uma ancoragem reta de barra de aço nervurada soldada em uma chapa de aço sob cargas de tração, ocorrendo assim uma interrupção da aderência entre o concreto e o aço.

2.7 Métodos de cálculo

2.7.1 ABNT 6118:2014

Conforme descrito na norma da ABNT 6118:2014, no item 21.2.4, que se refere a cargas aplicadas na superfície de elementos estruturais, no caso de cisalhamento, deve-se verificar o esmagamento de borda do concreto em contato com o chumbador,

de acordo com as seções pertinentes da norma citada ou ainda de literatura técnica especializada. Portanto, deve-se utilizar outras normas para verificação da capacidade de carga suportada por tal elemento de ancoragem.

2.7.2 CAN/CSA-A23.3-04

Conforme a norma Canadense CSA-A23.3/04, que trata sobre projeto de estruturas de concreto, a resistência nominal de cada ancoragem mecânica é influenciada por diversos fatores, como: resistência do concreto, tamanho dos chumbadores, quantidade de chumbadores, espaçamento entre chumbadores, profundidade de embutimento, cargas excêntricas e presença ou não de fissuras no concreto.

2.7.2.1 Resistência do aço ao cisalhamento

2.7.2.1.1 Resistência do aço do chumbador ao cisalhamento

A resistência fatorada de um chumbador mecânico ao cisalhamento, deve ser avaliada por cálculos com base nas propriedades do material pelo qual o chumbador mecânico é constituído, bem como nas suas dimensões físicas.

A resistência fatorada de um chumbador mecânico ou grupo de chumbadores no que diz respeito a sua resistência ao cisalhamento, deve ser analisada de acordo com uma das situações abaixo:

a) Para parafusos com cabeça pré-concretado, chumbador do tipo parafuso em 'L' ou 'J', que funciona principalmente pelo intertravamento mecânico da dobra de 90° ou curva de 180° na sua extremidade inferior, e ancoragens pós-concretadas sem torque controlado no chumbador de expansão, sendo que tais elementos se estendem através do plano de corte, podem ser determinadas através das expressões (1) e (2) abaixo.

$$V_{sr} = nA_{se} \Phi_s 0,6 f_{ut} R \quad (1)$$

Onde:

n = Número de chumbadores em um grupo de ancoragem;

A_{se} = Área transversal efetiva do chumbador;

Φ_s = Fator de resistência do aço para reforço;

f_{ut} = Resistência à tração específica do aço do chumbador;

R = Fator de modificação de resistência.

$$f_{ut} < \{1,9f_y\} \text{ ou } \{860MPa\} \quad (2)$$

Onde:

f_{ut} = Resistência à tração específica do aço do chumbador;

f_y = Resistência à deformação específica do aço do chumbador.

b) Para chumbadores pós-concretados com torque sobre o chumbador, estes se estendem através do plano de cisalhamento, V_{sr} deve ser baseado em 5% da quantidade de resultados dos testes executados e avaliados de acordo com ACI 355.2/355.2R. Alternativamente, a Equação (1) pode ser usada se a área do torque for negligenciada.

2.7.2.1.2 Fator de resistência R

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento do aço, deve-se considerar um fator de modificação de resistência R :

- Para chumbadores mecânicos compostos de aço dúctil:
 - $R = 0,75$
- Para chumbadores mecânicos compostos de aço frágil:
 - $R = 0,65$
- Para chumbadores mecânicos onde predomina ruptura de concreto, ruptura do aço, arrancamento, ou força de pré-tensionamento.
 - Condição A – $R = 1,15$
 - Condição B – $R = 1,00$

A condição 'A' aplica-se quando as potenciais superfícies de falha de concreto são atravessadas por reforço suplementar proporcionado para amarrar o potencial

prisma de falha de concreto no membro estrutural. A condição 'B' aplica-se quando o reforço suplementar não é fornecido ou onde a força de arrancamento ou de alavanca governa.

2.7.2.2 Resistência do concreto ao cisalhamento

2.7.2.2.1 Resistência do concreto na ruptura de borda por cisalhamento

A resistência de ruptura de borda do concreto no cisalhamento de um chumbador mecânico ou grupo de chumbadores, pode ser calculada através da expressão abaixo. Para força de cisalhamento perpendicular à borda em um único chumbador mecânico, deve ser utilizada a expressão (3) abaixo.

$$V_{cbr} = \frac{A_V}{A_{V_0}} \psi_{ed,V} \psi_{c,V} V_{br} \quad (3)$$

Onde:

V_{cbr} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador no cisalhamento;

A_V = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento;

A_{V_0} = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento, sem influência de borda, espaçamento ou espessura dos elementos;

$\psi_{ed,V}$ = Fator de modificação para resistência no cisalhamento para considerar distâncias de borda menores que $1,5c_1$;

$\psi_{c,V}$ = Fator de modificação para resistência em cisalhamento devido a fissuração;

V_{br} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador no cisalhamento, considerando concreto fissurado.

2.7.2.2.1.1 Determinação de A_{V_0}

Para o cálculo de A_{V_0} , é necessário determinar o valor de c_1 , que corresponde a distância entre a borda livre do elemento de concreto, até o eixo do chumbador a

ser analisado, neste caso, na mesma direção que a força de cisalhamento exerce sobre o chumbador. A expressão para determinação de A_{Vo} (4) encontra-se abaixo.

$$A_{Vo} = 4,5c_1^2 \quad (4)$$

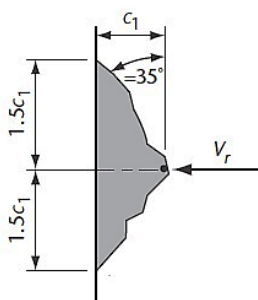
Onde:

A_{Vo} = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento, sem influência de borda, espaçamento ou espessura dos elementos;

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção.

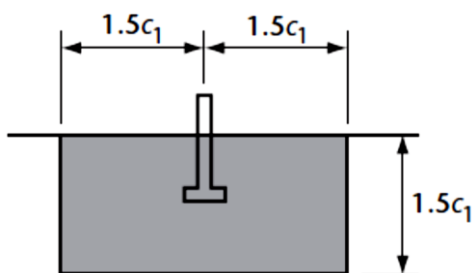
Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.

Figura 22 - Vista superior para determinação de A_{Vo} .



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

Figura 23 - Vista lateral para determinação de A_{Vo} .



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.2.2.1.2 Determinação de A_V

Para determinar o valor de A_V , deve-se levar em conta principalmente a altura a ser considerada e o valor de c_2 . A altura, em caso de placas muito finas, deverá ser usada totalmente, até o limite estipulado em $1,5c_1$. Já o valor de c_2 a ser determinado é a distância do centro do eixo de ancoragem até a borda de concreto na direção ortogonal a c_1 . Caso a altura da placa seja menor que $1,5c_1$, deve-se utilizar a então o valor de h , que corresponde a altura total da placa, através da expressão (5), conforme imagem a seguir.

$$A_V = 3c_1 \times h \quad (5)$$

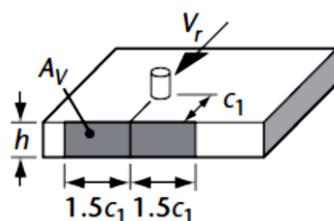
Onde:

A_V = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento;

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção. Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.

h = Espessura do elemento em que o chumbador é ancorado, medida paralelamente ao ao eixo de ancoragem.

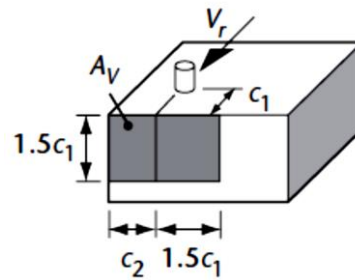
Figura 24 - Determinação de A_V para elementos finos.



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

Outra possibilidade ocorre quando a placa é mais alta do que $1,5c_1$. Desta forma, o valor a ser utilizado como altura deve ser o próprio limite, que corresponde a $1,5c_1$. Assim, tem-se a expressão (6) a seguir.

Figura 25 - Determinação de A_V para elementos robustos.



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

$$A_V = 2,25c_1^2 + 1,5c_1c_2 \quad (6)$$

Onde:

A_V = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência ao cisalhamento;

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção. Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.

c_2 = Distância do centro de um eixo de ancoragem até a borda de concreto na direção ortogonal a c_1 .

2.7.2.2.1.3 Determinação de V_{br}

A resistência de ruptura do concreto no cisalhamento de um único chumbador em concreto fissurado pode ser calculada através da expressão (7):

$$V_{br} = 0,58 \left(\frac{l}{d_o} \right)^2 \sqrt{d_o} \Phi_c \sqrt{f'_c} c_1^{1,5} R \quad (7)$$

Onde:

V_{br} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador no cisalhamento, considerando concreto fissurado.

l = vide lista de símbolos;

d_o = Diâmetro externo do chumbador ou diâmetro do eixo do pino do chumbador;

Φ_c = Fator de resistência do concreto para concreto, cujo valor de $\Phi_c = 0,65$;

f'_c = Resistência à compressão específica do concreto;

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção.

Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento;

R = Fator de modificação de resistência.

2.7.2.2.1.4 Verificação de c_1 a ser utilizado

Para o caso especial de chumbadores em um elemento de concreto estreito ($c_2 < 1,5c_1$) ou muito fino ($h < 1,5c_1$), o valor de c_1 utilizado nas equações (6), (7) e (11) deve ser:

$$\frac{c_2}{1,5} \text{ se } (c_2 > h) \quad (8)$$

$$\frac{h}{1,5} \text{ se } (c_2 < h) \quad (9)$$

Onde:

c_2 = Distância do centro de um eixo de ancoragem até a borda de concreto na direção ortogonal a c_1 .

h = Espessura do elemento em que o chumbador é ancorado, medida paralelamente ao ao eixo de ancoragem.

