

Análise de códigos normativos que estimam a resistência de ancoragem do PRFC aderido ao concreto

Analysis of standard codes that estimate bond strength of CFRP bonded to concrete

Análisis de códigos normativos que estiman la fuerza de adherencia del CFRP adherido al hormigón

Eixo temático: ENG 7 - Patologia

Resumo: No presente trabalho, foi realizada a análise do desempenho de códigos normativos que estimam a resistência de aderência de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) aderidos à superfície de concreto. Os resultados teóricos foram comparados com resultados experimentais de um banco de dados com resultados de 447 ensaios experimentais de ensaios corte. Os resultados mostraram que o *fib* Bulletin 14 (2001), JCI (2003) e SIA 166 (2004) tiveram ótimo desempenho em termos de segurança e acurácia. Apesar das estimativas do CNR DT200 (2004) serem a favor da segurança, foram extremamente conservadoras.

Palavras-chaves: PRFC; resistência de aderência; concreto; códigos normativos.

Abstract: *In this section,*

In the present work, the performance analysis of estimates of standard codes that estimate bond strength of carbon fiber reinforcement polymers (CFRP) bonded to concrete surface was performed. The theoretical results were compared with experimental results from a database with results from 447 experimental tests of shear pull tests. The results showed that the *fib* Bulletin 14 (2001), JCI (2003) and SIA 166 (2004) performed well in terms of safety and accuracy. Although CNR DT200 (2004) estimates were in favor of safety, they were extremely conservative.

Keywords: *CFRP; bond strength; concrete; standard codes.*

Resumen:

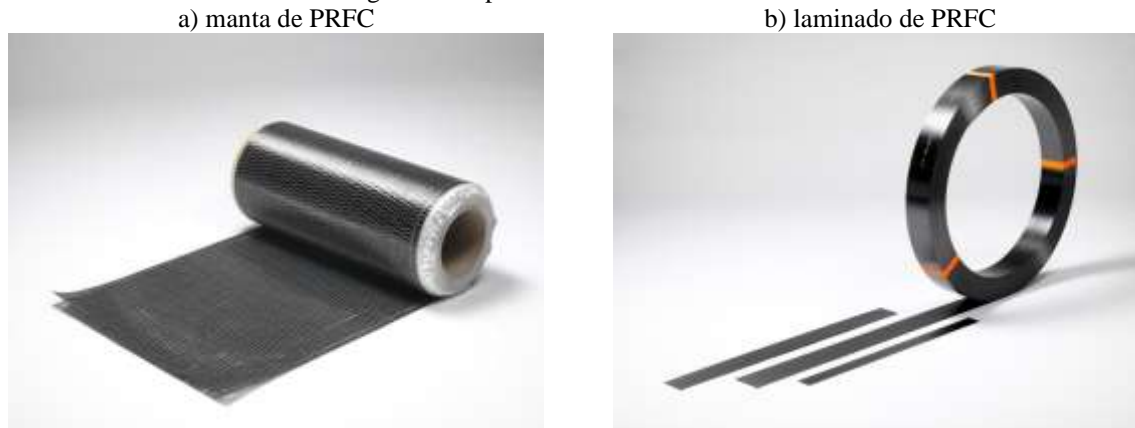
*En el presente trabajo se realizó el análisis de desempeño de estimaciones teóricas de códigos normativos que estiman la fuerza de unión de polímeros reformados con fibra de carbono (PRFC) adheridos a la superficie del concreto. Los resultados teóricos se compararon con los resultados experimentales de una base de datos con los resultados de 447 pruebas experimentales de pruebas de corte. Los resultados mostraron que el *fib* Bulletin 14 (2001), JCI (2003) y SIA 166 (2004) se desempeñaron bien en términos de seguridad y precisión. Aunque las estimaciones de CNR DT200 (2004) estaban a favor de la seguridad, eran extremadamente conservadoras.*

Palabras clave: *PRFC; fuerza de adherencia; de códigos normativos.*

1 Introdução

A utilização de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) aplicado na superfície do concreto é uma excelente solução para o reforço à flexão de vigas de concreto armado em alternativa às soluções tradicionais. Este material é comercializado em formato de manta, material bastante maleável, e laminado, material rígido, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de PRFC comercializados.



Fonte: <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/produtos>.

