

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS LEVES NA  
RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA DE INTERFACES CONCRETO-CONCRETO**

PATRICIA DA SILVA PEREIRA FIGUEIREDO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO -  
UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO-2020

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS LEVES NA  
RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA DE INTERFACES CONCRETO-CONCRETO**

PATRICIA DA SILVA PEREIRA FIGUEIREDO

“Tese apresentada ao PPGEC-  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências  
para obtenção do título de Doutora em  
Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Sergio Luis González Garcia

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

DEZEMBRO-2020

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS LEVES NA  
RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA DE INTERFACES CONCRETO-CONCRETO**

PATRICIA DA SILVA PEREIRA FIGUEIREDO

“Tese apresentada ao PPGEC-  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências  
para obtenção do título de Doutora em  
Engenharia Civil”.

Aprovada em 17 de dezembro de 2020.

Comissão examinadora:

---

Prof. D.Sc. Daniel de Lima Araújo -UFG

---

Prof. D.Sc. Gustavo Savaris - UTFPR

---

Prof. D.Sc. Rances Castillo Lara – LECIV/UENF

---

Prof. D. Sc. Sergio Luis González Garcia – LECIV/UENF  
(Orientador)

*“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres porque eu sou teu Deus; eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça.”(Isaías 41:10*

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	XIX
LISTA DE ABREVIATURA .....	XXIV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXV
RESUMO.....	XXVIII
ABSTRACT .....	XXIX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Considerações Iniciais .....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.3 - Organização da tese .....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1- Atrito Cisalhamento.....	6
2.2 - Interface concreto-concreto.....	11
2.3 - Técnicas de medição da rugosidade.....	14
2.4 - Parâmetros de rugosidade.....	19
2.5- Resistência de ligação da superfície do substrato .....	27
2.6 - Determinação da resistência da ligação concreto-concreto.....	28
2.6.1 - Ensaio de cisalhamento direto .....	31
2.6.2- Ensaio de tração direta .....	32
2.6.3- Ensaio de <i>pull-off</i> .....	32

2.6.4- Ensaio de <i>push-off</i> .....	33
2.6.5- Ensaio de <i>slant shear</i> .....	34
2.6.6- Ensaio de <i>splitting test</i> .....	36
2.7 - Estudos sobre aderência de interfaces concreto-concreto.....	36
2.7.1 - Rilo (2004) .....	37
2.7.2 - Momayez <i>et al.</i> (2005) .....	37
2.7.3- Santos <i>et. al.</i> (2005).....	38
2.7.4 - Tayeh <i>et al.</i> (2013).....	39
2.7.5- Carbonell Muñoz <i>et al.</i> (2014).....	40
2.7.6 - Ceia <i>et.al.</i> (2016) .....	42
2.7.8 - Zanotti e Banthia (2016) .....	42
2.7.9 - Diab (2017) .....	44
2.7.8 - Costa <i>et al.</i> (2018) .....	46
2.7.9 - Farzad <i>et al.</i> (2019).....	46
2.7.9 - Zanotti e Randl (2019) .....	47
2.7.10 - Semendary e Svecova (2020).....	48
2.8 - Previsão das normas para a resistência de interfaces.....	49
2.7.1 - Prescrições do código ACI 318 (2019) .....	50
2.7.2 - Prescrições do Model Code (2010) e Eurocode 2 (2010) .....	51
2.7.3 - Prescrições da ABNT NBR 9062 (2017).....	54
2.9 - Modelos de resistência ao cisalhamento por pesquisadores .....	56
 CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	 60
3.1- Materiais.....	60
3.1.1 - Cimento Portland .....	61
3.1.2 - Sílica Ativa .....	61
3.1.3 - Agregado Graúdo Convencional.....	61
3.1.4 - Agregados Graúdo e Miúdo de Argila Expandida.....	62
3.1.5 - Areia .....	63
3.1.6 - Aditivo superplastificante .....	64
3.2- Dosagem e mistura dos concretos.....	65

<b>3.3 - Detalhes dos corpos-de-prova.....</b>	<b>67</b>
<b>3.4 - Formas .....</b>	<b>70</b>
<b>3.5 - Armaduras utilizadas para os corpos-de-prova do tipo <i>push-off</i>.....</b>	<b>72</b>
<b>3.6 - Moldagem dos corpos-de-prova .....</b>	<b>73</b>
<b>3.7- Medição da rugosidade .....</b>	<b>78</b>
<b>3.8 - Realização dos ensaios .....</b>	<b>82</b>
3.8.1 - Ensaio de compressão e tração por compressão diametral .....	82
3.8.2 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo <i>slant shear</i> .....	83
3.8.3 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo <i>push-off</i> .....	86
3.8.4 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo <i>pull-off</i> .....	87
<b>CAPÍTULO 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
<b>4.1 - Propriedades mecânicas dos concretos.....</b>	<b>90</b>
4.1.1 - Resistência à compressão dos concretos.....	90
4.1.2 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos .....	94
4.1.3 - Módulo de elasticidade .....	98
<b>4.2- Parâmetros de rugosidade das interfaces .....</b>	<b>99</b>
<b>4.3- Resistência ao cisalhamento na interface. ....</b>	<b>108</b>
4.3.1 - Ensaio de <i>slant shear</i> .....	108
4.3.1.1- Avaliação do efeito da rugosidade da interface nos corpos-de-prova do tipo <i>slant shear</i> .....	140
4.3.1.2 - Avaliação do efeito da substituição do agregado leve nos corpos- de-prova no ensaio do tipo <i>slant shear</i> .....	147
4.3.2- Ensaio de corpos-de-prova do tipo <i>push-off</i> .....	156
<b>4.4 - Resistência à tração na interface usando o ensaio de corpos-de-prova do tipo <i>pull-off</i> .....</b>	<b>167</b>
<b>4.6 - Avaliação conjunta dos ensaios de aderência .....</b>	<b>179</b>

<b>4.5 - Abordagem analítica-experimental.....</b>	<b>182</b>
<b>4.7 - Comparação entre a resistência ao cisalhamento experimental obtidas por modelos propostos por pesquisadores e normas .....</b>	<b>188</b>
4.7.1 - Corpos-de-prova <i>slant shear</i> .....	188
4.7.2 - Corpos-de-prova <i>push-off</i> .....	196
<b>4.8 - Coeficientes de coesão e atrito .....</b>	<b>199</b>
<b>4.9 - Interação experimental de tensões normal e tangencial para os ensaios de <i>slant shear</i>, <i>pull-off</i> e <i>push-off</i>.....</b>	<b>204</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>210</b>
<b>5.1 - Conclusões.....</b>	<b>210</b>
<b>5.2 - Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>213</b>
<b>CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS .....</b>	<b>214</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>223</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>228</b>
<b>B.1 - <i>Slant shear</i> .....</b>	<b>225</b>
B.1.1. Influência da rugosidade.....	228
B.1.2.- Influência da substituição do concreto com agregado leve .....	233
<b>ANEXO C.....</b>	<b>240</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Pilar submetido a esforços axiais com excentricidade. ....	4
Figura 2.1 - Modelo shear friction e transmissão de esforços na interface. ....	7
Figura 2.2- Comportamento ao cisalhamento. ....	7
Figura 2.3- Contribuição da aderência e atrito. ....	8
Figura 2.4- Critério Mohr Columb. ....	10
Figura 2.5- Viga Composta.....	11
Figura 2.6-Viga compósita sem mobilização da tensão tangencial na interface .....	11
Figura 2.7-Viga compósita com mobilização da tensão tangencial na interface .....	11
Figura 2.8- Perfis de rugosidade padronizados do ICRI.....	16
Figura 2.9- Rugosidade média .....	20
Figura 2.10- Altura média pico-vale.....	21
Figura 2.11- Altura média do 3º pico-vale mais alto. ....	22
Figura 2.12- Altura dos dez pontos .....	23
Figura 2.13- Altura total da rugosidade. ....	24
Figura 2.14- Altura média do pico .....	24
Figura 2.15- Altura máxima do pico.....	25
Figura 2.16 - Profundidade média do vale. ....	26
Figura 2.17- Profundidade máxima do vale.....	26
Figura 2.18 - Modos de ruptura (Adaptada de Santos, 2009). ....	30
Figura 2.19 - Ensaio de cisalhamento direto simples e duplo. ....	31
Figura 2.20 - Ensaio de tração direta. ....	32
Figura 2.21 - Ensaio de pull-off. ....	33
Figura 2.22 - Ensaio de push-off. ....	33
Figura 2.23 - Ensaio de slant shear.....	34
Figura 2.24 - Splitting test em um corpo-de-prova cúbico e cilíndrico, respectivamente. ....	36
Figura 2.25 - Rugosidades do substrato do concreto normal de Carbonell Muñoz et al.(2014). ....	41
Figura 2.26- Geometria das amostras de Zanotti e Banthia (2016) em mm.....	43

Figura 2.27 - Configuração do corpo-de-prova do tipo slant shear (Diab,2017). .....	44
Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	62
Figura 3.2-Curva granulométrica da areia.....	64
Figura 3.3 - Identificação dos corpos-de-prova do ensaio tipo slant shear. ....	68
Figura 3.4 - Configuração do corpo-de-prova do ensaio tipo slant-shear na inclinação de 45° (dimensões em mm).....	68
Figura 3.5 - Configuração do corpo-de-prova do tipo push-off para interfaces: a) como vibrada (V) e; b) rugosa (R2) (dimensões em mm). ....	69
Figura 3.6 - Configuração dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo pull-off.	70
Figura 3.7 - Formas de policloreto de vinil (PVC) para a concretagem da primeira metade dos corpos-de-prova do tipo slant shear. ....	71
Figura 3.8 - Forma metálica para produção dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo pull-off.....	71
Figura 3.9 - Forma para o corpo-de-prova para o ensaio do tipo push-off. ....	72
Figura 3.10 - Detalhes das dimensões e armaduras dos corpos-de-prova push- off. ....	73
Figura 3.11 - Armaduras dos corpos-de-prova push-off.....	73
Figura 3.12 - Processo de tratamento das interfaces lisa, vibrada e rugosa... ..	74
Figura 3.13 - Instrumento de indução das interfaces rugosas (R1, R2 e R3). Dimensões em mm. ....	74
Figura 3.14 - Superfície da interface dos corpos-de-prova slant shear. ....	75
Figura 3.15 - Processo de fabricação do complemento: a) limpeza, b) Concretagem do complemento dos corpos-de-prova slant shear. ....	76
Figura 3.16 - Processo de fabricação do substrato: a) concretagem dos corpos- de-prova para os ensaios dos tipos push-off e pull-off ; b) indução da rugosidade. .....	77
Figura 3.17 - Substratos dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo push-off com interface: a) como vibrada (V); b) rugosa (R2). ....	78
Figura 3.18 - Formas do push-off e pull-off antes de ser concretado o complemento.....	78
Figura 3.19 - Configuração do ensaio para medição da rugosidade com sensor de deslocamento a laser. ....	79

Figura 3.20 - Esquema de leitura da rugosidade com respectivos comprimentos. .....	80
Figura 3.21 - Leitura completa da rugosidade de uma interface. ....	81
Figura 3.22 - Detalhe da leitura da rugosidade de uma interface como vibrada (V). ....	81
Figura 3.23 – Ensaios realizados nos concretos estudados: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral. ....	83
Figura 3.24 - Representação da inclinação da interface que o corpo-de-prova slant shear foi realizado. ....	83
Figura 3.25 - Forma e dimensões do slant shear original e modificado. ....	84
Figura 3.26 - Corpos-de-prova para o ensaio slant shear original e modificado. .....	85
Figura 3.27- Ensaio de corpos-de-prova do tipo slant shear modificado com ruptura pela interface. ....	85
Figura 3.28 - Configuração do ensaio do tipo push-off.....	87
Figura 3.29 - Procedimentos prévios para a execução do ensaio do tipo pull-off: a) execução do carote; b) colagem do disco. ....	88
Figura 3.30 - Processo de execução do ensaio do tipo pull-off.....	89
Figura 3.31 - Ruptura de um corpo-de-prova pull-off na interface.....	89
Figura 4.1 - Corpos-de-prova com substituição de agregado leve após o ensaio de tração por compressão diametral. ....	98
Figura 4.2 - Valores de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Angelin (2014). ....	98
Figura 4.3 - Rugosidade média - $R_a$ .....	104
Figura 4.4 - Altura média pico-vale - $R_z$ (DIN) .....	104
Figura 4.5 - Altura máxima pico-vale - $R_{max}$ .....	104
Figura 4.6 - Altura média do 3º pico-vale mais elevado- $R_{3z}$ .....	105
Figura 4.7 - Altura máxima do 3º pico-vale mais elevado - $R_{3zmax}$ .....	105
Figura 4.8 - Altura dos 10 pontos - $Rz_{(ISO)}$ .....	105
Figura 4.9 - Altura total da rugosidade - $R_y$ .....	106
Figura 4.10 - Altura média do pico - $R_{pm}$ .....	106
Figura 4.11 - Altura máxima do pico - $R_p$ .....	106
Figura 4.12 - Profundidade média do vale - $R_{vm}$ .....	107
Figura 4.13 - Profundidade máxima do vale - $R_v$ .....	107

Figura 4.14 - Parâmetros de rugosidade normalizado. ....	108
Figura 4.15 - Ruptura coesiva e adesiva respectivamente.....	109
Figura 4.16 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto de alta resistência (AR).....	110
Figura 4.17 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto leve com 25% de substituição. ....	111
Figura 4.18 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto leve com 100% de substituição. ....	112
Figura 4.19 - Tensões $\tau_{xy}$ e $\sigma_y$ para os corpos-de-prova reto e inclinado do AR-AR sob carga de 200 kN. ....	114
Figura 4.20- Tensões $\tau_{xy}$ e $\sigma_y$ para os corpos-de-prova reto e inclinado do AR-100% sob carga de 200 kN. ....	115
Figura 4.21 - Tensões $\tau_{xy}$ e $\sigma_y$ para os corpos-de-prova reto e inclinado do 100%-100% sob carga de 200 kN. ....	116
Figura 4.22 - Tensões de cisalhamento para as séries do <i>slant-shear</i> reto simuladas para uma carga de 200 kN.....	117
Figura 4.23 - Tensões normais para as séries do <i>slant-shear</i> reto simuladas para uma carga de 200 kN. ....	117
Figura 4.24 - Tensões de cisalhamento para as séries do <i>slant-shear</i> inclinado simuladas para uma carga de 200 kN.....	118
Figura 4.25 - Tensões normais para as séries do <i>slant-shear</i> inclinado simuladas para uma carga de 200 kN. ....	118
Figura 4.26 - Tensões no estado plano para o corpo-de-prova do tipo <i>slant shear</i> modificado. ....	121
Figura 4.27 - Resistência ao cisalhamento vs rugosidade média para o corpos-de-prova de <i>slant shear</i> de substrato AR. ....	140
Figura 4.28 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo <i>slant shear</i> para a série AR-AR.....	141
Figura 4.29 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo <i>slant shear</i> para a série AR-25%. ....	141
Figura 4.30 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo <i>slant shear</i> para a série AR-50%. ....	141

Figura 4.31 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série AR-75%. .....	142
Figura 4.32 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série AR-100%. .....	142
Figura 4.33 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 25%-25%. .....	143
Figura 4.34 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 25%-50%. .....	143
Figura 4.35 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 25%-75%. .....	144
Figura 4.36- Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 25%-100%. .....	144
Figura 4.37 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 100%-50%.....	145
Figura 4.38 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 100%-75%.....	146
Figura 4.39 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo slant shear para a série 100%-100%.....	146
Figura 4.40 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato AR e interface lisa. ....	148
Figura 4.41 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface como vibrada. ....	148
Figura 4.42 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R1).....	149
Figura 4.43 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R2).....	149
Figura 4.44 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R3).....	150
Figura 4.45 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface lisa. ....	151
Figura 4.46 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface como vibrada. ....	151

Figura 4.47 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R1).....	151
Figura 4.48 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R2).....	152
Figura 4.49 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R3).....	152
Figura 4.50 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição de agregado leve e interface lisa (L).....	153
Figura 4.51 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve <i>no complemento</i> para substrato com 100% de substituição de agregado leve e interface como vibrada (V). ....	154
Figura 4.52 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R1).....	154
Figura 4.53 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R2).....	154
Figura 4.54 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R3).....	155
Figura 4.55 - Corpos-de-prova da série AR-25% do tipo push-off após ruptura. ....	157
Figura 4.56 - Corpos-de-prova da série AR-50% do tipo push-off após ruptura. ....	158
Figura 4.57 - Corpos-de-prova da série AR-75% do tipo push-off após ruptura. ....	158
Figura 4.58 - Corpos-de-prova da série AR-100% do tipo push-off após ruptura. ....	159
Figura 4.59 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo push-off para o grupo AR-25%.....	159

Figura 4.60 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo push-off para o grupo AR-50%.....	160
Figura 4.61 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo push-off para o grupo AR-75%.....	160
Figura 4.62 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo push-off para o grupo AR-100%.....	160
Figura 4.63 - Influência da substituição por agregado leve no ensaio de push-off para interface como vibrada.....	161
Figura 4.64 - Influência da substituição por agregado leve no ensaio de push-off para interface rugosa.....	162
Figura 4.65 – Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-25%-V. ....	162
Figura 4.66 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-25%-R2....	163
Figura 4.67 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-50%-V. ....	163
Figura 4.68 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-50%-R2....	163
Figura 4.69 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-75%-V. ....	164
Figura 4.70 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-75%-R2....	164
Figura 4.71 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-100%-V....	164
Figura 4.72 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-100%-R2..	165
Figura 4.73 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-25%.....	165
Figura 4.74 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-50%.....	166
Figura 4.75 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-75%.....	166
Figura 4.76 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-100%.....	166
Figura 4.77 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova pull-off para a série AR-AR.....	169
Figura 4.78 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova pull-off para a série AR-25%.....	169
Figura 4.79 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova pull-off para a série AR-50%.....	170
Figura 4.80 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova pull-off para a série AR-75%.....	171

Figura 4.81 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova pull-off para a série AR-100%. .....	171
Figura 4.82 - Valores médios de resistência à tração ( $f_{tim}$ ) para os diferentes grupos. ....	172
Figura 4.83 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_a$ ). .....	174
Figura 4.84- Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_p$ ). .....	175
Figura 4.85 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_v$ ). .....	175
Figura 4.86 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_{pm}$ ). .....	175
Figura 4.87 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_{vm}$ ). .....	176
Figura 4.88 - Correlação entre o parâmetro $R_a$ e coeficiente de adesividade. 177	
Figura 4.89 - Correlação entre o parâmetro $R_{pm}$ e coeficiente de adesividade. .....	177
Figura 4.90 -Correlação entre o parâmetro $R_p$ e coeficiente de adesividade. 178	
Figura 4.91 - Correlação entre o parâmetro $R_{vm}$ e coeficiente de adesividade. .....	178
Figura 4.92 - Correlação entre o parâmetro $R_v$ e coeficiente de adesividade. 178	
Figura 4.93 - Resultado dos ensaios para avaliação da aderência para as séries em comum.....	180
Figura 4.93 - Envelope de falha do concreto do substrato e do complemento baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	183
Figura 4.94 - Tensão de cisalhamento puro para corpos-de-prova de slant shear que apresentam falha adesiva. ....	184
Figura 4.95 – Tensão de cisalhamento puro para corpos-de-prova de slant shear que Critério de Mohr-Coulomb. ....	184
Figura 4.96 - Resistência ao cisalhamento puro calculado e experimental para a interface como vibrada. ....	187
Figura 4.97 - Resistência ao cisalhamento puro calculado e experimental para a interface rugosa.....	187



Figura 4.99 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-AR.....	189
Figura 4.100 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-25%.....	189
Figura 4.101 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-50%.....	190
Figura 4.102 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-75%.....	190
Figura 4.103 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-100%.....	191
Figura 4.104 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-25%.....	191
Figura 4.105 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-50%.....	192
Figura 4.106 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-75%.....	192
Figura 4.107 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-100%.....	193
Figura 4.108 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-50%.....	193
Figura 4.109 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-75%.....	194
Figura 4.110 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-100%.....	194
Figura 4.111 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-25%.....	197
Figura 4.112 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-50%.....	197
Figura 4.113 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-75%.....	198
Figura 4.114 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-100%.....	198
Figura 4.117 - Linha de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade $R_{pm}$ .....	198

Figura 4.118 - Linha de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade $R_{vm}$ .....	202
Figura 4.119 - Linha de tendência entre o coeficiente de atrito e o parâmetro de rugosidade $R_{pm}$ .....	203
Figura 4.120 - Linha de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade $R_{vm}$ .....	203
Figura 4.121 - Interação experimental entre slant shear, push-off e pull-off para a série AR-25%. .....	205
Figura 4.122 - Interação experimental entre slant shear, push-off e pull-off para a série AR-50%. .....	206
Figura 4.123 - Interação experimental entre slant shear, push-off e pull-off para a série AR-75%. .....	206
Figura 4.124 - Interação experimental entre slant shear, push-off e pull-off para a série AR-100%. .....	207
Figura 4.125 - Comparação entre as curvas de iteração de diferentes pesquisadores para interface como vibrada (V). .....	208
Figura 4.126 - Comparação entre as curvas de iteração de diferentes pesquisadores para interface rugosa (R2). .....	208

