

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ESTUDO PARAMÉTRICO DO CONECTOR PERFOBOND E  
INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO CONCRETO**

**Paulo Estevão Carvalho Silvério**

Belo Horizonte  
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

" ESTUDO PARAMÉTRICO DO CONECTOR PERFOBOND E  
INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO DO CONCRETO "

Paulo Estevão Carvalho Silvério

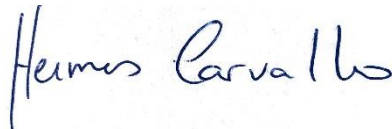
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:



---

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas  
DEES - UFMG (Orientador)



---

Prof. Dr. Hermes Carvalho  
DEES - UFMG



---

Profa. Dra. Renata Gomes Lanna da Silva  
CEFETMG

Belo Horizonte, 05 de maio de 2020

S587e

Silvério, Paulo Estevão Carvalho.

Estudo paramétrico do conector Perfobond e influência do confinamento do concreto [recurso eletrônico] / Paulo Estevão Carvalho Silvério. - 2020.

1 recurso online (86 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodrigo Barreto Caldas.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 84-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Conectores de cisalhamento - Teses. 3. Ensaios - Teses. I. Caldas, Rodrigo Barreto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, força e determinação que me permitiram chegar ao fim de mais essa importante etapa.

À minha querida esposa Thaís, pelo amor, carinho e suporte durante todo este período, principalmente nessa etapa final, com a chegada de nossa querida filha Isabela. Sua dedicação e compreensão, assim como ajuda na organização das minhas tarefas, foram fundamentais para que eu conseguisse finalizar este trabalho. Obrigado também à minha pequena Isabela, que enche nossas vidas de alegria todos os dias!

À toda minha família, meus pais Carlos e Izabel que sempre me apoiaram e incentivaram. Ao meu irmão Marcos e toda família, meus sogros Lourdinha e Sálvio, e minhas cunhadas Bruna e Sílvia Natália. A todos agradeço pela companhia, amizade e suporte tão importantes para que tudo ficasse bem a cada dia, também pelos momentos de descontração, tranquilidade e descanso.

À todos da família E. Bicalho, pela amizade e apoio durante esse percurso. Aos engenheiros (as) Fabiano, Tânia, Thaís, Matheus, Lucas e Renata pelo companheirismo diário e amizade.

Ao Professor Estêvão, chefe, amigo e padrinho, agradeço imensamente por tornar tudo isso possível. Agradeço pela paciência e apoio, não somente a mim, mas à minha família. Pela compreensão durante toda essa jornada com horários flexíveis para fazer as disciplinas, para realizar os ensaios e para reunir com a equipe do mestrado. Agradeço por todas as dicas, experiências e recomendações na realização deste trabalho.

Ao Professor, orientador e amigo, Rodrigo Caldas, agradeço por acreditar que seria possível desenvolver este trabalho mesmo sem que eu pudesse ter dedicação exclusiva. Agradeço pela dedicação e todo o suporte no decorrer deste trabalho.

Ao meu colega de projeto, e amigo, Otávio que ajudou imensamente no desenvolvimento deste trabalho. Foi um prazer trabalhar durante todo o projeto, desenvolvimento dos ensaios, das modelagens, e também os momentos de descontração.

À todos os colegas do mestrado pela parceria e troca de experiências.

À todos os professor do DEES por contribuírem na minha formação, principalmente à toda a equipe do Grupo de Pesquisa em Estruturas de Aço e Misturas de Aço e Concreto (*Steel Group*).

À toda equipe do LAEES que contribuíram imensamente no desenvolvimento dos ensaios experimentais.

E por fim, à todos os amigos que sempre estão presentes alegrando o nosso dia a dia, mesmo que distantes.

Muito Obrigado!