Conforme Ekenel *et al.* (2004) a utilização de PRFC no reforço estrutural de elementos de concreto armado fornece um incremento de resistência à flexão considerável, que advém da alta resistência à tração e à corrosão, bem como ótima estabilidade química em ambientes hostis (ACI 440.1R-06, 2006), no entanto a segurança da aplicação deste tipo de material depende de como a fibra estará colada na superfície de concreto e como ocorrerá a transferência de esforços entre o PRFC e o concreto. Devido a isto, há na literatura muitos documentos de cunho normativo que prescrevem recomendações para a utilização deste material relativamente inovador como reforço estrutural de estruturas de concreto armado, podendo-se citar o *fib* Bulletin 14 (2001), CNR DT200 (2004) e JCI (2003) SIA 166 (2004).

O mecanismo de transferência de esforços entre os materiais é importante pois poderá governar o modo de ruptura de vigas reforçadas à flexão, que podem alcançar a ruptura por tração do polímero, descolamento do PRFC e destacamento do concreto, conforme mostrado na Figura 2. O descolamento da manta pode ocorrer por deficiência da ancoragem do reforço, por fissuração excessiva da viga ou, ainda, por falhas no seu processo de colagem (FERREIRA *et al.*, 2018). O autor ainda relata que em razão da diferença de módulos de elasticidade são geradas tensões cisalhantes entre o concreto e o PRFC. Então a zona de ancoragem é uma região da fibra que deve ter um devido cuidado no método de dimensionamento e execução, haja vista que se um desses procedimentos for feito de modo indevido podem ocorrer os modos de ruptura citados, acarretando a ruptura prematura da viga reforçada de forma frágil.

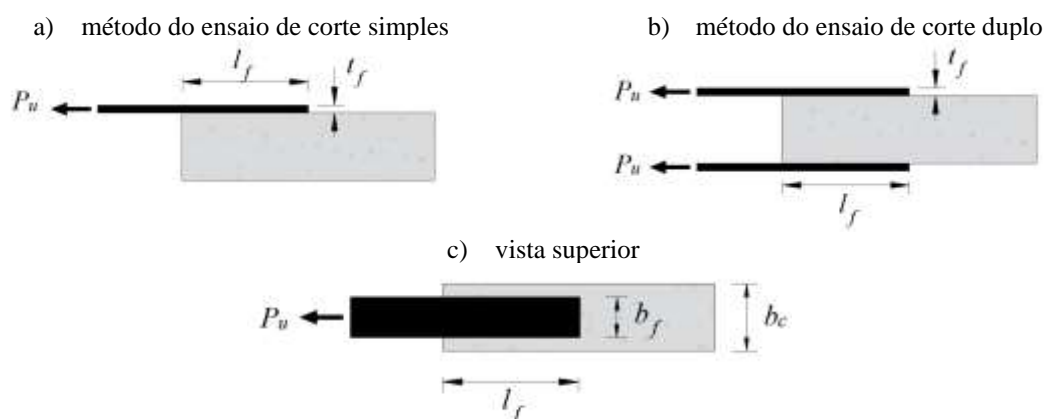
Figura 2 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC.



Fonte: Ferreira *et al.* (2018).

Os mecanismos resistentes da ligação aderente entre o PRFC e o concreto são afetados por diversos parâmetros, seja geométrico, como as dimensões da fibra e da superfície de concreto, como também mecânica, como a resistência do polímero e do concreto. Para o estudo da importância destes parâmetros na capacidade aderente destes materiais há métodos de ensaio experimental que verificam a resistência de ancoragem do PRFC aderido no concreto, podendo-se citar o ensaio de corte simples e o ensaio de corte duplo, conforme mostrado na Figura 3, onde estes métodos de ensaio simulam os esforços tangenciais entre PRFC e concreto na região de ancoragem da fibra colada na superfície de concreto de vigas de concreto armado.

Figura 3 – Métodos de ensaio de corte.



Fonte: Autor.

Dado que a resistência de ancoragem é um ponto crítico de projeto de reforço estrutural com utilização de manta ou laminados de PRFC, o presente estudo visa avaliar modelos teóricos prescritos por códigos normativos à nível de segurança, acurácia e precisão de suas estimativas teóricas.