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resultados do ensaio slant shear (Diab, 2017).....	45
Tabela 2.2 - Resistência ao cisalhamento horizontal (ACI 318 (2019)).....	50
Tabela 2.3- Coeficientes de coesão e atrito, propostos pelo Eurocode 2 (2010) e pelo Model Code (2010).....	53
Tabela 2.4 - Valores de coeficiente $\beta_s$ e $\beta_c$ (ABNT 9062 (2017)) .....	56
Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	61
Tabela 3.2 - Composição química da argila expandida 0500 e 1506.....	62
Tabela 3.3 - Características dos agregados leves. ....	63
Tabela 3.4- Absorção de água dos agregados leve. ....	63
Tabela 3.5 - Granulometria da areia.....	64
Tabela 3.6- Dados técnicos do Glenium 51. (Fonte: Basf).....	65
Tabela 3.7- Composição do concreto de alta resistência em kg/m <sup>3</sup> .....	65
Tabela 3.8 - Composição dos concretos com substituição de agregado leve..	66
Tabela 4.1 - Resistência à compressão do substrato dos corpos-de-prova do tipo slant shear.....	91
Tabela 4.2- Resistência à compressão do complemento dos corpos-de-prova do tipo slant shear. ....	92
Tabela 4.3 - Resistência à compressão do substrato dos corpos-de-prova push-off e pull-off.....	93
Tabela 4.4 - Resistência à compressão do concreto do complemento dos corpos-de-prova dos ensaios do tipo push-off e pull-off.....	94
Tabela 4.5 - Resistência à tração por compressão diametral do substrato dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo slant shear. ....	95
Tabela 4.6 - Resistência à tração por compressão diametral do complemento dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo slant shear. ....	96
Tabela 4.7 - Resistência à tração por compressão diametral do substrato dos corpos-de-prova para os ensaios do tipo push-off e pull-off.....	97
Tabela 4.8 - Resistência à tração por compressão diametral do complemento dos corpos-de-prova para os ensaios do tipo push-off e pull-off.....	97
Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade dos concretos estudados.....	99
Tabela 4.10 - Parâmetros de rugosidade média. ....	103

Tabela 4.11 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-AR.....	124
Tabela 4.12 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-25%.....	125
Tabela 4.13 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-50%.....	126
Tabela 4.14 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-75%.....	127
Tabela 4.15 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-100%.....	128
Tabela 4.16 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 25%-25%. ....	131
Tabela 4.17 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 25%-50%. ....	133
Tabela 4.18 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 25%-75%. ....	134
Tabela 4.19 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 25%-100%. ....	135
Tabela 4.20 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 100%-50%. ....	136
Tabela 4.21 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 100%-75%. ....	137
Tabela 4.22 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série 100%-100%. ....	138
Tabela 4.23 - Resultados dos ensaios de corpos-de-prova do tipo push-off..	156
Tabela 4.24 - Resultado de resistência à tração na interface pelo ensaio de pull-off. ....	167
Tabela 4.25 - Coeficientes de correlação da resistência à tração ( $f_{tim}$ ) com os parâmetros de rugosidade para as séries AR-75%-PL e AR-100%-PL. ....	174
Tabela 4.26- Valores do coeficiente de adesividade ( $a$ ) para os grupos do ensaio de resistência à tração na interface.....	176
Tabela 4.27- Coeficientes de correlação entre adesividade e parâmetros de rugosidade.....	179

Tabela 4.28 - Relação entre os resultados dos ensaios de slant shear, pull-off e push-off. ....	181
Tabela 4.29 - Comparação dos valores de cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) calculado pelo Critério de ruptura de Mohr-Coulomb com os valores obtidos experimentalmente. ....	186
Tabela 4.30 – Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do slant shear com substrato AR. ....	195
Tabela 4.31 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do slant shear com substrato 25%. ....	195
Tabela 4.32 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do slant shear com substrato 100%. ....	196
Tabela 4.33 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do push-off. ....	199
Tabela 4.34 - Estimativa dos coeficientes de coesão e atrito. ....	200
Tabela 4.35 - Equações obtidas da interação das tensões tangenciais e normais. ....	209
Tabela A-1- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface lisa (L). ....	224
Tabela A-2- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface como vibrada (V). ....	225
Tabela A-3- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface rugosa (R1). ....	226
Tabela A-4- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface rugosa (R2). ....	227
Tabela A-5- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface rugosa (R3). ....	228.
Tabela B.1 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-AR. ....	228
Tabela B.2 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-25%. ....	229
Tabela B.3 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-50%. ....	229
Tabela B.4 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-75%. ....	229
Tabela B.5 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-100%. ....	230
Tabela B.6 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-25%. ....	230
Tabela B..7 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-50%. ....	231
Tabela B.8 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-75%. ....	231

Tabela B.9 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-100%...	231
Tabela B.10 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-50%.	232
Tabela B.11 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-75%.	232
Tabela B.12 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-100%.	233
Tabela B.13 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface lisa.	233
Tabela B.14 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface como vibrada.	234
Tabela B.15 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R1).	234
Tabela B.16 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R2).	234
Tabela B.17 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R3).	235
Tabela B.18 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface lisa.	235
Tabela B.19 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface com vibrada.	236
Tabela B.20 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R1).	236
Tabela B.21 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R2).	236
Tabela B.22 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R3).	237
Tabela B.23 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface lisa.	237
Tabela B.24 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface como vibrada.	238
Tabela B.25 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R1).	238
Tabela B.26 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R2).	238

Tabela B.27 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R3).....	239
Tabela C.1 - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de slant shear com ruptura adesiva do substrato AR.....	2421
Tabela C.2 - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de slant shear com ruptura adesiva do substrato 25%.....	242
Tabela C.3 - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de slant shear com ruptura adesiva do substrato 100%.....	242

## LISTA DE ABREVIATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
COV	Coefficiente de variação
GPa	Giga Pascal
ICRI	<i>International Concrete Repair Institute</i>
kN	Quilo Newton
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
UHPC	Concreto de ultra alto desempenho
UHPFC	Concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibra



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas minúsculas

$a$	Coeficiente de adesividade
$a_v$	Distância entre os pontos de momento nulo e máximo
$b$	Largura da interface
$c$	Coeficiente de coesão
$c_a$	Coeficiente para a ligação adesiva
$d$	Distância da fibra mais comprimida ao centroide da armadura longitudinal de tração
$e$	Espessura da seção ao nível da interface
$f_{cd}$	Resistência de cálculo à compressão do concreto
$f_{cm}$	Resistência à compressão do concreto
$f_{ctd}$	Resistência à tração de cálculo do concreto com menor resistência
$f_{ctm}$	Resistência à tração média do concreto com menor resistência
$f_y$	Tensão de escoamento da armadura que atravessa a interface
$f_{syd}$	Resistência de cálculo ao escoamento da armadura que atravessa a interface
$f_{yd}$	Resistência ao escoamento de cálculo da armadura que atravessa a interface
$k_1$	Coeficientes de interação que levam em conta que a armadura ou os conectores
$k_2$	Coeficientes de interação que levam em conta que a armadura ou os conectores
$l_m$	Comprimento da avaliação
$u_A$	Deslocamento que mobiliza a resistência máxima ao cisalhamento
$s$	Espaçamento da armadura que atravessa a interface
$v$	Fator de redução da resistência

## Letras romanas maiúsculas

$A_v$	Área da armadura de cisalhamento que atravessa a interface
$F_{md}$	Valor médio da força de compressão ou de tração da ligação
$I$	Momento de inércia da seção total em relação ao eixo neutro.
$Q$	Momento estático da área acima da interface em relação ao eixo neutro da seção
$R_a$	Rugosidade média
$R_{max}$	Altura máxima pico-vale
$R_p$	Altura máxima do pico
$R_{pm}$	Altura média do pico
$R_v$	Profundidade máxima do vale
$R_{vm}$	Profundidade média do vale
$R_y$	Altura total da rugosidade
$R_{3z}$	Altura média do 3º pico-vale mais alto
$R_{3zmax}$	Altura máxima do 3º pico-vale mais alto
$R_{z(DIN)}$	Altura média pico-vale
$R_{ISO}$	Altura de dez pontos
$V$	Esforço cortante
$V_{nh}$	Resistência ao cisalhamento horizontal

## Letras gregas

$\alpha$	Ângulo formado com a horizontal da armadura que atravessa a interface
$\beta_c$	Coefficiente de minoração aplicado ao concreto
$\beta_s$	Coefficiente de minoração aplicado à armadura
$\lambda$	Coefficiente que depende da proporção relativa de agregados leves
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\rho$	Taxa de armadura que atravessa a interface
$\sigma_{im}$	Tensão normal média na interface
$\sigma_n$	Tensão normal na interface devido ao carregamento externo
$\tau_a$	Componente de coesão devido à adesão e ao engrenamento do agregado;
$\tau_0$	Tensão de cisalhamento puro
$\tau_{im}$	Tensão de cisalhamento média na interface
$\tau_u$	Tensão tangencial última
$\tau_r$	Tensão tangencial residual

## RESUMO

Uma boa aderência entre duas camadas de concreto é fundamental para o desempenho de um elemento estrutural compósito. Nesse contexto, a utilização de concretos com agregados leves, com reduzida densidade e satisfatória resistência, requer alguns desafios. No entanto é necessário desenvolver um conhecimento técnico científico que garanta a correta previsão do comportamento deste tipo de concreto. Sendo assim este trabalho apresenta um estudo experimental para caracterizar a resistência de ligação de interfaces utilizando concretos com agregado de densidade normal e leve. Adotou-se um concreto normal de alta resistência, com resistência à compressão em torno de 55 MPa, e quatro concretos utilizando agregado leve, com porcentagens de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. Ensaios do tipo *slant shear*, *push-off* e *pull-off* foram realizados para avaliar a resistência de ligação da interface, considerando diferentes rugosidades na superfície do substrato. Para o ensaio de *slant shear* foi proposto um modelo modificado com o objetivo de induzir gradientes de tensões diferentes na interface originadas por diferentes solicitações. Um novo método de medição de rugosidade foi desenvolvido para caracterizar a interface concreto-concreto. Os resultados foram analisados e comparados com as previsões de acordo com códigos de projeto e com dados de pesquisas relacionadas ao tema. Relações entre as resistências de ligação obtidas pelos diferentes ensaios foram determinadas. E por fim, os resultados obtidos no programa experimental confirmam a viabilidade do uso de concreto com diferentes porcentagens de substituição de agregado graúdo normal por leve, para aplicações em estruturas compostas e reparos estruturais.

Palavras chave: resistência ao cisalhamento, interface, rugosidade, *slant shear*, *push-off* e *pull-off*.

## ABSTRACT

A good adherence between two layers of concrete is fundamental for the performance of a composite structural element. In this context, the use of concrete with a lightweight aggregate, with low density and satisfactory strength, requires some challenges. However, it is necessary to develop a scientific technical knowledge that provides the correct prediction of the behavior of this type of concrete. Therefore, this work presents an experimental study to characterize the interface bond strength using normal and lightweight aggregated concrete. It was adopted a normal concrete of high strength, with compressive strength around 55 MPa, and four concretes using lightweight aggregate, with replacement percentages of 25%, 50%, 75% and 100%. Slant shear, push-off and pull-off tests were performed to evaluate the bond strength of the interface, considering different roughness of the substrate surface. For the slant shear test a modified model was proposed with the objective of inducing different stress gradients at the interface originated by different solicitations. A new roughness measuring method was developed to characterize the concrete-concrete interface. The results were analyzed and compared with the predictions according to design codes and research data related to the research. Relationships between the bond strengths obtained by the different tests were determined. Finally, the results obtained in the experimental program confirm the viability of using concrete with different rates of substitution of normal to lightweight aggregate, for applications in composite structures and structural repairs.

Keywords: shear strength, interface, roughness, slant shear, push-off e pull-off.

## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações Iniciais

O concreto pré-moldado é frequentemente integrado ao concreto moldado *in situ* para aumentar a resistência geral da estrutura. Vigas pré-moldadas com lajes moldadas *in situ* é um tipo comum dessas construções, geralmente aplicadas em pontes de concreto. Uma parte fundamental desse tipo de construção é o desenvolvimento de uma ação composta entre a viga e a laje desempenhando um papel significativo na obtenção do comportamento monolítico do sistema. Com o objetivo de desenvolver essa ação composta, uma adequada resistência ao cisalhamento horizontal deve ser obtida na interface.

Nesses membros compostos, a utilização do concreto leve e de alta resistência, permite a redução do peso-próprio da seção transversal e, o aumento do vão, levando a subestruturas menores, o que facilita o manuseio e o transporte. A utilização de materiais não convencionais, como o concreto leve, é uma tendência que apresenta vantagens, porém a resistência da interface nessas seções compostas tende a diminuir. Um dos fatores importantes, nesse aspecto, é o tratamento da superfície da interface de concreto que desempenha um papel fundamental, garantindo a ligação entre os materiais. Sendo assim, em elementos pré-fabricados, é exigido uma preparação adequada da superfície do substrato de forma a garantir uma estrutura monolítica.

Muitos elementos de concreto pré-moldado são projetados com base nas disposições de projeto de atrito-cisalhamento, porém a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal, ao contrário dos esforços axial e de flexão, é um dos problemas para o qual ainda não existe uma opinião consensual entre os pesquisadores em geral. O fato da resistência ao cisalhamento longitudinal abordar a transferência de esforços entre corpos distintos, sendo estes muitas vezes constituídos por materiais diferentes, ainda o torna mais complexo, pois não é um meio contínuo e homogêneo (Santos, 2005).

A falta de consenso em torno desse problema se deve em parte à determinação de quais são os parâmetros realmente a ter em consideração para a quantificação desta grandeza. A resistência ao cisalhamento longitudinal é

influenciada por diversos parâmetros, tais como: a rugosidade da superfície da interface; a tensão normal aplicada na interface; a limpeza da interface e a resistência dos materiais constituintes dos corpos sujeitos ao cisalhamento. Outros parâmetros, cuja influência não deve ser desprezada, tais como a temperatura e umidade relativa, também têm influência na resistência ao cisalhamento longitudinal, além da retração do concreto adicionado.

Nos últimos anos, pesquisas mostram que a rugosidade é um parâmetro importante no estudo deste tema, como Momayez *et al.* (2005), Santos *et al.* (2007), Costa (2012), De La Varga *et al.* (2018), porém pouco abordada quando se trata da ligação entre concretos com agregados normais e leve moldados em tempos diferentes. Dentro desse contexto, como um dos parâmetros fundamentais na resistência ao cisalhamento longitudinal, torna-se importante abordar, para esses tipos de concreto, aspectos como a quantificação dos esforços de cisalhamento na interface, considerando a influência da rugosidade dessa mesma interface; técnicas de tratamento da superfície da interface de forma a aumentar a rugosidade; técnicas de medição da rugosidade da interface e parâmetros de caracterização da rugosidade da interface.

O concreto de densidade leve representa uma solução interessante não apenas para novas estruturas, onde desempenha um papel importante na redução do peso próprio, mas também nas estruturas já existentes, para reforçá-las. Em ambos os casos, o resultado é um membro composto compreendendo uma camada de concreto leve e um concreto de densidade normal, ou um substrato de concreto leve. Portanto, é fundamental verificar se as expressões de projeto existentes, formuladas empiricamente para interfaces de concreto normal/concreto normal, aplicam-se às interfaces concreto normal /concreto leve e concreto leve/ concreto leve, ou se são necessários ajustes e correções.

Dentro do contexto de atrito-cisalhamento destaca-se a carência de resultados no que tange ao comportamento dessas combinações de concreto em relação à aderência existente entre eles e, além disso, a influência potencial dos tipos de agregados leves não foi investigada. Isso ganha significado pelo fato de que diferentes tipos de agregados podem ser utilizados na produção de concretos leves, e, no Brasil, o tipo comumente utilizado é a argila expandida. Esse agregado, comparado a outros, pode ter diferentes densidades e propriedades mecânicas que podem desempenhar um papel específico na



transferência direta de cisalhamento, e assim torna-se mais um aspecto a ser considerado.

A maioria dos estudos sobre a resistência da ligação entre interfaces concreto-concreto concentram-se no concreto de densidade normal e nos últimos anos intensificou-se para o concreto de ultra alta resistência. Da mesma forma, a influência da densidade do concreto não é considerada ou é abordada de maneira simplificada. De fato, poucos estudos abordaram esse tópico. Um desses estudos foi realizado por Scott (2010) para estudar a resistência de interfaces em vigas de ponte de concreto agregado leve, outro por Shaw e Sneed (2014) com o objetivo de examinar a aplicabilidade das especificações do ACI 318 e do PCI Design Handbook para diferentes tipos de concreto leve. Sneed *et al.* (2016) estudou a influência de diferentes agregados leves na transferência de cisalhamento de interface e Costa (2018) utilizou *slant shear* e *splitting test* para avaliar a resistência de união da interface entre concreto normal e leve e, e entre leve-leve. Esses estudos concluíram que os códigos fornecem abordagens conservadoras de projeto. No entanto, o principal objetivo do estudo aqui apresentado é colaborar com a lacuna referente à resistência à aderência da interface entre combinações de concretos que englobem a utilização de concreto normal e leve, com diferentes porcentagens de substituição de agregado graúdo leve (argila expandida) e tipos de preparação da superfície.

A geometria do *slant shear* modificado, objeto de estudo deste trabalho, tem como objetivo avaliar interfaces de elementos de concreto armado ou protendido onde a mesma não está submetida a uma distribuição de tensões uniformes.

Neste caso, o corpo-de-prova é submetido a esforços axiais excêntricos, provocando tensões normais e tangencias variáveis ao longo da interface inclinada.

Como exemplo disto temos pilares, onde por motivos de juntas de construção, seja por interrupção de concretagem, reforço, reparos ou simplesmente em elementos pré-moldados, quando a combinação das solicitações normais para o estado limite último (ELU) da seção é dimensionada

com predomínio da compressão, embora com compressão variável, é também submetida a esforços transversais de natureza sísmica ou de ventos (Figura 1.1).

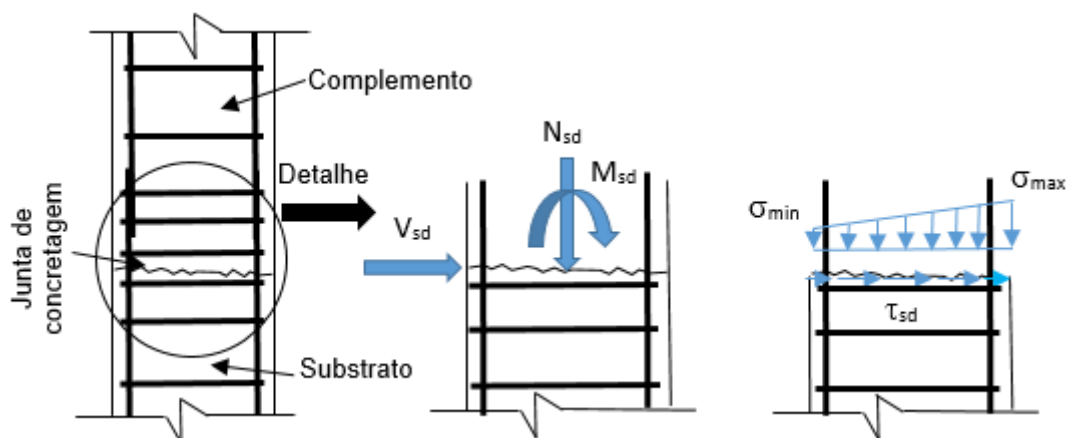


Figura 1.1 - Pilar submetido a esforços axiais com excentricidade.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da rugosidade da superfície da interface na resistência à aderência entre concretos com diferentes idades e densidades (concreto normal e leve com argila expandida), levando em conta um concreto já existente (substrato) e um concreto adicionado (complemento).

Os objetivos específicos definidos para este estudo de pesquisa são:

- desenvolver um sistema simples e eficiente para caracterizar a interface de superfícies de concreto que permita medir rugosidade sem exigir o contato com a superfície, sendo fácil de usar e rápido para executar;
- quantificar a resistência da ligação da interface concreto-concreto em relação ao cisalhamento e à tração;
- propor um modelo de *slant shear* modificado com a finalidade de induzir na interface um gradiente de tensões mais próximo das estruturas reais;
- analisar os resultados experimentais a serem obtidos e comparar com modelos existentes na literatura e códigos.

### 1.3 - Organização da tese

O primeiro capítulo serve de introdução ao trabalho desenvolvido, apresentando uma breve introdução sobre a temática do cisalhamento longitudinal, objetivos e organização da tese.

No segundo capítulo, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica acerca do tema, os parâmetros que o envolve, além de propostas para o seu melhoramento. Foi estudado também trabalhos relacionados ao tema além das especificações de projeto dos códigos e de alguns pesquisadores.

O terceiro capítulo apresenta o desenvolvimento do programa experimental para avaliar a influência do tratamento da superfície na resistência à ligação da interface de estruturas compostas de concreto. Esta etapa consistiu na concretagem de corpos-de-prova de concreto, do tipo *slant shear*, *pull-off* e *push-off*. Os corpos-de-prova foram preparados com cinco tratamentos superficiais diferentes e a rugosidade da superfície foi medida por meio de um laser.

A análise dos resultados é apresentada no quarto capítulo, onde são avaliadas a medição da rugosidade e a resistência de cisalhamento e tração na ligação entre camadas de concreto. Foi possível também avaliar a influência da substituição de agregado leve nos mecanismos de resistência, do aumento da rugosidade e comparar com resultados já existentes.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões obtidas, destacando a importância e a contribuição do presente trabalho, sendo também recomendados estudos futuros.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

## Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- Atrito Cisalhamento

A pesquisa sobre a resistência de ligação das interfaces concreto-concreto começou na década de 1960, principalmente orientada para elementos de concreto armado pré-fabricados com peças moldadas *in situ*. A contribuição mais importante nesse escopo é a *shear friction theory*, denominada de teoria atrito cisalhamento, apresentada por Birkeland e Birkeland (1966), a qual pressupõe que a resistência ao cisalhamento da interface concreto-concreto seja mobilizada através de um deslizamento relativo entre ambas as partes de concreto. Devido à rugosidade da superfície, origina-se também um deslocamento normal relativo, induzindo esforços de tração na armadura que atravessa a interface. Como reação, a interface desenvolve tensões compressivas e resiste ao deslizamento por atrito.