## RESUMO

O presente trabalho refere-se a um estudo numérico experimental do conector *Perfobond*. Este trabalho está sendo empreendido, pois observou-se na literatura que as diferentes disposições geométricas em que se insere o conector do tipo *Perfobond* têm grande influência sobre seu comportamento mecânico, podendo-se observar variações significativas na ductilidade, capacidade resistente e modo de falha do conector em função da profundidade e nível de confinamento do concreto na região da conexão. Portanto, nesse trabalho optou-se por adotar uma nova geometria de ensaio de cisalhamento, similar a um ensaio de arrancamento, que permite simular o conector tanto em situação superficial quanto profunda. Observou-se que o furo com barra passante e confinado apresenta um estágio de resistência secundário onde, após a ruptura localizada do concreto, a barra passante é mobilizada até sua ruptura, o que dá um acréscimo de capacidade resistente e ductilidade a conexão. Esse acréscimo não é observado no conector superficial, cuja capacidade resistente é definida pela falha localizada do concreto, que, devido à ausência de confinamento, imediatamente danifica a superfície, causando fissuração e destacamento do concreto. Visando gerar mais dados para a formulação de um novo modelo de cálculo, construiu-se um modelo numérico no software ABAQUS que reproduz a configuração dos ensaios realizados. O modelo foi capaz de simular com boa precisão os ensaios experimentais realizados e, em seguida, é utilizado para extrapolar as configurações físicas e geométricas dos protótipos experimentais em um estudo paramétrico para verificar a influência dos parâmetros diâmetro do furo ( $D$ ), espessura da chapa ( $t$ ), diâmetro da barra de reforço ( $d$ ), e o confinamento dado pela profundidade do conector no interior do concreto ( $P$ ), e taxa de armadura confinante ( $A_c$ ).

**Palavras chaves:** *Perfobond*, Conector, Confinamento, Ensaios, Numérico.

## ***ABSTRACT***

The present work refers to an experimental and numerical study for the Perfobond connector. This work is being undertaken as it has been observed that the different geometric arrangements in which the Perfobond connector is inserted have great influence on its mechanical behavior. Significant variations in ductility, strength and failure mode of the connector observed in the literature can be attributed to the depth and level of concrete confinement in the region of the connection. Therefore, in this work it was adopted a new push test geometry, similar to a pullout test, which allows simulating the connector in both superficial and confined situations. It was observed that confined Perfobond holes with perforating rebar show a secondary resistance stage, which occurs after local failure of the concrete dowel, where the perforating rebar resists nearly the totality of the shear force until it fails. This behavior provides a strength and ductility increase to the connection and is not observed in superficial connections, whose resistant capacity is defined by the local failure of the concrete, which, due to the absence of confinement, immediately damage the surface, causing cracking and spalling of the concrete. In order to generate more data for the formulation of a new design model, a numerical model that reproduces the configuration of the performed tests was built in ABAQUS software. The model was able to accurately simulate performed push tests and then was used to extrapolate the physical and geometric configurations of the experimental prototypes in a parametric study to validate the influence of some properties such as the hole diameter ( $D$ ), plate thickness ( $t$ ), rebar diameter ( $d$ ), and the confinement given by the connector depth inside the concrete ( $P$ ), and the confinement steel reinforcement rate ( $A_c$ ).

**Keywords:** Perfobond, Connector, Confinement, Tests, Numerical.



# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO .....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS .....	11
LISTA DE SÍMBOLOS .....	11
1. Introdução .....	13
1.1 Considerações Iniciais .....	13
1.2 Pesquisa e Justificativa .....	14
1.3 Objetivo Geral .....	15
1.4 Metodologia .....	15
1.5 Estrutura do Documento.....	16
2. Revisão Bibliográfica.....	17
2.1 Comportamento do Perfobond.....	17
2.1.1 Influência da Barra Transversal.....	17
2.1.2 Influência da Espessura da Chapa .....	21
2.1.3 Influência do Diâmetro do Furo .....	22
2.1.4 Influência da Profundidade da Conexão .....	23
2.1.5 Influência da Resistência do Concreto .....	26
2.2 Ensaios de Cisalhamento em Conectores do tipo <i>Perfobond</i> .....	27
2.2.1 Ensaio de Cisalhamento Padrão ( <i>Standard Push-out Test</i> ).....	28
2.2.2 Ensaio de Cisalhamento tipo Plug-in.....	29
2.3 Propriedades do Concreto para Simulação Numérica .....	31
2.3.1 Compressão.....	31
2.3.2 Tração.....	34
2.3.3 Parâmetros no Modelo Numérico.....	35
3. Ensaios Experimentais .....	37
3.1 Considerações Iniciais .....	37
3.2 Configuração do Ensaio.....	38
3.3 Protótipos Experimentais.....	40
3.4 Caracterização dos Materiais .....	43
3.5 Resultados dos Ensaios .....	45