2 Códigos normativos

No Quadro 1 são expostos os parâmetros geométricos e mecânicos dos materiais utilizados no reforço que cada código normativo considera em suas expressões analíticas. No Quadro 2 são mostradas as expressões analíticas que prescrevem a capacidade portante do PRFC aderido à superfície de concreto, tendo a fibra submetida ao corte simples ou duplo, em que são expostas as expressões do documento europeu *fib* Bulletin 14 (2001), da norma americana CNR DT200 (2004), do código normativo japonês JCI (2003) e da norma suíça SIA 166 (2004), explicitando os parâmetros considerados nas formulações. Salienta-se ainda que estas normas citadas possuem recomendações para o cálculo e dimensionamento de reforço e reabilitação estrutural com auxílio de PRFC, e o cálculo da resistência de aderência é uma das fases importantes de projeto de reforço.

Quadro 1 - Parâmetros considerados pelos códigos normativos.

Modelo teórico	Parâmetro					
	f_c	f_{ct}	fator de largura (b_f/b_c)	l_{ef}	$E_f t_f$	b_f
CNR DT200 (2004)	x	x	x	x	x	x
JCI (2003)	x			x	x	x
fib Bulletin 14 (2001)	x	x	x	x	x	x
SIA 166 (2004)	x				x	x

Fonte: autor.

Quadro 2 – Códigos normativos.

Norma	Expressão analítica
fib Bulletin 14 (2001)	$P_u = \begin{cases} 0,64 \cdot k_p \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ct}} \text{ se } l_f \geq l_{ef} \\ 0,64 \cdot k_p \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ct}} \cdot \frac{l_f}{l_{ef}} \cdot \left(2 - \frac{l_f}{l_{ef}}\right) \text{ se } l_f < l_{ef} \end{cases}; \quad l_{ef} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ct}}}$ $k_p = \sqrt{1,125 \times \frac{2 - \frac{b_f}{b_c}}{\frac{b_f}{b_c}}}$
CNR DT200 (2004)	$P_u = \frac{1}{g_{f,d} \cdot \sqrt{g_c}} \times b_L \times b_f \times \sqrt{k_G \times k_b} \times \sqrt{2 \times E_f \times t_f \times \sqrt{f_c \times f_{ct}}}; \quad l_{ef} = \sqrt{\frac{E_f \times t_f}{2 \times f_{ct}}}$ $\beta_L = \frac{l_f}{l_{ef}} \cdot \left(2 - \frac{l_f}{l_{ef}}\right) \text{ se } l_f \leq l_{ef} \text{ e } \beta_L = 1 \text{ se } l_f > l_{ef}; \quad k_b = \sqrt{\frac{2 - (b_f/b_c)}{1 + (b_f/b_c)}}^3 \cdot 1$
JCI (2003)	$P_u = \begin{cases} \tau_a \cdot b_f \cdot L_f & \text{se } L_f < L_{ef} \\ \tau_a \cdot b_f \cdot L_{ef} & \text{se } L_f \geq L_{ef} \end{cases}; \quad L_{ef} = 0,125 \cdot (E_f \cdot t_f)^{0,57}; \quad \tau_a = 0,93 \cdot f_c^{0,44}$
SIA 166 (2004)	$P_u = 0,5 \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctH}}; \quad f_{ctH} = 0,3 \cdot f_c^{1,5}$

Onde:

E_f - Módulo de elasticidade do PRFC;

f_c - Resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico;

f_{ct} - Resistência à tração do concreto;

l_f - Comprimento de ancoragem do PRFC aderido ao concreto;

l_{ef} - Comprimento de ancoragem efetivo do PRFC aderido ao concreto, que é o comprimento máximo de PRFC ancorado ao concreto, no qual não há incremento de resistência quando se aumenta o comprimento a partir deste valor (CHEN; TENG, 2001);

b_f - Largura do PRFC;

t_f - Espessura do PRFC;

b_c - Largura do espécime de concreto;

k_p, k_b - Fator que considera a influência da relação entre a largura do PRFC e o concreto na resistência de aderência;

b_L - Fator que considera o comprimento de ancoragem do PRFC aderido ao concreto;

3 Metodologia

A avaliação dos códigos normativos será realizada por meio de um banco de dados com resultados de 447 ensaios experimentais de 30 autores, ilustrado resumidamente na Tabela 1, envolvendo laminados e mantas de PRFC aderidos em corpos de provas prismáticos de concreto, tendo como método de ensaio o ensaio de corte simples e duplo (Figura 3). No banco de dados são expostos os parâmetros geométricos e mecânicos dos ensaios experimentais, como a largura do prisma de concreto (b_c), resistência à compressão (f_c) e tração do concreto (f_{ct}), rigidez do PRFC expresso pelo produto entre módulo de elasticidade (E_f) e espessura do PRFC (t_f), largura do PRFC (b_f), comprimento de ancoragem da fibra (l_f) e carga última alcançada no ensaio experimental (P_u).