O modelo de atrito cisalhamento foi proposto como um mecanismo de transferência de forças tangenciais ao longo de uma interface concreto-concreto sujeita simultaneamente à força de cisalhamento e à compressão, apresentado na Figura 2.1 (a) e (b).

Nos casos em que o cisalhamento deve ser transferido através de uma interface entre dois elementos estruturais que podem deslizar um em relação ao outro, o atrito cisalhamento evita que isso ocorra. A resistência é obtida através da armadura que atravessa a interface. A tensão se desenvolve na armadura, proporcionando um confinamento por meio do qual o atrito cisalhamento é facilitado. A transferência de cisalhamento horizontal entre dois membros do concreto é mantida pela ação da coesão, atrito e efeito de pino da armadura de cisalhamento.

Na Figura 2.1 (a) e (b) verifica-se que ao existir deslizamento entre dois corpos- e devido à rugosidade da superfície - ocorre um afastamento desses dois corpos de maneira perpendicular à interface, o que se denomina dilatação. Devido à dilatação, e caso exista armadura transversal na interface, esta será solicitada passando a estar sujeita aos esforços de tração, comprimindo, assim, a interface.

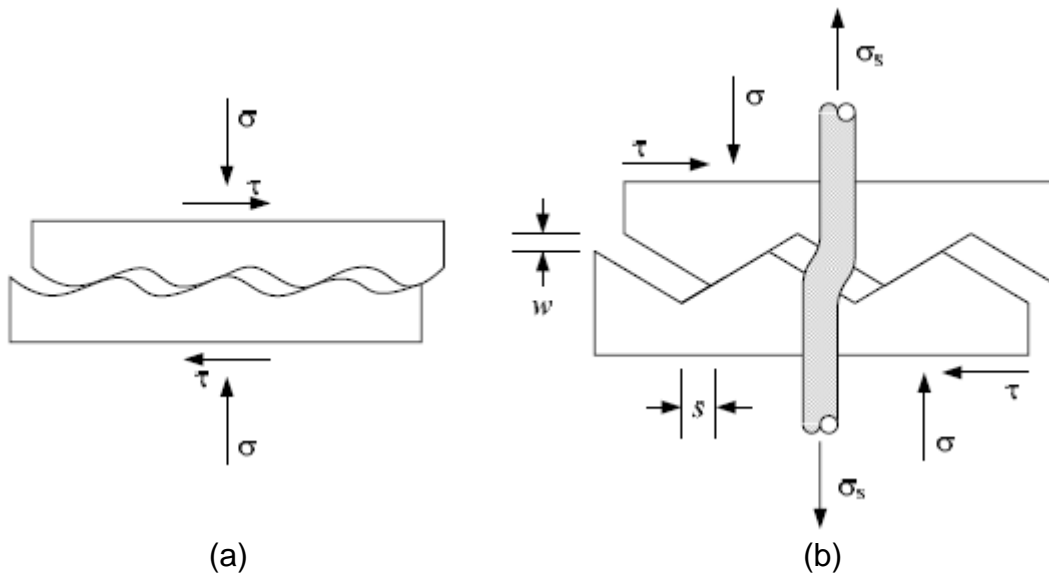


Figura 2.1 - Modelo *shear friction* e transmissão de esforços na interface.

Takorabet (1989) considera que o comportamento de uma interface é devido a uma ação combinada e conjunta de dois parâmetros, aderência e atrito. De acordo com esse autor, a lei de comportamento da interface ao cisalhamento longitudinal pode ser representada como indicado na Figura 2.2. Na Figura 2.3, é indicada a contribuição da aderência e do atrito para a lei de comportamento da interface, sendo esta representada pela curva que inclui ambos os parâmetros considerados essenciais pelo autor.

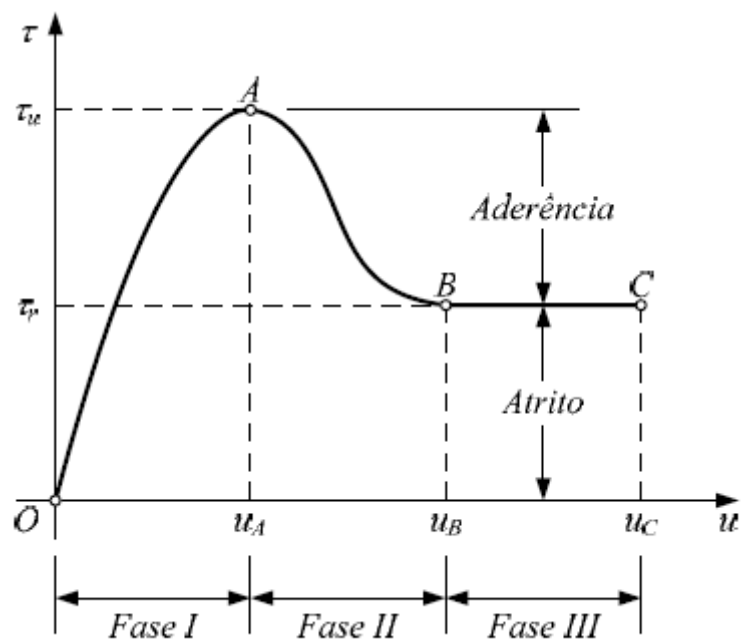


Figura 2.2- Comportamento ao cisalhamento.

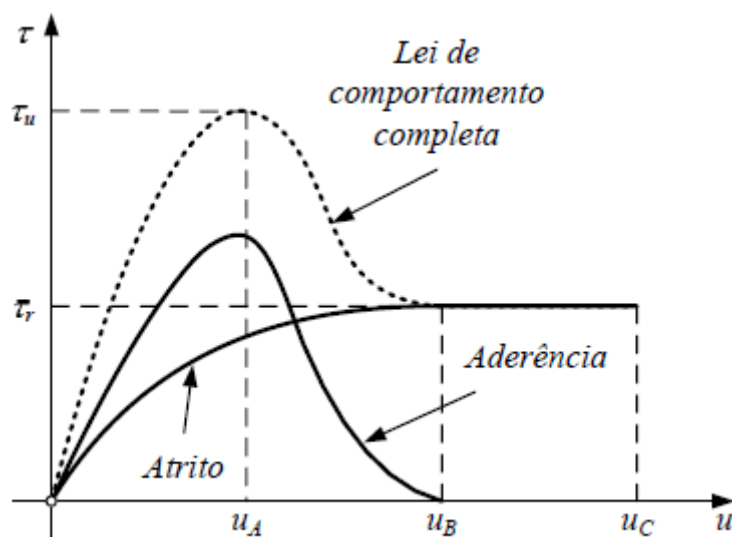


Figura 2.3- Contribuição da aderência e atrito.

Para que seja mobilizada a resistência ao cisalhamento de uma interface, é necessário que ocorra um determinado deslocamento relativo entre ambas as superfícies de contato, ou seja, que se atinja a Fase I (Figura 2.2). A Fase I corresponde a um comportamento elástico da interface. Após se atingir o deslocamento ( $u_A$ ), que permite mobilizar a resistência máxima ao cisalhamento, a que corresponde uma tensão tangencial última ( $\tau_u$ ), inicia-se uma fase de diminuição da ligação, com ruptura da ligação na interface, aparecimento de irregularidades e dilatância com transferência de esforços para a armadura transversal, caso exista Fase II (Figura 2.2). O fenômeno de diminuição da ligação ocorre progressivamente com o aumento dos deslocamentos relativos na interface e diminuição da tensão tangencial, até que se verifica a estabilização desta num valor designado por tensão tangencial residual ( $\tau_r$ ). A partir desse ponto, a interface apresenta apenas resistência devido a fenômenos de atrito (Fase III, Figura 2.2).

Randl (1997) propôs uma expressão de projeto que considera a resistência ao cisalhamento da interface como a soma de três efeitos diferentes: coesão, atrito e ação de pino. A coesão está relacionada à aderência e intertravamento dos agregados; o atrito resulta do deslizamento relativo entre as peças de concreto e é influenciado pela rugosidade da superfície e pela tensão normal (aplicada e/ou causada pela tensão de tração da armadura combinada

com a dilatação) na interface; e a ação de pino refere-se à deformação específica da armadura que atravessa a interface devido ao deslizamento. No entanto, todos esses efeitos se opõem ao deslizamento e, portanto, contribuem para a resistência ao cisalhamento da interface.

Uma vez que os concretos com agregados leves geralmente têm algumas propriedades mecânicas reduzidas em relação ao concreto normal da mesma resistência à compressão, várias disposições de projeto representam o uso de agregados leves, reduzindo a resistência ao cisalhamento do concreto. Para o projeto de atrito cisalhamento, algumas disposições o fazem, reduzindo o coeficiente de atrito, enquanto outros reduzem a coesão.

O critério de Mohr-Coulomb, mostrado na Figura 2.4, também inclui estes dois parâmetros fundamentais: a aderência e o atrito. A Equação 2.1 obtida desse critério inclui o termo  $\tau_0$ , que representa a adesão, que pode ser designada como coesão, e o termo  $\mu$  que representa o atrito. Se o atrito for constante, a resistência devido a este é diretamente proporcional ao valor da tensão normal aplicada na interface.

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma_N = \tau_0 + \tan(\phi)\sigma_N \quad (2.1)$$

sendo:

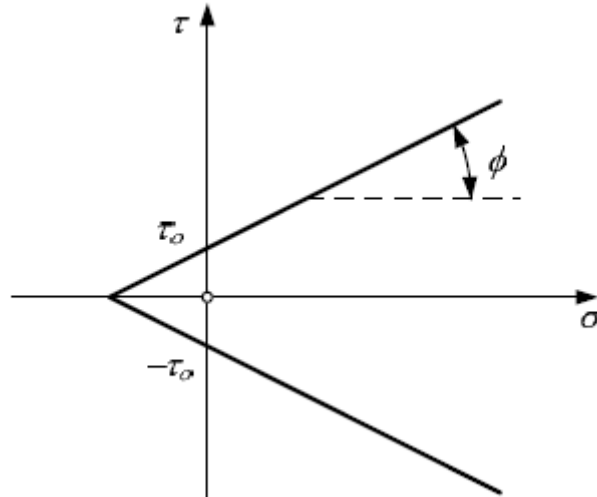
$\tau$  - tensão tangencial na interface;

$\tau_0$  - aderência;

$\mu$  - coeficiente de atrito;

$\phi$  - ângulo de atrito interno do material;

$\sigma_N$  - tensão normal à interface.



**Figura 2.4- Critério Mohr Columb.**

No caso de vigas compostas, sujeitas ao esforço transversal, em fase elástica e sem existir fissuração, a tensão tangencial na interface pode ser determinada recorrendo à Teoria da Resistência dos Materiais, como indicado, na Equação 2.2.

$$\tau = \frac{VQ}{Ie} \quad (2.2)$$

onde:

$\tau$  é a tensão tangencial.

$V$  é o esforço cortante.

$Q$  é o momento estático da área acima da interface em relação ao eixo neutro da seção.

$I$  é o momento de inércia da seção total em relação ao eixo neutro.

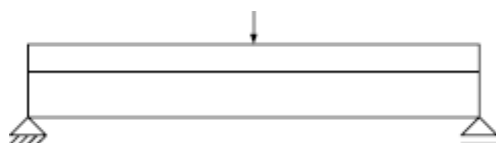
$e$  é a espessura da seção ao nível da interface.

Na Figura 2.5 é mostrado o caso de uma viga composta simplesmente apoiada e sujeita a esforço cortante (momento fletor variável); se não existir mobilização da tensão tangencial na interface, ela comporta-se como se fosse constituída por duas lamelas, verificando-se deslocamento relativo entre ambas as faces da interface, como mostrado na Figura 2.6. No caso de existir mobilização da totalidade da tensão tangencial na interface, o comportamento



da viga é completamente diferente, sendo idêntico ao de uma viga monolítica, como é mostrada na Figura 2.7. Em geral, não é necessário mobilizar a totalidade da tensão tangencial, bastando que os deslocamentos relativos na interface se situem dentro de limites admissíveis.

Segundo Loov e Patnaik (1994), apesar de apenas ser válida para comportamento elástico linear e seção não fissurada, a Equação 2.2 também se pode aplicar em situações em que já exista fissuração. Nesta situação, o momento de inércia e o momento estático devem ser determinados para a seção fissurada.



**Figura 2.5- Viga Composta.**



**Figura 2.6-Viga composta sem mobilização da tensão tangencial na interface**



**Figura 2.7-Viga composta com mobilização da tensão tangencial na interface**

Nos últimos 50 anos, diferentes pesquisadores propuseram várias versões modificadas da teoria atrito-cisalhamento: Ali e White (1999); Kahn e Mitchell (2002), Gohnert (2003), Mansur e Vinayagam (2008). Uma revisão abrangente da literatura dos estudos mais relevantes sobre esse assunto pode ser encontrada em Santos e Júlio (2012).

## **2.2 - Interface concreto-concreto**

A resistência da interface entre concretos de diferentes idades é um parâmetro de extrema importância para o comportamento monolítico de estruturas de concreto, tanto em obras de estruturas existentes envolvendo o

reforço com uma nova camada de concreto, como no caso de obras novas, envolvendo elementos de concreto moldados em momentos diferentes, como por exemplo, elementos pré-fabricados com parte concretada *in situ*. A utilização do concreto de densidade leve, nesses dois casos, permite obter soluções competitivas, na medida em que se reduz o peso próprio do conjunto.

Destas aplicações resultam elementos estruturais compostos, constituídos por partes em concreto de densidade leve e/ou em concreto de densidade normal, concretadas com diferentes idades. Além das propriedades dos diferentes tipos de concreto que constituem essas soluções mistas, é essencial conhecer o comportamento da interface entre ambos, uma vez que dessa depende o comportamento monolítico.

Diferentes estratégias são tipicamente usadas para melhorar o desempenho da ligação da interface. Entretanto, a preparação da superfície e o pré-umedecimento são considerados um dos principais fatores para assegurar uma ação composta entre materiais novos e antigos e a durabilidade resultante da conexão (Vaysburd *et al.*, 2016).

A rugosidade da superfície pode variar amplamente devido às práticas de construção, especialmente na construção pré-moldada. A rugosidade da superfície é avaliada frequentemente de forma qualitativa, sendo atualmente adotada por todos os códigos de dimensionamento este tipo de avaliação. Habitualmente classifica-se a superfície como muito lisa, lisa, rugosa ou muito rugosa, recorrendo a uma inspeção visual. No entanto, essa classificação é pouco precisa, uma vez que se encontra sujeita a erro humano. Tratamentos correntes de preparação de superfícies de concreto são habitualmente interligados com essa classificação e os valores de dois coeficientes - atrito e coesão - são definidos para serem adotados nas expressões de dimensionamento.

Tais códigos de dimensionamento não levam em consideração por exemplo, as condições de cura do concreto do substrato (concreto existente) e do concreto complementar (concreto novo) e, portanto, desprezam a retração diferencial. A rigidez diferencial, devido à diferença entre módulos de Young de ambas as camadas de concreto, é igualmente desprezada. Isso tem uma influência significativa, porque pode criar tensões adicionais na interface.

Santos (2009) caracterizou a influência desses parâmetros (retração e a rigidez diferencial) no comportamento de interfaces entre camadas de concreto normal com diferentes idades. Segundo Costa (2012), nas interfaces com concreto de densidade leve, a retração diferencial não deverá constituir um parâmetro com a relevância das interfaces entre concreto normal, devido à cura melhorada e à reduzida retração desses concretos, proporcionadas pela hidratação prolongada da matriz ligante.

Alguns estudos a respeito do efeito da umidade sobre a resistência da ligação mostraram que fornecer umidade à interface antes de moldar o novo material pode aumentar a resistência da ligação interfacial (De La Varga *et al.*, 2015; Vaysburd *et al.* 2016; Lukovic, 2017). Isso ocorre porque uma superfície de concreto seca retira água do material do complemento, e extraíndo a água, conseqüentemente prejudica-se a hidratação, resultando em uma camada interfacial fraca (Bissonnette *et al.*, 2012). Ao contrário, a superfície muito úmida aumenta a proporção água-cimento do novo material na interface, levando a uma menor resistência da interface e aumentando a retração. Além disso, o excesso de água nas cavidades abertas pode perturbar o efeito de bloqueio impedindo a penetração de partículas de cimento nos poros.

No entanto, outros pesquisadores como Beushausen (2010) mostrou que a umidade não teve efeito significativo na melhoria da resistência da ligação, principalmente quando o novo concreto possuía baixa relação água-cimento, a pré-umidificação da interface não apresentou impacto sobre a durabilidade da resistência da ligação.

Erhard e Chorinsky (1986) concluíram que tanto a superfície do substrato de concreto muito seco ou muito úmido enfraquece a resistência da ligação. No entanto, é difícil tirar uma conclusão geral sobre o quanto o teor de umidade do substrato de concreto ajuda a melhorar a resistência da ligação, pois depende das características do material do substrato.

A rigidez diferencial também poderá ter uma influência significativa no comportamento da interface, devido ao fato de que o módulo de elasticidade do concreto de densidade leve tende a ser inferior ao do concreto com densidade normal, dependendo da resistência e densidade do concreto leve utilizado. Além disso, a resistência da matriz ligante geralmente é bastante superior à resistência

final do concreto de densidade leve devido à redução de resistência intrínseca dos agregados leves. Isso é igualmente ignorado pelas expressões de previsão da resistência da interface.

De forma adicional, a elevada resistência da matriz ligante dos concretos de densidade leve terá, previsivelmente, uma influência no comportamento da resistência da interface, principalmente na parcela de coesão; porém, a parcela de atrito pós ruptura, poderá ser também influenciada pela configuração da ruptura ao cisalhamento dos concretos de densidade leve (Costa *et al.*, 2011). Assim, é fundamental caracterizar adequadamente cada uma das parcelas em função dos parâmetros que as influenciam.

### **2.3 - Técnicas de medição da rugosidade**

Algumas técnicas para reparar e/ou fortalecer estruturas envolvem a adição de novo concreto a um substrato de concreto existente. A prática comum consiste em aumentar primeiro a rugosidade da superfície do substrato. Vários métodos são usados, mas pouca informação está disponível sobre a eficiência relativa de cada um.

Apesar da referência unânime à importância de se obter uma boa ligação entre camadas de concreto para assim garantir um comportamento monolítico do elemento compósito, a resistência da união alcançada com os métodos adotados de preparação da superfície não é usualmente quantificada.

Os trabalhos publicados sobre a ligação de materiais de reparo a um substrato de concreto, onde é mencionada a preparação da superfície do substrato com diferentes técnicas, dispõe de algumas diferenças como: testes adotados; a mistura de concreto do substrato; os materiais de reparo; a idade das amostras; as condições de temperatura e umidade relativa; e o eventual uso de agentes de ligação. Por essas razões, as conclusões apresentadas geralmente não são coincidentes e, às vezes, as conclusões são contraditórias (Júlio *et al.*, 2004).

De forma a assegurar uma boa interação entre o material existente e o material de reforço, é essencial garantir uma aderência adequada entre ambos. Esta aderência depende essencialmente da limpeza e da rugosidade da

superfície de contato entre ambos os materiais, não existindo qualquer dúvida que estes dois aspectos são essenciais no bom desempenho de uma ligação. Aspectos como a existência de micro fissuração, resistência mecânica dos materiais, composição do concreto etc., também influenciam a aderência entre o substrato e o reforço, mas aparentemente com muito menor relevância.

O tipo de rugosidade da superfície na interface influencia a coesão, o atrito e a resistência da união entre as camadas de concreto (Júlio *et al.* (2004), Santos *et al.* (2007)). Para caracterizar a resistência ao cisalhamento horizontal na interface entre as camadas de concreto moldados em diferentes momentos, os códigos de projeto como ACI 318 (2020), Eurocode 2 (2010) e CEB-FIB Model Code (2010) recomendam valores de projeto baseados na textura da superfície e na superfície com armadura de cisalhamento.

Verifica-se nas normas, como no Eurocode 2 (2010), ACI 318 (2019), que não existe uma avaliação quantitativa da rugosidade. Esta é definida por comparação com padrões de rugosidade, ou classificada como *pouco rugosa*, *rugosa* ou *muito rugosa*. Sendo assim, fica a critério de cada um a definição do grau de rugosidade, não existindo sequer um método aceito pela maioria dos pesquisadores, embora os métodos ópticos, que recorrem à utilização de laser, pareçam ser os mais consensuais e fiáveis, segundo Maerz (1999).

Uma inspeção visual da superfície do concreto não é suficiente para obter qualquer conclusão acerca da sua rugosidade, mas serve meramente como uma comparação com outras situações e está, por isso, sujeita à opinião de cada um, além de não permitir uma quantificação numérica.

Assim, conclui-se que, para efetuar comparações entre os diversos tipos de tratamento da superfície do concreto, é necessário definir primeiro uma técnica que permita medir de forma simples, expedita e com precisão suficiente, dada a sua reduzida dimensão visível a *olho nu*, a rugosidade na superfície do concreto. Tal técnica poderá ser utilizada tanto em laboratório como *in situ*.

O *International Concrete Repair Institute* (ICRI, 1997) definiu uma técnica de avaliação da rugosidade de uma superfície que consiste em comparar a superfície em questão com nove amostras padronizadas. Essa técnica é meramente uma inspeção visual, sendo muito subjetiva por estar dependente da

opinião do observador. Na Figura 2.8, representam-se os perfis de rugosidade padrão do ICRI, sendo o perfil 1 o menos rugoso e o perfil 9 o mais rugoso.