2.7.2.2.1.5 Fator de modificação dos efeitos de borda

Pode ser calculado através das expressões (10) e (11):

$$\psi_{ed,v} = 1,0 \text{ se } (c_2 > 1,5c_1) \quad (10)$$

$$\psi_{ed,v} = 0,7 + 0,3 \frac{c_2}{1,5c_1} \text{ se } (c_2 < 1,5c_1) \quad (11)$$

Onde:

$\psi_{ed,v}$ = Fator de modificação para resistência no cisalhamento para considerar distâncias de borda menores que $1,5c_1$;

c_2 = Distância do centro de um eixo de ancoragem até a borda de concreto na direção ortogonal a c_1 .

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção. Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.

2.7.2.2.1.6 Fator de modificação da resistência ao cisalhamento devido à fissuração

Para chumbadores localizadas em uma região de concreto onde a análise inclui os efeitos de temperatura e retração nas cargas de serviço, um fator de modificação $\psi_{c,v} = 1,4$ pode ser utilizado.

Para chumbadores localizadas em uma região do concreto onde a análise indica fissuração em nível de carga de serviço, os seguintes fatores de modificação podem ser usados:

Tabela 1 – Valores do coeficiente de modificação da resistência ao cisalhamento devido à fissuração.

Para chumbadores em concreto fissurado sem reforço de borda ou borda reforçada com barra menor que 16,0 mm.	$\psi_{c,v} = 1,0$
Para chumbadores em concreto fissurado com reforço de borda com barra de 16,0 mm ou maior entre o chumbador e a borda.	$\psi_{c,v} = 1,2$
Para chumbadores em concreto fissurado com reforço de borda, com barras de 16,0 mm ou maior entre o chumbador e a borda, e com o reforço de borda contido dentro de estribos espaçados a não mais de 100 mm de distância.	$\psi_{c,v} = 1,4$

Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.2.2.2 Ruptura do concreto devido ao braço de alavanca

A resistência do concreto quanto a ruptura devido ao braço de alavanca pode ser calculada através da expressão (12).

$$V_{cpr} = k_{cp} N_{cbr} \quad (12)$$

Onde:

V_{cpr} = Resistência fatorada ao 'Pry – out' do concreto de um único chumbador;

k_{cp} = Coeficiente de resistência à ruptura por 'Pry – out';

N_{cbr} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador na tração.

2.7.2.2.2.1 Coeficiente de ruptura

O coeficiente de ruptura pode ser encontrado em uma das expressões a seguir, (13) ou (14).

$$k_{cp} = 1,0 \text{ se } h_{ef} < 65mm \quad (13)$$

$$k_{cp} = 2,0 \text{ se } h_{ef} \geq 65mm \quad (14)$$

Onde:

k_{cp} = Coeficiente de resistência à ruptura por 'Pry – out';

h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador.

2.7.2.2.2.2 Resistência do concreto na ruptura de borda por tração

Pode ser encontrado através da expressão (15).

$$N_{cbr} = \frac{A_N}{A_{NO}} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_{br} \quad (15)$$

Onde:

N_{cbr} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador na tração;

A_N = Área projetada de falha de concreto de um chumbador, para cálculo da resistência de tração;

A_{No} = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência em tração, quando não limitada pela distância de borda ou espaçamento;

$\psi_{ed,N}$ = Fator de modificação para resistência na tração para considerar distâncias de borda menores que $1,5h_{ef}$;

$\psi_{c,N}$ = Fator de modificação para a resistência na tração devido as fissurações;

$\psi_{cp,N}$ = Fator de modificação para resistência de ruptura do concreto por 'Break – out' devido a falha de divisão prematura.

N_{br} = Resistência fatorada ao 'Break – out' do concreto de um único chumbador na tração, considerando concreto fissurado.

2.7.2.2.2.1 Determinação do A_N

Para calcular o valor de A_N , deve-se considerar a expressão (16), tomando como base a figura a seguir.

$$A_N = 4,5h_{ef}^2 + 3c_1h_{ef} \quad (16)$$

Onde:

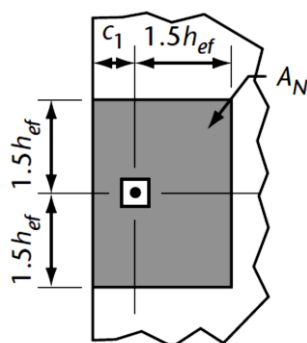
A_N = Área projetada de falha de concreto de um chumbador, para cálculo da resistência de tração;

h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador;

c_1 = Distância do centro do eixo de ancoragem até a borda do concreto em uma direção.

Onde a força de cisalhamento é aplicada ao chumbador, c_1 está na direção da força de cisalhamento.

Figura 26 – Vista superior para determinação de A_N .



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.2.2.2.2 Determinação de A_{No}

O valor de A_{No} pode ser determinado através da expressão (17), em conjunto com as figuras que ilustram os termos da expressão.

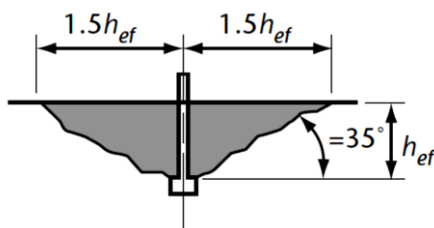
$$A_{No} = 9h_{ef}^2 \quad (17)$$

Onde:

A_{No} = Área projetada de falha de concreto de um chumbador para cálculo da resistência em tração, quando não limitada pela distância de borda ou espaçamento;

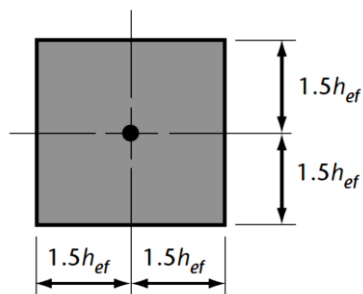
h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador.

Figura 27 - Vista lateral com altura de embutimento efetiva.



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

Figura 28 - Vista superior para determinação de A_{No} .



Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.2.2.2.3 Fator de modificação dos efeitos de borda

O fator de modificação dos efeitos de borda pode ser encontrado através do uso das expressões (18) e (19).

$$\psi_{ed,N} = 1 \text{ se } c_{min} \geq 1,5h_{ef} \quad (18)$$

$$\psi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{min}}{1,5h_{ef}} \text{ se } c_{min} < 1,5h_{ef} \quad (19)$$

Onde:

$\psi_{ed,N}$ = Fator de modificação para resistência na tração para considerar distâncias de borda menores que $1,5h_{ef}$;

c_{min} = Menor distância de borda;

h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador.

2.7.2.2.2.4 Fator de modificação de resistência na tração devido a fissuração

Quando um chumbador está localizado em uma região de um elemento concreto onde a análise indica que não há fissuração nos níveis de carga de serviço, o seguinte fator de modificação pode ser usado:

$\psi_{c,N} = 1,4$ para chumbadores de pós – concretagem quando $k = 7,0$ é usado no cálculo de N_{br}

Quando k usado N_{br} é retirado de um relatório de avaliação do produto ACI 355.2/ 355.2R para chumbadores de pós-concretagem aprovadas para uso em concreto fissurado e não fissurado, o valor $\psi_{c,N}$ e k deve ser baseado no relatório de avaliação do produto.

Para chumbadores de pós-concretagem aprovados para uso somente em concreto não fissurado de acordo com ACI 355.2/355.2R, o valor de k no relatório de avaliação do produto ACI 355.2/355.2R a ser usado na equação N_{br} e em $\psi_{c,N}$ deve ser 1,0.

Quando a análise indicar que há fissura nos níveis de carga de serviço, $\psi_{c,N}$ deve ser considerado como 1,0 para chumbadores de pré e pós-concretagem.

2.7.2.2.2.5 Fator de modificação devido a divisão prematura do concreto

O fator de modificação para chumbadores pós-concretagem projetadas para concreto sem fissuração e sem reforço suplementar, pode ser encontrado através das expressões (20) e (21) abaixo.

$$\psi_{cp,N} = 1 \text{ se } c_{a,min} \geq c_{ac} \quad (20)$$

$$\psi_{cp,N} = \frac{c_{a,min}}{c_{ac}} \geq \frac{1,5h_{ef}}{c_{ac}} \text{ se } c_{a,min} < c_{ac} \quad (21)$$

Onde:

$\psi_{cp,N}$ = Fator de modificação para resistência de ruptura do concreto por 'Break – out' devido a falha de divisão prematura;

c_{min} = Menor distância de borda;

c_{ac} = Distância crítica de borda;

h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador.

O valor do coeficiente c_{ac} , a menos que determinado a partir de testes de tensão de acordo com a ACI 355.2/355.2R, a distância crítica da borda não deve ser menor que:

Tabela 2 – Valores do coeficiente c_{ac} , determinado através da altura efetiva de embutimento.

Chumbadores ‘undercut’	$2,5h_{ef}$
Chumbadores controlados por torque	$4h_{ef}$
Chumbadores controlados por deslocamento	$4h_{ef}$

Fonte: CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.2.2.2.6 Determinação do N_{br}

A resistência de ruptura do concreto de um único chumbador na tração em concreto fissurado pode ser determinada através da expressão (22).

$$N_{br} = k\Phi_c\sqrt{f'_c}h_{ef}^{1,5}R \quad (22)$$

Onde:

N_{br} = Resistência fatorada ao ‘Break – out’ do concreto de um único chumbador na tração, considerando concreto fissurado.

k = Coeficiente de resistência à ruptura por ‘Break – out’;

Φ_c = Fator de resistência do concreto para concreto, cujo valor de $\Phi_c = 0,65$;

f'_c = Resistência à compressão específica do concreto;

h_{ef} = Profundidade efetiva de embutimento do chumbador;

R = Fator de modificação de resistência.

O fator $k = 7$ pode ser adotado para chumbadores de pós-concretagem. Para que se possa aumentar este fator, devem ser realizados testes específicos dos produtos de acordo com a norma ACI 355.2/355.2R. Porém, o valor máximo a ser adotado não deve exceder $k = 10$.

