



João de Jesus dos Santos

**Estudo Experimental de Ligações
Aparafusadas de Aço Inoxidável
Submetidas à Tração**

Tese de Doutorado

V^•^ æ |^•^} ææÁæ ÁÚ[*!æ æÁ^ÁÚ5•Ë!æ æè[
^ { ÁÒ} *^} ææÁ Ôæ ÁæÁ ÚWÔËæ Á& { [Á!^~ æ æ[
] æ&æÁ] ææÁ [àç} 8è[Á à[Á æ [Á à^ Ô[ç! ^ {
Ò} *^} ææÁ Ôæ ÁË

U!æ } ææ[!K Ú[-ÈÚ^àæ ææ[ÁËË[] ^•Á^ Ô æ!ææ^
Ô[È!æ } ææ[!K Ú[-ÈÚ^à[ÁÔ[] æ ÔÈÚæçæX^||æ &
Ô[È!æ } ææ[!K Ú[-ËË~ ææ [ÁËË! } ^|æ à^Áæ æ

Üæ Á^Áæ ^æ[
Ù^ç{ à[á^Áæ



João de Jesus dos Santos

**Estudo experimental de ligações aparafusadas de
aço inoxidável submetidas à tração**

V^•^Á æ[^•^} ææÁ &{ [Á !^~ ã æ[Á] ææÁ] ææ
[à^} 8è[Á[ÁO!æ á^ Ô[~ d[] ^[[ÁU! *!æ æÁ^U5• È
Ô!æ æè[Á{ ÁO} *^} ææÁÔãÁ[ÁO^] ææ ^} d[Á^
Ô} *^} ææÁÔãÁ[ÁO^] d[ÁV..& æ[ÁOã} ææ[Áææ
ÚWÔËÛ È Ç[! çææÁ ^!æÁ Ô{ ã•è[ÁOæ ð æ[!æ
ææ[Á•ð ææ

Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

U!ã} æ[!
Ô^] ææ ^} d[Á^ÁO} *^} ææÁÔã. ÚWÔËÛ

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Ô[ÈU!ã} æ[!
Wj ã^!•ææ^Á[ÁO•æ[Á[ÁÛ ã^Áæ^ã[

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Ô[ÈU!ã} æ[!
Wj ã^!•ææ^Á[ÁO•æ[Á[ÁÛ ã^Áæ^ã[

Prof. Ney Augusto Dumont

Ô^] ææ ^} d[Á^ÁO} *^} ææÁÔã. ÚWÔËÛ

Prof. Raul Rosas e Silva

Ô^] ææ ^} d[Á^ÁO} *^} ææÁÔã. ÚWÔËÛ

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Wj ã^!•ææ^Á^á!æÁ{ ã^}•^

Prof. Ricardo Azoubel da Mota Silveira

Wj ã^!•ææ^Á^á!æÁ^! ÁU!^d

Prof. José Eugenio Leal

Ô[!á^} æ[!ÁU^d !æÁ[ÁO^] d[ÁV..& æ[ÁOã} ææ[. ÚWÔËÛ

Û ã^Áæ^ã[ÈÏ Á^Á^ç{ à[Á^ÁÇFI È

Vqf qu"qu" f k g k qu" t g u t x c f q u 0' i " r t q k d k f c " c " t g r t q f w ± q " v q v n
q w' r c t e k n' f q " v t c d c n j q " u g o " c w w t k c ± q " f c " w p k x g t u k f c f g . " f q
c w w t " g " f q " q t k g p v c f q t 0

João de Jesus dos Santos

I t c f w q w / u g g o " G p i g p j c t k " E k x k n e q o ž p h c u g " g o " G u t w w t c u
r g r e W p k x g t u k f c f g " X g k i c " f g " C m g k f c " * 3 ; ; 3 ± . " o g u t c f q " g o
G p i g p j c t k " E k x k n' r g r e W p k x g t u k f c f g " f q " G u x c f q " f q " T k q " f g
L c p g k t q " * 4 2 2 : + 0 R w d n e q w w o e c r k w r q " g o " r k x t q . " f q k u ' v g z v q u " g o
l q t p c k u " g " t g x k u c u . u g v g v t c d c n j q u e q o r r g v q u " r w d n e c f q u " g o
c p c k u " f g " e q p i t g u u q 0' V g o " g z r g t k p e k " p c " a t g c " f g " G p i g p j c t k
E k x k n " e q o " ' p h c u g " g o " G u t w w t c u g " E q p u t w ± g u . " c w c p f q
r t k p e k r c m g p v g " p q u " u g i w k p v g u " v g o c u < e a r e w r q " g u t w w t c n
e q p u t w ± q " f g " r t 2 f k q u . " t g h q t o c " f g " e q p u t w ± g u . r k i c ± g u
c r c t c h u c f c u . " c p a r k u g " g z r g t k o g p v c n c p a r k u g p w o 2 t l e c g
c p a r k u g c p c n f l e c 0

Ficha Catalográfica

Santos, João de Jesus

Estudo experimental de ligações aparafusadas de
aço inoxidável submetidas à tração / João de Jesus dos
Santos; orientador: Sebastião A. Lopes de Andrade; co-
orientador: Pedro Colmar G. Silva Vellasco, Luciano R.
Ornelas de Lima. – 2014

261f. : 239il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil,
2014.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Aço inoxidável. 3.
Ligações aparafusadas. 4. Resistência a tração. 5.
Análise experimental. 6. Dimensionamento estrutural. I.
Andrade, Sebastião A. Lopes de. II. Vellasco, Pedro
Colmar G. Silva. III. Lima, Luciano R. Ornelas de. IV.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

Fgf leq"guv"vgug c"o kpj c"ho "hc.
r qt² o . gur gekm gpvg" c"wo c"r guuc"s wg"o cku"o g"cr qkqw.
g"o g"tqwz g"o wku cugi tkcu g"eqphqw"go "o ko "f guf g"s wg"pcuek
C"o kpj c"s wgtkf c"o - g."s wg"guv "pq"e² w"o cu"s wg"eqpvkwc"eqo ki q0
Cnekpfc"fg"lguwu"fu"Ucpvqu

Agradecimentos

Ci tcf g±q go "gur gekn" c" F gwu" r qt" r tqr qtekpct" guug" o qo gpvq" o wksq" hgrk" go o kpj c" xkf c" g" r qt" guvct" ugo r tg" cq" o gw' rcf q. " c²" o guo q" s wcpf q" cej co qu" guvct uq| kpj qu0

Vco d²o " s wgtq" ci tcf gegt. " o cku" wo c" xgl " go " gur gekn" «" o kpj c" gur quc" r qt eqo r tggpf gt g" cwtct cu" o wksu" j qtcu" f g" guwf q0 Cqu o gw" hñj qu s wg" o g" vcl go o wksu cñgi tku" g hñekf cf gu0

Cq" o gw' r ck r qt" guvcto qu ugo r tg" lwpvqu. o g" cr qlcpf q" g" clwf cpf q" f g" vqf c" hqto c r quuñxgneqo "o wksq" co qt" g" ectkpj q0