A análise do banco de dados envolverá a comparação dos resultados experimentais e resultados teóricos obtidos pelas expressões analíticas dos códigos normativos CNR DT200 (2004), JCI (2003), SIA 166 (2004) e *fib* Bulletin 14 (2001), nas quais serão avaliadas a precisão, acurácia e segurança dos resultados teóricos. A análise da precisão e acurácia das normas será feita por meio de gráficos que ilustram os resultados teóricos confrontados com os resultados experimentais.

A análise da segurança será alcançada por meio da aplicação do critério de Collins (2001), conhecido como *Demerit Point Classification* – DPC. O critério de Collins (2001) avalia os resultados de “ λ ”, que é a razão entre resultado experimental ($P_{u,exp}$) e teórico ($P_{u,teo}$) de cada código normativo em análise no presente estudo. O DPC penaliza os resultados de “ λ ” conforme o

Quadro 2, sendo que resultados de “ λ ” muito abaixo da segurança ($\lambda \ll 1$), possuem a maior penalidade, dado que comprometem a segurança estrutural, assim como resultados muito conservadores ($\lambda \gg 1$), pois geram desperdício de materiais na fase de dimensionamento estrutural, onde as penalidades são classificadas de extremamente perigosas ($\lambda < 0,5$) a extremamente conservadoras ($\lambda \geq 2$).

Tabela 1 – Banco de dados resumido.

Autor	nº de ensaios	b_c (mm)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	$E_f \cdot t_f$ (N/mm)	b_f (mm)	l_f (mm)	P_u (KN)
BARBIERI <i>et al.</i> (2016)	12	150	32,6	3,03	238000	25-100	25-200	3,7-46,28
BISCAIA <i>et al.</i> (2015)	11	300	18,16	2,26	222600	10	50-300	5,07-10,51
BORBA (2015)	11	300	18,2	2,26	235200	10	50-300	5,07-10,51
MOSTOFINEJAD <i>et al.</i> (2014)	8	150	35,9-43	3,18-3,48	31178-39100	48-100	200	10,1-20,6
HADIGHEH; SETUNGE (2014)	17	150	47,1	3,64	237852	25-80	200	16-49,6
HOSSEINI; MOSTOFINEJAD (2014)	22	150	36,5-41,1	3,2-3,4	31178	48	20-250	7,58-10,12
BIOLZI <i>et al.</i> (2013)	6	150	32,59	3,03	238000	50	30-250	9,53-37,95
CARLONI <i>et al.</i> (2013)	3	125	42	3,43	38410	25	152	5,8-6,3
HOSSEINI; MOSTOFINEJAD (2013)	8	150	36,5-39,1	3,2-3,31	31178	48	75-150	9,12-10,07
WU; JIANG (2013)	20	150	25,3-59,02	2,67-4,07	41466,1	50	30-250	9,36-19,27
CARLONI <i>et al.</i> (2012)	3	125	35	3,14	38410	25	152	7,01-8,04
GRAVINA <i>et al.</i> (2012)	6	150	63-67	4,21-4,34	140000-448000	75	200	23-42

Fonte: autor.

Tabela 2 – Banco de dados resumido (cont.).