2.7.3 ACI 318-14

A norma americana ACI 318-14, desenvolvida pela Instituto Americano de Concreto, é a principal referência em normas de concreto em todo mundo. Desta forma, o método de cálculo apresentado acima pela norma canadense, é baseado

quase inteiramente na norma ACI 318-14, de forma a não ser de interesse do estudo analisar novamente os mesmos parâmetros, visto que os resultados obtidos serão os mesmos. Assim, o método de cálculo adotado será o da norma canadense CAN/CSA-A23.3-04.

2.7.4 ABNT NBR 8800:2008

A norma brasileira 8800:2008, que trata sobre “Projetos de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, possui também cálculos para verificação de cisalhamento em ligações parafusadas. Neste trabalho, será utilizada a fórmula pertinente a este assunto para determinar a resistência ao cisalhamento de um chumbador. A fórmula (23) deve ser utilizada para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (23)$$

Onde:

$F_{v,Rd}$ = Resistência ao cisalhamento do aço do chumbador;

A_b = Área da seção transversal do chumbador;

f_{ub} = Resistência à tração do aço o chumbador.

No entanto, o objetivo do trabalho é encontrar as cargas finais, ou seja, as cargas de ruptura do chumbador. Desta forma, não será utilizado o coeficiente de ponderação das resistências γ_{a2} . Assim, a fórmula (24) a ser utilizada segue abaixo.

$$F_{v,Rd} = 0,4A_b f_{ub} \quad (24)$$

Onde:

$F_{v,Rd}$ = Resistência ao cisalhamento do aço do chumbador;

A_b = Área da seção transversal do chumbador;

f_{ub} = Resistência à tração do aço o chumbador.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada pelo presente trabalho, consiste em comparação entre dados de pesquisa e teóricos, com resultados de análises experimentais.

Para tanto, inicialmente foi realizada uma extensa revisão bibliográfica, tratando de assuntos como chumbadores de expansão, métodos de ruptura do concreto, métodos de ruptura do aço e forças exercidas sobre os elementos, tendo como foco principal a força de cisalhamento exercida sobre o chumbador.

Após a revisão de tal bibliografia, buscou-se analisar métodos de cálculos que satisfizessem as necessidades do presente trabalho, ou seja, um método pelo qual seria possível calcular a resistência tanto do chumbador quanto do concreto. Adotaram-se desta forma, os métodos de cálculo apresentados pelas normas canadense CAN/CSA-A23.3-04 e brasileira ABNT NBR 8800:2008.

Adotou-se ainda como referência, os resultados de ensaios encontrados no catálogo da empresa Âncora®, fabricante dos chumbadores utilizados para os ensaios experimentais.

Posteriormente, criou-se um programa experimental para obtenção de resultados que pudessem ser comparados com os dados teóricos da norma brasileira e canadense, bem como com os valores encontrados no catálogo da empresa Âncora®.

O programa experimental consistiu na confecção de 9 blocos de concreto, com 3 diferentes traços. Posteriormente, era realizada a furação em duas faces opostas dos blocos. Colocava-se sobre o bloco um suporte, que serviu para distribuição da carga do equipamento de ensaio para os chumbadores. Este suporte era fixado junto ao bloco com a utilização de dois chumbadores, sendo cada um deles ancorado em uma face do bloco. Os chumbadores foram instalados utilizando um torquímetro, para medir a força a qual foi utilizada para a expansão do chumbador. Após, colocava-se o conjunto do bloco, suporte e chumbadores na máquina de ensaio, e aplicava-se carga de compressão até a ruptura dos chumbadores. Com o ensaio, foram obtidos os valores de resistência ao cisalhamento dos chumbadores, que poderão ser utilizado para comparar com os métodos de cálculo e com o catálogo da empresa Âncora®.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Blocos de Concreto

Inicialmente, procurou-se determinar as dimensões que o bloco de concreto deveria ter para que as forças exercidas sobre o chumbador, não apresentasse influência sobre os resultados obtidos. Desta forma, analisou-se a norma NBR 14827:2002, que discorre sobre “Chumbadores instalados em elementos de concreto ou alvenaria - Determinação de resistência à tração e ao cisalhamento”. A seguir, apresenta-se a tabela que determina através do embutimento efetivo e do tipo de carga solicitante, quais devem ser as dimensões entre chumbadores ou distância do chumbador até a borda.

Tabela 3 - Espaçamentos mínimos para chumbadores com carga de tração ou cisalhamento.

Chumbadores de adesão química		Todos os demais chumbadores	
Espaçamento mínimo entre chumbadores ou entre apoios.	Distância mínima entre chumbador e borda ou entre chumbador e apoios.	Espaçamento mínimo entre chumbadores ou entre apoios.	Distância mínima entre chumbador e borda ou entre chumbador e apoios.
Cargas de tração			
$2,0 h_{ef}$	$1,0 h_{ef}$	$4,0 h_{ef}$	$2,0 h_{ef}$
Cargas de cisalhamento			
$4,0 h_{ef}$	$2,0 h_{ef}$	$4,0 h_{ef}$	$2,0 h_{ef}$

Fonte: NBR 14827:2002.

Desta forma, adotou-se valor maior a $2,0 h_{ef}$, visando que o concreto não apresentasse ruptura de borda ou houvesse alteração nos resultados de ensaio dos chumbadores. Assim, optou-se por adotar as dimensões de 30 centímetros por 30 centímetros de largura, e 40 centímetros de altura. A altura do bloco foi idealizada com mais altura devido ao método de ensaio dos chumbadores, ser de compressão

vertical, e para que não houvesse qualquer influência da altura nos resultados do ensaio, optou-se por aumentar a dimensão do comprimento do bloco.

4.1.1 Formas

As formas foram executadas em madeira, material este de uso comum em todas as obras, e apresenta bom uso para o molde de concreto. Com a definição das dimensões dos blocos de concreto e suas quantidades, realizou-se o planejamento de corte das formas, com a seguida marcação das partes na madeira. Posteriormente foram cortadas todas as peças, e realizada a montagem utilizando parafusos para fixação das chapas entre si.

Foram montadas três grupos de formas, cada uma delas contendo três blocos de concreto nas dimensões já citadas, de forma a totalizar nove blocos de concreto.

Figura 29 - Formas para moldagem dos blocos.



Fonte: Autor.

4.1.2 Traço do concreto

Foram utilizados três diferentes tipos de traço para a realização da concretagem, pois buscou-se atender a três resistências de concreto, sendo de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa. Para tanto, utilizou-se o mesmo traço utilizado por Lorber

(2019). O traço foi desenvolvido de modo unitário, ou seja, a quantidade de areia, brita e aditivo, servem para cada quilograma de cimento.

Tabela 4 - Traços de concreto utilizados.

Traço	Classe	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita 1 (Kg)	Fator Água/Cimento	Aditivo (g)
A	C25	1	2,50	3,33	0,60	-
B	C35	1	2,51	2,99	0,53	0,192
C	C45	1	1,73	2,32	0,42	0,282

Fonte: Lorber (2019).

O objetivo da utilização de três traços foi para verificar a interação que ocorre entre o chumbador e o concreto, analisando desta forma, se a alteração da resistência do concreto, implica em alterações na resistência ao cisalhamento do chumbador.

4.1.3 Concreto

Inicialmente, buscou-se obter o volume total que seria necessário para concretar os 9 blocos, juntamente com 9 corpos de prova. Desta forma, obteve-se o valor de 132 litros de concreto para cada traço. O concreto para cada traço foi realizado de uma única vez na betoneira com capacidade para 200 litros.

O cimento utilizado foi da marca Votorantim, classificado com Cimento Portland V (CP-V), que tem como característica a alta resistência inicial (ARI).

A areia teve todo o volume necessário separado e espalhado sobre uma lona em ambiente exposto ao sol para sua secagem. Após tal etapa, a areia passou por uma peneira para retirar qualquer material orgânico presente, como folhas, a fim de evitar qualquer presença desses materiais no concreto. A areia foi armazenada em ambiente seco até o dia da concretagem.

Figura 30 - Areia exposta ao sol para secagem.



Fonte: Autor.

A brita 1 teve seu volume separado e foi lavado na betoneira de 200 litros, até que a cor da água resultante da lavagem fosse constante, o que se deu em aproximadamente 3 lavagens por volume. Posteriormente, a brita foi distribuída sobre uma lona para que fosse retirada toda a umidade. Ao final, a brita foi armazenada em caixas até seu uso.

Figura 31 - Figura da esquerda mostra a lavagem da brita e na direita a secagem ao sol.



Fonte: Autor.

O aditivo utilizado nos traços B e C foi o Viapol Eucon PL 300, que é um aditivo líquido plastificante de pega normal, utilizado para atender a requisitos como fluidez e manutenção da trabalhabilidade.

No que diz respeito a verificação da trabalhabilidade do concreto, utilizou-se do ensaio de abatimento do cone de concreto, conhecido também como '*Slump Test*'. Neste ensaio, que é determinado pela NBR NM 67:1998, deve preencher o cone com três camadas igualmente distribuídas, compactadas com 25 golpes da haste padrão em cada camada. Posteriormente, deve-se retirar verticalmente o cone. Coloca-se o cone ao lado do concreto e mede-se o abatimento que ocorreu quando o cone foi retirado.

Figura 32 - Ensaio de abatimento de tronco de cone ou 'Slump'.



Fonte: Autor.

Para os traços definidos acima, foi estipulado que o valor de abatimento do cone de concreto deveria ser de 140 milímetros, podendo variar 20 milímetros para mais ou para menos. Portanto, qualquer valor obtido entre 120 milímetros e 160 milímetros, seria satisfatório.

Para realizar a concretagem, iniciou-se o procedimento com o traço A, seguido pelos traços B e C, respectivamente. Todos os materiais foram separados e pesados, para que não houvesse desvios na resistência do concreto. Colocou-se inicialmente 70% da água na betoneira, seguido de todo volume de brita. A seguir, adicionou-se o

cimento pouco a pouco, de modo a criar uma nada de cimento. Por último, acrescentou-se a areia, pouco a pouco, de modo que fosse possível obter uma mistura homogênea. Adicionou-se o restante da água, para completar os 100%. O próximo passo somente foi utilizado nos traços B e C, que se tratava da incorporação do aditivo plastificante, encerrando assim a produção do concreto.