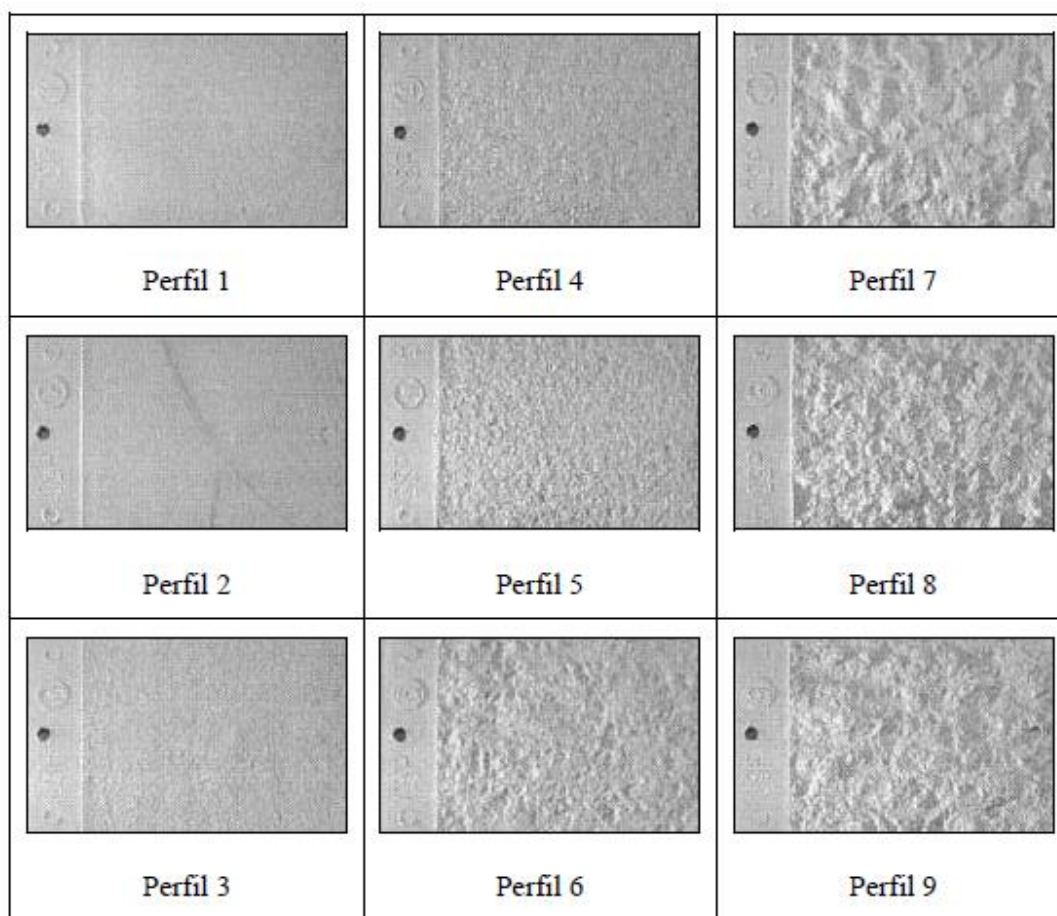


Figura 2.8- Perfis de rugosidade padronizados do ICRI.

Issa *et al.* (2003) recorreram à geometria de fractais para caracterizar a superfície de fratura do concreto. Segundo os autores, define-se como fractal um objeto cuja geometria é demasiadamente irregular para se enquadrar dentro dos objetos criados pelo homem e que geralmente corresponde à geometria Euclidiana. As superfícies do concreto sujeitas a tratamentos abrasivos com o objetivo de aumentar a sua rugosidade correspondem a fractais, porque a sua geometria é totalmente irregular e aleatória, bem como as superfícies de fratura do concreto. Verifica-se que a dimensão do fractal se relaciona de forma clara com a rugosidade da superfície e, quanto mais rugosa esta for, maior será a dimensão do fractal. Esses pesquisadores recorreram ao método chamado de *slit-island* numa versão modificada, utilizando água e imagem digital para definir a dimensão do fractal.

Abu-Tair *et al.* (2000) propuseram uma técnica designada por método do gradiente da rugosidade (*roughness gradient method*), em que a superfície do concreto é definida através de uma série de ondas. Essa série de ondas é obtida através de instrumentação desenvolvida especificamente para o efeito, um conjunto de agulhas que se ajusta à superfície da interface, sendo em seguida fotografado o perfil obtido e ampliado para facilitar a obtenção de leituras. Tal método é destrutivo, uma vez que implica o seccionamento de elementos de concreto de forma a se obter um perfil longitudinal. Para cada comprimento de onda, é determinado o gradiente médio, obtido através da média entre o gradiente descendente e ascendente de cada onda. O gradiente da rugosidade, parâmetro definido assim pelo autor do método e que caracteriza a rugosidade da superfície, é obtido através das médias dos gradientes de cada comprimento de onda.

Qualquer um dos métodos propostos, tanto o de Issa *et al.* (2003) quanto o de Abu-Tair *et al.* (2000), apenas podem ser realizados em laboratório, dadas as suas características.

Maerz e Franklin (1990), Maerz *et al.* (1990), Maerz (1999) e Maerz *et al.* (2001) abordaram a utilização de três técnicas distintas, designadamente como *shadow profilometry*, *texture mapping* e *laser stripping*.

A técnica de *shadow profilometry* consiste na incidência de focos de luz sobre uma superfície, fotografando-a e recorrendo ao tratamento digital da imagem para que se defina um perfil de sombra através da sua ampliação. Este perfil de sombra é o respectivo perfil de rugosidade da superfície. A principal dificuldade inerente a esta técnica é o contraste entre agregados e a pasta do cimento que poderá impedir o tratamento digital da imagem e respectiva definição do perfil de sombra.

O varrimento com laser (*laser stripping*), é claramente a melhor técnica que se pode utilizar para medir a rugosidade da superfície do concreto. Nesta técnica é utilizada uma câmara de alta resolução e um laser. À medida que o laser percorre a superfície do concreto, definindo-se várias faixas de varrimento, a câmara de alta resolução captura apenas a luz emitida pelo laser permitindo que se defina um perfil da superfície do concreto. Para que seja capturado apenas o laser a incidir sobre a superfície do concreto é necessário utilizar, em conjunto com a câmara, um filtro de luz acoplado a esta. Em função da dimensão

da rugosidade existente, é necessário definir as propriedades do equipamento utilizado, laser e câmara, para que estes tenham sensibilidade suficiente para detectar as variações da superfície. Todas as pesquisas do autor recomendam igualmente a utilização mínima de 10 faixas para caracterizar devidamente a superfície.

Garbacz *et al.* (2004) recorreram à utilização de um equipamento comercial, constituído por um estilete, condicionador/amplificador, equipamento mecânico e equipamento informático para aquisição de dados. Para a descrição da rugosidade do concreto foi realizada uma análise do perfil obtido da superfície e definidos diversos parâmetros numéricos de caracterização da mesma.

Santos *et al.* (2007) desenvolveram um método *in situ* para quantificar a rugosidade de superfícies de concreto e correlacionar com a resistência ao cisalhamento de interfaces concreto-concreto. Esse método foi denominado “método TDI” porque é baseado no processamento de imagem digital. O método TDI é parcialmente destrutivo, pois envolve a extração de amostras do elemento de concreto. As amostras extraídas são submetidas a um procedimento de preparação que consiste em etapas de: limpeza; aplicação de resina epóxi sobre a superfície do corpo-de-prova, serragem em plano perpendicular à superfície e polimento do corpo de prova; criação de imagem digital, por métodos fotográficos ou de digitalização, em escala métrica auxiliar; processamento da imagem digital obtida para identificação das partes correspondentes à resina e ao concreto; determinação das coordenadas do perfil de rugosidade; e transformação de coordenadas para remover o efeito da orientação do perfil.

No entanto, Santos (2009) desenvolveu um dispositivo especificamente para caracterizar a textura das superfícies de concreto, chamado de analisador de rugosidade a laser 2D. O objetivo principal era aperfeiçoar o método TDI, desenvolvido por Santos *et al.* (2007), que apresentava algumas desvantagens como o fato de ser parcialmente destrutivo, trabalhoso e de incluir um componente laboratorial.

Com este dispositivo, o método pôde ser realizado totalmente no local e de forma não destrutiva. Além disso, era obtida uma caracterização quantitativa e rápida da rugosidade da superfície, podendo assim substituir facilmente a abordagem qualitativa dos códigos de projeto existentes. Sendo assim, o novo método proposto apresentava todas as vantagens, com resultados ainda mais



precisos, e superava todas as desvantagens do método TDI e de outros métodos.

## 2.4 - Parâmetros de rugosidade

A principal dificuldade com o estudo da rugosidade de uma superfície, não está na medição e obtenção de um perfil de rugosidade, mas sim na atribuição de um escalar que permita quantificar essa rugosidade de forma a compará-la com outras situações.

Cabe ao engenheiro escolher os parâmetros - um ou vários - que permitirão caracterizar essa superfície. No caso de duas superfícies com rugosidades diferentes, e se for efetuada a caracterização através de parâmetros de rugosidade, os resultados terão de ser diferentes, caso contrário esta caracterização de nada serve, pois não permite as diferenciar. Se os parâmetros escolhidos não refletirem a diferença de rugosidade, não deverão ser adotados. Um parâmetro de rugosidade deve ser sensível ao tipo de superfície em análise, devendo sempre ser efetuada a sua escolha com este critério em mente.

No trabalho de Mummery (2000), apresenta-se inúmeros parâmetros de caracterização da topografia de uma superfície, extraídos relativamente à sua rugosidade. Dentre esses parâmetros, e levando em conta que vários deles podem ser adotados para quantificar a rugosidade da superfície e podem ser considerados individualmente ou combinados, serão descritos a seguir aqueles considerados relevantes para a caracterização das superfícies utilizadas por Santos (2005) e serviram de base para esta pesquisa. Embora em trabalhos mais recentes, Santos e Júlio (2010), tenham utilizado apenas cinco desses parâmetros: altura máxima do pico ( $R_p$ ); altura média do pico ( $R_{pm}$ ); profundidade máxima do vale ( $R_v$ ); profundidade média do vale ( $R_{vm}$ ); rugosidade média ( $R_a$ ), para estabelecer uma classificação quantitativa, logo, mais rigorosa, da rugosidade do substrato.

- *Rugosidade Média ( $R_a$ )*

A rugosidade média (*average roughness*) de um perfil, mostrada na Figura 2.9 é o principal parâmetro, e o primeiro utilizado para caracterizar uma superfície. Este parâmetro representa o desvio médio do perfil relativo à linha média e pode ser expresso pela Equação 2.3.

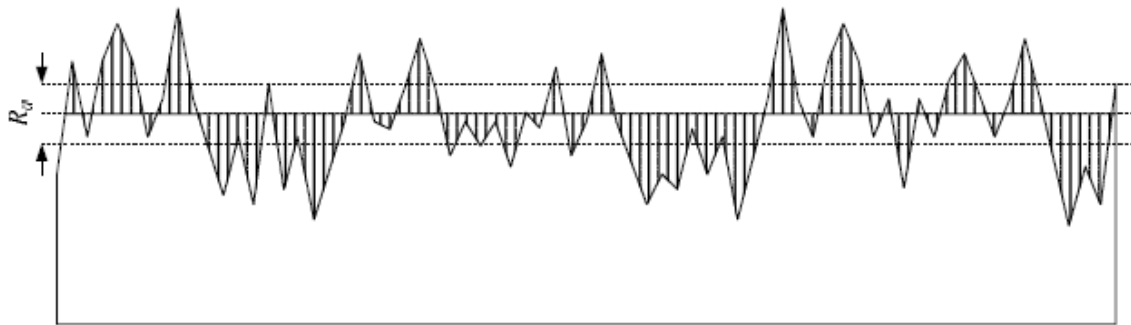
$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.3)$$

onde:

$l_m$  é o comprimento da avaliação;

$y(x)$  é a altura do perfil na posição  $x$ .

Este parâmetro não leva em conta a existência de picos e vales, podendo facilmente obter-se uma rugosidade média semelhante em perfis bastante distintos.



**Figura 2.9- Rugosidade média**

- *Altura média pico-vale* ( $R_{z(DIN)}$ )

Para determinar a altura média pico-vale, mostrado na Figura 2.10, divide-se o perfil em cinco trechos iguais. Em cada trecho é determinado o valor máximo da altura pico-vale  $z_i$ , sendo o parâmetro de rugosidade dado pela média dos valores obtidos nos 5 trechos e pode ser expressa pela Equação 2.4. Este parâmetro é definido pela DIN 4768.

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (2.4)$$

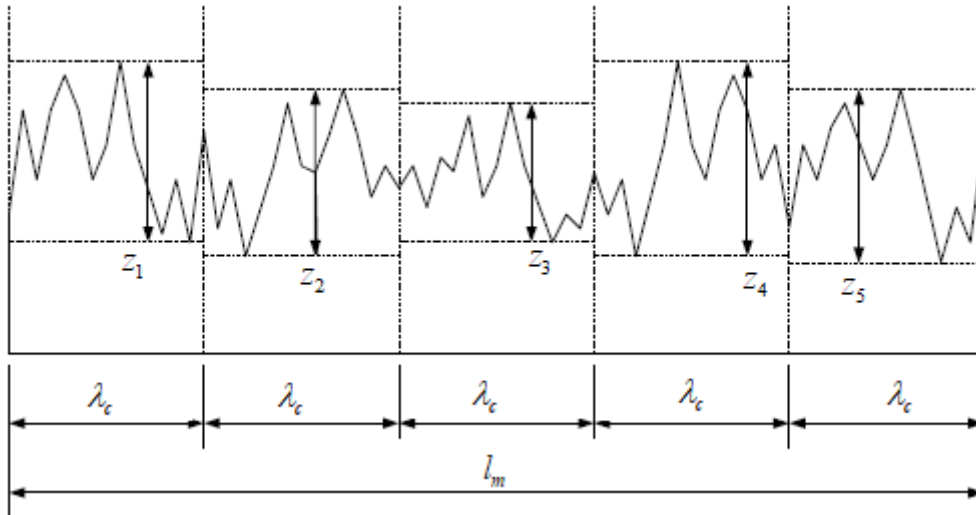


Figura 2.10- Altura média pico-vale

- *Altura máxima pico-vale ( $R_{\max}$ )*

A determinação da altura máxima pico-vale, procede-se de forma análoga à da determinação da altura média pico-vale, como mostrado na Figura 2.10, sendo o parâmetro de rugosidade dado pelo máximo dos valores obtidos nos 5 trechos e é expressa pela Equação 2.5.

$$R_{\max} = \max \{z_i\} \quad (2.5)$$

Este parâmetro, utilizado em conjunto com a altura média pico-vale, permite obter algumas conclusões acerca da variação da superfície. No caso de serem da mesma ordem de grandeza, verifica-se que a superfície é consistente, ou seja, sem variações abruptas.

- *Altura média do 3º pico-vale mais alto ( $R_{3z}$ )*

Para determinar a altura média do 3º pico-vale mais alto, mostrado na Figura 2.11, divide-se o perfil em cinco trechos iguais. Em cada trecho é determinado o valor máximo da altura pico-vale, mas, relativo ao 3º pico-vale e não ao 1º. O valor do parâmetro de rugosidade é dado pela média dos valores obtidos nos 5 trechos. Este parâmetro apenas pode ser determinado se existirem no mínimo 3 picos e 3 vales em cada trecho, caso contrário, não será possível

proceder à sua determinação. Este parâmetro pode ser expresso pela Equação 2.6.

$$R_{3z} = \max \{ R_{3zi} \} \quad (2.6)$$

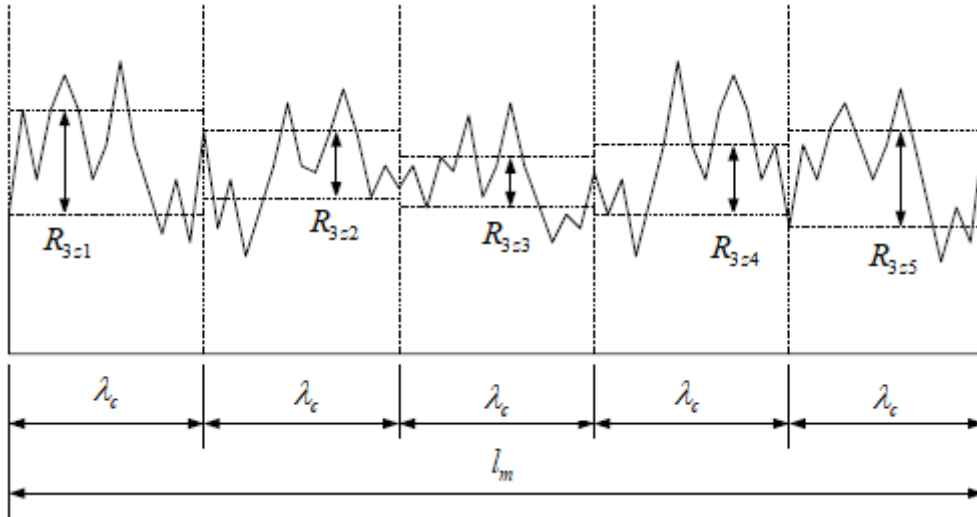


Figura 2.11- Altura média do 3º pico-vale mais alto.

- Altura máxima do 3º pico-vale mais alto ( $R_{3z\max}$ )

Para determinar a altura máxima do 3º pico-vale mais alto, procede-se de forma análoga à da determinação da altura média do 3º pico-vale mais alto (Figura 2.11), sendo o parâmetro de rugosidade dado pelo máximo dos valores obtidos nos 5 trechos. Este parâmetro é expresso pela Equação 2.7.

$$R_{3z\max} = \max \{ R_{3zi} \} \quad (2.7)$$

- Altura dos dez pontos ( $R_{z(ISO)}$ )

O parâmetro altura dos dez pontos, mostrado na Figura 2.12, definido pela ISO 4287, é análogo ao parâmetro altura média pico-vale definido pela norma DIN. Este parâmetro representa a distância média entre a média dos 5 picos mais elevados e a média dos 5 vales mais profundos. Um pico-vale é definido como o ponto mais elevado (profundo) localizado entre dois cruzamentos da linha média do perfil.

Neste tipo de parâmetro, os picos e os vales podem estar localizados em qualquer posição ao longo do perfil, não sendo necessário a divisão em 5 trechos. Este parâmetro tem a desvantagem de, no caso dos picos e/ou vales se localizarem apenas numa zona específica, não traduzir de forma adequada a rugosidade existente. Pode ser expresso pela Equação 2.8.

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (2.8)$$

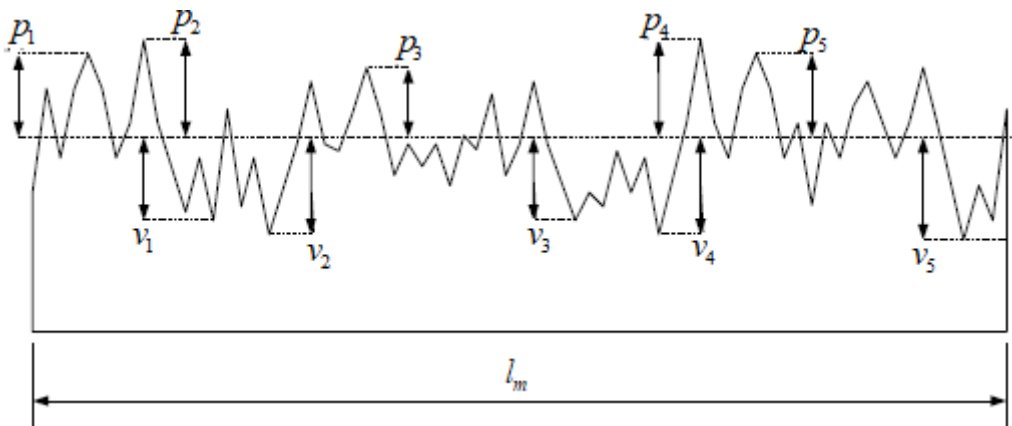


Figura 2.12- Altura dos dez pontos

- *Altura total da rugosidade ( $R_y$ )*

A Figura 2.13 representa o parâmetro altura total da rugosidade, definido pela norma ISO, é análogo ao parâmetro altura máxima pico-vale definido pela norma DIN. Este parâmetro representa a distância máxima entre o pico mais elevado e o vale mais profundo do perfil. Sendo assim, possui a vantagem de traduzir realmente qual a distância pico-vale do perfil, contudo, o pico mais elevado e o vale mais profundo podem estar localizados no início e final do perfil, respectivamente. Neste caso, o parâmetro deixa de ter utilidade. Pode ser expresso através da Equação 2.9.

$$R_y = p_{\max} - v_{\max} \quad (2.9)$$

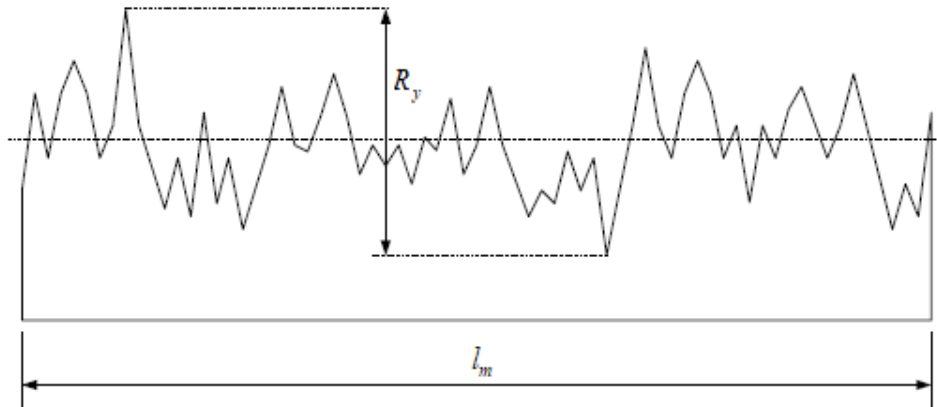


Figura 2.13- Altura total da rugosidade.