Autor	nº de ensaios	b_c (mm)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	$E_f \cdot I_f$ (N/mm)	b_f (mm)	l_f (mm)	P_u (KN)
BILOTTA <i>et al.</i> (2011)	34	150	21,46-26	2,46-2,70	38180-381800	50-100	50-400	16,85-33,56
CHO <i>et al.</i> (2011)	8	100	21-28	2,43-2,80	224900	50	100-250	12,5-22,5
NIGRO <i>et al.</i> (2011)	18	150	21,23-23,8	2,44-2,59	35856-239400	50-100	50-400	16,88-22,6
SUBRAMANIAM <i>et al.</i> (2011)	6	52	39	3,31	38410	20-25	152	6,15-8,65
BILOTTA <i>et al.</i> (2011)	18	160	19	2,31	227500-309400	60-100	300	6,89-54-79
CERONI; PECCE (2010)	14	150	21,58	2,46	37950	25-100	100-150	3,7-18,97
SENA-CRUZ <i>et al.</i> (2010)	2	200	32,8	3,04	244467	60	200	17,55-20,84
MAZZOTTI <i>et al.</i> (2009)	10	150	52,7	3,85	21450-276000	80	500	14,4-41
SHADRAVAN (2009)	43	150	16-76	2,12-4,62	37620	30-100	25-240	4,65-49,03
COSTA (2008)	7	150	43	3,48	38775	50	70-250	8-12,5
SUBRAMANIAM <i>et al.</i> (2007)	13	125	39	3,31	38410	12-46	152	3,50-13,2
SHARMA <i>et al.</i> (2006)	18	100	29,7-35,82	2,89-3,17	198000-360000	50	100-300	18,25-46,35
ÇAMLI (2005)	24	200-300	6-31	1,30-2,95	37950	25-50	50-150	2,84-12,45
FOSTER; KHOMWAN (2005)	2	100	37-53	3,22-3,86	224000	50	300	32,5-35,5
YAO <i>et al.</i> (2005)	53	100-150	18,9-27,1	2,30-2,76	42240	15-100	75-240	3,81-14,27
REN (2003)	30	150	22,96-44,4	2,54-3,53	42330-68310	20-80	60-150	4,61-22,8
FAELLA <i>et al.</i> (2002)	10	150	28,96-46,44	2,85-3,61	196000	50	50-250	8,34-39,78
BROSENS (2001)	10	200	44,9	3,55	39245	80-120	50-200	13,35-35,82

Fonte: autor.

Quadro 3 – Critério de Collins.

λ	Classificação	Penalidade
<0,5	Extremamente perigoso	10
[0,5-0,65[	Perigoso	5
[0,65-0,85[	Baixa segurança	2
[0,85-1,15[	Segurança apropriada	0
[1,15-2,00[	Conservador	1
$\leq 2,00$	Extremamente conservador	2

Fonte: Collins (2001).