3.6	Análise dos Resultados dos Ensaios .....	49
4.	Modelagem Numérica .....	56
4.1	Considerações Iniciais .....	56
4.2	Modelos Numéricos .....	56
4.2.1	Configuração geral dos modelos.....	56
4.2.2	Malha de Elementos Finitos .....	57
4.2.3	Condições de Contorno, Restrições, Contatos e Carregamento .....	59
4.2.4	Método de Análise .....	63
4.2.5	Materiais .....	64
4.2.6	Aquisição dos Resultados.....	70
4.3	Resultados Numéricos.....	71
4.3.1	Variações Geométricas do Modelo .....	71
4.3.2	Curvas Força <i>versus</i> Deslizamento .....	71
4.3.3	Análise dos Resultados Numéricos .....	74
4.3.4	Comparação com Observações Experimentais .....	75
5.	Análise Paramétrica.....	77
5.1	Parâmetros Geométricos do Furo ( $D$ , $t$ e $d$ ) .....	77
5.2	Parâmetros Geométricos do Entorno ( $P$ e $A_c$ ).....	80
6.	Conclusões .....	82
7.	Referências Bibliográficas .....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DEES	Departamento de Engenharia de Estruturas
DT	Transdutores de Deslocamento
EN	Norma Europeia
LAEES	Laboratório de Análise Experimental de Estruturas
NBR	Norma Brasileira
PT	Conectores Profundos
ST	Conectores Superficiais
T1, T2	Tipologias de protótipos dos ensaios experimentais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_C$	Taxa de Aço confinante
$A_{dr}$	Protótipo experimental com aderência entre chapa e concreto
CDP	<i>Concrete Damaged Plasticity</i>
C1, C2	Constantes
D	Diâmetro do furo
d	Diâmetro da barra de reforço
$d_c$	Dano à compressão
$d_t$	Dano à tração
$d_n$	Diâmetro da barra não deformada
$d_f$	Diâmetro da barra na região de estrição do ensaio de tração
$E_{cm}$	Módulo de elasticidade secante do concreto
$E_a$	Módulo de elasticidade do aço
Esp	Espessura de concreto do conector entre a chapa e a barra de reforço

$f_c$	Resistência à compressão
$f_{cm}$	Resistência média à compressão do concreto
$f_{ctm}$	Resistência média à tração do concreto
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço
$f_u$	Resistência à ruptura do aço
$f_{b0}$	Resistência à compressão no estado biaxial
$f_{c0}$	Resistência à compressão no estado uniaxial
$K$	Parâmetro para definição da superfície de escoamento (CDP – ABAQUS)
$L_{loc}$	Comprimento do trecho deformado da barra no ensaio de tração
$P$	Profundidade do conector
$P_E$	Resistência do conector no ponto I
$P_Y$	Resistência do conector no ponto II
$P_R$	Resistência máxima do conector (ponto III)
$P_U$	Resistência do conector no deslizamento máximo (ponto IV)
$t$	Espessura da chapa
$w$	Abertura de fissuras
$w_c$	Abertura de fissuras crítica
$\varepsilon_c$	Deformação do concreto
$\varepsilon_y$	Deformação do aço
$\alpha, \alpha_{tD}, \alpha_{tE}$	Constantes
$\beta$	Constante
$\gamma_c$	Massa específica do concreto
$\mu$	Parâmetro de viscosidade (CDP – ABAQUS)
	Coefficiente de atrito
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\psi$	Ângulo de dilatância (CDP – ABAQUS)
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\sigma_t$	Tensão de tração
$\eta$	Constante
$\delta_E$	Deslizamento do conector no ponto I
$\delta_Y$	Deslizamento do conector no ponto II
$\delta_R$	Deslizamento do conector no ponto III
$\delta_U$	Deslizamento máximo do conector (ponto IV)

# 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, O. P. Estudo do Comportamento de conectores Crestbond em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto. Dissertação de Mestrado, 2015.