- Altura média do pico ( $R_{pm}$ )

Para determinar a altura média do pico, mostrado na Figura 2.14, divide-se o perfil em cinco trechos iguais, e em cada trecho é determinado o valor máximo da altura do pico em relação à linha média, sendo o parâmetro de rugosidade dado pela média dos valores obtidos nos 5 trechos. Este parâmetro é determinado pela Equação 2.10.

$$R_{pm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 p_i \quad (2.10)$$

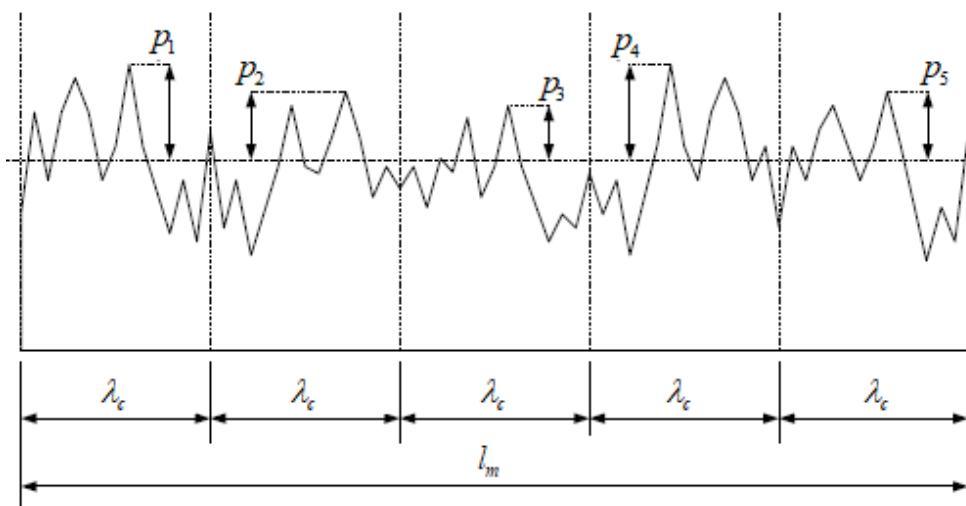


Figura 2.14- Altura média do pico

- *Altura máxima do pico ( $R_p$ )*

O parâmetro altura máxima do pico, mostrado na Figura 2.15, corresponde à altura máxima de qualquer pico do perfil em relação à linha média, expressa pela Equação 2.11.

$$R_p = \max \{ p_i \} \quad (2.11)$$

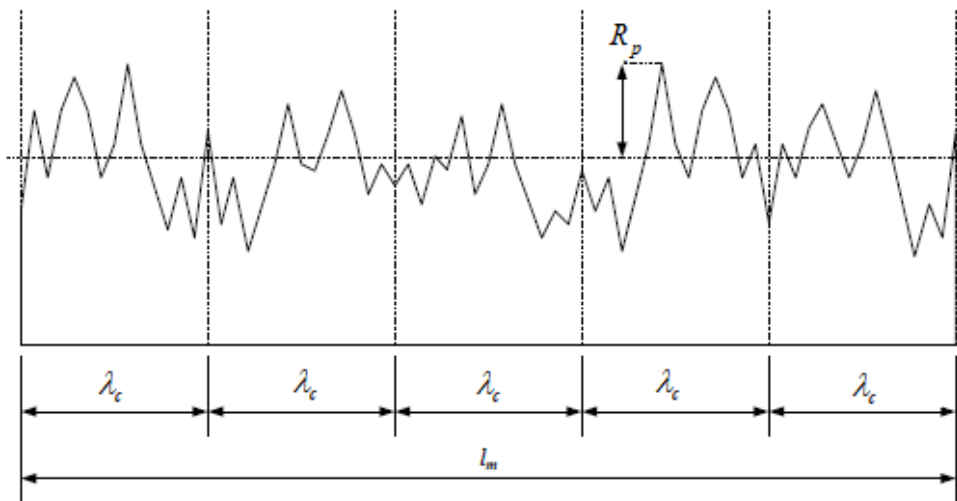


Figura 2.15- Altura máxima do pico.

- *Profundidade média do vale ( $R_{vm}$ )*

Para determinar a profundidade média do vale, mostrado na Figura 2.16, divide-se o perfil em cinco trechos iguais e em cada trecho é determinado o valor máximo da profundidade do vale em relação à linha média, sendo o parâmetro de rugosidade dado pela média dos valores obtidos nos 5 trechos, expresso na Equação 2.12.

$$R_{vm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i \quad (2.12)$$

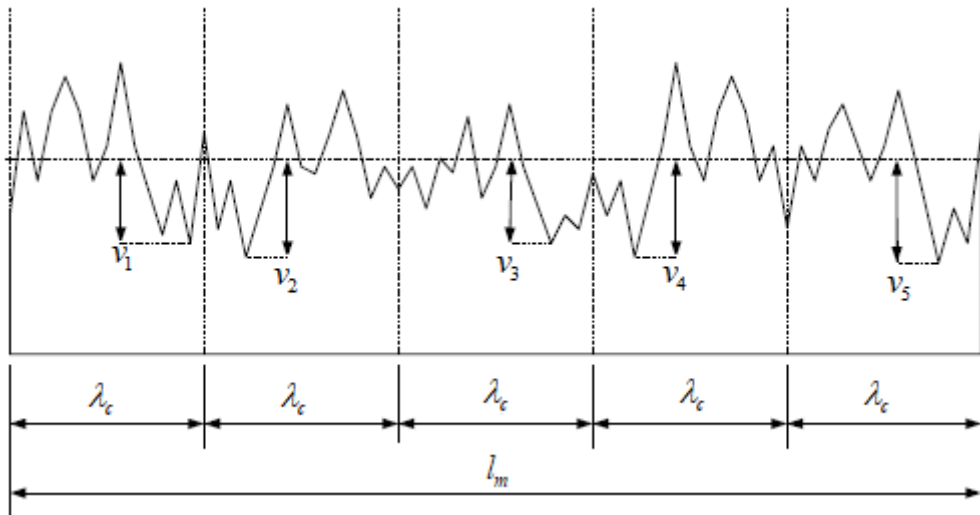


Figura 2.16 - Profundidade média do vale.

- Profundidade máxima do vale ( $R_v$ )

O parâmetro profundidade máxima do vale, mostrado na Figura 2.17, corresponde à profundidade máxima de qualquer vale do perfil em relação à linha média e é expresso pela Equação 2.13.

$$R_v = \max \{v_i\} \quad (2.13)$$

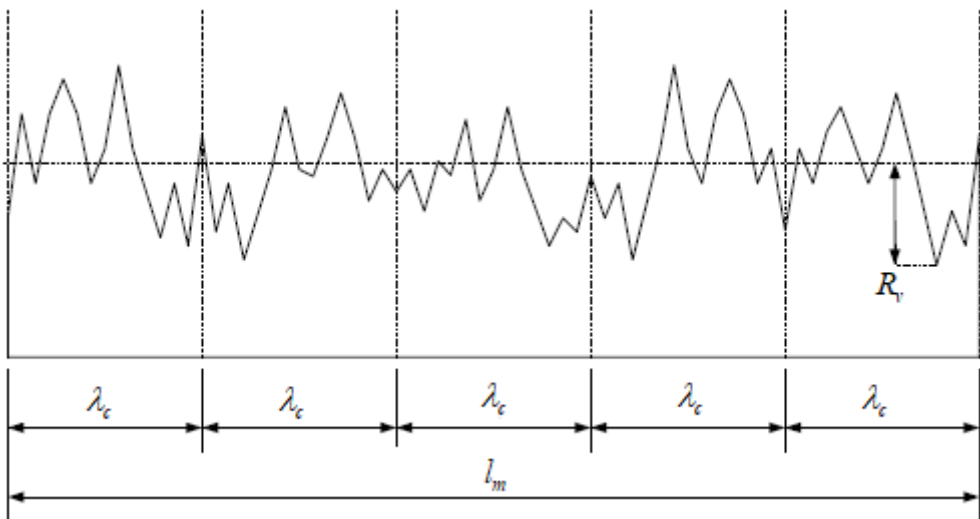


Figura 2.17- Profundidade máxima do vale.



## 2.5- Resistência de ligação da superfície do substrato

Para a resistência de ligação interfacial ser adequadamente caracterizada, ela deve ser definida por uma lei de interação, relacionando valores de força para diferentes combinações de tensões cisalhantes e normais. Os estados de tensão interfacial aplicados pelos ensaios de ligação incluem: (1) cisalhamento e compressão combinados; (2) cisalhamento “puro”; (3) cisalhamento e tração combinados; (4) tração indireta; e (5) tração direta, com força de união gradualmente diminuindo de (1) para (5).

A obtenção de um modo de falha específico, desejado em um ensaio de união sob condições de tensões específicas, como cisalhamento puro ou tração, pode ser particularmente desafiadora, especialmente para materiais frágeis e quase frágeis, como compósitos cimentícios. Uma falha que ocorre parcial ou totalmente no substrato, e não no plano de ligação, é frequentemente observada. Como resultado, pode-se supor que a resistência de união seja maior que a tensão alcançada na falha, enquanto nenhum valor de resistência pode ser estimado, nem a influência de alguns fatores (como rugosidade da interface ou agentes de união) na resistência de união pode ser estimado. Uma falha não interfacial não é necessariamente indicativa de uma boa ligação, pois pode ser uma consequência da condição específica de tensão aplicada por um teste específico. Segundo Zanotti (2016), de fato, algumas configurações de ensaio como por exemplo o ensaio de *pull-off* podem induzir uma combinação de tensão mais desvantajosa no substrato ou no reparo do que na interface.

Além disso, embora tensões uniformes ao longo da área interfacial sejam comumente assumidas, distribuições de tensões não uniformes devem ser esperadas, com a extensão do gradiente de tensão afetada pela incompatibilidade da ligação das superfícies.

A qualidade da ligação concreto-concreto depende de ações de atrito/intertravamento e da ligação coesiva/adesiva como mostrado por Randl (2013) e Mohamad *et al.* (2015). O atrito e o intertravamento foram minuciosamente investigados e modelados, embora a correlação entre coeficientes de atrito e rugosidade interfacial ainda seja motivo de discussão. Outro fator contribuinte

importante para a durabilidade, solidez e eficácia da ligação é sua composição coesa, tanto no cisalhamento quanto na tração. Em geral, a ligação coesa é extremamente importante por ser benéfica para resistir a todos os modos de fratura, apesar de ser altamente sensível a vários fatores. Assim como a ligação de atrito, sabe-se que a ligação coesa depende da rugosidade interfacial, dado que a tortuosidade interfacial afeta a área de contato concreto-concreto e a resistência à propagação de fissuras.

Mas a ligação coesa também é afetada por outros fatores micro mecânicos (como fraturas localizadas), composição do material, ações adesivas (químicas e físicas) na interface, composição e porosidade da Zona de Transição Interfacial (ITZ), bem como a solidez dessa zona (Zanotti *et al.*, 2014). Segundo Randl (2016), o uso de concreto de alta resistência é benéfico para a união coesa, pois a qualidade da ITZ é melhorada através da densificação da matriz. No entanto, a capacidade limitada de utilizar esses efeitos benéficos no projeto da ligação de interfaces concreto-concreto é afetada principalmente pela atual falta de métodos quantitativos apropriados de avaliação.

## **2.6 - Determinação da resistência da ligação concreto-concreto**

A determinação da resistência da ligação concreto-concreto é um fator importante em elementos pré-moldados, em reparo e reforço de estruturas de concreto armado. Uma ampla variedade de ensaios para avaliar essa ligação está disponível e alguns destes ensaios podem ser realizados *in situ* e em laboratório, enquanto outros só podem ser executados em laboratório.

Chmielewska (2005) apresentou uma extensa revisão sobre ensaios de ligação, dividindo-os em quatro categorias: a) tração direta; b) flexão; c) *splitting* (tração indireta); e d) cisalhamento. A primeira categoria inclui o *direct tension test* (ensaio de tração direta) e o *pull-off test* (ensaio de *pull-off*) que avaliam a resistência de união sob tração. A segunda categoria inclui vários ensaios de ligação onde corpos-de-prova são ensaiados sob flexão. A terceira categoria inclui o *splitting test* (ensaio de tração indireta) e outros ensaios que avaliam a resistência de ligação do corpo-de-prova ensaiados sob tração combinada com

compressão. A quarta categoria inclui o *direct shear test* (ensaio de cisalhamento direto); o *slant shear* (ensaio de cisalhamento inclinado); o ensaio de cisalhamento duplo, o *push-off test*, que avaliam a resistência de ligação sob tensão de cisalhamento combinada com outras como compressão e torção.

Já Momayez *et al.* (2005) sugeriram que os ensaios de ligação fossem agrupados apenas em três categorias, dependendo do estado de tensão a que os corpos-de-prova estejam submetidos. A primeira categoria de ensaios determina a ligação sob tensões de tração e os principais ensaios desta categoria são o *pull-off*, o ensaio de tração direta e o *splitting* (ensaio de tração indireta). A segunda categoria de ensaios avalia a ligação sob tensões de cisalhamento e é chamada de métodos de cisalhamento direto. Vários ensaios se enquadram nessa categoria, como *direct shear test* e *bi-surface shear test*, sendo o mais usual o ensaio de *push-off*. A terceira categoria leva em conta a resistência da ligação sob um estado de tensão que combina cisalhamento e compressão. Todos os ensaios de *slant shear*, conhecido como cisalhamento inclinado, enquadram-se nessa categoria.

Um ensaio de ligação eficaz deve ser capaz de simular o estado real de tensão de uma estrutura, desde os mais simples, como compressão, tração ou cisalhamento, até os mais complexos, como a combinação de compressão com cisalhamento. Também deve ser capaz de apresentar diferentes modos de falha – adesivos, coesivos e mistos – que podem ocorrer no concreto já existente (concreto do substrato) e o novo concreto (complemento); ou o agente de ligação, caso seja usado. Nesta perspectiva, os modos de falha são representados na Figura 2.18, onde (a) representa uma ruptura no agente de ligação, (b) no concreto velho (substrato), (c) no concreto novo (complemento), (d) entre o agente de ligação e o substrato, (e) entre o agente de ligação e o complemento e (f) misto, atravessando o substrato, o agente de ligação e o complemento.

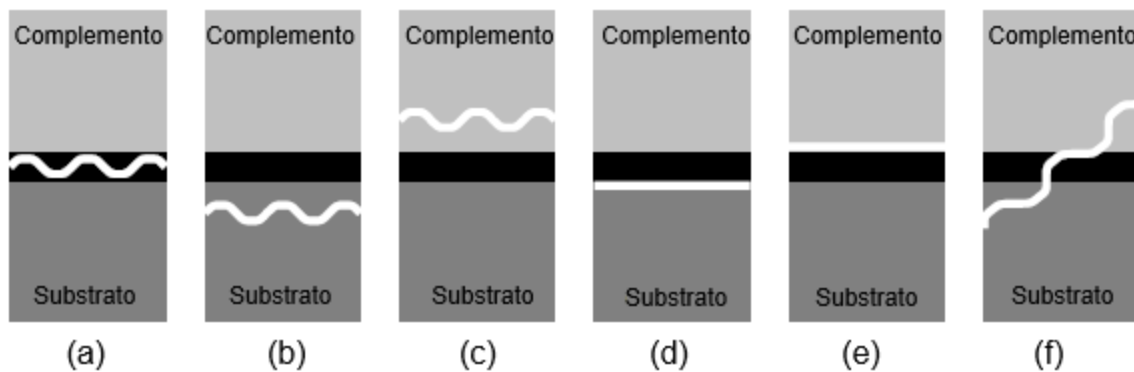


Figura 2.18 - Modos de ruptura (Adaptada de Santos, 2009).

É comum a preparação da superfície do substrato de concreto para obter uma ligação mais alta. Outro fato a se considerar é o uso de misturas de concreto e materiais de reparo com diferentes resistências, como neste trabalho. Além disso, outros parâmetros como tamanho da amostra, a aplicação de carga e a orientação da interface influenciam nos ensaios da ligação.

Portanto, de acordo com Santos (2009), o ensaio da união selecionado deve ser sensível a esses parâmetros, variações da rugosidade da superfície e também da possível rigidez diferencial entre os concretos. Além disso, destaca também que a avaliação de uma ligação não deve ser utilizada somente com um tipo de ensaio, mas em conjunto com outros, pois cada um fornece dados limitados sobre as características da ligação.

A resistência ao cisalhamento da interface obtida para cada ensaio depende da configuração e do ensaio escolhido. A sensibilidade do ensaio é devido à interação de tensões normais e de cisalhamento, às diferentes distribuições de tensões e a possíveis efeitos de excentricidades não consideradas.

As pesquisas sobre ensaios de interfaces concreto-concreto são crescentes e, além da enorme variedade de parâmetros relacionados ao material e dos fatores de preparação da superfície, existe uma variedade de configurações de ensaios diferentes com foco em tração, cisalhamento ou cisalhamento combinado com compressão da interface, produzindo ainda mais variabilidade entre os dados de resistência da ligação concreto-concreto (Momayez *et al.*, 2005 e Espeche e Leon, 2011).

Como já mencionado, existem muitos fatores que afetam a resistência da união entre um concreto existente e um novo concreto, como, por exemplo, a resistência à compressão do concreto antigo (base) e do concreto novo, e a rugosidade do concreto da base. Todos os parâmetros são particularmente relevantes no caso de ensaios de cisalhamento. Portanto, o *slant shear* foi selecionado para realizar o estudo aqui apresentado, mas principalmente por ser altamente sensível à rugosidade da superfície da interface. Além disso, outros ensaios foram realizados: os ensaios de *pull-off* e o *push-off*.

A seguir, são apresentados os principais ensaios de avaliação de interfaces concreto-concreto, incluindo os adotados nesta pesquisa.

### 2.6.1 - Ensaios de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é o ensaio de ligação mais simples para avaliar a resistência ao cisalhamento entre dois materiais. Este teste pode ser realizado com um plano de cisalhamento simples ou duplo.

Através destes ensaios, um corpo-de-prova composto de duas (Figura 2.19 a) ou três (Figura 2.19 b) partes é submetido a forças de compressão opostas. A tensão média de cisalhamento na interface é obtida dividindo a carga de ruptura pela área da interface, seja uma ou duas vezes.

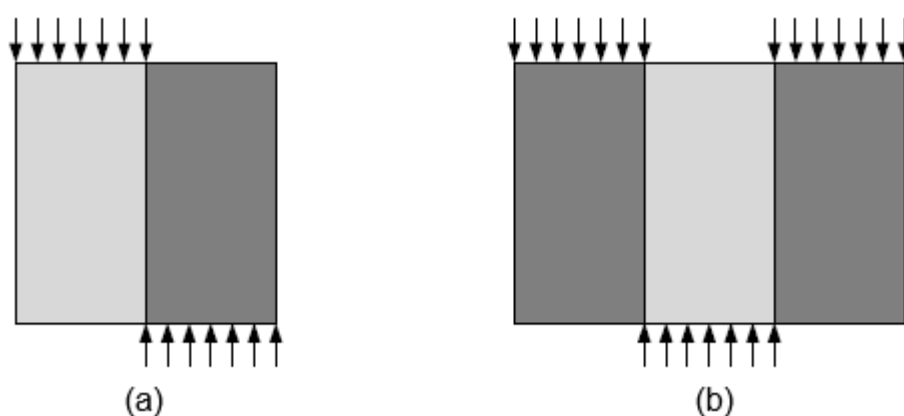


Figura 2.19 - Ensaio de cisalhamento direto simples e duplo.

### 2.6.2- Ensaio de tração direta

O ensaio de tração direta mede a resistência à tração da interface entre dois materiais como mostra a Figura 2.20.

O corpo-de-prova composto é submetido a duas forças de tração opostas, geralmente transmitidas por duas chapas de aço coladas nas duas extremidades ou por garras especiais. O alinhamento do corpo-de-prova com a força de tração é muito importante, pois as excentricidades introduzem flexões, levando à elevada variabilidade nos resultados. Por isso, segundo Geissert *et al.* (1999), o *pull-off*, que é uma variação deste ensaio, é mais fácil de se realizar e capaz de produzir bons resultados.

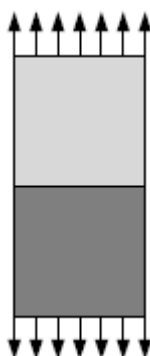


Figura 2.20 - Ensaio de tração direta.

### 2.6.3- Ensaio de *pull-off*

O ensaio de *pull-off*, é um dos ensaios de aderência à tração mais amplamente utilizado, como mostrado na Figura 2.21. A principal vantagem deste ensaio é sua capacidade de ser usado tanto em laboratório quanto *in situ*. O procedimento de preparação e execução do ensaio consiste em perfurar um núcleo circular no concreto, até atingir o substrato e estendê-lo abaixo da superfície da interface. Em seguida, um disco circular de aço é aderido na superfície superior do núcleo, utilizando para isto um material colante capaz de fornecer uma resistência superior à aderência das interfaces e dos materiais colantes. Um dispositivo é então conectado ao disco de aço e uma força de tração é aplicada até que ocorra uma ruptura.

Há muitos fatores que influenciam os resultados do ensaio de *pull-off*, incluindo o agregado graúdo do concreto, a profundidade do substrato, a espessura da camada do complemento, a resistência do substrato de concreto, o diâmetro do núcleo, a excentricidade da carga, e a taxa de carregamento (Bonaldo *et al.*, 2005).

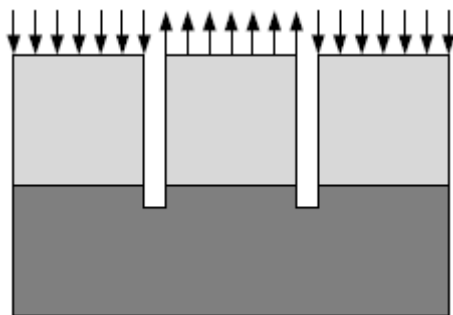


Figura 2.21 - Ensaio de *pull-off*.