Após a produção do concreto e utilizando as formas fabricadas, foram moldados os blocos. O concreto foi adicionado até a superfície da forma, e posteriormente vibrado com auxílio de equipamento vibrador. Inseriu-se o vibrador no concreto com o objetivo de retirar possíveis vazios e excesso de ar incorporado ao concreto. A vibração do concreto encerrou-se quando parou de se perceber o aparecimento de bolhas na superfície do concreto. A finalização da superfície do bloco se deu com a ajuda de uma desempenadeira. O último passo foi a identificação dos blocos com o concreto que qual traço eles foram preenchidos.

Figura 33 - Blocos de concreto moldados e identificados.



Fonte: Autor.

Após a concretagem, tomou-se o cuidado de molhar os blocos ao menos 3 vezes ao dia, para evitar qualquer tipo de fissuração devido a retração do concreto. Ao quinto dia da concretagem, foi realizada a desforma dos blocos. Em seguida, os mesmos receberam novamente uma identificação, que foi colocada em sua superfície utilizando giz de cera.

Para a confecção dos corpos de prova, tomou-se como base a norma ABNT NBR 5738:2015, que trata sobre “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”. A partir dela, obtém-se que para o diâmetro de 10 centímetros, que foi utilizado na confecção dos corpos de prova, a moldagem deviria ocorrer em 2 camadas, sendo aplicados 12 golpes com a haste padrão em cada camada. É necessário ainda, lubrificar as formas cilíndricas, com óleo mineral ou outro material que não reaja com o concreto.

No que diz respeito a coleta de amostras de concreto para confecção dos corpos de prova, deve-se levar em consideração a norma NBR NM 33:1998. A recomendação da norma é que se deve retirar as amostras quando do volume total de concreto, já forem utilizados pelo menos 15% e não mais que 85%, para betoneiras.

Desta forma, observando as duas normativas pertinentes ao assunto, realizou-se a moldagem dos corpos de prova. Os mesmos, foram identificados no momento da concretagem, e guardados em ambiente sem vibrações e livre das intempéries.

Após passadas 24 horas da concretagem dos corpos de prova, estes foram desformados, e novamente identificados giz de cera em seu topo. Posteriormente, foram colocados submersos em água, para evitar qualquer tipo de fissuração, mantendo-os submersos em água até o momento do ensaio.

4.2 Suporte

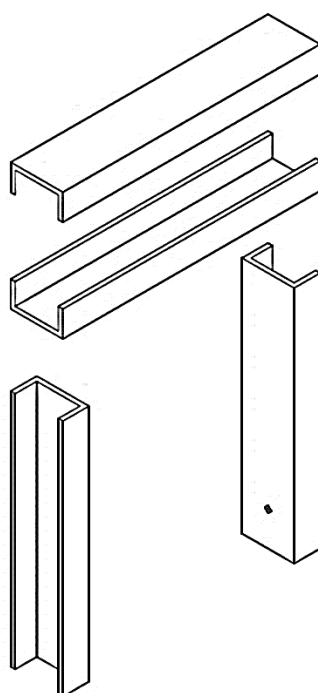
Para a realização do ensaio, fez-se necessário a confecção de um suporte que pudesse distribuir igualmente a força concentrada exercida pelo equipamento de ensaio, aos dois chumbadores. O suporte deveria ser resistente o suficiente para não sofrer deformações e suportar a carga até a ruptura dos chumbadores e finalização do ensaio.

Assim, buscou-se utilizar perfil laminado U, pois além de apresentar maior inércia de sessão e resistência a flambagem local, possui também uma alma mais robusta, de modo que não haveria rasgamento do perfil na sessão do furo onde o chumbador seria inserido.

O perfil utilizado para a confecção do suporte foi um perfil U laminado, com dimensão de 3” com 2ª alma. Possui 38,05 milímetros de aba, 6,55 milímetros de espessura de alma, 76,2 milímetros de largura e 7,4 quilogramas por metro linear de perfil. A fabricação do suporte se deu por serviço terceirizado, sendo responsável pela

execução uma serralheria. As dimensões do suporte levaram em conta a largura do bloco de concreto, que era de 30 centímetros, e sua altura, 40 centímetros. Desta forma, considerando metade da altura o bloco, mais a folga abaixo do furo, somado o espaçamento entre o bloco e o suporte, chegou-se no valor de 30 centímetros de altura. A largura efetiva do suporte foi de 30 centímetros. Na imagem a seguir, pode-se notar de que forma foram cortados e soldadas as peças que compuseram o suporte.

Figura 34 - Esquema de fabricação do dispositivo de suporte.



Fonte: Autor.

Optou-se por confeccionar 2 unidades deste suporte, visando um melhor rendimento no momento do ensaio, visto que enquanto um suporte era utilizado para ensaiar os chumbadores de um bloco, o outro já podia ser montado para posterior realização do ensaio, agilizando assim o processo.

Figura 34 - Dispositivos de suporte prontos.



Fonte: Autor.

4.3 Chumbadores

Os chumbadores utilizados são da marca Âncora[®], que atua no mercado nacional desde 1992, e é referência em sistemas de fixação na construção civil.

O chumbador escolhido para realização do ensaio foi o de expansão controlada por torque. O chumbador PBA, como é denominado pela empresa, é o que obtém melhor desempenho na ancoragem mecânica, segundo a própria empresa. Outras características incluem, por exemplo, que o chumbador foi desenvolvido no mesmo diâmetro que as brocas convencionais, facilitando assim sua instalação. Ainda, não possui limitação quanto a profundidade do furo para instalação e pode ter aplicação de carga imediatamente após a instalação do mesmo, pois depende exclusivamente da expansão da presilha para seu funcionamento.

No que diz respeito ao diâmetro do chumbador escolhido, optou-se por um tamanho considerado comum, ou seja, fácil de ser encontrado, e que ao mesmo tempo fosse amplamente utilizado na construção civil. Desta forma, optou-se pelo diâmetro de rosca de 3/8", aproximadamente 10 milímetros de diâmetro. Quanto ao comprimento do chumbador, utilizou-se o que foi encontrado comercialmente na cidade de Santa Cruz do Sul, no caso 3.3/4", ou cerca de 95 milímetros. Na imagem

abaixo, que demonstra a tabela com todos os dados dos chumbadores PBA, pode-se ver melhor as características do chumbador utilizado.

Figura 36 - Chumbador utilizados no programa experimental.



Fonte: Âncora.®

Figura 37 - Tabela de características dos chumbadores.

Código	Diâmetro da rosca (pol)	Comprimentos		Furo		Embut. hef	Distâncias ⁽³⁾ (mm)		Espessura máxima à fixar (mm)	Chave (pol)	Torque de aperto (kgf.m)	Cargas últimas ⁽²⁾ (kgf)	
		Chumbador (pol)	Rosca mín. (mm)	Diâm. (pol - mm)	Prof. (1) (mm)		Fixador Fixador	Fixador Borda				Tração	Corte
X38214C	3/8"	2.1/4"	21	3/8" - 9,5	55	45	135	67	3	9/16"	3	2.210	1.703
X38234C		2.3/4"	27						15				
X38300C		3"	28						22				
X38312C		3.1/2"	41						14				
X38334C		3.3/4"	48						21				
X38500C		5"	75						52				

Fonte: Âncora.®. Alterada pelo autor.

No que tange os materiais no qual este chumbador pode ser utilizado, limita-se unicamente ao substrato de concreto, e ao bloco estrutural, desde que este esteja preenchido com graute.

Figura 38 - Tabela de usos do chumbador PBA.

MATERIAL BASE	Concreto	Bloco Concreto	Bloco Cerâmico	Bloco Estrutural*	Metal	Tijolo Maciço*	Pedra	Madeira	Drywall	Cimentícia	OSB
PRODUTO											
PBA	✓			✓							

Fonte: Âncora.®

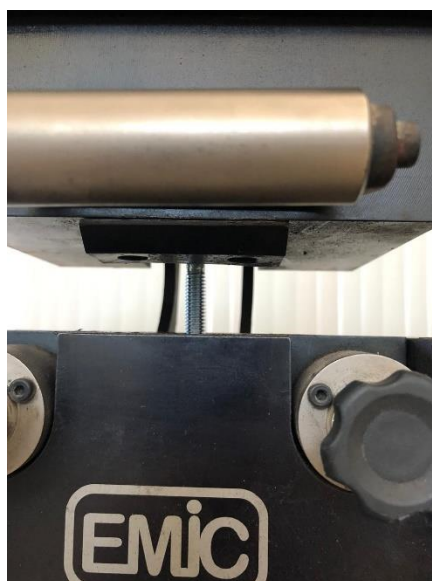
O ensaio de cisalhamento do chumbador ancorado no bloco de concreto, tinha por objetivo principal, obter os valores da resistência direta ao cisalhamento. Porém, como ensaio complementar, realizou-se o ensaio de escoamento do aço do

chumbador, com o objetivo de determinar qual a tensão de escoamento do aço utilizado na fabricação do chumbador.

Este ensaio complementar, tem como objetivo fornecer dados para a realização do cálculo de tensão de cisalhamento, cujos valores obtidos serão comparados com os valores do ensaio experimental, do catálogo da empresa fabricante e da norma canadense.

Para a realização deste ensaio utiliza-se o mesmo equipamento que foi utilizado para o ensaio dos chumbadores ancorados em blocos de concreto. A diferença está na força, que desta vez, é de tração. O parafuso é preso através de suportes na parte inferior e superior do mesmo. Aplica-se a carga até o escoamento total do aço, obtendo-se além do gráfico de força x deformação, o valor de tensão de escoamento do aço. A seguir, é apresentada uma imagem do ensaio.

Figura 39 - Ensaio de tração do chumbador.



Fonte: Autor.