Cqu" o gwu qtlgpvcf qtgu Rtqhguuqt" F qwwt Ugdcuk q" Cpf tcf g. Rtqhguuqt" F qwwt Rgf tq" Xgmueq g" Rtqhguuqt" F qwwt" Nwekcpq" Nko c. s wg" o g clwf ctco " pc" gñdqt c± q f guug r tqlgvq qtlgpvcf q q" b gñj qt" eco kpj q" c" ug" vqo ct0

Cqu" co ki qu Gwñkf gu" g" Lqu² " P knuqp f q" NGO " f c" RWE/ Tkq r grñ clwf c" pc gzgew± q f qu o gwu" gpuckqu0 Cqu" co ki qu Gpi à Cpñ/pkq" Kpª ekq. " Ectmqu" g" Rcwnñ" f q NGE pc WGT L r gññ" cr qlq" pc" tgcñk c± q" f cu" cpª r kuqu f qu" gpuckqu" gñr gtlo gpvcu0ñ " go r tguç O gññhgpcu r gññ cr qlq egf gpf q" ugw o cs wkpª tkq" g" qu" ugwu" gur c± qu" hññlequ" r ctc eqphge± q" f qu" gñr gtlo gpvqu0 Cq Rtqhguuqt" F qwwt" O ctegmñ r grñ eqphge± q f cu i cttcu" g" f qu" eqtr qu" f g" r tqxc0C ECRGU" g q EP Rs " r gññ" cr qlq" hñpcpegk q0

Cqu" co ki qu Tqdgñvñ qu" Ucpvqu. Tgi kpcñf q Dctdquç. Tqdgñvñ I wñf c. Vcteñññk Tgku. Tqpcñf q" Emrgñv" g Cf qññññ Mçñti ku" f q" P cueko gpvñ" Xkpc f c" CRGTCO . r gtñppegpñg" cq" I twr q" f c Ctegmñt O kñññ" r gññ hñtpgeko gpvñ" f q" c± q" kpqz kª xgn wññk cf q pguug guwf q0

Gñ c vqf qu" s wg" guñkxgtco " eqo ki q" pguuc" eco kpj cf c. " o gwu" ukpegtqu" ci tcf geko gpvqu0

Resumo

Ucpvqu." Iq⁻q" f g" Iguwu" f qu=" Cpftcf g." Ugdcuk⁻q" Ctjy wt" Nqr gu" f g
*Qtkgpvcf qt+. Xgmcueq. Rgf tq"Eqmo ct I qp±cxkgu f c Ukxc g"Nko c."Nwekcpq
Tqftki wgu" Qtpgrcu" f g *Eqqtkgpvcf qtgu+0 **Estudo Experimental de**
Ligações Aparafusadas de Aço Inoxidável Submetidas à Tração0Tkq
f g"Lcpgktq."42360483 r 0Vgug f g F qwwqtcf q ó F gr ctwco gpvq"f g"Gpi gpj ctke
Ekxkn"Rqpwt^hpek"Wpkxgtukf cf g"Ecw^hrec"f q"Tkq"f g"Lcpgktq0

Cwcm gpvg c"wkk^h c± q"f q" c±q"kpqz^hkf^a xgn"go "grgo gpvqu"gutwwtcku"ckpf c
2 eqpul^h gtcfc r qt o wkuqu"api gpj gktqu" g"cts wkgvqu wo c"uqnw⁻ q"gz vtcxci cpv^h r ctc
qu"r tqdngo cu"fc"api gpj ctke0Vqf cxkx."o wf cp±cu" f g"ckw^h gu"pc eqputw⁻ q"ekxkn" g
wo c" vcpuk⁻ q" i mdcn" r ctc" wo " f gupxqrxko gpvq" uwugp^h xgn g" tgf w⁻ q" go
lo r cevqu"co dkgpcku" vgo "ugi wtco gpv^h r tqxqecf q" wo "cwo gpvq"pq" wuq" f q" c±q
kpqz^hkf^a xgn0C"o ckqtk^h f cu"pqto cu" f g"r tqlgvq" f g" c±q"kpqz^hkf^a xgn"cwcku"ckpf c"u⁻ q
dcugcf cu" go "cpcmqi kcu" cuwo kf cu"eqo "q"eqo r qt wco gpvq" f g" gutwwtcku" f g" c±q
ectdqpq0 Gpvtgcpvq." q" c±q" kpqz^hkf^a xgn" cr tgugpvc" s wctq" ewt^hxcu" vgu⁻ q *versus*
f ghqto c± q gur ge^hcku p⁻ q" rkgctgu" ugo "r cwco ct" f g" gueqco gpvq" g" tgi k⁻ q" f g
gpvtwco gpvq"eritco gpv^h f ghkpf qu"*tc± q" g"eqo r tgu⁻ q." r ctcgr^h g"r gtr gpf lewnt
c" f ktg⁻ q" f g" nco kpc± q+." o qf k^hecpf q" cuuko ugw" eqo r qt wco gpvq" i mdcn0 P c
r tgugpvc" kpxguk^h c± q" hqto "wkk^h cf qu" q" c±q"kpqz^hkf^a xgn"cwugp^h k^heq"526. f wr ngz
4427. hgtt^h k^heq 652 g"q" c±q"ectdqpq"WUK522."eqo "vgpu^h gu Ànko cu g" f we^hkk^h cf gu
f k^hkpvcu0Go "grgo gpvqu"gutwwtcku"uwo gkf qu" c guhqt±qu f g"tc± q wuwm gpv^h c
twr wt c" f c" ug± q" r^h vkf c" tgr tgugpvc" wo " f qu" guwcf qu" rko kgu" Ànko qu" c" ugt go
xgtk^hecf qu0Ego "q" qdlgvkxq" f g" ug" cxcrct" c" tguk^h v^h pek^h c" c" tc± q" f g" grgo gpvqu
gutwwtcku" cr ctchwcf qu" go "c±q"kpqz^hkf^a xgn guug vtedcj q cr tgugpvc" tguwncf qu" f g
wo r tqi tco c" gztgto gpvcn gpqxkxgpf q" rki c±^h gu cr ctchwcf cu eqo " hwtqu
f ghucf qu"uqd"tc± q0Guug guwf q hqk tgerk^h cf q go "r g±cu" f g" c±q"ectdqpq" g" c±qu
kpqz^hkf^a xgku f g" hqto c" c" eqo r ctct" cu" r tkpek^h ck^h ectcevt^h k^hcku" o ge⁻ p^hcku gpvtg
guugu" f qku" v^h qu" f g" c±qu" gutwwtcku0 F guuc hqto c" hqk^h r qu^h kgn cr tgugpvc" ppxqu
tguwncf qu" c" tgr gkxq" f q eqo r qt wco gpvq" c" tc± q" f guucu" rki c±^h gu0 F gpvtg" qwtcu
xctk^h xgku" s w^h eqpvtqrco " qu guwcf qu" rko kgu" Ànko qu" hqk^h xgtk^hecf c" c" kphw^h pek^h
uki p^hck^h v^hxc" f c" gur guwtc" f c" r nec" f g" cr r^hec± q" f c" ecti c." f ktg⁻ q" f c" nco kpc± q.
eqph^hki wt c± q f g" r ctchwqu" f c" rki c± q" g" r tqrtk^h cf gu" f q" c±q"kpqz^hkf^a xgn eqo q
f we^hkk^h cf g" g"tc|⁻ q" gpvtg" wcu" vgu^h gu" f g" gueqco gpvq" g" f g" twr wt c0