#### 2.6.4- Ensaio de *push-off*

O ensaio de *push-off* é um ensaio de cisalhamento normalmente adotado para avaliar a resistência de união das interfaces concreto-concreto, principalmente quando existe armadura atravessando a interface (Figura 2.22).

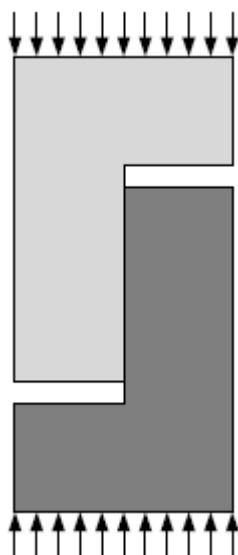


Figura 2.22 - Ensaio de *push-off*.

Esse ensaio foi utilizado a primeira vez por Anderson (1960). Posteriormente, foi adotado e modificado por vários pesquisadores e, mesmo não sendo normalizado, tem sido empregado frequentemente. Uma de suas

vantagens é que por apresentar dimensões reduzidas permite a moldagem de um número maior de corpos-de-prova e uma maior facilidade na execução do ensaio.

É composto por duas partes de concreto, cada uma com a forma de um L, conectadas através da interface e apresentando uma abertura nas duas extremidades, o que permite que o teste continue após a falha da interface por cisalhamento.

Na maioria dos casos, a superfície de união para um ensaio de cisalhamento direto está sujeita a tensões de cisalhamento e a pequenas tensões resultadas da flexão.

#### 2.6.5- Ensaio de *slant shear*

O ensaio de *slant shear*, chamado também de cisalhamento inclinado, é um dos ensaios de adesão mais utilizados para determinar a resistência da união entre dois tipos de concreto, mostrado na Figura 2.23. Além disso, esse ensaio abrange a determinação da resistência de ligação de sistemas à base de resina epóxi para uso com concreto de cimento Portland. Nesse ensaio, a interface é submetida a um estado de tensão de compressão combinado com cisalhamento.

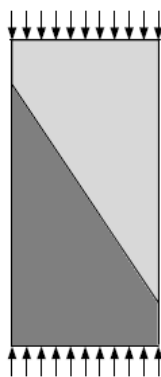


Figura 2.23 - Ensaio de *slant shear*.

Proposto por Kriegh (1976), na Universidade do Arizona, é o mais comum e aceito por pesquisadores desde então. Segundo o pesquisador, o *slant shear* é um método confiável e consistente, porque simula um estado de tensão próximo ao uso real e ao modo de ruptura do concreto. O corpo-de-prova, proposto por Kriegh (1976), foi um cilindro de concreto de 150 mm de diâmetro



e 300 mm de altura com uma interface de ligação a 30° graus com o eixo longitudinal do corpo-de-prova e 60° com a horizontal. Este cilindro composto é ensaiado em compressão como um corpo-de-prova padrão de concreto.

Wall e Shrive (1988) modificaram o ensaio proposto por Kriegh (1976), usando corpo-de-prova retangular com um comprimento três vezes maior que a dimensão da seção transversal, que possuía o mesmo ângulo de inclinação do original. Sua pesquisa indicou que um leve desalinhamento das duas metades do prisma não teve um efeito significativo nos resultados.

Abu-Tair *et al.* (1996) destacou a importância da utilização do *slant shear* para avaliar a ligação de materiais de reparo com resina a substratos de concreto.

Zilch e Reinecke (2000) propuseram um corpo-de-prova prismático alternativo para o ensaio de *slant shear* com um entalhe localizado nas duas extremidades do plano de cisalhamento, a fim de melhor induzir o modo de ruptura adesivo. Saldanha *et al.* (2013) também desenvolveram um novo método, chamado "ensaio de cisalhamento modificado", projetado para impor falhas adesivas, sugerindo o uso de uma armação formada por barras longitudinais e transversais nas duas metades do corpo-de-prova.

Uma desvantagem deste ensaio de ligação é a diferença entre os padrões de ruptura, resultado das dimensões do corpo-de-prova e o ângulo da interface, uma vez que essas diferenças dificultam a comparação entre os resultados obtidos, conforme afirma Clímaco e Regan (2001). Complementando o dito acima, Ceia *et al.* (2016) destacou que a principal desvantagem deste ensaio é que, em algumas situações, ocorrem falhas coesivas ao invés de adesivas e, portanto, nesses casos, o resultado não é a resistência ao cisalhamento desejada da interface, mas uma estimativa inferior desta última. Mesmo em pesquisas recentes, como de Semendary e Svecova (2020), utilizando ângulo de 30° na interface, foi relatado rupturas coesivas, ou seja, não foi satisfeito o modo de falha deslizante, o que impediu que a interface chegasse à sua capacidade limite de resistência ao cisalhamento.

### 2.6.6- Ensaio de *splitting test*

O *splitting test*, mostrado na Figura 2.24, é utilizado para medir a resistência à tração entre dois materiais, geralmente dois concretos diferentes. Foi desenvolvido de forma independente e proposto quase simultaneamente por Carneiro e Barcellos (1953) e Akazawa (1953). Esse ensaio também é conhecido como o ensaio brasileiro e atualmente é definido pelas normas EN 12390-6 (2004) e ASTM C 496 (2004).

Neste ensaio, um corpo-de-prova composto é ensaiado pela aplicação de duas forças compressivas opostas, em uma direção paralela à superfície da interface. A falha é atingida por tração normal à superfície da interface, devido ao efeito Poisson.

O *splitting test* é simples e fácil de ser realizado com a união de duas partes prismáticas ou cilíndricas. A fôrma cilíndrica usada para moldar os corpos-de-prova de concreto usados para ensaios de compressão padrão pode ser usada para moldar os corpos-de-prova para este ensaio.

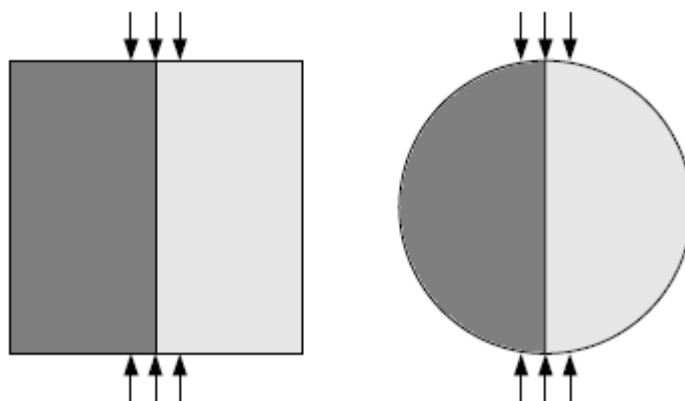


Figura 2.24 - *Splitting test* em um corpo-de-prova cúbico e cilíndrico, respectivamente.

## 2.7 - Estudos sobre aderência de interfaces concreto-concreto

Nos trabalhos de investigação desenvolvidos sobre este assunto, como mencionado anteriormente, os parâmetros identificados como sendo os mais relevantes para a resistência de interfaces entre concretos de diferentes idades são os seguintes: (i) a rugosidade do substrato; (ii) a resistência do concreto; (iii) o valor da tensão normal na interface; (iv) a resistência da armadura que atravessa a interface, resultado do produto entre a percentagem de armadura ( $\rho_{sw}$ ) e a tensão de escoamento do aço ( $f_{yd}$ ) que a constitui; e (v) o ângulo da armadura que atravessa a interface. Estes dois últimos não são objeto de estudo do presente trabalho.

### **2.7.1 - Rilo (2004)**

Rilo (2004) realizou sua pesquisa usando ensaios do tipo *slant shear*. Foi utilizado concreto convencional com resistência à compressão aos 28 dias de aproximadamente 50 MPa, para substrato e complemento, foram consideradas duas situações distintas de interface: sem tratamento e com tratamento aplicando jato de areia. Além destas duas situações, foram considerados outros tipos de tratamento da interface, como a aplicação de resinas epoxídicas. Os resultados mostraram que o tratamento da interface com jato de areia aumentou a resistência ao cisalhamento, em relação à situação de interface sem tratamento. Os corpos-de-prova tratados com jato de areia, sendo cinco no total, apresentaram ruptura pela interface numa situação, ruptura monolítica em duas situações, e ruptura mista nas outras duas situações.

### **2.7.2 - Momayez et al. (2005)**

Nesse trabalho, Momayez et al. (2005) estudaram o efeito dos tipos de ensaios na resistência da união entre substrato de concreto e o material de reparo. Foram estudados quatro tipos de ensaio com materiais de reparo cimentícios, com duas rugosidades da superfície. Os ensaios utilizados foram *pull-off*, *splitting test prism*, *direct shear* e *slant shear*. Embora o coeficiente de variação (COV) para cada tipo de ensaio tenha sido aceitável, a resistência da ligação de alguns ensaios foi até oito vezes maior que a obtida em outros. De

acordo com os autores, é importante que os ensaios de ligação sejam selecionados de modo que representem o estado de tensão à qual a estrutura está sujeita no campo. A resistência da interface obtida experimentalmente diminuiu com o tipo de ensaio na seguinte ordem: *slant shear*, *direct shear*, *splitting test prism* e *pull-off*.

### **2.7.3 - Santos *et al.* (2005)**

No trabalho de Santos *et al.* (2005), os autores estudou a viabilidade de um método alternativo com o objetivo de quantificar a rugosidade da superfície ao invés de classificá-la de maneira qualitativa e assim verificar se esses parâmetros poderiam ser correlacionados com a resistência de união da interface. Foram consideradas amostras com a superfície do substrato preparada com diferentes tipos de rugosidade. O perfil de rugosidade da superfície do substrato foi obtido com o processamento digital de imagem.

Essa abordagem apresentava como vantagem o fato dos resultados não serem influenciados pelo observador. Vários parâmetros foram adotados para quantificar a rugosidade e foram considerados de forma individual ou combinados.

Ensaio do tipo *slant shear* e *pull-off* foram adotados para avaliar a resistência de união no cisalhamento e na tração, respectivamente. No *slant shear*, corpos-de-prova de concreto foram ensaiados sob compressão e a geometria adotada foi um prisma de 200x200x400 mm com a interface em 30° com a vertical. Para o ensaio tipo *pull-off*, foi adotado um cubo com aresta de 200 mm, com a interface na altura média. O modo de falha neste ensaio ocorreu na interface, sendo de forma adesiva ou coesiva.

Os corpos-de prova foram preparados com três diferentes tratamentos de superfície: (1) superfície lisa, moldados contra cofragem de aço; (2) superfície levemente rugosa, tratadas com escovação, sem expor os agregados; e (3) superfície rugosa, preparadas com jateamento de areia, expondo os agregados.

A técnica adotada para obter o perfil de rugosidade apresentou bons resultados. No entanto, para superfícies lisas, o autor afirma que seria necessário um equipamento mais preciso para obter a imagem digital do perfil,

para evitar dificuldades na identificação deste. Um procedimento óptico, como a profilometria a laser, seria provavelmente a técnica mais adequada e também apresentaria a vantagem de não ser destrutivo.

Os parâmetros de rugosidade foram correlacionados com a resistência da interface no cisalhamento e na tração, determinados experimentalmente com ensaios de cisalhamento e tração. Foi assumida uma relação linear obtendo-se um bom coeficiente de correlação. Consequentemente, eles frisaram que seria muito adequado adotar nos códigos de projeto um método quantitativo para avaliar o cisalhamento na interface entre o concreto-concreto moldados em diferentes momentos, em vez do processo qualitativo atual.

Finalmente, os autores aconselharam usar os seguintes parâmetros de rugosidade: altura máxima do pico-vale ( $R_{m\acute{a}x}$ ) ou profundidade máxima do vale ( $R_v$ ), uma vez que correspondem aos maiores coeficientes de correlação obtidos.

Os resultados obtidos com os ensaios de *slant shear* foram inconclusivos, ou seja, não apresentaram diferenciação significativa quando avaliada a influência do tratamento da interface na sua resistência ao cisalhamento. Verificou-se ainda uma grande dispersão dos resultados, conduzindo a um elevado coeficiente de variação.

#### **2.7.4 - Tayeh *et al.* (2013)**

Para avaliar a resistência de ligação da interface entre concreto normal e concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibra (UHPFC) como material de reparo para cisalhamento e tração, foram realizados ensaios de *slant shear* e *splitting*, respectivamente.

O concreto normal foi utilizado no substrato e o UHPFC como material de reparo. As amostras foram moldadas, após 24 horas foram limpas e colocadas em cura por dois dias. Na idade de três dias, foi feita a preparação da interface. Foram feitos cinco tipos diferentes de rugosidade, são elas: como moldada, jateamento de areia, escovação com arame, perfuração e ranhuras. Antes da moldagem do material de reparo, as amostras do substrato permaneceram em cura por 28 dias.

Os corpos de prova do tipo *splitting* possuíam um diâmetro de 100 mm e comprimento longitudinal de 200 mm. Os modos de ruptura para estes foram categorizados em três tipos, ou seja, a ruptura interfacial pura, a ruptura interfacial com falha parcial do substrato e a ruptura do substrato.

Para o *slant shear*, prismas compostos de 100 mm x 100 mm x 300 mm foram moldados com um ângulo de inclinação de 30° em relação ao eixo vertical. Os modos de ruptura para os corpos-de-prova do tipo *slant shear* foram divididos em quatro tipos, a ruptura da ligação interfacial, a ruptura interfacial com fissuras ou pequenas peças quebradas no substrato, a ruptura interfacial e a fratura do substrato e a ruptura do substrato.

Os resultados mostraram que o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibra tem excelente ligação com a superfície do substrato de concreto normal e, em seguida, fornece maior resistência à interface de ligação do que a resistência do substrato de concreto normal. Para ambos os ensaios, o maior resultado de resistência da ligação da interface foi obtido quando a preparação da superfície foi por jateamento de areia.

#### **2.7.5- Carbonell Muñoz *et al.* (2014)**

Carbonell Muñoz *et al.*(2014) em seu trabalho exploram as características de ligação entre o concreto normal e de ultra alta resistência (UHPC) sob diferentes configurações de tensão e condições ambientais.

As variáveis avaliadas foram o grau de rugosidade dos substratos de concreto, idade da ligação, exposição a ciclos de congelamento-descongelamento e condições de umidade do substrato de concreto.

O ensaio de *splitting* foi combinado com 0, 300, 600 e 900 ciclos de congelamento e descongelamento para avaliar o desempenho da ligação sob condições ambientais severas. O ensaio de *slant shear* foi conduzido com diferentes ângulos na interface (20°, 25° e 30°) a fim de fornecer uma compreensão mais ampla do desempenho da ligação sob várias combinações de tensões de compressão e cisalhamento.

Além disso, as medições da resistência à tração da ligação, foi avaliada por meio do ensaio de *pull-off* para fornecer dados que pudessem ser correlacionados com os outros ensaios. O programa experimental mostrou que o desempenho da ligação entre concreto normal e UHPC é adequado para aplicações de sobreposição de pontes, independentemente do grau de rugosidade do substrato de concreto, da idade dos corpos de prova, da exposição a ciclos de congelamento e descongelamento além das diferentes configurações de carga.

A preparação da superfície era realizada quando os substratos de concreto atingiam os 28 dias de idade. A Figura 2.25 mostra os diferentes substratos do concreto normal produzidos por Carbonell Muñoz *et al.* (2014). As superfícies foram preparadas usando combinações de brocas, escovas de arame, serragem e retardador de aplicação superficial para criar uma variedade de rugosidades superficiais e texturas.



Figura 2.25 - Rugosidades do substrato do concreto normal de Carbonell Muñoz *et al.* (2014).

Para avaliar o grau de rugosidade obtido por cada tratamento de superfície foram usados dois métodos: o ensaio de profundidade da macrotextura (usado usualmente como medida de rugosidade para pavimento) e o índice de preparação da superfície de concreto dado pelo ICRI (1997).

Os autores destacaram que todas as amostras de *slant shear* com um ângulo de interface de 30° falharam no substrato de concreto (ruptura coesiva). Porém, as amostras com um ângulo de interface de 20° apresentaram rupturas adesivas. Todas as amostras com superfície escovada falharam na interface e

as restantes em sua maioria no substrato de concreto. No entanto, de maneira geral concluíram que para todos as variáveis estudadas o desempenho da ligação excedeu as capacidades recomendadas encontradas na literatura.

#### **2.7.6 - Ceia *et.al.* (2016)**

Ceia *et al.* (2016), usando o ensaio de *slant shear*, estudaram a resistência da interface entre concreto com agregado reciclado e concreto com agregado natural. Foram consideradas quatro taxas de substituição de agregados graúdos pelo reciclado de 0% (referência), 20%, 50% e 100%. e as seguintes condições de rugosidade do substrato: interface lisa sem tratamento adicional; interface levemente rugosa (produzida com uma escova de aço); e superfície rugosa (tratada com uma pistola de agulha). Um total de 12 amostras com as quatro taxas de substituição e as três condições de rugosidade do substrato constituía o programa experimental. A determinação da rugosidade foi realizada com um equipamento a laser portátil.

As principais conclusões foram: a resistência ao cisalhamento da interface aumentou com o aumento da rugosidade, como esperado, 217% para superfícies perfuradas por agulha em comparação com superfícies muito lisas; a resistência ao cisalhamento da interface normalizada por  $f_{ctm}$  diminuiu com o aumento da porcentagem de substituição de agregado reciclado.

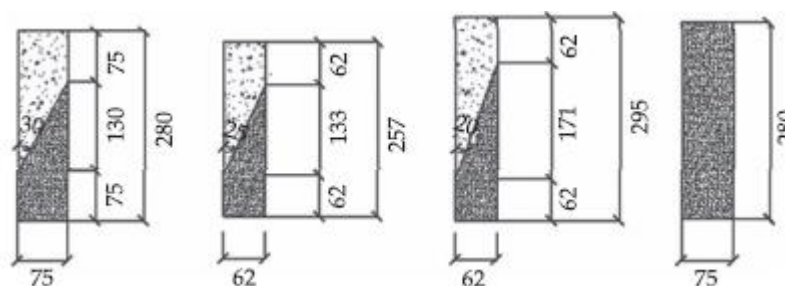
Além disso, os autores afirmaram que as equações de projeto do Model Code fib (2010) e do Eurocode 2 (2010) podem ser usadas para determinar a resistência ao cisalhamento das interfaces entre concreto normal e concreto com agregado reciclado embora leve a resultados bastante conservadores. A expressão de projeto proposta por Santos e Júlio (2012) levou a uma estimativa superior da resistência ao cisalhamento da interface e, portanto, não deve ser usada quando for utilizado concreto convencional com concretos de agregado reciclado.

#### **2.7.7 - Zanotti e Banthia (2016)**



Zanotti e Banthia (2016) apontaram que a maioria dos ensaios de ligação de reparo de substrato disponíveis na literatura são de praticidade e comparabilidade limitadas, pois os resultados são intrinsecamente afetados pela condição específica de tensão aplicada, geometria da amostra e da interface e fluxos de tensão alterados ao redor da interface.

Baseado nesse contexto, os autores propuseram estudar ensaios do tipo *slant shear* modificado onde as amostras cilíndricas foram produzidas com três geometrias diferentes. Foi adotada uma inclinação padrão do plano de união igual a 30 ° e, além desta, dois ângulos de união adicionais um de 25° e outro de 20°, visando impor diferentes combinações de tensões de cisalhamento e de tensões normais. As amostras foram produzidas com diâmetros variando de 62 mm a 75 mm e alturas variando de 257 mm a 302 mm como mostra a Figura 2.26.



**Figura 2.26- Geometria das amostras de Zanotti e Banthia (2016) em mm.**

A principal conclusão apontou que à medida que o ângulo da ligação diminuiu de 30° para 20°, a relação entre as tensões tangencial e normal ( $\tau_n/\sigma_n$ ) aumenta e, assim, a resistência da ligação diminui. Além disso, confirmou-se que qualquer concentração de tensões inadequadas ou inesperadas devem ser evitadas em aplicações práticas, bem como durante um ensaio de laboratório.

No que diz respeito ao teste de *slant shear*, os autores concluíram que é possível garantir uma condição de tensão uniforme na interface de reparo, quando se coloque uma distância mínima igual ao diâmetro do cilindro entre as arestas de carregamento e a interface.

### 2.7.8 - Diab *et al.* (2017)

Em seu trabalho, Diab *et al.* (2017) estudaram a resistência de união entre um concreto existente e um concreto novo, sendo este último auto adensável, utilizando o ensaio *slant shear*.

Os parâmetros estudados pelos autores foram: o efeito da geometria da amostra do ensaio de *slant shear* (cilíndrica ou prismática); espalhamento para avaliar o diâmetro do fluxo do concreto auto adensável; resistência à compressão do concreto; rigidez (neste parâmetro foram usados dois tipos de agregado graúdo para obter rigidez diferente) entre o concreto já existente e o novo, rugosidade da superfície do substrato (escova manual, rugosidade mecânica, ranhuras com 3 mm de profundidade e 3 mm de largura e com 6 mm de profundidade e 6 mm de largura); efeito do uso de agentes de união; efeito da adição de látex e efeito do uso de fibra de polipropileno.

O parâmetro da geometria da amostra foi analisado para escolher o formato de ensaio do *slant shear* mais adequado, sendo considerado aquele que produzisse uma variação mínima nos resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado. O formato da amostra selecionada foi utilizado para avaliar os demais parâmetros estudados. A Figura 2.27 mostra um dos tipos de geometria e rugosidade adotadas.



Figura 2.27 - Configuração do corpo-de-prova do tipo *slant shear* (Diab,2017).