4.4 Procedimentos de preparação do ensaio

Após a desmoldagem dos blocos, os mesmos tiveram duas de suas laterais, opostas entre si, marcadas com o centro geométrico do bloco. Como o bloco possui 40 centímetros de altura e 30 centímetros de largura, o centro geométrico ficou a 20 centímetros de altura e a 15 centímetros das bordas laterais.

Figura 40 - Bloco marcado para realização da perfuração.



Fonte: Autor.

Para realizar a perfuração, utilizou-se uma broca de vídea SDS com 10 milímetros de diâmetro, e o equipamento utilizado para a furação foi um marteleiro da marca Bosch. Conforme mostrado no catálogo da empresa, o furo deveria ter no mínimo 75 milímetros de profundidade. Após a perfuração dos blocos, utilizou-se de ar comprimido soprado para dentro dos furos, até que não saísse mais poeira, a fim de evitar qualquer tipo de interferência por resíduos da perfuração. Foram realizados 18 furos no total, sendo duas perfurações em cada bloco. Todos os furos foram realizados antes do início do ensaio, com o objetivo de agilizar a realização do mesmo.

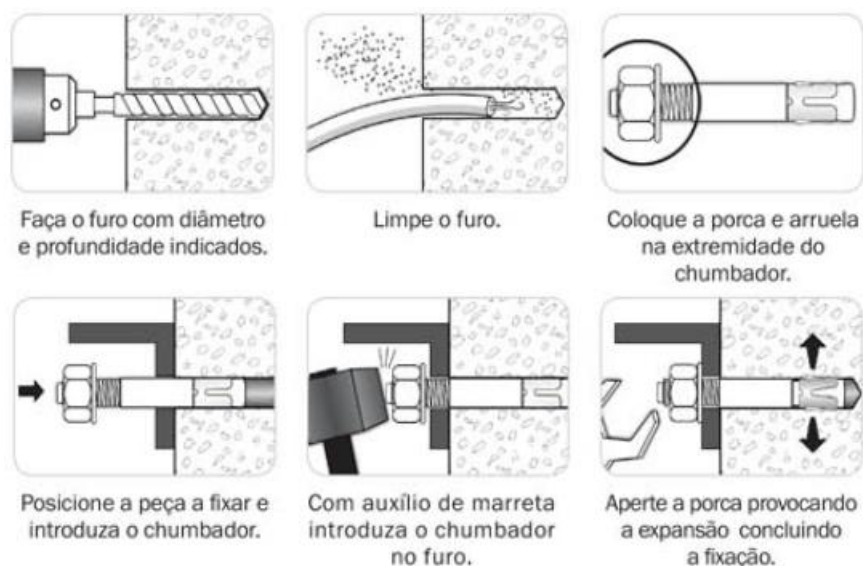
Em seguida, posicionou-se o suporte na posição de ensaio, e colocou-se os chumbadores no suporte, de modo a prender o mesmo contra o concreto. Com o auxílio de uma marreta, o chumbador foi introduzido no furo até o que toda sua extensão estivesse dentro do furo.

A última etapa antes do ensaio foi o aperto da porca com o objetivo de expandir a presilha e gerar a tensão necessária para fixar a peça. Esse processo se chama de torque de aperto, e possui um valor específico para cada chumbador. No caso do chumbador utilizado neste trabalho, o torque de aperto recomendado pelo fabricante é de 3 kgf.m.

Para realizar o procedimento de aperto de torque, é necessário a utilização de um equipamento denominado torquímetro. Este equipamento mede a tensão de aperto da porca e foi utilizado em todos os chumbadores. Cabe ressaltar, que para

realização de tais procedimentos, utilizou-se como referência as recomendações da Âncora®, conforme segue.

Figura 41 - Procedimentos para fixação de um chumbador.



Fonte: Âncora.®

4.5 Equipamento de ensaio

Para a realização dos ensaios, foram utilizados os equipamentos disponíveis no laboratório de estruturas da UNISC (Universidade de Santa Cruz do Sul). Os equipamentos, da marca EMIC série 23, possuem dois módulos. O módulo principal, possui capacidade de trabalho de até 300 kN, tanto para tração quanto para compressão. Já o módulo auxiliar, é utilizado somente para compressão, sendo ideal para ensaios de compressão de concretos, e exerce carga de até 2000 kN.

4.6 Realização do ensaio

Os ensaios foram realizados 7 dias após a concretagem, procedendo-se inicialmente com os corpos de prova, e posteriormente com os blocos de concreto, conforme segue a descrição do ensaio abaixo.

4.6.1 Corpos de prova

No dia do ensaio, os corpos de prova foram retirados da água e tiveram suas superfícies de base e topo retificadas por um esmeril, de modo a ficar perpendiculares ao eixo longitudinal do cilindro, seguindo as recomendações da ABNT NBR 5738:2015. Após este procedimento, os cilindros foram ensaiados individualmente. Para isso, utilizou-se de duas camisas de metal, que foram colocadas na base e topo do cilindro, de modo a distribuir uniformemente a carga por toda a área que sofrerá a compressão. Foram ensaiados os 9 cilindros, obtendo-se assim o resultado da resistência média do concreto.

4.6.2 Blocos de concreto com chumbadores

Para o ensaio dos chumbadores, conforme foi explicado anteriormente, todos os furos já haviam sido realizados. Desta forma, bastou colocar o suporte sobre o bloco e prendê-lo com um chumbador em cada lateral. Com o auxílio da marreta, empurrou-se o chumbador até a profundidade máxima. Apertou-se então a porca utilizando um torquímetro, chegando à tensão de torque de 3 kgf.m. O procedimento foi realizado nos dois chumbadores.

Por último, colocou-se o bloco com o suporte sobre a máquina, e centralizou-se o bloco em relação ao centro de aplicação de carga, garantindo assim, a distribuição de carga de maneira correta e igual para ambos os chumbadores.

A velocidade de aplicação de carga no decorrer do ensaio foi de 0,98 MPa/s. Ou seja, a cada segundo que decorreu o ensaio, ocorreu um incremento de carga de 0,98 MPa.

Figura 42 - A esquerda mostra o dispositivo de suporte fixado ao bloco de concreto, e a direita, o ensaio sendo realizado.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos tanto nos métodos de cálculo, quanto através de ensaios decorrentes do método experimental.

5.1 Método Experimental

A seguir são explanados os resultados obtidos através dos ensaios do programa experimental, divididos em corpos de prova, blocos e chumbadores.

5.1.1 Corpos de prova

O ensaio dos corpos de prova foi realizado aos 7 dias da concretagem. Para a realização do ensaio de compressão dos corpos de prova, tomou-se como base o texto da norma ABNT NBR 5739:2018, que trata sobre Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Desta forma, foram ensaiados os corpos de prova dos três traços de concreto. Nas imagens abaixo, pode-se analisar a ruptura de dois corpos de prova ensaiados.

Figura 43 - Corpos de prova rompidos através do ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

Tabela 5 - Resistências médias dos traços A, B e C.

Traço	Corpo de Prova	Idade (dias)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
A	1	7	32,41	31,58
	2		31,20	
	3		31,14	
B	1	7	34,64	36,83
	2		38,25	
	3		37,60	
C	1	7	45,74	47,70
	2		48,73	
	3		48,64	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a resistência de todos os corpos de prova foi superior a classe do concreto ao qual se esperava a resistência. Desta forma, para o concreto do traço A, classe C25, a resistência média foi de 31,58 MPa. O resultado obtido no ensaio superou a classe de concreto a qual se pretendia alcançar, de modo a poder ser considerada classe C30. A seguir, encontram-se os gráficos do ensaio, apresentados os resultados de tensão x tempo para o traço A.

Pode-se observar que apenas um corpo de prova não atingiu a resistência esperada. Porém a resistência média obtida do concreto traço B, classe C35, foi de 36,83 MPa. Assim, o resultado ficou dentro do esperado em termos de resistência à compressão. A seguir, são apresentados estes dados em forma de gráficos realizados no decorrer do ensaio, válidos para o traço B.

Como é possível notar, nenhum corpo de prova apresentou resultado abaixo do esperado. Desta forma, a média do concreto traço C, classe C45, foi de 47,70 MPa.

5.1.2 Blocos

Conforme era esperado, todos os blocos permaneceram intactos quando ensaiados com os chumbadores. Não ocorreram rupturas de nenhum grau, de modo que não se pode classificar quanto as rupturas apresentadas na bibliografia pesquisada.

Na região onde foram realizados os furos para colocação dos chumbadores, houve certa deterioração da área. Entretanto, deve-se salientar que a maior parte do deslocamento que ocorreu na região do furo, ocorreu no momento da perfuração. O uso do martetele, ainda que com muito cuidado, gera danos a parte superficial do concreto, de modo que a região ao redor do furo fique deteriorada.

5.1.3 Chumbadores

Quanto aos resultados dos ensaios realizados com os chumbadores, ocorreram em dois tipos. O primeiro, foi o ensaio de tração, ou seja, para determinar a tensão de escoamento do aço, e assim, através de fórmulas padrão de cálculo de parafusos, determinar a resistência ao cisalhamento. O segundo ensaio realizado, foram os blocos de concreto com chumbadores, cujo objetivo foi determinar diretamente, os valores da resistência ao cisalhamento.

5.1.3.1 Ensaio de escoamento do aço

O ensaio de escoamento do aço foi realizado no mesmo equipamento que foi utilizado para realizar o ensaio de cisalhamento dos chumbadores. O principal objetivo é determinar a tensão de escoamento do aço. Os resultados do ensaio são apresentados a seguir, bem como os gráficos de força x deformação.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração dos chumbadores.

Chumbador	Força Máxima (kgf)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Escoamento Média (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Ruptura Média (MPa)
CH1	2621,03	291,23	283,07	367,83	352,25
CH2	2495,57	235,03		350,23	
CH3	2413,33	322,95		338,68	

Fonte: Autor.