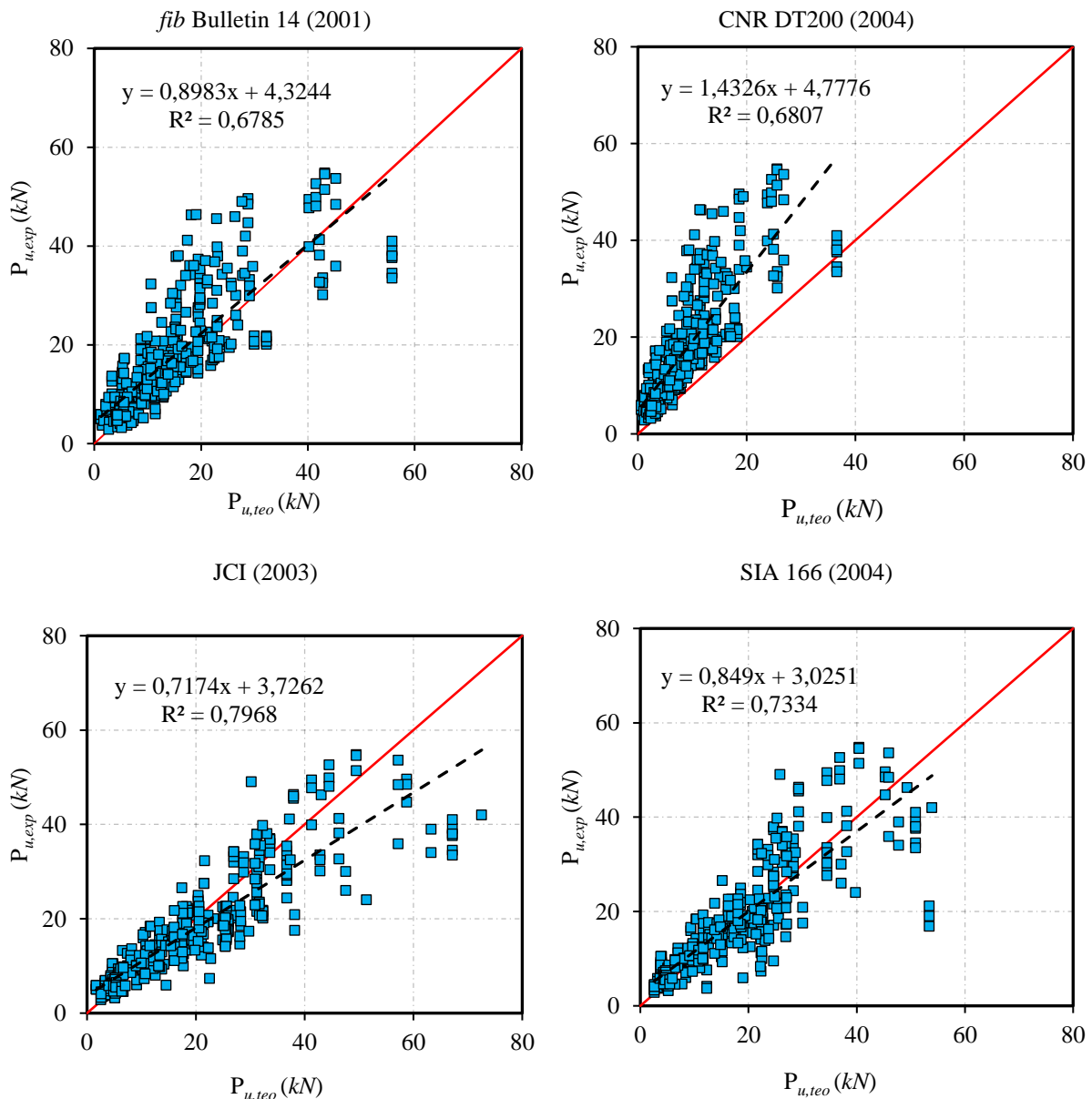
4 Discussão dos resultados

A Figura 4 demonstra os resultados teóricos estimados pelos códigos normativos (abscissas) e confrontados com os resultados experimentais (ordenadas). Os resultados que estão abaixo da linha vermelha diagonal estão abaixo da segurança, enquanto os resultados que estiverem acima desta mesma linha estão a favor da segurança. Quanto mais próximo os resultados estiverem da linha diagonal, mais preciso serão os resultados. Ainda na mesma figura, na linha tracejada, é expressa a linha de tendência dos resultados e o parâmetro estatístico R^2 , que será utilizado para avaliar a precisão das estimativas teóricas dos códigos normativos.

Analisando a Figura 4, quanto a acurácia, observou-se que dentre os códigos normativos avaliados, o *fib* Bulletin 14 (2001) e SIA 166 (2004), obtiveram resultados ligeiramente mais

acurados que os demais, dado que suas linhas de tendência situam-se em proximidade ao desejado (linha vermelha), indicando que um percentual considerável dos resultados estão próximos de $\lambda = 1$, ou seja, os resultados teóricos iguais ou próximo aos resultados experimentais. Quanto à precisão dos resultados, o modelo proposto pelo JCI (2003) obteve o melhor resultado com R^2 tendo o valor de 0,79. Na Figura 4 ainda é possível verificar que o código CNR DT200 (2004) teve um ótimo desempenho, uma vez que praticamente todos os resultados foram a favor da segurança, contudo muitos dos seus resultados foram acentuadamente conservadores, o que não é desejado, haja vista que resulta em desperdício de materiais na fase de projeto de reforço.

Figura 4 – Análise da precisão e segurança das prescrições normativas.



Na Figura 5 é ilustrada em termos de porcentagem, a quantidade de estimativas teóricas que estiverem em cada nível de penalidade proposto por Collins (2001), classificando resultados

como extremamente perigosos (muito abaixo da segurança) a extremamente conservadores (muito acima da segurança). Na Tabela 3 é mostrada a quantidade de resultados de λ para cada penalidade e a Figura 6 mostra a penalidade total das estimativas teóricas dos códigos normativos, que é a somatória do produto entre o número de resultados em cada intervalo de penalidade (4ª coluna da Tabela 3) e sua respectiva penalidade numérica (3ª coluna).