Em relação ao efeito da geometria, os resultados são apresentados na Tabela 2.1, e mostram que o menor coeficiente de variação foi alcançado quando foi utilizado o ensaio de *slant shear* para cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Além disso, o valor da resistência ao cisalhamento inclinado é significativamente afetado pela geometria das amostras usadas, onde as amostras cilíndricas produziram valores de resistências no *slant shear* mais altas. Baseados nisso, adotou-se o cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para as outras amostras. Todos os corpos-de-prova tinham inclinação de 30°.

**Tabela 2.1 - Resultados do ensaio *slant shear* (Diab, 2017).**

Formato e dimensões do corpo-de-prova	Área de cisalhamento (mm <sup>2</sup> )	Resistência ao cisalhamento (MPa)				Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
		CP 1	CP 2	CP 3	CP4		
Prismático - 200 x 200 x 500 mm	80000	5,93	5,49	5,55	5,86	0,24	4,26
Prismático - 100 x 100 x 400 mm	19500	6,54	4,56	6,72	4,61	1,19	20,18
Cilíndrico - diâmetro = 150 mm e altura = 300 mm	34754	13,03	12,83	13,52	13,2	0,36	2,74
Cilíndrico - diâmetro = 75 mm e altura = 150 mm	8541	10,67	10,3	11,94	11,46	0,85	7,82

Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento da interface é significativamente afetada pelo grau de resistência à compressão do concreto novo (auto adensável). Esta foi maior com o aumento da resistência à compressão do concreto. Porém, esse aumento foi mais significativo quando a resistência à compressão do concreto complementar aumentou de 25 MPa para 35 MPa. Esse aumento foi limitado quando a resistência à compressão do concreto foi superior a 35 MPa. Nesse caso, segundo os autores a ruptura ocorre no concreto do substrato.

A rugosidade da superfície do concreto do substrato na resistência da união ao cisalhamento inclinado mostrou que em todas as situações de rugosidade avaliadas houve um aumento da resistência da ligação ao cisalhamento inclinado.

### **2.7.9 - Costa *et al.* (2018)**

Costa *et al.* (2018) apresentaram um estudo experimental para caracterizar a resistência de interfaces de concretos de densidade normal e concretos com agregado leve, assim como entre eles mesmos, com as seguintes combinações: interfaces normal-leve, leve-leve e normal-normal como referência. Adotou-se uma mistura única para os concretos de densidade normal, com resistência à compressão de 50 MPa e três para os concretos leves, com densidade entre 1500 e 1900 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão entre 45 e 75 MPa. Ensaio do tipo *slant shear* e tração indireta foram realizados para avaliar a resistência da interface, considerando diferentes métodos para aumentar a rugosidade da superfície do substrato.

Os resultados foram analisados e comparados com as previsões do Eurocode 2 (2010) e o Model Code (2010), mostrando diferenças significativas, principalmente para superfícies rugosas. Verificou-se que o papel da resistência da matriz de ligação e do tipo de agregado, na resistência da interface, depende da rugosidade do substrato. Os coeficientes de coesão e atrito apresentaram boa correlação com o parâmetro de rugosidade, sendo a coesão também influenciada pela resistência da matriz do concreto adicionado. Concluiu-se também que, em termos de resistência ao cisalhamento e à tração das interfaces com concreto leve, não há vantagem em aumentar a rugosidade da superfície acima de um determinado limite.

### **2.7.10 - Farzad *et al.* (2019)**

Farzad *et al.* (2019), desenvolveram um programa experimental em amostras compostas para caracterizar o desempenho da ligação entre camadas de concreto convencionais, bem como concreto comum e concreto de ultra alta resistência (UHPC). A pesquisa incluiu também uma abordagem numérica em comparação ao modelo de interação de ligação e sua capacidade de prever a capacidade de carga de estruturas nas quais o substrato é unido ou reparado com um revestimento de concreto. Para validar o modelo, foram realizados ensaios de: flexão de vigas a três pontos (15x15x50 cm), cisalhamento direto

através de prismas de 15x15x15 cm com 10 cm de substrato e 5 cm de complemento e *slant shear* através de cilindros de 7,5x15 cm com ângulo de inclinação de 42° em relação à vertical.

O concreto de resistência normal foi empregado como camada de substrato e para investigar o efeito dos materiais de revestimento, foram usados concreto normal e UHPC. Os resultados experimentais foram obtidos para a superfície seca e úmida do concreto do substrato. Foi realizada uma série de 36 amostras compostas para caracterizar o desempenho da ligação com diferentes tipos de tensões. Além das amostras compostas, nove amostras feitas de concreto normal monolítico foram moldadas como referência.

Os autores destacaram que o ensaio de *slant shear* foi o que apresentou resultados mais inconsistentes e que alguns fatores podem ter contribuído para esta sensibilidade como: o ângulo de ligação e sua diferença com o ângulo de ligação crítico. Segundo eles, o ensaio de flexão a três pontos é um método de ensaio conveniente que não requer nenhum equipamento específico para ser executado e com base nos resultados deste estudo e da literatura esse método pode ser reconhecido como um método de ensaio fácil e confiável para investigar o desempenho da ligação entre camadas de concreto.

#### **2.7.11 - Zanotti e Randl (2019)**

Zanotti e Randl (2019) apresentaram uma discussão sobre a correlação entre ensaios de aderência à tração e ao cisalhamento (com e sem tensões de compressão). Foram utilizados concretos de resistência normal, alta resistência e com adição de fibras. Enquanto a preparação do substrato e da superfície permaneceu inalterada, o concreto de resistência normal, o de alta resistência e os com adição de fibras foram adotados como materiais de reparo. A resistência da interface foi ensaiada sob diferentes ensaios de tração (direta, por compressão diametral (*splitting*) e *pull-off*) ou cisalhamento (cisalhamento direto e *slant shear* com corpos de prova cilíndricos com 20°, 25° e 30°) assim, os autores variaram o ângulo com o objetivo de superar as limitações de um teste padrão apenas com inclinação de 30°.

Foram feitas comparações entre os dados existentes na literatura e os coeficientes semi-empíricos das ligações da interface, obtidas com diferentes métodos de teste e abordagens de falha e também previsões do coeficiente de ligação sugeridas pelos códigos de projeto. E, por fim, foram analisadas correlações entre os coeficientes de tração e cisalhamento dos diferentes ensaios.

Os autores destacaram que até o momento da pesquisa não existia modelo para correlacionar diretamente a resistência à tração e de cisalhamento de interfaces, e destacaram a enorme dispersão dos resultados experimentais disponíveis. Isso justificou o fato de adotarem diferentes configurações e geometrias de corpos-de-prova.

Concluíram que a geometria do ensaio afeta significativamente os modos de ruptura, a distribuição das tensões e os valores de resistência da interface. Em geral, a dispersão observada nos ensaios de adesão é bastante grande, devido aos diferentes componentes envolvidos (camada de interface, substrato, reparo) e aos vários parâmetros afetados, incluindo rugosidade geral da interface e variações de rugosidade local, bem como a grande variedade de configurações de ensaio.

As comparações feitas entre a resistência à tração e a cisalhante são significativamente afetadas pelas diferenças das configurações de ensaio de tração e cisalhamento e a própria ligação é diferentemente correlacionada a fatores interfaciais como, por exemplo, a rugosidade e textura. No entanto, para cada configuração de ensaio e abordagem de cisalhamento, foi obtida uma relação de coesão e tração constante para diferentes concretos com diferentes resistências (força normal e alta resistência).

#### **2.7.12 - Semendary e Svecova (2020)**

Na pesquisa de Semendary e Svecova (2020) foi avaliada a resistência de ligação entre o concreto pré-fabricado e o concreto moldado *in loco* de ultra alto desempenho (UHPC). Alguns parâmetros foram avaliados: o tipo de substrato de concreto (concreto normal e de alta resistência), o tipo de agregado

(pedra britada e pedra de rio), preparação da superfície (seca e saturada), idade do UHPC, e método de ensaio.

Através do ensaio de tração direta foram avaliados os efeitos do tipo de substrato de concreto (normal e alta resistência), a idade do UHPC e o tipo de agregado, além disto, mais quatro métodos de ensaio (ensaio de tração direta, *pull-off*, teste de cisalhamento duplo e *slant shear*) foram utilizados para avaliar o efeito da pré-umidificação da interface sobre a resistência da ligação.

A preparação da interface das amostras foi feita utilizando retardador na forma, que era pintado na parte inferior do molde, com o objetivo de expor o agregado. Para diferenciar a interface de concreto normal e de alta resistência, devido à utilização também de agregados distintos foram feitas medições da rugosidade utilizando um scanner a laser sem contato. O concreto normal possuía uma rugosidade média de 2,39 mm e o de alta resistência 1,96 mm.

As principais conclusões foram: quando avaliada a resistência de ligação à tração, os valores foram aproximados para os ensaios de tração direta e *pull-off*, no entanto, a falha da ligação interfacial foi predominante no método de teste de tração direta. O aumento máximo na resistência de ligação foi de 3%, 22,7% e 2,3% utilizando a tração direta, cisalhamento duplo e *slant shear*, respectivamente. A condição da superfície saturada reduziu a variabilidade no modo de falha, porém não aumentou a resistência da ligação. Para conexões de ponte UHPC, a preparação da superfície seca fornece assim valores adequados de resistência de ligação similares ao preparo da superfície saturada. Entretanto, a utilização da condição saturada melhorará o comportamento, induzindo a falhas fora do substrato, e sim na interface.

## **2.8 - Previsão das normas para a resistência de interfaces**

Nas últimas décadas foram propostas várias expressões de cálculo para a resistência ao cisalhamento da interface entre camadas de concreto de diferentes idades baseadas majoritariamente na teoria do atrito-cisalhamento.

Uma vez que as expressões propostas por estes investigadores são consideravelmente diferentes dependendo de vários parâmetros, as mesmas

apresentam, por vezes, diferenças muito significativas (Santos, 2009). Além disso, a contribuição da armadura que atravessa a interface só é solicitada, significativamente, após a ruptura desta por coesão (Zilch e Reinecke, 2000), mobilizando as parcelas de atrito e a parcela da armadura por efeito de pino. Assim, é necessário definir e identificar as expressões mais adequadas para as interfaces, avaliando de forma micro a aderência existente, não só para concreto de densidade normal, mas também para concretos com baixa densidade ou leves.

As expressões apresentadas nas normas de estruturas de concreto adotadas no presente trabalho, para quantificação da resistência ao cisalhamento da interface entre camadas de concreto de diferentes idades, baseiam-se na teoria atrito-cisalhamento como mencionado anteriormente, sendo função de parâmetros como: resistência do concreto mais fraco; tensão normal à interface; e parâmetros de rugosidade e coesão da superfície do substrato.

### 2.7.1 - Prescrições do código ACI 318 (2019)

O código da ACI 318 (2019) classifica a resistência ao cisalhamento da interface em apenas dois tipos de rugosidades de superfície, rugoso e muito rugoso em amplitude total 6,4 mm. A resistência do concreto à compressão não é especificada no ACI 318 (2019) para determinar a resistência ao cisalhamento da interface, que é baseada apenas em avaliações qualitativas. Levando em conta que a superfície de contato do concreto deve estar limpa e livre de resíduos, a Tabela 2.2 apresenta as condições da superfície para avaliar a resistência ao cisalhamento horizontal ( $V_{nh}$ ). O fator de modificação,  $\lambda$ , é utilizado para considerar a redução da resistência do concreto leve em relação ao concreto normal para a mesma resistência à compressão.

**Tabela 2.2 - Resistência ao cisalhamento horizontal (ACI 318 (2019)).**

Armadura que atravessa a interface	Preparação da superfície de contato	$V_{nh}$ (N)
------------------------------------	-------------------------------------	--------------



$A_v \geq A_{v,min}$	Concreto moldado acima do concreto endurecido intencionalmente rugoso para uma amplitude total de aproximadamente 6,4 mm.	Menor que:	$\lambda \left( 1,79 + 0,6 \frac{A_v f_{yt}}{b_v s} \right) b_v d$
			$3,45 b_v d$
	Concreto moldado acima do concreto endurecido não rugoso intencionalmente.		$0,55 b_v d$
Outros casos	Concreto moldado acima do concreto endurecido intencionalmente rugoso		$0,55 b_v d$

onde:

$\lambda$  é igual a 1,0 para concretos com agregados normal, igual a 0,85 para concretos com agregados graúdo leve e 0,75 para concreto todo leve;

$A_v$  é a área da armadura de cisalhamento que atravessa a interface;.

$f_{yt}$  é a tensão de escoamento da armadura transversal que atravessa a interface;

$b_v$  é a largura do plano de cisalhamento horizontal;

$s$  é o espaçamento da armadura transversal que atravessa o plano de cisalhamento;

$d$  é a distância da fibra mais comprimida ao centroide da armadura longitudinal de tração.

### 2.7.2 - Prescrições do Model Code (2010) e Eurocode 2 (2010)

Por outro lado, o CEB-FIB Model Code (2010) e o Eurocódigo 2 (2010) consideram a resistência à compressão do concreto e categorizam o grau de rugosidade de superfícies muito lisas a muito rugosas.

Atualmente, adota-se que a resistência ao cisalhamento da interface entre camadas de concreto moldadas em momentos diferentes ocorre devido a três mecanismos principais: coesão, atrito e ação de pino. A coesão inclui a ligação adesiva e o intertravamento mecânico, o atrito é devido às forças de compressão externas perpendiculares à interface e à força de confinamento devido à armadura que atravessa a interface e a ação de pino é devido à deformação

desta última quando ocorre deslizamento. O Model Code 2010 foi o primeiro código a apresentar a Equação 2.14 de projeto para a resistência ao cisalhamento da interface concreto-concreto, com base nesses três mecanismos principais.

$$\tau_u = \tau_a + \mu(\kappa_1 f_y + \sigma_n) + \kappa_2 \rho \sqrt{f_y f_c} \quad (2.14)$$

onde:

$\tau_u$  é a resistência máxima de cisalhamento na interface;

$\tau_a$  é a componente de coesão devido à adesão e ao engrenamento do agregado;

$\mu$  é o coeficiente de atrito;

$\sigma_n$  é a tensão normal na interface devido ao carregamento externo;

$\kappa_1$  e  $\kappa_2$  são coeficientes de interação que levam em conta que a armadura ou os conectores estão sujeitos simultaneamente à forças axiais e de flexão e que os valores máximos das várias contribuições ocorrem com deslizamentos diferentes;

$\rho$  é a taxa de armadura que atravessa interface;

$f_{cd}$  é a resistência de cálculo à compressão do concreto;

$f_y$  é a tensão de escoamento da armadura que atravessa a interface.

Para interfaces sem armadura,  $\tau_a$  é dado por  $c_a f_{ctd}$ , onde  $c_a$  é o coeficiente para a ligação adesiva e  $f_{ctd}$  é o valor de projeto da menor resistência à tração do concreto.

A expressão proposta pelo Eurocode 2 (2010) para determinar o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal da interface entre concretos de diferentes idades e pelo Model Code (2010) são iguais e constituídas por três parcelas (Equação 2.15). Estas dependem, além das propriedades resistentes dos materiais, dos coeficientes de rugosidade, indicados na Tabela 2.3: coesão,

c e atrito,  $\mu$ . Apesar de apresentarem diferenças na proposta do coeficiente de coesão, o resultado obtido é muito próximo.

$$\tau_u = cf_{ctd} + \mu\sigma_n + \rho f_{syd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5\nu f_{cd} \quad (2.15)$$

onde:

$\tau_u$  é a resistência máxima de cisalhamento na interface;

$c$ ,  $\mu$  são fatores que dependem da rugosidade da superfície da interface;

$f_{ctd}$  é a resistência à tração do concreto com a menor resistência;

$\sigma_n$  é a tensão normal na interface devido a ações externas;

$\rho$  é a taxa de armadura que atravessa a interface;

$f_{syd}$  é o valor de cálculo da resistência ao escoamento da armadura que atravessa a interface;

$\alpha$  é o ângulo formado com a horizontal da armadura que atravessa a interface;

$\nu$  é o fator de redução da resistência igual a  $0,55 \left( \frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} < 0,55$  para o Model

Code (2010) e  $0,6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$  para o Eurocode (2010);

$f_{cd}$  é a resistência de cálculo à compressão do concreto.

**Tabela 2.3- Coeficientes de coesão e atrito, propostos pelo Eurocode 2 (2010) e pelo Model Code (2010)**

Tipo do substrato	Model Code (2010)		Eurocode 2 (2010)	
	c	$\mu$	c	$\mu$
Muito liso	0,025-0,10	0,5	0,025-0,1	0,5
Liso	0,2	0,6	0,35	0,6
Rugoso	0,4	0,7	0,45	0,7
Muito rugoso	0,5	0,9	0,5	0,9

Para o Model Code (2010), a equação para interfaces sem armadura é dada pela Equação 2.16.

$$\tau_u = cf_{ctd} + \mu\sigma_n \leq 0,5vf_{cd} \quad (2.16)$$

Quando analisada as diversas situações de rugosidade admitidas pelo Eurocode 2 (2010), conclui-se que esta informação é inadequada para a correta quantificação da resistência ao cisalhamento. É insuficiente porque é bastante subjetiva, dependendo da opinião do observador para analisar e classificar o tipo de rugosidade. O mesmo acontece com o Model Code 2010. Deve-se destacar que os coeficientes de coesão e atrito dependem da rugosidade da interface e exercem uma grande influência na resistência da união. Estes foram tipicamente avaliados com uma abordagem qualitativa em todos os códigos. Para superar essa clara desvantagem, é necessário a utilização de métodos que possam a medir a rugosidade da superfície da interface e, com base nisso, calcular os coeficientes de coesão e atrito.

### **2.7.3 - Prescrições da ABNT NBR 9062 (2017)**

A ABNT NBR 9062 (2017) define peças compostas de seção parcial como elementos de concreto interligados por meio de moldagem distinta e que atua como peça única submetida a efeito de ações impostas após a sua solidarização. Um exemplo da utilização de peças compostas pode ser visto no emprego de pontes, cuja laje da ponte é de concreto moldado no local e suas vigas de sustentação são elementos de concreto pré-moldados.

A norma prescreve que deve ser levado em consideração o cálculo das tensões existentes na parte pré-moldada antes do endurecimento do concreto aplicado na segunda etapa, as propriedades mecânicas correspondentes à solidarização da peça pelo preenchimento de concreto moldado no local e às propriedades mecânicas do concreto pré-moldado.

Outro fator a considerar no cálculo das tensões de cisalhamento é a redistribuição de esforços decorrentes da retração e da fluência, além dos esforços de deslizamento da superfície em contato. Segundo a mesma norma,

a tensão solicitante de cálculo  $\tau_{sd}$  deve ser menor ou igual ao valor último da tensão de cisalhamento  $\tau_u$  (Equação 2.17) e também observados os valores da Equação 2.18. Deve ser considerado o valor médio da força de compressão ou de tração  $F_{md}$  que age na interface ao longo do comprimento ( $l_v$ ) e a largura de interface  $b_{int}$  (Equação 2.19)

$$\tau_{sd} \leq \tau_u \quad (2.17)$$

$$\tau_{sd} \leq \beta_s \frac{f_{yd} A_s}{bs} + \beta_c f_{ctd} < 0,25f_{cd} \quad (2.18)$$

$$\tau_{sd} = \frac{F_{md}}{a_v \cdot b} \quad (2.19)$$

onde:

$A_s$  é a área da armadura que atravessa a interface e totalmente ancorada nos elementos componentes;

$f_{yd}$  é a resistência ao escoamento de cálculo da armadura que atravessa a interface;

$s$  é o espaçamento da armadura que atravessa a interface;

$b$  é a largura da interface;

$f_{ctd}$  é a resistência à tração de cálculo do concreto menos resistente;

$f_{cd}$  é a resistência de cálculo à compressão do concreto;

$F_{md}$  é o valor médio da força de compressão ou de tração da ligação, ao longo do comprimento  $a_v$ ;

$a_v$  é o distância entre os pontos de momento nulo e máximo;

$\beta_s$  é o coeficiente de minoração aplicado à armadura;

$\beta_c$  é o coeficiente de minoração aplicado ao concreto.

Quando as superfícies da interface são intencionalmente ásperas com rugosidade mínima de 0,5 cm em 3,0 cm, os valores dos coeficientes  $\beta_s$  e  $\beta_c$  são

definidos na Tabela 2.4 interpolando-se linearmente para os valores intermediários. Para superfícies lisas ou naturalmente rugosas, os valores de  $\beta_s$  e  $\beta_c$  devem ser obtidos após ensaios específicos.

**Tabela 2.4 - Valores de coeficiente  $\beta_s$  e  $\beta_c$  (ABNT 9062 (2017))**

$A_s/bs$ (%)	$\beta_s$	$\beta_c$
$\leq 0,2$	0	0,3
$\geq 0,5$	0,9	0,6

## 2.9 - Modelos de resistência ao cisalhamento propostos por pesquisadores

Pelo exposto anteriormente, conclui-se que a rugosidade é de fato um parâmetro fundamental na determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal. Para uma determinação adequada da resistência ao cisalhamento longitudinal, é essencial quantificar a rugosidade da superfície da interface e correlacioná-la com esta resistência.