Palavras-chave

C₂q" Kqz k^a xgn" Nk c₂gu Cr ctch wuf cu" Tgukv' pek" c" vc₂q" Cp^a rkug
Gzr gtlo gpvn=F lo gpukpco gpvq"Gut wwtcn

Abstract

Ucpvqu."Lq~q"f g"Lguwu"fu=Cpf tcf g."Ugdcuk q"Ctj wt"Nqr gu"fg."Xgmueq
*Cf xkuqt+."Rgf tq"Eqm ct"I qp±cixgu"fc"Ukxc"Xgmueq g"Nko c."Nwekcpq
Tqf tki wgu"Qtpgru"fg *EqCf xkuqt+0 **Experimental Study of Stainless
Steel Bolted Connections Subjected to Tension**0 Tkq"f g"Lcpqtkq."42360
483r0 F(Ue"Vj guku óF gr ctwco gpvq" fg" Gpi gpj ctke" Ekxkn" Rqpvtfpeke"
Wpkxgtukf cf g"Ecwdec"f q Tkq"f g"Lcpqtkq0

Vj g"wug"qh"uclprguu"uygn"kp"utwewtcln"api kpggtkpi "cr r necvku"ku"ukm"uggp
d{" o cp{" ctej kgew" cpf " gpi kpggtu" cu" cp" gzvtexci cpv" uqmwkqp0 J qy gxgt.
o qf khecvtu"qh"fguki pgtu"r ctcf ki o u"cpf ej cpi gu"kp"vj g"eqpwtwewkqp"o ctngv"cpf
vj g"pcwtcln"tcpu"kp"vq"cu"uwuclpcedng"fgxgnr o gpv'tgf welpi "gpxktqpo gpv'ko r ceu
j cxg" dqquvgf " vj g" wug" qh" uclprguu" uygn" utwewtgu0 C" uwdwcpvcln" o clqtkv{" qh
uclprguu" uygn" utwewtcln" f guki p" eqf gu" ku" ukm' dcugf " qp" ectdqp" uygn" cpcmji kgu0
F gur kv" vj ku" hrev vj g" uclprguu" uygn" r t gupv" hqwt" pqp/rkp gct utguu *versus* utclp
ewtxgu" *vgpukqp" cpf " eqo r tguukqp. " r ctcmgn" cpf " r gtr gpf kewrt" vq" vj g" tqnkpi
f ktgevkqp+"y kj qw" c" f ghkpgf "{ kgrf " r nvgcw" cpf utclp" j ctf gpkpi " | qpgu. uwdwcpvclm{
cnegt kpi " ku" i mdcn" utwewtcln" t gur qpug0 Vj g" r t gupv" kpxguiki cvkqp" cf qr vgf " vj g
cwugpkle" uclprguu" uygn" i tcf g" 526. " f wr ngz" uclprguu" uygn" i tcf g" 4427. " hgttkle
uclprguu" uygn" i tcf g 652 cpf " vj g" ectdqp" uygn" WUK522. cm y kj " uko krt " { kgrf
utguugu" dw" y kj " f khtgvp { kgrf utgpi vj utguugu" cpf " f wevkv{ " ecr cekkgu0
Utwewtcln" grgo gpv" uwdlgevfg " vq" vgpukqp" czcln" hqtegu" wuwcm{ " r t gupv" vj g" pgv
ugevkqp" twr wtg" cu" qpq" qh" ku" eqpvtqnkpi " wnko cvg" rko k' ucvgu0 Vj g" r t gupv" uwf {
r gthqto gf " cp gzt rtko gpvcln" r tqi tco o g" vq" gxcnvcg" cpf " kpxguiki cvg" vj g" vgpukqp
ecr cekv{ " qh" uci i gtgf " dqngf " o go dgtu0 Vj g vguu y gtg" o cf g" y kj " ectdqp" cpf
uclprguu" uygn" vq" eqo r ctg" cpf " ceegu" vj gk' uko krtkkgu" cpf " f khtgpegu" kp" vgt o u" qh
utwewtcln" r gthqto cpeg0 Vj wu" k' y cu" r quukdng" vq" qdugt xg" uki pkhecvtu" hkp fpi u" kp vj g
dgj cxkwt qh" vj gug dqngf " uci i gtgf " o go dgtu wpgt" vgpukqp" hqtegu0 Vj g
eqpvtqnkpi " wnko cvg" rko k' ucvgu" y gtg" uki pkhecvtu{ " kphwpegf " d{" xctkqu
r ctco gvtu" rkg< vj g" mcf kpi " r nvg" vj kempguu. " vj g" tqnkpi " f ktgevkqp. cf qr vgf " dqnv
eqphki wtcvkqp. " cpf " uclprguu" uygn" r tqr gtvgu" rkg< f wevkv{ " ecr cekv{ " cpf " vj g" tcvkq
dgw ggp" vj g" { kgrf " cpf " wnko cvg twr wtg utguugu0

Keywords

""""""Uckpꞑguu"uvggn= dqngf "lqkpu="vgpukꞑp"utgpi vj ="gzi gtko gpvci"cpnꞑuku= utwewtci
f guki p0

Sumário

1 Introdução.....	30
1.1 Motivação	33
1.2 Objetivos.....	35
1.3 Escopo.....	36
2 Revisão Bibliográfica	38
2.1 Estudo de ligações tracionadas com rebites sujeitos a cisalhamento (D’Aniello <i>et al.</i> , 2011).....	38
2.2 Estudo das ligações soldadas (Steven <i>et al.</i> , 2011)	39
2.3 Estudo de ligações em compressão com chapas de preenchimento (Borello <i>et al.</i> , 2011)	40
2.4 Estudo de ligações em duplo cisalhamento (Može e Beg, 2011)	42
2.5 Estudo de ligações com ruptura por esmagamento em aços inoxidáveis (Salih <i>et al.</i> , 2011).....	43
2.6 Comportamento mecânico de ligação aparafusada	44
2.7 Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada	46
2.8 Dimensionamento de ligações aparafusadas segundo o EUROCODE 3 (2003)	47
2.8.1 Dimensionamento de Ligações em Aço Carbono.....	47
2.8.2 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável	51
2.9 Análise da razão $s^2/4p$	52
2.10 Estudo de compatibilidade e equilíbrio da ligação aparafusada	54
3 Descrição do Programa Experimental.....	58
3.1 Caracterização da ligação aparafusada	58
3.2 Corpos de prova das chapas de aço carbono	60
3.3 Corpos de prova das chapas de aço inoxidável	61
3.4 Critério de dimensionamento	63