Como observado na Figura 5, Figura 6 e Tabela 3, os códigos normativos *fib* Bulletin 14 (2001), SIA 166 (2004) e JCI (2003) obtiveram resultados em sua maioria com classificação de segurança apropriada e conservador e com poucos resultados sendo penalizados com baixa segurança, indicando ótimo desempenho em relação à segurança estrutural. Ainda, o *fib* Bulletin 14 (2001), em nível segurança, conforme os critérios de Collins (2001), foi o que alcançou o melhor desempenho, considerando o menor valor de penalidade que obteve.

Cabe destacar o CNR DT200 (2004), que obteve todos os seus resultados acima da segurança e com penalidade de segurança adequada, conservador ou extremamente conservador. Do ponto de vista da segurança estrutural é algo desejável, no entanto nota-se que 45% dos resultados são conservadores e 52% extremamente conservadores, o que refletiu na penalidade total ilustrada na Figura 6, que mesmo sendo o código normativo que estava mais favorável à segurança, foi o que teve a maior penalidade, alcançando o valor de 668, quase o dobro das demais penalidades dos outros códigos, o que não é almejado em um código normativo de projeto estrutural, pois como supracitado, em consequência gera desperdício de materiais, algo não aceitável em um projeto, uma vez que um projeto estrutural sempre deve aliar segurança e economia.

Figura 5 – Distribuição dos resultados de λ .

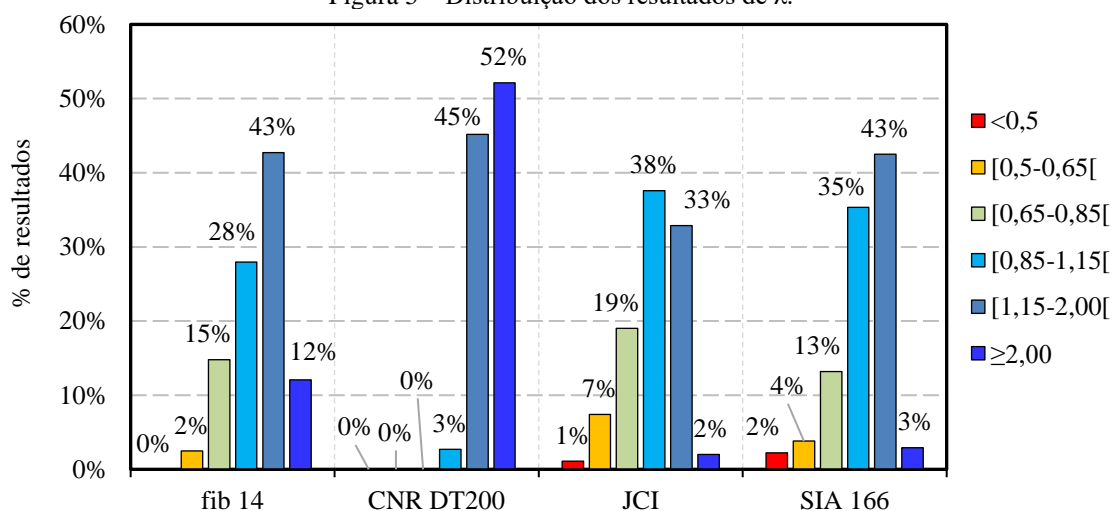
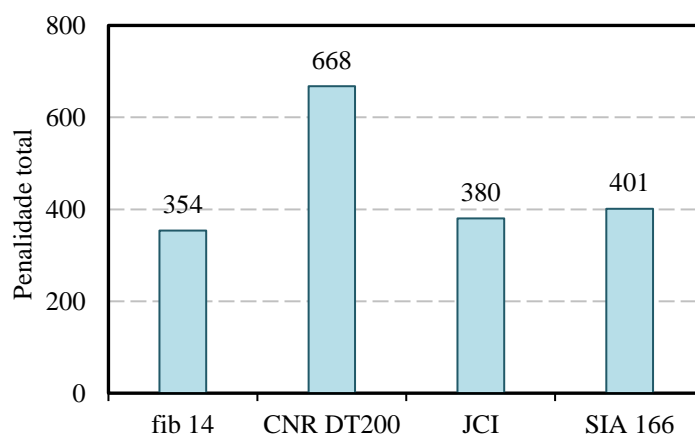


Tabela 3 – Classificação da segurança conforme critério de Collins (2001).