AGUIAR, O. P. Transferência de Esforços em Furos em Chapas de Aço Preenchidos por Concreto. Projeto de Tese, 2018.

AGUIAR, O. P.; CALDAS, R. B.; RODRIGUES, F. C.; FAKURY, R. H.; VERÍSSIMO, G. S. Conectores Crestbond para transferência de carga em pilares mistos preenchidos com concreto. Revista IBRACON. Volume 11, Number 5, p. 960-965,1983-4195, 2018.

ARCELORMITTAL EUROPE. Slim Floor – An innovative concept for floors, Design Guide. Retrieved April 24, 2017, from <http://constructalia.arcelormittal.com>.

BRAUN, M.; OBIALA, R.; ODENBREIT, C. Numerical simulation of the load bearing behaviour of concrete dowels in slim-floor construction, Proceedings of Eurosteel, v. 1, p. 1831-1840, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

HE, S.; FANG, Y.; LIU, L.; MOSALLAM, A.S. Experimental study on perfobond strip connector in steel–concrete joints of hybrid bridges, Journal of Constructional Steel Research, v. 118, p. 169-179, 2016.

KRAUS, D; WURZER, O. Bearing capacity of concrete dowels, IABSE Reports, p. 133-138, 1997.

NAKAJIMA, A.; NGUYEN, M.H. Strain behaviour of penetrating rebar in perfobond strip and its evaluation of shear resistance, Journal of Japan Society of Civil Engineers, v. 71, n.1, p. 99-112, 2015.

NBR 5739:2007. Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos.

NBR 7222:2011. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

NBR 8522:2017. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.

NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida 2:2018. Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.

PAVLOVIĆ, M.; MARKOVIĆ, Z.; VELJKOVIĆ, M.; BUĐEVAC, D. (2013). Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research* 88 (2013) 134–149.

PENG-ZHEN, L.; LIN-FENG, C.; YANG, L.; ZHENG-LUN, L.; HUA, S. Study on Mechanical Behavior of Negative Bending Region Based Design of Composite Bridge Deck. *International Journal Civil Engineering*, v. 16, n. 5, 2018; p.489-497.

REINHARDT, H. W., CORNELISSEN, H. A. W., & HORDIJK, D. A. (1986). Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 112(11), 2462–2477.

SU, Q. T.; WANG, W.; LUAN, H. W.; YANG, G. T. Experimental research on bearing mechanism of perfobond rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 95, 2014; p.22-31.

SIMULIA CORP. Software ABAQUS 6.13, Dassault Systèmes, 2013.

USHIJIMA, Y.; TETSUYA, H.; MITSUKI, M. An experimental study on shear characteristics of perfobond strip and its rational strength equations, *International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, p. 1066-1075, 2001.

VIANNA, J.; COSTA-NEVES, L.; VELLASCO, P.; ANDRADE, S. Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach. *Engineering Structures*, v. 30, n. 9, 2008; p.2381-2391.

XIAO, L.; LI, X.; MA, Z.J. Behavior of Perforated Shear Connectors in Steel–Concrete Composite Joints of Hybrid Bridges, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, v. 22, n.4, 2016.

XU, F.; ZHANG, Z.; WANG, D.; HULIL, W. Application of a Perfobond Rib Shear Connector Group in a Beam–Arch Hybrid Bridge. *Structural Engineering International*, v. 25, n. 4, 2015; p.414-418.

ZHONG TAO; ZHI-BIN WANG; QING YU. Finite element modeling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. 2013.