3.5 Avaliação da ligação aparafusada para o aço carbono e aço inoxidável.....	64
3.6 Caracterização dos ensaios	66
3.7 Preparação dos ensaios	68
3.8 Instrumentação	68
3.8.1 Extensômetros	68
3.8.2 LVDT e Encoder	69
3.8.3 Sistema de aplicação de força e aquisição de dados	70
3.8.4 Programação em LabView	73
3.9 Definição dos ensaios experimentais	73
3.10 Apresentação dos ensaios experimentais	76
4 Resultados dos Ensaios Experimentais	80
4.1 Ensaio de ligações em aço carbono (1 a 22).....	80
4.1.1 Influência do parâmetro s (1 a 8)	81
4.1.1.1 Ensaio E1_C_PL_N_145_6_25	81
4.1.1.2 Ensaio E2_C_PL_N_145_6_28	82
4.1.1.3 Ensaio E3_C_PL_N_145_6_30	83
4.1.1.4 Ensaio E4_C_PL_N_145_6_30	83
4.1.1.5 Ensaio E5_C_PL_N_145_6_35	84
4.1.1.6 Ensaio E6_C_PL_N_145_6_35	85
4.1.1.7 Ensaio E7_C_PL_N_145_6_40	85
4.1.1.8 Ensaio E8_C_PL_I_145_6_50	86
4.1.1.9 Resultados dos ensaios 1 a 8 – Grupo I	87
4.1.2 Influência do parâmetro t_{pi} - (espessura da placa interna da ligação) (11 a 18)	89
4.1.2.1 Ensaio E11_C_PL_N_145_8_30	90
4.1.2.2 Ensaio E12_C_PL_N_145_10_30	91
4.1.2.3 Ensaio E13_C_PL_N_145_10_30	92
4.1.2.4 Ensaio E14_C_PL_N_145_12_30	92
4.1.2.5 Ensaio E15_C_PL_N_145_15_30	93
4.1.2.6 Ensaio E16_C_PL_N_145_15_30	94
4.1.2.7 Ensaio E17_C_PL_N_145_8_50	95
4.1.2.8 Ensaio E18_C_PL_N_145_15_50	95
4.1.2.9 Resultados dos ensaios – Grupo II (11 a 18)	96
4.1.3 Influência do parâmetro L (19 a 22)	98
4.1.3.1 Ensaio E19 – C_PL_N_107_6_25	99
4.1.3.2 Ensaio E20_C_PL_N_107_6_28	99
4.1.3.3 Ensaio E21_C_PL_N_107_6_30	100

4.1.3.4 Ensaio E22_C_PL_N_107_6_50	101
4.1.3.5 Resultado dos ensaios – Grupo III (19 a 22)	102
4.1.4 Influência da configuração geométrica da ligação (9 e 10)	103
4.1.4.1 Ensaio 9 – C_PL_I_145_15_50	104
4.1.4.2 Ensaio E10_C_PL_I_145_15_70	105
4.1.4.3 Resultado dos ensaios – Grupo IV (9 e 10)	105
4.2 Ensaaios com aço inoxidável austenítico	107
4.2.1 Influência do parâmetro s	107
4.2.1.1 Ensaio E23_A_PL_N_145_15_23	107
4.2.1.2 Ensaio 24 – A_PL_N_145_15_23	108
4.2.1.3 Ensaio E27_A_PL_N_145_15_30	110
4.2.1.4 Ensaio E28_A_PL_N_145_15_50	111
4.2.1.5 Ensaio E37_A_PP_N_145_6_20	112
4.2.1.6 Ensaio E40_A_PP_I_145_6_30	114
4.2.1.7 Ensaio 41 – A_PP_I_145_8_40	115
4.2.1.8 Ensaio E42_A_PP_I_145_8_50	117
4.2.1.9 Resumo dos ensaios 23 a 28, 37 e 40 a 42 – Grupo V	119
4.2.2 Influência do parâmetro t (espessura da placa interna da ligação)	122
4.2.2.1 Ensaio E25_A_PL_N_145_15_26	122
4.2.2.2 Ensaio 26_A_PL_N_145_15_30	124
4.2.2.3 Ensaio E29_A_PL_N_145_6_26	125
4.2.2.4 Ensaio E30_A_PL_N_145_6_30	126
4.2.2.5 Resultado dos ensaios – Grupo VI (25, 26, 29 e 30)	128
4.2.3 Influência do parâmetro L	130
4.2.3.1 Ensaio E34_A_PL_N_107_6_22	130
4.2.3.2 Ensaio E35_A_PL_N_107_6_24	131
4.2.3.3 Ensaio E36_A_PL_N_107_6_26	132
4.2.3.4 Ensaio E44_A_C_N_107_6_18	134
4.2.3.5 Ensaio E45_A_C_N_107_6_23	135
4.2.3.6 Resultado dos ensaios – Grupo VII (34 a 36, 44 e 45)	137
4.2.4 Influência da direção de laminação	139
4.2.4.1 Ensaio E32_A_PL_I_145_6_60	139
4.2.4.2 Ensaio E43 – A_PP_I_145_8_60	141
4.2.4.3 Resultado dos ensaios – Grupo VIII (32 e 43)	143
4.2.5 Influência da configuração geométrica da ligação	145
4.2.5.1 Ensaio E31_A_PL_I_145_6_55	145
4.2.5.2 Ensaio E38_A_C_N_145_6_25	146
4.2.5.3 Ensaio E39_A_C_I_145_8_25	148
4.2.5.4 Resultado dos ensaios – Grupo IX (31, 38 e 39)	149
4.3 Ensaaios de ligações em aço inoxidável duplex	151