No que diz respeito a força máxima aplicada ao chumbador, esta variou aproximadamente entre 2400 kgf e 2600 kgf. Já a tensão de escoamento, variou aproximadamente entre 235 MPa e 320 MPa. Desta forma, a tensão de escoamento média foi de 283,07 MPa. Na imagem a seguir pode-se verificar a forma de ruptura do chumbador na tração.

Figura 44 - Ruptura do chumbador por tração.

Fonte: Autor.

5.1.3.2 Ensaio de cisalhamento dos chumbadores

Inicialmente foram ensaiados os chumbadores ancorados nos blocos confeccionados com concreto do traço A, classe C25. Em seguida, foram ensaiados os chumbadores dos blocos que foram confeccionados com concreto traço B, classe C35, e traço C, classe C45, respectivamente.

A partir do ensaio, obtiveram-se os resultados de cisalhamento direto para os chumbadores, contendo a resistência ao cisalhamento e gráfico de força x deformação. Nas imagens abaixo pode-se verificar a ruptura do chumbador por cisalhamento, que ocorreu em todos os chumbadores dos três traços de concreto.

Figura 45 - Ruptura da seção transversal do chumbador por cisalhamento.



Fonte: Autor.

5.1.3.2.1 Blocos com concreto traço A

Para o ensaio dos chumbadores ao cisalhamento ancorados no bloco de concreto confeccionado a partir do traço A, classe C25, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 7 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço A.

Bloco com chumbadores	Torque de aperto (kgf.m)	Embutimento efetivo do chumbador (mm)	Carga de ruptura para 2 chumbadores (kgf)	Carga de ruptura por chumbador (kgf)	Carga de ruptura média (kgf)
A1	3,00	65,00	2899,00	1449,50	1379,17
A2			2414,00	1207,00	
A3			2962,00	1481,00	

Fonte: Autor.

No que diz respeito as cargas de ruptura, os valores alcançaram marca superior a 1400 kgf, sendo que somente um chumbador resistiu pouco mais de 1200 kgf. Desta forma, a carga de ruptura média foi de 1379,17 kgf.

Quanto ao método de ruptura, todos ocorreram exclusivamente devido a ação do esforço cortante, de modo que ocorreu o rompimento da seção metálica do chumbador, em ambos os casos. Deve-se considerar ainda, que somente um chumbador de cada bloco apresentou rompimento, de forma que o outro chumbador ficou intacto. Porém, quando o equipamento verifica uma queda na resistência no decorrer do ensaio, o mesmo é encerrado automaticamente. Ressalta-se ainda, que o rompimento do chumbador não ocorreu somente de um lado do dispositivo de suporte, demonstrando que não houve erro na realização do ensaio.

5.1.3.2 Blocos com concreto traço B

Para o ensaio dos chumbadores ao cisalhamento ancorados no bloco de concreto confeccionado a partir do traço B, classe C35, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 8 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço B.

Bloco com chumbadores	Torque de aperto (kgf.m)	Embutimento efetivo do chumbador (mm)	Carga de ruptura para 2 chumbadores (kgf)	Carga de ruptura por chumbador (kgf)	Carga de ruptura média (kgf)
B1	3,00	65,00	2792,00	1396,00	1495,33
B2			2862,00	1431,00	
B3			3318,00	1659,00	

Fonte: Autor.

No que tange as cargas de ruptura, verifica-se que dois chumbadores ficaram com resistência de aproximadamente 1400 kgf, enquanto um terceiro obteve um ganho de resistência, e chegou ao valor de 1659 kgf. Desta forma, a resistência média deste conjunto de chumbadores foi de 1495,33 kgf.

Quanto ao método de ruptura, em todos os casos ocorreu a ruptura da seção metálica do chumbador, demonstrando ruptura por cisalhamento. Da mesma forma que no ensaio dos blocos com traço de concreto A, neste ensaio, somente um dos

chumbadores rompeu. O fato verificou-se em ambos os lados do dispositivo de suporte.

5.1.3.2.3 Blocos com concreto traço C

Para o ensaio dos chumbadores ao cisalhamento ancorados no bloco de concreto confeccionado a partir do traço C, classe C45, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 9 - Ensaio de cisalhamento dos chumbadores ancorados em concreto traço C.

Bloco com chumbadores	Torque de aperto (kgf.m)	Embutimento efetivo do chumbador (mm)	Carga de ruptura para 2 chumbadores (kgf)	Carga de ruptura por chumbador (kgf)	Carga de ruptura média (kgf)
C1	3,00	65,00	3241,00	1620,50	1595,33
C2			3119,00	1559,50	
C3			3212,00	1606,00	

Fonte: Autor.

No que se refere a carga de ruptura, pode-se analisar que este conjunto de chumbadores, foi o que apresentou resultados mais próximos entre si, variando cerca de 60 kgf, entre 1560 kgf e 1620 kgf. Desta forma, a resistência média ficou em 1595,33 kgf.

O método de ruptura não se alterou no último ensaio, sendo que este ocorreu através de esforço cortante, de forma que rompeu a seção metálica do chumbador. Como ocorreu nos outros ensaios, apenas um chumbador rompeu, de modo que o outro permaneceu intacto. Porém, deve-se ressaltar novamente que, o rompimento dos chumbadores não ocorreu de forma padrão, ou seja, o chumbador não foi rompido em apenas um lado do dispositivo de suporte, e sim de forma aleatória.

Tabela 10 - Cargas de ruptura média para os traços A, B e C.

Traço de concreto	Traço A	Traço B	Traço C
Carga de ruptura média ao cisalhamento (kgf)	1379,17	1495,33	1595,33

Fonte: Autor.

5.2 Método teórico

A seguir são apresentados os resultados obtidos através dos métodos teóricos e dos métodos de cálculo, através das normas brasileira e canadense.

5.2.1 Método CAN/CSA-A23.3-04

5.2.1.1 Concreto

5.2.1.1.1 Resistência de ruptura 'Break-out'

Para o cálculo de A_{V_o} , é necessário determinar o valor de c_1 , que corresponde a distância entre a borda livre do elemento de concreto, até o eixo do chumbador a ser analisado, neste caso, na mesma direção que a força de cisalhamento exerce sobre o chumbador. A expressão para determinação de A_{V_o} encontra-se abaixo.

$$A_{V_o} = 4,5c_1^2$$

$$A_{V_o} = 4,5.20^2$$

$$A_{V_o} = 1800 \text{ cm}^2$$

Para determinar o valor de A_V , deve-se levar em conta principalmente a altura a ser considerada e o valor de c_2 , calculado a partir da fórmula a seguir.

$$A_V = 2,25c_1^2 + 1,5c_1c_2$$

$$A_V = 2,25.20^2 + 1,5.20.15$$

$$A_V = 1350 \text{ cm}^2$$

A resistência de ruptura do concreto no cisalhamento de um único chumbador em concreto fissurado pode ser calculada através da expressão (7):

$$V_{br,A} = 0,58 \left(\frac{l}{d_o} \right)^2 \sqrt{d_o} \phi_c \sqrt{f'_c} c_1^{1,5} R$$

$$V_{br,A} = 0,58 \cdot \left(\frac{1,91}{0,95} \right)^2 \cdot \sqrt{1,91} \cdot 0,65 \cdot \sqrt{3,158} \cdot 20^{1,5} \cdot 1$$

$$V_{br,A} = 334,75 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_{br,B} = 0,58 \cdot \left(\frac{1,91}{0,95} \right)^2 \cdot \sqrt{1,91} \cdot 0,65 \cdot \sqrt{3,683} \cdot 20^{1,5} \cdot 1$$

$$V_{br,B} = 361,51 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_{br,C} = 0,58 \cdot \left(\frac{1,91}{0,95} \right)^2 \cdot \sqrt{1,91} \cdot 0,65 \cdot \sqrt{4,770} \cdot 20^{1,5} \cdot 1$$

$$V_{br,C} = 411,42 \text{ kN/cm}^2$$

O fator de modificação da resistência ao cisalhamento devido à fissuração para chumbadores em concreto fissurado sem reforço de borda deve ser $\psi_{c,v} = 1,0$.

O fator de modificação dos efeitos de borda pode ser calculado através da equação abaixo.

$$\psi_{ed,v} = 0,7 + 0,3 \frac{c_2}{1,5c_1} \text{ se } (c_2 < 1,5c_1)$$

$$\psi_{ed,v} = 0,7 + 0,3 \frac{15}{1,5 \cdot 20}$$

$$\psi_{ed,v} = 0,85$$

A determinação da resistência de ruptura de borda do concreto no cisalhamento de um chumbador mecânico, pode ser calculada através da expressão abaixo.

$$V_{cbr} = \frac{A_v}{A_{v0}} \psi_{ed,v} \psi_{c,v} V_{br}$$

$$V_{cbr,A} = \frac{1350}{1800} \cdot 0,85 \cdot 1,00 \cdot 334,75$$

$$V_{cbr,A} = 213,40 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 2134,00 \text{ MPa}$$

$$V_{cbr,B} = \frac{1350}{1800} \cdot 0,85 \cdot 1,00 \cdot 361,51$$

$$V_{cbr,B} = 230,46 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 2340,60 \text{ MPa}$$

$$V_{cbr,C} = \frac{1350}{1800} \cdot 0,85 \cdot 1,00 \cdot 411,42$$

$$V_{cbr,C} = 262,28 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 2622,80 \text{ MPa}$$

5.2.1.1.2 Ruptura do concreto 'Pry-out'

O coeficiente de ruptura para o cálculo da resistência do concreto devido ao 'Pry-out', deve ser:

$$h_{ef} = 65 \text{ mm}$$

$$k_{cp} = 2,0 \text{ se } h_{ef} \geq 65 \text{ mm, então:}$$

$$k_{cp} = 2,0$$

Para calcular o valor de A_N , deve-se considerar a expressão, considerando o embutimento efetivo e o valor de c_1 .

$$A_N = 4,5h_{ef}^2 + 3c_1h_{ef}$$

$$A_N = 4,5 \cdot 6,5^2 + 3 \cdot 20 \cdot 6,5$$

$$A_N = 580,13 \text{ cm}^2$$

O valor de A_{No} pode ser determinado através da expressão, utilizando apenas o valor do embutimento efetivo.