Classificação	$\lambda = P_{u,exp}/P_{u,te}$ o	penalidade e	fib 14	nº de resultados		
				CNR DT200	JCI	SIA 166
Extremamente perigoso	<0,5	10	0	0	5	10
Perigoso	[0,5-0,65[	5	11	0	33	17
Baixa segurança	[0,65-0,85[	2	66	0	85	59
Segurança apropriada	[0,85-1,15[	0	125	12	168	158
Conservador	[1,15-2,00[	1	191	202	147	190
Extremamente conservador	$\geq 2,00$	2	54	233	9	13
Penalidade total			354	668	380	401

Fonte: Autor.

Figura 6 – Penalidade total de Collins (2001) aplicada.



Fonte: Autor.

Um ponto importante de ser notado é que mesmo as expressões dos códigos normativos JCI (2003) e SIA 166 (2004) serem relativamente simples comparadas as demais, obtiveram um bom desempenho quando considerado a segurança, tendo penalidades (COLLINS, 2001) próximas da penalidade alcançada pelo *fib* Bulletin 14 (2001), cujas expressões são mais elaboradas, logo estas expressões podendo ser consideradas muito mais práticas a nível de projeto de reforço estrutural.

Cabe ressaltar que a segurança não é o único critério a ser avaliado em um código normativo, pois também é desejado que os resultados sejam acurados, isto pode ser notado nos resultados alcançados pelo método analítico proposto pelo CNR DT200 (2004), no qual obtiveram muitos resultados com classificação extremamente conservadores, como supracitado, e novamente salientando, acarretando desperdício de material.

5 Conclusões

O presente trabalho avaliou o desempenho de estimativas teóricas de códigos normativos que prescrevem recomendações sobre o cálculo da resistência de aderência entre o PRFC e o concreto, utilizando um banco de dados com resultados experimentais e comparando os

resultados teóricos com os experimentais.

De modo geral, os códigos normativos analisados tiveram um desempenho relativamente bom, pois a quantidade de resultados teóricos com segurança inadequada foi muito baixa, tendo em sua grande maioria (mais que 80%) resultados acima da segurança. Ainda pode-se concluir que:

- ✓ O modelo analítico proposto pelo CNR DT200 (2004) considerando os resultados da amostra analisada, gera resultados extremamente conservadores, o que afeta negativamente na economia de um projeto de reforço;
- ✓ Quanto a precisão dos resultados, o JCI (2003) e SIA 166 (2004) possuíram estimativas ligeiramente melhores, mesmo tendo expressões numéricas mais simplificadas;
- ✓ À nível de segurança e acurácia, o código *fib* Bulletin 14 (2001) se destacou, dado que possuiu a menor penalidade na análise da segurança conforme critério de Collins (2001).

Referências

ACI 440.1R-06: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars: reported by ACI committee 440. 2006

CHEN, J. F. ; TENG, J. G. Anchorage strength models for FRP and steel plates attached to concrete. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 2001.

COLLINS, M. P. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. **A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design**. 2001.

EKENEL, M.; STEPHEN, V.; MYERS, J. J.; ZOUGHI, R. **Microwave NDE of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates Containing Surface Defects and Tested Under Cyclic Loading**. Electrical and Computer Engineering, University of Missouri-Rolla, , USA, pp 1-8, 2004.

Fédération Internationale du Béton. Externally bonded FRP reinforcement for reinforced concrete structures. **fib Bulletin 14**, Lausanne, Switzerland, 2001.

FERREIRA, M. P.; OLIVEIRA, M. H.; LIMA NETO, A. F.; TAPAJÓS, L. S.; NASCIMENTO, A.; FREIRE, M. C. Influência da Ancoragem na Resistência à Flexão de Vigas Reforçadas com Mantas de PRFC. **Revista ALCONPAT**, 9 (1), pp. 30 – 47. 2018.

Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, **CNR DT 200**, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, National Research Council, Washington DC, USA, 2004.

Japan Concrete Institute. **JCI**. Technical report of technical committee on retrofit technology. In Proceedings of the International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Kyoto, Japan, 14–15 July 2003.

SIA. SIA Norm 166. Klebebewehrung; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Zurich, Switzerland, 2004; p. 44.

Simpson Strong – Tie. **Sistemas de reforço FRP**. Disponível em: <https://www.sp-reinforcement.pt/pt-PT/produtos>. Acessado em 10 de Set. de 2021.