4.3.1 Influência do parâmetro s e L.....	151
4.3.1.1 Ensaio E46_D_PL_N_145_8_27	151
4.3.1.2 Ensaio E47_D_PL_N_145_8_30	153
4.3.1.3 Ensaio E48_D_PL_N_107_6_24	155
4.3.1.4 Ensaio E49_D_PL_N_107_8_28	156
4.3.1.5 Resultados dos ensaios 46 a 49 – Grupo X	158
4.3.2 Influência da configuração geométrica da ligação e da direção da laminação da chapa.....	160
4.3.2.1 Ensaio E50_D_PP_I_145_8_40	160
4.3.2.2 Ensaio E51_D_PP_I_145_8_50	162
4.3.2.3 Ensaio E52_D_PP_I_145_8_50	164
4.3.2.4 Ensaio E53_D_PP_I_145_8_60	165
4.3.2.5 Resultados dos ensaios – Grupo XI (50 a 53)	166
4.4 Ensaios de ligações em aço inoxidável ferrítico	169
4.4.1 Influência dos parâmetros s e L	169
4.4.1.1 Ensaio E54_F_PL_N_145_6_27.....	169
4.4.1.2 Ensaio E55_F_PL_N_145_6_30.....	171
4.4.1.3 Ensaio E58_F_PL_N_107_6_24.....	172
4.4.1.4 Ensaio E59_F_PL_N_107_6_28.....	174
4.4.1.5 Resultado dos ensaios– Grupo XII (54, 55, 58 e 59)	175
4.4.2 Influência da configuração geométrica da ligação.....	177
4.4.2.1 Ensaio E56_F_PL_I_145_6_50	177
4.4.2.2 Ensaio 57 – F_PL_I_145_6_55.....	179
4.4.2.3 Resultado dos ensaios 56 e 57 – Grupo XIII	180
5 Análise dos Resultados dos Ensaios Experimentais	184
5.1 Análise da variação da espessura da placa interna	184
5.1.1 Ensaios de configurações aparafusadas – P_N_145_30 (11, 12, 14, 15, 26, 31, 47 e 55)	185
5.1.2 Ensaios de ligações aparafusadas – C_PL_N_145 (1 a 4, 6, 7, 11, 12, 14 e 16 a 18)	186
5.1.3 Ensaios de configurações aparafusadas – C_PL_145_50 (8, 9, 17 e 18)	188
5.1.4 Formulação analítica	190
5.1.5 Análise Numérica	194
5.2 Influência do parâmetro s.....	201
5.2.1 Ensaios configurações aparafusadas – C_PL_N_6 (1 a 4, 6, 7 e 19 a 21).....	201
5.2.2 Ensaios de configurações aparafusadas – C_PL_6 (1 a 8 e 19 a 22)	203
5.2.3 Ensaios de configurações aparafusadas – PL_N_145 (1 a 7, 16, 18, 24 a 30, 46 e 47)	205

5.2.4 Ensaio de configurações aparafusadas – PP_I_145_6 (39 a 43, 50, 52 e 53)	207
5.2.5 Análise Numérica	208
5.3 Influência da largura da chapa	209
5.3.1 Ensaio de configurações aparafusadas – PL_N_6 (1 a 4, 6, 7, 19 a 21, 29, 30, 34 a 36, 46 a 49, 54, 55, 58 e 59)	209
5.4 Influência da variação do tipo do aço	211
5.4.1 Ensaio de configurações aparafusadas – PL_N_107_6 (19 a 21, 34 a 36, 48, 49, 58 e 59)	211
5.4.2 Ensaio de configurações aparafusadas – PL_N_145_6 (1 a 4, 6, 7, 29, 30, 46, 47, 54 e 55)	213
5.5 Análise da geometria da furação das chapas	215
5.5.1 Ensaio de configurações aparafusadas – A_PP_145_6 (37, 38 e 40 a 44)	215
5.5.2 Ensaio de configurações aparafusadas – C_PL_145 (1 a 3, 6, 7, 9 e 10)	217
5.5.3 Estudo analítico	218
5.6 Influência da direção de laminação	219
5.6.1 Ensaio de configurações aparafusadas – A_I_145_6 (31, 32 e 39 a 43)	219
5.7 Determinação de um fator de correção para chapas aparafusadas em aço inoxidável	220
6 Método da Resistência Contínua – MRC	224
6.1 Comportamento mecânico do material	225
6.2 Aço carbono	229
6.3 Aços inoxidáveis	234
6.3.1 Aço inoxidável austenítico	234
6.3.2 Aço inoxidável duplex	235
6.3.3 Aço inoxidável ferrítico	237
6.3.4 Aumento da resistência com MRC	238
7 Considerações finais	243
7.1 Conclusões	243
7.1.1 Variação da espessura da placa interna	244
7.1.2 Variação do parâmetro s	245
7.1.3 Variação da largura da chapa	246
7.1.4 Variação do tipo de aço	247
7.1.5 Variação da configuração da furação	247
7.1.6 Variação da direção da laminação	248
7.1.7 Análise do coeficiente de ajuste experimental	248

7.1.8 Análise da configuração aparafusada com o MRC.....	249
7.2 Principais contribuições	252
7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	253
8 Referências Bibliográficas.....	254
9 Anexo A Metodologia para o cálculo da deformação específica limite pelo MRC	259
A.1 Aço carbono	259
A.2 Aço Inoxidável austenítico	259
A.3 Aço Inoxidável duplex.....	260
A.4 Aço Inoxidável ferrítico	261

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comparação de preços dos aços estruturais (http://www.worldsteelprices.com , 2012).	30
Figura 1.2 – Stonecutters Bridge, China (www.constructalia.com , 2008).	31
Figura 1.3 – Estrutura em aço inoxidável - Japão (Foto: Nisshin Steel, 1992).	32
Figura 1.4 – Estação ferroviária de Bilbao (Foto: Alfredo Aldai).	32
Figura 1.5 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica – aços carbono e austenítico.	33
Figura 1.6 – Fotos da análise metalográfica dos aços dessa tese.	35
Figura 2.1 – Ligações soldadas (Steven <i>et al.</i> , 2011).	39
Figura 2.2 – Ligações em compressão (Borello <i>et al.</i> , 2011).	40
Figura 2.3 – Ligação com cisalhamento duplo nos parafusos (Može e Beg, 2011).	42
Figura 2.4 – Resultados numéricos de ligações (Salih <i>et al.</i> , 2011).	43
Figura 2.5 – Estados limites últimos em chapa aparafusada (chasqueweb.ufrgs.br)	45
Figura 2.6 – Definição dos parâmetros L e t (www.chasqueweb.ufrgs.br).	46
Figura 2.7 – Definição dos parâmetros e_1 , e_2 , s e p.	46
Figura 2.8 – Limitação de parâmetros geométricos – EUROCODE 3 (2003).	47
Figura 2.9 – Gráfico da análise do fator 0,9 de dedução da seção líquida (aço carbono).	49
Figura 2.10 – Estudo de ligações: parafusos alternados (Cochrane, 1922).	53
Figura 2.11 – Esquema do comportamento mecânico (Kulak, 1965).	55
Figura 3.1 – Esquema da ligação aparafusada ensaiada.	59
Figura 3.2 – Corpo de prova (chapa com espessura de 3 mm).	59
Figura 3.3 – Esquema de retirada dos corpos de prova no sentido paralelo a direção da laminação.	59
Figura 3.4 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica do aço carbono.	60
Figura 3.5 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica do aço inoxidável austenítico.	62
Figura 3.6 – Evolução de tensões normais: placa sujeita a carregamento axial.	64
Figura 3.7 – Forças limites no aço carbono, L=145 mm.	65
Figura 3.8 – Forças limites no aço inoxidável austenítico, L=107 mm.	65
Figura 3.9 – Localização dos parâmetros s e p.	66
Figura 3.10 – Detalhe do parafuso ASTM A325 M12 cl. 8.8 (Lima, 2003).	67
Figura 3.11 – Linhas de ruptura possíveis para a ligação em estudo.	68
Figura 3.12 – Posicionamento dos extensômetros.	69
Figura 3.13 – Esquema geral dos ensaios.	69