$$A_{No} = 9h_{ef}^2$$

$$A_{No} = 9,6,5^2$$

$$A_{No} = 380,25 \text{ cm}^2$$

O fator de modificação dos efeitos de borda pode ser encontrado através do uso da expressão.

$$\psi_{ed,N} = 1 \text{ se } c_{min} \geq 1,5h_{ef}$$

$$15 \geq 9,75, \text{ então:}$$

$$\psi_{ed,N} = 1$$

O fator de modificação de resistência na tração devido a fissuração, de um chumbador que está localizado em uma região de um elemento concreto onde não há análise para indicar se há fissura nos níveis de carga de serviço, $\psi_{c,N}$ deve ser considerado como 1,0 para chumbadores de pré e pós-concretagem.

$$\psi_{c,N} = 1,0$$

O fator de modificação devido a divisão prematura do concreto para chumbadores pós-concretagem projetados para concreto sem fissuração e sem reforço suplementar, deve ser calcula com a expressão abaixo.

$$c_{a,min} = 9,7 \text{ cm (Catálogo Âncora)}$$

$$c_{ac} = 4h_{ef} = 4,6,5 = 26 \text{ cm}$$

$$h_{ef} = 6,5 \text{ cm}$$

$$\psi_{cp,N} = \frac{c_{a,min}}{c_{ac}} \geq \frac{1,5h_{ef}}{c_{ac}} \text{ se } c_{a,min} < c_{ac}$$

$$\psi_{cp,N} = \frac{9,7}{26} \geq \frac{1,5,6,5}{26}$$

$$\psi_{cp,N} = 0,373 \geq 0,375$$

$$\psi_{cp,N} = 0,375$$

A resistência de ruptura do concreto de um único chumbador na tração em concreto fissurado pode ser determinada através da expressão, para cada traço de concreto.

$$N_{br} = k\Phi_c\sqrt{f'_c}h_{ef}^{1,5}R$$

$$N_{br,A} = 7,0,65 \cdot \sqrt{3,158} \cdot 6,5^{1,5} \cdot 1$$

$$N_{br,A} = 133,99 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1339,94 MPa$$

$$N_{br,B} = 7,0,65 \cdot \sqrt{3,683} \cdot 6,5^{1,5} \cdot 1$$

$$N_{br,B} = 144,70 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1447,04 MPa$$

$$N_{br,C} = 7,0,65 \cdot \sqrt{4,770} \cdot 6,5^{1,5} \cdot 1$$

$$N_{br,C} = 164,68 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1646,80 MPa$$

A resistência do concreto na ruptura de borda por tração, pode ser encontrado através da expressão.

$$N_{cbr} = \frac{A_N}{A_{NO}} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_{br}$$

$$N_{cbr} = \frac{580,13}{380,25} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,375 \cdot 133,99$$

$$N_{cbr} = 76,66 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_{cbr} = \frac{580,13}{380,25} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,375 \cdot 144,70$$

$$N_{cbr} = 82,78 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_{cbr} = \frac{580,13}{380,25} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,375 \cdot 164,68$$

$$N_{cbr} = 94,22 \text{ kN/cm}^2$$

A ruptura do concreto devido ao braço de alavanca, ou 'Pry-out' pode ser calculada através da expressão.

$$V_{cpr} = k_{cp} N_{cbr}$$

$$V_{cpr,A} = 2.76,66$$

$$V_{cpr,A} = 153,32 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1533,20 \text{ MPa}$$

$$V_{cpr,B} = 2.82,78$$

$$V_{cpr,B} = 165,56 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1655,60 \text{ MPa}$$

$$V_{cpr,C} = 2.94,22$$

$$V_{cpr,C} = 188,44 \frac{kN}{cm^2} \text{ ou } 1884,40 \text{ MPa}$$

5.2.1.2 Chumbadores

5.2.1.2.1 Norma CAN/CSA-A23.3-04

A resistência fatorada de um chumbador mecânico no que diz respeito a sua resistência ao cisalhamento, pode ser calculada a partir da equação abaixo. Conforme a fórmula, o valor de f_{ut} deve ser menor ou igual ao menor entre $\{1,9f_y\}$ e $\{860MPa\}$. Desta forma, como foi realizado o ensaio de tração do aço, este valor já foi obtido no ensaio.

$$f_{ut} < \{1,9f_y\} \text{ ou } \{860MPa\}$$

$$f_{ut} < \{1,9.283,07\} \text{ ou } \{860MPa\}$$

$$f_{ut} < \{537,83 \text{ MPa}\} \text{ ou } \{860MPa\}$$

$f_{ut} = 352,25 \text{ MPa}$, foi o valor adotado a partir de ensaio de tração no chumbador.

Para chumbadores pós-concretados com torque sobre o chumbador, estes se estendem através do plano de cisalhamento, V_{sr} pode, alternativamente, ser calculado através da equação a seguir.

$$V_{sr} = nA_{se} \Phi_s 0,6f_{ut} R$$

$$V_{sr} = 1.0,71256.0,6.35,225.0,75$$

$$V_{sr} = 11,295 \text{ kN ou } 1129,50 \text{ kgf}$$

5.2.1.2.2 ANBT NBR 8800:2008

A norma brasileira 8800:2008 será utilizada para determinar a resistência ao cisalhamento de um chumbador, através da fórmula abaixo.

$$F_{v,Rd} = 0,4A_b f_{ub}$$

$$F_{v,Rd} = 0,4.0,71256.35,225$$

$$F_{v,Rd} = 10,04 \text{ kN ou } 1004,00 \text{ kgf}$$

Tabela 11 - Cargas de ruptura média para os traços A, B e C.

Método de Cálculo/Teórico	NBR	CAN	Catálogo Técnico Âncora
Carga de ruptura de cálculo ao cisalhamento (kgf)	1004,00	1129,50	1703,00

Fonte: Autor.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Concreto

No que se refere a resistência do concreto, destaca-se que tanto os corpos de provas, como os blocos de concreto alcançaram a resistência desejada, ou até mesmo superior, como foi o caso do traço A.

O traço A foi desenvolvido para possuir resistência e ser classificado como classe C25, ou seja, 25 MPa. No entanto, a resistência média dos corpos de prova alcançou 31,58 MPa, de modo que o traço pode ser classificado com C30.

Para o traço B, buscava-se atingir resistência para poder classificá-lo como classe C35, ou seja, 35 MPa. O traço atingiu a resistência necessária para ser classificado como C35.

Para o traço C, o mais resistente, esperava-se atingir resistência para classificá-lo como classe C45, ou seja, 45 MPa. Desta forma, o traço atingiu valores dentro do esperado, podendo ser classificado como C45.

No que diz respeito ao desempenho dos blocos com chumbadores, deve-se destacar que nenhum bloco apresentou qualquer fissura ou qualquer tipo de ruptura, seja por tração ou cisalhamento. Posteriormente, analisando o cálculo teórico baseado na norma canadense, verificou-se que seria necessária uma força maior que a capacidade de carga do chumbador submetido ao esforço cisalhante para que ocorresse a ruptura do bloco. Desta forma, como o chumbador tem uma capacidade de carga relativamente baixa quando comparado com o concreto, explica o fato de não ter ocorrido ruptura no bloco de concreto.

6.2 Chumbadores

No que diz respeito aos chumbadores, inicialmente destaca-se o ensaio de tração do aço. Como resultados, obteve-se que a tensão de escoamento média do aço foi de 283,07 MPa, enquanto a tensão de ruptura média do aço foi de 352,25 MPa.

Já nos ensaios dos chumbadores ao cisalhamento nos três diferentes traços de concreto, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 12 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados experimentais.

		Ensaio	CAN	NBR	Catálogo Técnico Âncora
Carga de Ruptura Média (kgf)	Traço A	1379,17	1129,50	1004,00	1703,00
Variação entre método teórico e experimental	%	-	22,10	37,37	-19,01
Carga de Ruptura Média (kgf)	Traço B	1495,33	1129,50	1004,00	1703,00
Variação entre método teórico e experimental	%	-	32,39	48,94	-12,19
Carga de Ruptura Média (kgf)	Traço C	1595,33	1129,50	1004,00	1703,00
Variação entre método teórico e experimental	%	-	41,24	58,90	-6,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o concreto de traço A, a resistência média dos chumbadores ao cisalhamento foi de 1379,17 kgf. Já para o traço de concreto B, a resistência média dos chumbadores foi de 1495,33 kgf, o que representa um acréscimo de resistência de 8,42%, em comparação com o traço A. Para o traço de concreto C, foi obtido o valor da resistência média ao cisalhamento de 1595,33 kgf, o que representa um acréscimo de resistência ao cisalhamento de 6,69% em comparação ao traço B e 15,67% em comparação com o traço A.

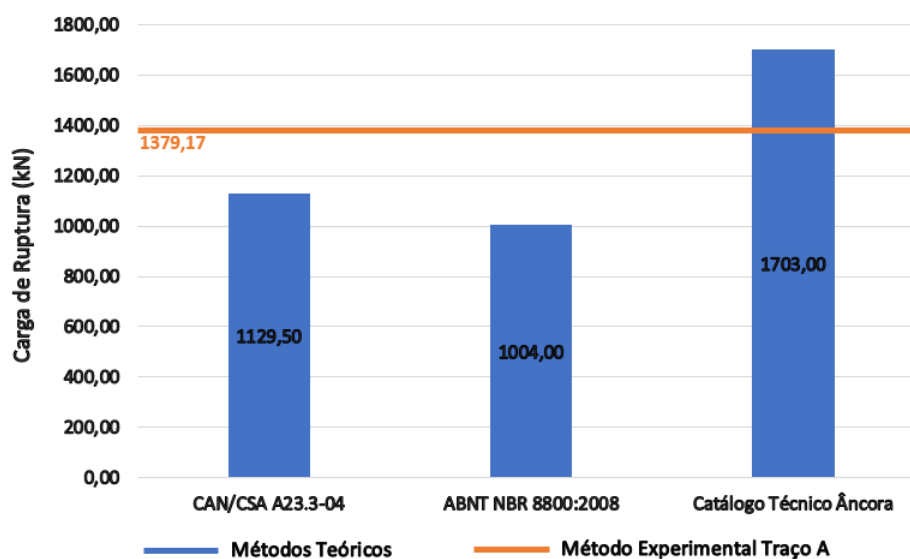
Segundo a empresa fabricante dos chumbadores, para um concreto classe C30, ou seja, 30 MPa, o chumbador utilizado neste trabalho deveria resistir em média 1703,00 kgf. No entanto, ao realizar o ensaio, verificou-se que todos os valores ficaram abaixo do informado pela empresa fabricante. Os resultados apresentados pelos chumbadores do concreto traço A, apresentaram diminuição de 19,01% de resistência ao cisalhamento em comparação com o informado pela fabricante. Já para o traço B e C, a diminuição foi de 12,19% e 6,32%, respectivamente.