Figura 3.14 – Detalhe do: (a) LVDT, (b) Encoder na máquina de tração.	70
Figura 3.15 – Máquina universal de ensaios Lousenhausen 600 kN.	70
Figura 3.16 – Leitura da força: (a) sistema NI-PXI-1050, (b) analógica	71
Figura 3.17 – Posicionamento dos extensômetros – E18_C_PL_N_145_15_50.	72
Figura 3.18 – Vista lateral.	72
Figura 3.19 – E18_C_PL_N_145_15_50, cotas em mm.	72
Figura 3.20- (d) – Curva tensão <i>versus</i> deformação – aços: austenítico, duplex ferrítico e carbono.	74
Figura 3.21 – Parâmetros geométricos investigados.....	75
Figura 3.22 – Laminação das chapas na direção da aplicação da carga.....	75
Figura 3.23 – Tipos de configuração das furações.....	76
Figura 4.1 – Desenho geométrico e posicionamento dos extensômetros.....	80
Figura 4.2 – Posicionamento do LVDT e Encoder.....	81
Figura 4.3 – Ensaio 1: (a) configuração inicial (b) depois da ruptura.	82
Figura 4.4 – Ensaio 2: (a) placa soldada, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	82
Figura 4.5 – Ensaio 3: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.	83
Figura 4.6 – Ensaio 4: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.	84
Figura 4.7 – Ensaio 5: (a) chapa de ensaio, (b) ligação, (c) ruptura da chapa interna.....	84
Figura 4.8 – Ensaio 6: (a) Posicionamento na máquina, (b) configuração inicial, (c) após a ruptura.	85
Figura 4.9 – Ensaio 7: (a) ensaio na máquina de tração, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	86
Figura 4.10 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	86
Figura 4.11 – Ensaio 8: (a) ensaio na máquina, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	87
Figura 4.12 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo I.	88
Figura 4.13 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo I.	89
Figura 4.14 – Ensaio 11: (a) posicionamento na máquina de tração, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	90
Figura 4.15 – Detalhe da ruptura na seção líquida em dois e três furos.	91
Figura 4.16 – Ensaio 12: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.	91
Figura 4.17 – Ensaio 13: (a) Ensaio pronto, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	92
Figura 4.18 – Ensaio 14: (a) vista lateral, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	93
Figura 4.19 – Ensaio 15: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.	94
Figura 4.20 – Ensaio 16: (a) ensaio posicionado na máquina de tração e localização do LVDT, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.....	94
Figura 4.21 – Ensaio 17: (a) vista da máquina, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	95
Figura 4.22 – (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.	96
Figura 4.23 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo II	97
Figura 4.24 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo II	98
Figura 4.25 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	99

Figura 4.26 – Ensaio 19: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.	99
Figura 4.27 – Ensaio 20: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura. ..	100
Figura 4.28 – Ensaio 21: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura. ..	100
Figura 4.29 – Geometria e posicionamento do extensômetro.	101
Figura 4.30 – Ensaio 22: (a) Posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	101
Figura 4.31 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo III.	102
Figura 4.32 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo III.	103
Figura 4.33 – Configuração invertida ou tipo B.	104
Figura 4.34 – Ensaio 9: (a) posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	104
Figura 4.35 – Ensaio 10: (a) posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	105
Figura 4.36 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo IV.	106
Figura 4.37 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo IV.	106
Figura 4.38 – Ensaio 23: (a) chapa interna, (b) configuração inicial, (c) ruptura.	108
Figura 4.39 – Detalhe do chapa interna e posicionamento do <i>clipgage</i>	109
Figura 4.40 – Posicionamento dos instrumentos de leitura.	109
Figura 4.41 – (a) configuração inicial, (b) após a ruptura.	110
Figura 4.42 – Ensaio 27: (a) ensaio na máquina, (b) alargamento dos furos, (c) ruptura.	110
Figura 4.43 – Ensaio 28: (a) início do ensaio, (b) alargamento dos furos, (c) ruptura. ..	111
Figura 4.44 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	112
Figura 4.45 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos transdutores de deslocamento e <i>clipgage</i>	113
Figura 4.46 – Ensaio 37: (a) início, (b) deformação limite, (c) fim com a ruptura.	113
Figura 4.47 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	114
Figura 4.48 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e <i>clipgage</i>	114
Figura 4.49 – Ensaio 40: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	115
Figura 4.50 – Geometria e posicionamento dos extensômetros no ensaio.	116
Figura 4.51 – (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e <i>clipgage</i> , (c) desenho esquemático.	116
Figura 4.52 – Ensaio 41: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	117
Figura 4.53 – Posicionamento dos extensômetros.	117
Figura 4.54 – Ensaio 42: (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e <i>clipgage</i> , (c) desenho esquemático.	118
Figura 4.55 – Ensaio 42: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	118
Figura 4.56 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo V.	120
Figura 4.57 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo V.	121
Figura 4.58 – Ensaio 25: (a) Detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e <i>clipgage</i> , (c) desenho esquemático.	122
Figura 4.59 – Ensaio 25: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	123

Figura 4.60 – Ensaio 25: (a) detalhe da ruptura na seção líquida em três furos, (b) alargamento dos furos.....	123
Figura 4.61 – Ensaio 26: (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento do clipgagem, (c) posicionamento do Clipgagem.	124
Figura 4.62 – Ensaio 26: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	124
Figura 4.63 – (a) Montagem do ensaio, (b) configuração inicial, (c) clipgagem.	125
Figura 4.64 – Antes do ensaio e após a ruptura.	126
Figura 4.65 – Ruptura na seção líquida passando por dois furos e deformação placa base.	126
Figura 4.66 – Detalhe do chapa interna e posicionamento do clipgagem.	127
Figura 4.67 – Ensaio 30: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	128
Figura 4.68 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo VI.	129
Figura 4.69 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo VI.	129
Figura 4.70 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	130
Figura 4.71 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos transdutores de deslocamento e clipgagem.	130
Figura 4.72 – Ensaio 34: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	131
Figura 4.73 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.	132
Figura 4.74 – Ensaio 35: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	132
Figura 4.75 – Detalhe da chapa interna e posicionamento do clipgagem.	133
Figura 4.76 – Ensaio 36: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	133
Figura 4.77 – Posicionamento dos extensômetros.	134
Figura 4.78 – (a) ensaio na máquina, (b) clipgagem, (c) desenho esquemático.	134
Figura 4.79 – Ensaio 44: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	135
Figura 4.80 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	136
Figura 4.81 – Posicionamento do ensaio, transdutores de deslocamento e clipgagem. ..	136
Figura 4.82 – Ensaio 45: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	136
Figura 4.83 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo VII.	137
Figura 4.84 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo VII.	138
Figura 4.85- Posicionamento dos extensômetros.	139
Figura 4.86 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.	140
Figura 4.87 – (a) configuração inicial, (b) após a ruptura.	140
Figura 4.88 – Posicionamento dos extensômetros.	141
Figura 4.89 – Parafusos: (a) A490, (b) corte no A490, (c) corte no A325, (d) A325.	141
Figura 4.90 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.	142
Figura 4.91 – (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) após a ruptura.	142
Figura 4.92 – Ruptura na seção líquida passando por um furo com a ruptura de um parafuso.	143
Figura 4.93 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica.	144
Figura 4.94 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento.	144

Figura 4.95 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	145
Figura 4.96 – Ensaio 31: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	146
Figura 4.97 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	146
Figura 4.98 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	147
Figura 4.99 – Ensaio 38: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.	147
Figura 4.100 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	148
Figura 4.101 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	148
Figura 4.102 – Ensaio 39: (a) antes do ensaio, (b) deformação específica limite, (c) na ruptura.	149
Figura 4.103 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo IX.....	150
Figura 4.104 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo IX.....	151
Figura 4.105 – Geometria e detalhe do posicionamento dos extensômetros.	152
Figura 4.106 – (a) chapa interna e posicionamento, (b) clipgage, (c) LVDT.	152
Figura 4.107 – Ensaio 46: (a) antes, (b) deformação específica limite, (c) após a ruptura.	153
Figura 4.108 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	153
Figura 4.109 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	154
Figura 4.110 – Ensaio 47: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	154
Figura 4.111 – Posicionamento dos extensômetros.....	155
Figura 4.112 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	155
Figura 4.113 – Ensaio 48: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	156
Figura 4.114 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	156
Figura 4.115 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	157
Figura 4.116 – Ensaio 49: (a) antes do ensaio, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	157
Figura 4.117 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo X.....	159
Figura 4.118 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo X.....	160
Figura 4.119 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	161
Figura 4.120 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	161
Figura 4.121 – Ensaio 50: (a) antes do ensaio, (b) deformação limite, (c) ruptura.	162
Figura 4.122 – Posicionamento dos extensômetros.....	162
Figura 4.123 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	163
Figura 4.124 – Ensaio 51: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura da placa interna.	163
Figura 4.125 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	164
Figura 4.126 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	164

Figura 4.127 – Ensaio 52: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	165
Figura 4.128 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	165
Figura 4.129 – Ensaio 53: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruína.	166
Figura 4.130 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	166
Figura 4.131 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo XI.....	167
Figura 4.132 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo XI.....	168
Figura 4.133 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	169
Figura 4.134 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	170
Figura 4.135 – Ensaio 54: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	170
Figura 4.136 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	171
Figura 4.137 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	171
Figura 4.138 – Ensaio 55: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.	172
Figura 4.139 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	172
Figura 4.140 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	173
Figura 4.141 – (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) após a ruptura.	173
Figura 4.142 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	174
Figura 4.143 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	174
Figura 4.144 – (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) depois na ruptura.....	175
Figura 4.145 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica – Grupo XII.....	176
Figura 4.146 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento – Grupo XII.....	176
Figura 4.147 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	177
Figura 4.148 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	178
Figura 4.149 – Ensaio 56: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura. ...	178
Figura 4.150 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.	179
Figura 4.151 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.....	179
Figura 4.152 – Ensaio 57: (a) configuração inicial, (b) def. limite, (c) ruptura.	180
Figura 4.153 – Gráficos carga <i>versus</i> deformação específica.....	181
Figura 4.154 – Gráficos carga <i>versus</i> deslocamento.	181
Figura 5.1 – Resultado da comparação dos ensaios – P_N_145_30 (11, 12, 14, 15, 26, 31, 47 e 55).	185
Figura 5.2 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_N_145 (1 a 4, 6, 7, 11, 12, 14 e 16 a 18).	187
Figura 5.3 – Esboço esquemático de uma das geometrias das chapas estudadas.	188
Figura 5.4 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_145_50 (8, 9, 17 e 18)... ..	189

Figura 5.5 – Variação nas deformações específica na seção de placa passando por dois furos com variação da chapa interna.	190
Figura 5.6 – Estudo analítico da transferência de carga.	191
Figura 5.7 – Ensaio experimental – cisalhamento do parafuso.....	192
Figura 5.8 – Parafuso após a ruína sem rosca nos dois planos de corte.....	192
Figura 5.9 – Parafuso após a ruína com rosca nos dois planos de corte.....	192
Figura 5.10 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento – parafusos ao corte.	193
Figura 5.11 – Gráfico de comparação dos resultados: experimental e analítico.....	193
Figura 5.12 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento – dois planos de corte.....	194
Figura 5.13 – Esquema dos apoios aplicados na simulação da ligação aparafusada. ..	194
Figura 5.14 – Resultado da análise numérica das deformações específicas.....	195
Figura 5.15 – Resultado da análise numérica em função da variação de espessuras. .	196
Figura 5.16 – Curvas numéricas – carga <i>versus</i> deformação específica.....	196
Figura 5.17 – Localização da seções em análise no ANSYS.....	198
Figura 5.18 – Gráfico força <i>versus</i> deformação específica – placa interna 15 mm e chapa externa 3 mm.....	198
Figura 5.19 – Gráfico detalhado – comparativo com curva experimental.	199
Figura 5.20- Gráfico força <i>versus</i> deformação – placa interna 6 mm e chapa externa 3 mm.....	200
Figura 5.21- Gráfico detalhado – placa interna de 6 mm e chapa externa de 3 mm.	200
Figura 5.22 – Gráfico força <i>versus</i> deformação específica – Ensaio experimentais variando a espessura da placa interna.	201
Figura 5.23 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_N_6 (1 a 4, 6, 7 e 19 a 21).	202
Figura 5.24 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_6 (1 a 8 e 19 a 22).....	204
Figura 5.25 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_145 (1 a 7, 16, 18, 24 a 30, 46 e 47).	205
Figura 5.26 – Resultado da comparação dos ensaios – PP_I_145_6 (39 a 43, 50, 52 e 53).	207
Figura 5.27 – Variação do parâmetro s.....	209
Figura 5.28- Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_6 (1 a 4, 6, 7, 19 a 21, 29, 30, 34 a 36, 46 a 49, 54, 55, 58 e 59).	210
Figura 5.29 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_107_6 (19 a 21, 34 a 36, 48, 49, 58 e 59).	212
Figura 5.30 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_145_6 (1 a 4, 6, 7, 29, 30, 46, 47, 54 e 55).	214
Figura 5.31 – Diferentes tipos de configuração de furação das chapas.....	215
Figura 5.32 – Resultado da comparação dos ensaios – A_PP_145_6 (37, 38 e 40 a 44).	216
Figura 5.33- Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_145 (1a3, 6, 7, 9 10).....	217

Figura 5.34 – Análise do deformação específica na ligação tipo A e B.....	218
Figura 5.35 – Resultado da comparação dos ensaios – A_I_145_6 (31, 32 e 39 a 43).	220
Figura 5.36 – Aço inoxidável austenítico.	221
Figura 5.37 – Aço inoxidável duplex.	222
Figura 5.38 – Aço inoxidável ferrítico.....	222
Figura 6.1 – Curva tensão <i>versus</i> deformação – Ramberg-Osgood (1943).....	226
Figura 6.2 – MRC – modelo de material elástico com encruamento linear.....	227
Figura 6.3 – Análise da deformação específica limite – E3_C_PL_N_145_6_30.	230
Figura 6.4 – Modelo da curva bilinear e deformações específica limites – aço carbono.....	232
Figura 6.5 – Análise das deformações limite do aço inoxidável austenítico.....	235
Figura 6.6 – Análise das deformações limite do aço inoxidável duplex.....	236
Figura 6.7 – Análise das deformações limite do aço inoxidável ferrítico	237