Ainda, para realizar o cálculo teórico da norma canadense CAN/CSA-A23.3-04, utilizou-se dos valores do ensaio de tração nos chumbadores de igual diâmetro e comprimento aos ensaiados para cisalhamento. De acordo com a norma canadense, o chumbador analisado resistiria a cerca de 1129,50 kgf. Em comparativo com os resultados do ensaio experimental, todos os resultados apresentaram valores superiores. Desta forma, o traço A apresentou um aumento de resistência de cisalhamento de 22,10% em relação ao cálculo teórico da norma canadense. Da mesma forma, os traços B e C, apresentaram aumento de resistência de 32,39% e 41,24%, respectivamente.

No cálculo realizado através da norma ABNT NBR 8800:2008, também foram utilizados os resultados do ensaio de tração do aço do chumbador. Desta forma, a resistência do chumbador ao cisalhamento de acordo com tal norma é de 1004 kgf. O valor está bem abaixo do apresentado no ensaio experimental. A comparação do traço A com o resultado da norma demonstra que houve um aumento de resistência em torno de 37,37%. Para os traços B e C, o mesmo padrão é demonstrado, apresentando aumento em torno de 48,94% e 58,90%, respectivamente.

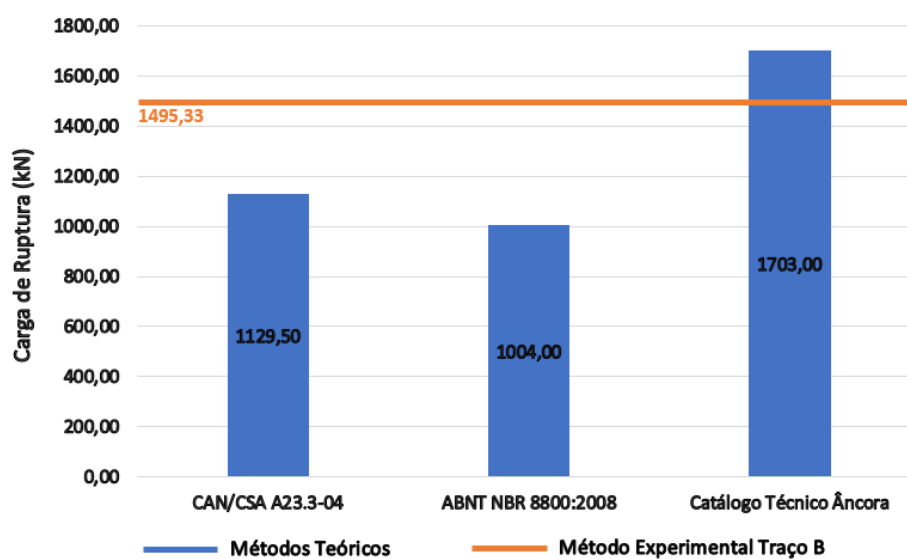
Através dos gráficos abaixo pode-se ver com clareza a diferença entre os valores obtidos no ensaio experimental e a partir dos modelos teóricos.

Figura 36 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço A.



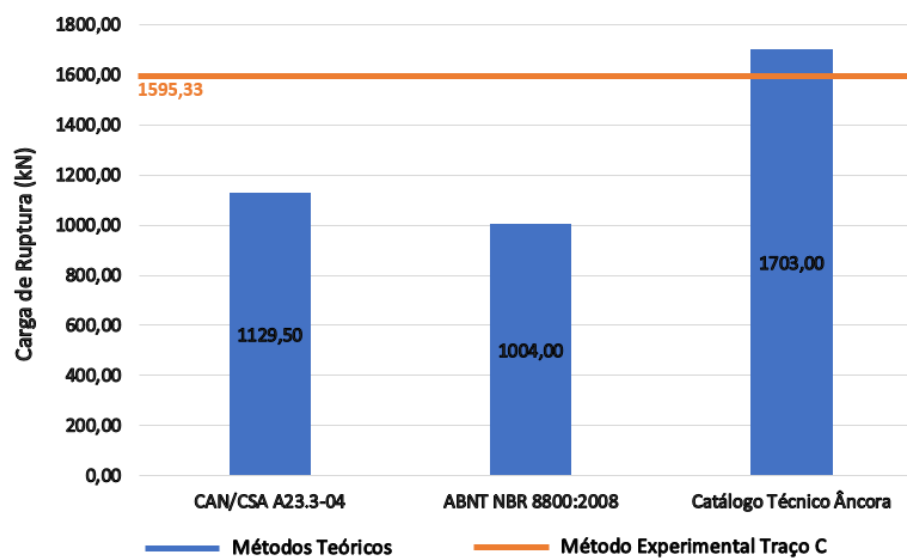
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Comparação de resultados: métodos teóricos x método experimental traço C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões

Através do ensaio experimental realizado com os chumbadores de expansão ancorados nos blocos de concreto, composto por três diferentes traços, pode-se obter algumas conclusões a respeito dos blocos e dos chumbadores.

Conforme já era esperado, nenhum bloco sofreu avarias durante os ensaios, ou seja, não apresentou fissuras ou ruptura do concreto. Tal acontecimento se deve ao fato de a resistência do concreto ser inúmeras vezes maior que a resistência do chumbador ao cisalhamento. Apenas dois tipos de rupturas poderiam ocorrer: 'Break-out' e 'Pry-out'. Entretanto, conforme cálculos realizados no método teórico, os valores de resistência para são muito superiores aos encontrados no ensaio, de forma a não causar prejuízos ao concreto.

Quanto aos resultados obtidos através de ensaio experimental e também através dos métodos teóricos, pode-se destacar que o método experimental apresentou desempenho superior em relação a ABNT NBR 8800:2008 e CAN/CSA-A23.3-04. Porém, quanto ao catálogo técnico da empresa fabricante dos chumbadores, o resultado obtido em ensaio experimental foi inferior quanto a resistência informada pela fabricante. Nenhum dos métodos foi eficaz quanto a proximidade de valores de resistência com o ensaio experimental.

Quanto a ruptura dos chumbadores no ensaio experimental, ambos foram rompidos na sua seção metálica devido ao esforço cisalhante aplicado. Deve-se considerar que apenas um chumbador rompeu em cada bloco ensaiado. Tal acontecimento ocorre devido a ser impossível fabricar dois ou mais chumbadores exatamente iguais, de modo que cada um possui a sua própria resistência a tração e cisalhamento. Reitera-se ainda, que o rompimento dos chumbadores não se deu exclusivamente em um mesmo lado do dispositivo de suporte, comprovando a teoria acima descrita.

Quanto à comparação de resultados entre os ensaios experimentais, pode-se verificar que conforme aumentava a resistência do concreto, aumentava a resistência de aderência do chumbador. A partir destes resultados supõe-se, que devido a maior resistência do concreto os chumbadores fixam-se de maneira mais eficiente, obtendo assim uma maior estabilidade e atingindo uma resistência ao cisalhamento mais alta.

Porém para uma conclusão sobre esta influência torna-se necessária a realização de um gama muito maior de ensaios para os diversos valores de resistência do concreto.

7.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Realizar o mesmo programa experimental, porém, com uma maior amplitude de ensaios, no que diz respeito a traços de concreto, e também um maior número de exemplares de cada traço, a fim de comprovar se existe de fato um ganho de resistência do chumbador ao cisalhamento, ao ter aumentada a resistência do concreto.
- Sugere-se a realização de um novo programa experimental, variando principalmente o diâmetro do chumbador e sua altura de embutimento efetiva.
- Realizar novo programa experimental, combinando os esforços de tração, cisalhamento e momento fletor, visto que um chumbador não está submetido exclusivamente a um tipo de esforço.
- Sugere-se ainda, a alteração do tipo de chumbador, e também a alteração do tipo de sistema de ancoragem, como por exemplo, ancoragem química.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, 2014.

_____. ACI 355.2-01: Evaluating the performance of post-installed mechanical anchors in concrete. Farmington Hills, 2017.

ÂNCORA®. Dados técnicos de sistemas de ancoragem. São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. ABECE 005:2018. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 14827: Chumbadores instalados em elementos de concreto ou alvenaria – Determinação da resistência à tração e ao cisalhamento. Rio de Janeiro, 2002.

BEMFICA, Henrique Medeiros. *Análise teórica experimental de chumbadores ancorados em concreto. 85f.* Dissertação de graduação em Engenharia Civil. Universidade de Santa Cruz do Sul. Santa Cruz do Sul, 2016.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CSA-A23.3-04. Toronto, 2007.

LORBER, Thomás Eduardo. *Análise teórica e experimental de barras rosqueadas e vergalhões ancorados em concreto com resina epóxi. 91f.* Dissertação de graduação em Engenharia Civil. Universidade de Santa Cruz do Sul. Santa Cruz do Sul, 2019.

MARTINS, Joel Donizete. *Resistência à tração de chumbadores com placa de ancoragem instalados em concreto. 148f.* Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. Aderência e ancoragem. USP – Departamento de engenharia de estruturas. São Paulo, 2003.