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Análise de fatores de redução da seção líquida para o aço carbono.....	49
Tabela 2.2 – Média de fatores de redução da seção líquida para o aço carbono.....	50
Tabela 3.1 – Tensões limites do aço carbono	61
Tabela 3.2 – Tensões limites médias do aço inoxidável austenítico	62
Tabela 3.3 – Tensões limites médias do aço inoxidável austenítico	62
Tabela 3.4 – Tensões limites médias do aço inoxidável duplex.....	63
Tabela 3.5 – Tensões limites médias do aço inoxidável duplex.....	63
Tabela 3.6 – Tensões limites médias do aço inoxidável ferrítico.....	63
Tabela 3.7 – Nomenclatura dos ensaios.....	76
Tabela 3.8 – Sequência de ensaios experimentais	77
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo I	89
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo II	98
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo III	103
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo IV.....	106
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo V.....	119
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VI.....	129
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VII.....	139
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VIII.....	144
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo IX.....	150
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo X.....	159
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XI.....	168
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XII.....	177
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XIII.....	181
Tabela 4.14 – Tabela resumo comparativo com resultados teóricos	181
Tabela 5.1 – Variação percentual da deformação específica do Ensaio 11.....	197
Tabela 5.2 – Análise das deformações específicas e deslocamentos	197
Tabela 5.3 – Comparação das deformações – Ligação tipo A e B	218
Tabela 5.4 – Fatores experimentais e corrigidos para os aços em estudo	223
Tabela 6.1 – Deformação específica limite dos ensaios de aço carbono.....	230
Tabela 6.2 – Deformações específicas limites para o aço carbono	233
Tabela 6.3 – Fatores para o aço carbono	233
Tabela 6.4 – Deformações específicas limites – aço inoxidável austenítico	234
Tabela 6.5 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável austenítico.....	235
Tabela 6.6 – Deformações limites para o aço inoxidável duplex.....	236
Tabela 6.7 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável duplex	236

Tabela 6.8 – Deformações limites para o aço inoxidável ferrítico	237
Tabela 6.9 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável ferrítico	237
Tabela 6.10 – Fatores de ajuste, ruptura da seção líquida nos aços inoxidáveis	238
Tabela 6.11 – Tensão limite de escoamento X tensão limite (MRC).....	238
Tabela 6.12 – Carga última experimental/carga calculada e fatorada.....	239
Tabela 7.1 – Valores limites para o parâmetro s	246
Tabela 7.2 – Análise do coeficiente de ajuste experimental para o aço inoxidável.....	248
Tabela 7.3 – Tensão limite de escoamento X tensão limite	249
Tabela 7.4 – Fatores a serem incorporados: aço inoxidável	249
Tabela 7.5 – Fatores de ajuste para ruptura da seção líquida nos aços inoxidáveis	250
Tabela 7.6 – Carga última experimental/Carga calculada e fatorada.....	250

Lista de Símbolos

A_b	área total da seção transversal da chapa base
A	área do parafuso
A_g	área bruta da seção transversal da chapa experimental
A_l	área instantânea da seção transversal do corpo de prova
A_{net}	área total líquida da seção transversal da chapa experimental
b_b	largura da chapa base
c	constante relativa ao valor de p
d	diâmetro do parafuso
d_0	diâmetro do furo
e	deformação convencional
E	módulo de elasticidade
e_1	distância paralela a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_2	distância perpendicular a direção da força da linha de parafuso até a borda
e_3	distância perpendicular ao furo alongado do seu centro até a borda
e_4	distância paralela ao furo alongado do seu primeiro centro até a borda
F	força aplicada na chapa base
$F_{b,rd}$	resistência ao esmagamento
f	frequência
f_u	tensão limite de ruptura da placa experimental
f_{up}	tensão limite de ruptura do parafuso
f_{ured}	tensão limite de ruptura da placa inoxidável reduzida
$F_{v,rd}$	resistência ao cisalhamento por cada plano de corte
f_y	tensão limite de escoamento da placa experimental
g	distância entre linhas de parafusos no sentido transversal ao da força aplicada
k	constante que depende do tipo de material
k_r	fator de redução para o aço inoxidável
k_1	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
k_2	fator de correção em função da escariação do parafuso
L	largura da chapa experimental

L	largura da placa
L_0	comprimento inicial do corpo de prova
L_f	comprimento final do corpo de prova
m_1	índice não linear
n	número de parafusos
n_p	número de chapas
$N_{pl,rd}$	força última de projeto relativa ao escoamento da seção bruta
$N_{u,rd}$	força última de projeto relativa ao estado de ruptura a tração da seção líquida
$N_{t,rd}$	força normal de tração de projeto da ligação
p	distância entre linhas de parafusos no sentido perpendicular ao da força aplicada
p_1	distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
p_2	distância entre furos de mesma linha na direção transversal a força
$p_{1,0}$	primeira distância entre furos de mesma linha na direção paralela a força
$p_{1,i}$	distâncias seguidas entre furos, mesma linha e direção da força
P	força tração aplicada
r	número de parafusos numa seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u , dado por $2e_2$
s	distância entre linhas de parafusos no sentido paralelo ao da força aplicada
S	desvio padrão
t	espessura da chapa experimental
t_b	espessura da chapa base
u	constante usada no cálculo da ligação inoxidável, cujo valor é igual a $2e_2$
w	valor diminuído da área transversal de ligações aparafusadas alternadas
\bar{X}	média dos resultados
X_i	Valor do resultado
	constante que determina deformação além do escoamento
b	fator de correção em função da tensão limite de ruptura e posicionamento dos parafusos
d	fator de correção em função do posicionamento dos parafusos
v	fator que depende da classe do aço

ε	Deformação específica
$\varepsilon_{0,2}$	deformação específica a 0,2%
$\varepsilon_{0,1}$	deformação específica a 0,1%
ε_1	deformação específica a 1%
σ	tensão
σ_0	tensão elástica
$\sigma_{0,2}$	tensão limite do material apresentada ao nível de deformação de 0,2%
σ_r	Tensão residual
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M1}	coeficiente de resistência
γ_{M2}	coeficiente de resistência

Lista de Abreviaturas

ACESITA	Fábrica de Aço – Inox do Brasil S/A
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padronização
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DEC	Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
EUROCODE	<i>European Committee for Standardisation</i>
ITUC	Instituto Tecnológico PUC-RIO
LEM	Laboratório de Estruturas e Materiais
LVDT	<i>“Linear Variable Differential Transducer”</i>
METALFENAS	METALFENAS Industria da Construção Ltda.
NZS	<i>Australian Standard</i>
PUC-RIO	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SEI	<i>Structural Engineering Institute</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A