Diante disso, nota-se que os valores dos coeficientes de coesão e atrito são definidos de acordo com uma avaliação qualitativa do substrato com rugosidade. Levando em conta essa abordagem, Santos *et al.* (2005) propuseram uma abordagem inovadora, baseada em um teste quantitativo parcialmente destrutivo para caracterizar a rugosidade do substrato, levando a um parâmetro de rugosidade. Posteriormente, Santos e Júlio (2008) propuseram um novo método quantitativo não destrutivo para medir a rugosidade. No ano seguinte, Santos (2009) e Santos e Júlio (2012) propôs duas expressões para determinar a resistência ao cisalhamento da interface, uma para a parcela da coesão (Equação 2.20) e outra para a contribuição do atrito e da armadura de ligação (Equação 2.21), admitindo deslocamento relativo na interface (teoria atrito-cisalhamento), além disso, propôs expressões para a quantificação dos coeficientes de coesão e atrito, em função do parâmetro de rugosidade profundidade média do vale ( $R_{vm}$ ), mostradas nas Equações 2.22 e 2.23.

$$\tau_u = C \cdot f_{ctd} \quad (2.20)$$

$$v_u = \mu \cdot \sigma_n + \rho_s \cdot f_{sy} (\mu \cdot \text{sen} \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v \cdot f_c \quad (2.21)$$

$$c = 1,062 R_{vm}^{0,145} \quad (2.22)$$

$$\mu = 1,366 R_{vm}^{0,041} \quad (2.23)$$

onde:

$f_{ctd}$  é a resistência à tração de projeto.

$c$  é o coeficiente de coesão;

$\mu$  é o coeficiente de atrito;

$R_{vm}$  é o parâmetro de profundidade média do vale.

Baseados em resultados experimentais, Santos (2009) também apresentou a forma de determinar os coeficientes de atrito e coesão mostrados na Equação 2.24 e 2.25.

$$c = \frac{\tau_0}{f_{ctm}} \quad (2.24)$$

$$\mu = \left( \frac{\tau_{im} - \tau_0}{\sigma_{im}} \right) \quad (2.25)$$

onde:

$\tau_0$  é a tensão de cisalhamento puro;

$f_{ctm}$  é a menor resistência à tração média do concreto;

$\tau_{im}$  é a tensão de cisalhamento média na interface;

$\sigma_{im}$  é a tensão normal média na interface para a  $\tau_{im}$ .

Costa (2012), em sua pesquisa, já havia questionado o fato de que as expressões do Eurocode 2 (2010) e do Model Code (2010) consideram a contribuição de todas as parcelas em simultâneo, para a resistência ao

cisalhamento da interface, e assim como Santos (2009) sugeriu duas equações de dimensionamento considerando duas situações distintas, correspondentes às seguintes propostas: (i) resistência por coesão e atrito, com comportamento linear elástico e sem perda de rigidez na interface, correspondente à Equação 2.26; (ii) resistência da armadura transversal e por atrito residual, após a ruptura da interface, embora com perda elevada da rigidez do elemento estrutural, correspondente à Equação 2.27.

$$\tau_u = cf_{ctd} + \mu\sigma_n \quad (2.26)$$

$$\tau_u = \mu\sigma_n + \rho_s f_{sy} (\mu \cdot \text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (2.27)$$

Mohamad *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental para avaliar a resistência de interfaces com diferentes coeficientes de atrito e coesão da ligação concreto-concreto sob diferentes tensões normais. O ensaio utilizado para determinar a relação entre o perfil de rugosidade e a resistência ao cisalhamento da interface foi o *push-off*. Foram estudadas cinco rugosidades, entre elas como vibrada, indentada e escovação com arame nas direções longitudinal e transversal, esta foi quantificada através de um rugosímetro mecânico como instrumento de medição da rugosidade. Dentre os coeficientes de rugosidade avaliados, a altura média do pico ( $R_{pm}$ ) teve a influência mais significativa na resistência ao cisalhamento da interface pré-fissurada, onde os coeficientes de correlação  $R^2$  variaram de 0,9009 a 0,9209. Foram propostas então equações analíticas para prever o coeficiente de atrito, dado pela Equação 2.28 e o coeficiente de coesão conforme a Equação 2.29. A equação considerada pelos autores para a resistência ao cisalhamento foi a mesma prescrita pelo Model Code (2010).

$$\mu = 0,8766R_{pm}^{0,3978} \quad (2.28)$$

$$c = 0,2363e^{0,237R_{pm}} \quad (2.29)$$



Usando os coeficientes de Santos (2005) e Santos (2009), em seu programa experimental em que avaliou a resistência de ligação entre interfaces de concreto de densidade normal e leve, Costa (2018), através de seus resultados experimentais, determinou uma boa correlação com o parâmetro de rugosidade,  $R_{pm}$  (altura média do pico), melhor que com o parâmetro de rugosidade,  $R_{vm}$  (altura média do vale), proposto anteriormente e assim propôs as Equações 2.30, 2.31 e 2.32 para determinar com maior precisão os coeficientes de coesão e atrito para concreto de densidade normal e leve.

$$c = 0,86R_{pm}^{0,48}, \text{ para concreto normal} \quad (2.30)$$

$$c = 1,25R_{pm}^{0,34}, \text{ para concreto leve} \quad (2.31)$$

$$\mu = 1,16R_{pm}^{0,04}, \text{ para concreto normal e leve} \quad (2.32)$$

Levando-se em conta as equações para se calcular os coeficientes de coesão e atrito, pode-se afirmar que a rugosidade da superfície do substrato é um parâmetro de suma importância para a ligação entre camadas de concreto de diferentes idades. A rugosidade depende diretamente do tratamento aplicado à superfície da interface e também influencia diretamente a resistência ao cisalhamento correspondente.

## Capítulo 3 - Programa Experimental

Com o objetivo de quantificar a resistência de interfaces em concretos de densidade normal e leve moldados em momentos diferentes, definiu-se um programa experimental tendo como variáveis: tipos de concretos do substrato, tipos de concretos adicionados e tipos de rugosidade do substrato. Para efetuar a caracterização da resistência das interfaces resultantes, realizaram-se os seguintes ensaios: caracterização dos parâmetros de rugosidade da interface, ensaio do tipo *slant shear* (cisalhamento inclinado) para avaliar a resistência ao cisalhamento, ensaio do tipo *pull-off* para avaliar a resistência à tração da interface e o ensaio de *push-off* para avaliar o cisalhamento puro.

Sendo o comportamento de estruturas compósitas relativamente complexo, optou-se pela fixação da maioria dos parâmetros intervenientes no fenômeno, com exceção da substituição em diferentes porcentagens do agregado graúdo de densidade normal por leve de argila expandida e a rugosidade da superfície do concreto do substrato, por ser este o principal parâmetro cuja influência é quantificada.

Para avaliar a influência da rugosidade da superfície do concreto do substrato, foram consideradas cinco situações distintas de rugosidade:

- a) uma superfície intencionalmente lisa;
- b) uma superfície como vibrada;
- c) três superfícies intencionalmente rugosas.

Sendo assim, as superfícies geradas entre o substrato e o complemento permitiram avaliar a influência destes tratamentos na capacidade resistente ao cisalhamento e tração.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil, na Universidade Estadual do Norte Fluminense.

### 3.1- Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram caracterizados por meio de ensaios físicos, obedecendo às prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

### 3.1.1 - Cimento Portland

Na produção dos concretos, empregou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), fabricado pela empresa Mizu®.

### 3.1.2 - Sílica Ativa

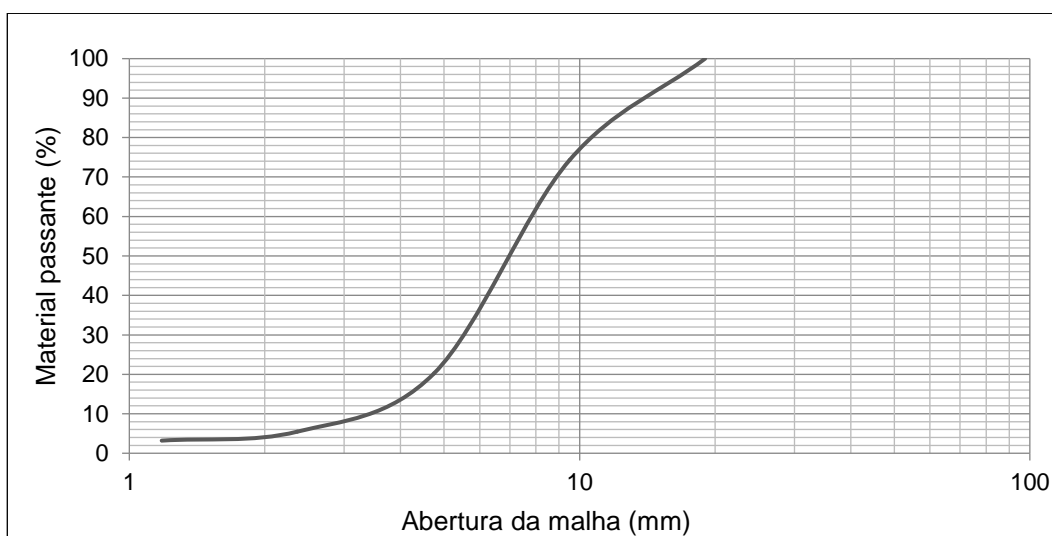
Utilizou-se sílica ativa fabricada pela empresa Tecnosil, com massa específica determinada segundo a norma ABNT NBR 16605 (2017) igual a 2,20 kg/dm<sup>3</sup>.

### 3.1.3 - Agregado Graúdo Convencional

O agregado graúdo convencional para a produção do concreto foi do tipo basáltico, proveniente de britagem das pedreiras da região de Campos dos Goytacazes – RJ. Com massa específica de 2,73 kg/dm<sup>3</sup> e massa unitária de 1,58 kg/dm<sup>3</sup>. A composição granulométrica desse material foi realizada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 248 (2003) e está apresentada na Tabela 3.1 e a curva granulométrica na Figura 3.1.

**Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado graúdo.**

Abertura da peneira (mm)	Agregado graúdo	
	% retida	% acumulada
19	0,00	0
9,5	25,72	25,72
4,75	54,05	79,77
2,36	14,76	94,53
1,18	2,27	96,80
Resíduo	3,20	100
D <sub>máx</sub> característica	9,5 mm	



**Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado graúdo.**

### 3.1.4 - Agregados Graúdo e Miúdo de Argila Expandida

Como agregado leve, utilizou-se a argila expandida nacional, fabricada pela empresa CINEXPAN S.A., em duas graduações: CINEXPAN 0500, utilizado como agregado miúdo e com  $D_{m\acute{a}x} = 4,8$  mm e CINEXPAN 1506, utilizado como agregado graúdo, com  $D_{m\acute{a}x} = 9,5$  mm. Estes agregados leves são produzidos em forno rotativo à temperatura média de 1200°C, os mesmos apresentam formato arredondado regular com camada externa de baixa porosidade. A Tabela 3.2 apresenta o resultado da análise química dos agregados leve.

**Tabela 3.2 - Composição química da argila expandida 0500 e 1506.**

Compostos químicos	Percentuais em massa (%)
SiO <sub>2</sub>	63,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,02
K <sub>2</sub> O	4,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,63
MgO	3,26
K <sub>2</sub> O	4,91
Na <sub>2</sub> O	0,61
CaO	0,64

A Tabela 3.3 apresenta os valores da massa específica e da massa unitária no estado seco e solto, esta última calculada segundo a norma ABNT NBR 45 (2006), a massa específica do agregado leve CINEXPAN 0500 foi

determinada pelo método prescrito na ABNT NBR 52 (2009), enquanto a CINEXPAN 1506, seguindo as prescrições da norma ABNT NBR 53 (2009).

**Tabela 3.3 - Características dos agregados leves.**

Propriedades	CINEXPAN	CINEXPAN
	0500	1506
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	1,55	1,15
Massa unitária no estado seco e solto (kg/dm <sup>3</sup> )	0,85	0,62
D <sub>max</sub>	4,8 mm	9,5 mm
Módulo de finura	3,10	5,50

Os valores da absorção dos agregados leves nacionais estão dispostos na Tabela 3.4 e foram disponibilizados pela fabricante CINEXPAN S.A.

**Tabela 3.4- Absorção de água dos agregados leve.**

Tempo	Absorção de água (%)	
	CINEXPAN 0500	CINEXPAN 1506
1 min	0,5	0,67
5	1	1,5
10	1,3	2
30	2,2	3,1
1 hora	3	3,83
2 horas	3,7	4,33
6 horas	4,83	5,5
24 horas	6,83	7,5

### 3.1.5 - Areia

Empregou-se areia natural quartzosa originária do Rio Paraíba do Sul na cidade de Campos dos Goytacazes- RJ. A Tabela 3.5 e a Figura 3.2 apresentam a composição granulométrica segundo as prescrições da ABNT NBR 248 (2003). A areia utilizada apresentou massa específica igual a 2,63 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária no estado solto e seco igual a 1,54 g/cm<sup>3</sup>, determinadas segundo a ABNT NBR 52 (2009) e ABNT NBR 45 (2006), respectivamente.

**Tabela 3.5 - Granulometria da areia.**

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	% retida	% acumulada
4,8	0,24	0,24
2,4	1,07	1,31
1,2	8,88	10,19
0,6	25,93	36,12
0,3	43,44	79,56
0,15	18,84	98,4
Resíduo	1,6	100
Módulo de finura	2,26	

**Figura 3.2-Curva granulométrica da areia.**

### 3.1.6 - Aditivo superplastificante

Como aditivo empregou-se o superplastificante de terceira geração Glenium 51 produzido pela empresa BASF S.A. Este aditivo tem base química de éter carboxílico modificado, que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução de água, resultando em um concreto com maior trabalhabilidade e sem alteração no tempo de pega. Os dados técnicos do aditivo fornecidos pelo fabricante são demonstrados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6- Dados técnicos do Glenium 51. (Fonte: Basf)**

Especificações	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 - 1,107
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5-7
Sólidos	28,5-31,5
Viscosidade (cps)	<150

### 3.2- Dosagem e mistura dos concretos

Para a caracterização experimental da resistência de interfaces com concreto de diferentes idades, definiram-se os seguintes concretos: um concreto de alta resistência com densidade normal e quatro concretos de densidade leve com substituições de agregado normal por agregado leve nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%.

Para o concreto de alta resistência, foi dosado um concreto para valores de resistência aos 28 dias igual a 55 MPa, apresentado na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7- Composição do concreto de alta resistência em kg/m<sup>3</sup>**

Materiais	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento Portland	511,6
Areia	719,77
Brita	905,2
Água	225,81
Superplastificante	1,467

A dosagem utilizada dos concretos leves estruturais se basearam na pesquisa de Angelin (2014). A única alteração feita após a realização de testes iniciais das composições foi a dosagem do superplastificante para o ajuste da consistência dos concretos. O teor de sílica ativa utilizado nos concretos foi de 10% em relação à massa de cimento, a relação água/cimento foi de 0,4 e o teor de argamassa de 65%. Fixaram-se também as porcentagens de areia natural e da argila expandida CINEXPAN 0500. A quantidade de materiais para cada uma das composições utilizadas na elaboração dos concretos leve é apresentada na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8 - Composição dos concretos com substituição de agregado graúdo natural.**

Materiais	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )			
	25%	50%	75%	100%
Cimento Portland	550	565	575	580
Areia	704	723,5	736	742,4
Brita	654,5	452	230	-
CINEXPAN 0500	126,5	129,95	132,25	133,4
CINEXPAN 1506	99	209,05	316,25	429,2
Sílica Ativa	55	56,5	57,5	58
Superplastificante	2,53	2,6	2,64	2,67

Para a mistura dos materiais do concreto de alta resistência (AR) seguiram-se as prescrições da ABNT NBR 12821 (2009). Foi usada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade total de 400 litros. A mistura foi realizada da seguinte forma: a betoneira foi previamente umedecida e introduziu-se o agregado graúdo convencional. Em seguida foi adicionada a água proveniente da rede pública, logo após, o cimento Portland de alta resistência inicial foi introduzido, seguido da areia e, por último, a sílica ativa foi incluída na mistura. Assim, houve a mistura dos materiais na betoneira de eixo inclinado por aproximadamente 5 minutos. Logo após introduziu-se o aditivo superplastificante, ocorrendo uma nova mistura por 3 minutos.

Devido à alta absorção dos agregados leves, de forma a compensar esse efeito, fez-se uma imersão em água dos mesmos por 24 horas e retirados próximo ao momento de serem introduzidos na betoneira.

O processo de mistura dos materiais, na fabricação dos concretos leves, ocorreu de forma análoga ao utilizado para a confecção do concreto de alta resistência, sendo a argila expandida CINEXPAN 1506 introduzida após o agregado graúdo e antes da água.

Para todos os concretos foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo as prescrições da ABNT NBR 67 (1998), por meio do qual pôde-se verificar a consistência e plasticidade do concreto, com a finalidade de obter uma trabalhabilidade adequada prevista em torno de 200 +/- 10 mm.

A massa específica dos concretos foi obtida através da ABNT NBR 9833 (2009) e possui valores de 2470 kg/m<sup>3</sup>, 2289 kg/m<sup>3</sup>, 2250 kg/m<sup>3</sup>, 2012 kg/m<sup>3</sup>, 1788



kg/m<sup>3</sup>, para o concreto de alta resistência, 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

### 3.3 - Detalhes dos corpos-de-prova

Após o estudo dos traços e a determinação dos tipos de concretos a serem utilizados, algumas combinações de substrato e complemento foram estabelecidas para cada tipo de ensaio, e também o tipo de rugosidade da interface entre eles.

#### - Ensaio de *slant shear*

Para efetuar a caracterização da resistência das interfaces entre camadas de concreto nos corpos-de-prova do tipo *slant shear*, foram utilizados três tipos de composições de concreto do substrato, AR, 25% e 100%. Nos corpos-de-prova com concreto de substrato AR foram elaborados cinco tipos de concreto no complemento (AR, 25%, 50%, 75% e 100%), para aqueles com substrato de 25%, quatro tipos de concretos foram adicionados (25%, 50%, 75% e 100%), e para os de substrato 100%, três concretos foram adicionados (50%, 75% e 100%), tendo assim combinações para todos os concretos utilizados.

A condição da interface do substrato para todos os corpos-de-prova foi lisa (L), como vibrada (V), e três condições intencionalmente rugosas, denominadas como R1, R2 e R3, com rugosidades de 5 mm, 7,5 mm e 15 mm respectivamente.

Os valores adotados para a rugosidade foram baseados nas indicações da ABNT NBR 9062 (2017), que sugerem para superfícies intencionalmente rugosas, rugosidade mínima de 5 mm em 30 mm. Sendo assim, optou-se também pela determinação de mais duas rugosidades, maiores do que o valor mínimo sugerido pela norma.

Para cada grupo foram feitas três repetições, totalizando 180 corpos-de-prova, identificados como mostra a Figura 3.3. Cada corpo-de-prova recebeu a numeração da repetição, o tipo de concreto do substrato, seguido do tipo de concreto do complemento, o tipo de rugosidade da interface e por fim o tipo de ensaio correspondente a ele. Por exemplo, o corpo-de-prova 1-AR-100%-R2-SS

representa o corpo-de-prova número um, produzido com substrato de concreto de alta resistência, complemento com concreto leve com substituição de 100% de agregado leve, rugosidade R2 correspondente ao ensaio do tipo *slant shear*.

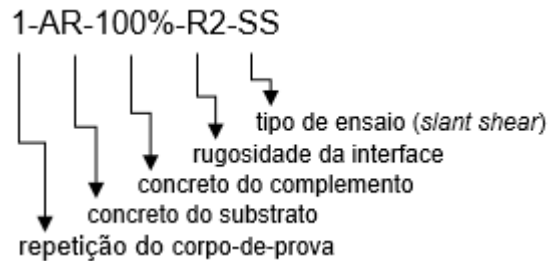


Figura 3.3 - Identificação dos corpos-de-prova do ensaio tipo *slant shear*.

Na Figura 3.4 mostra-se as dimensões e o esquema dos corpos-de-prova do ensaio tipo *slant shear* que foram concretados na forma de um cilindro, com uma interface inclinada com  $45^\circ$  com a vertical, sendo a Figura 3.4a, a configuração de um corpo-de-prova com interface lisa e a Figura 3.4b de um corpo-de-prova com interface rugosa.

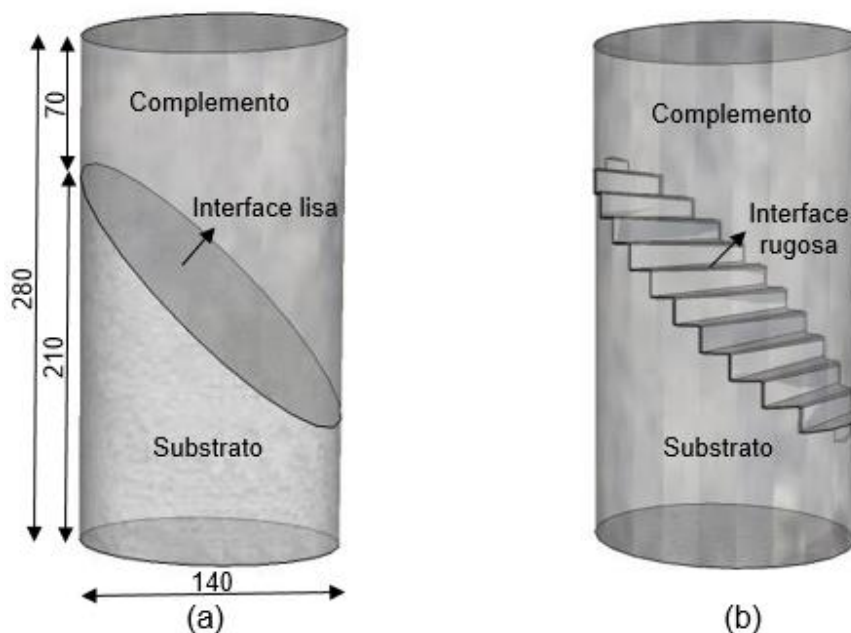


Figura 3.4 - Configuração do corpo-de-prova do ensaio tipo *slant-shear* na inclinação de  $45^\circ$  (dimensões em mm).

Para o ensaio do tipo *push-off* foi considerado apenas um tipo de substrato, sendo ele de concreto de alta resistência. Foram produzidas apenas as rugosidades do tipo como vibrada (V) e rugosa (R2). Para o complemento,

foram utilizados os concretos com substituição de agregado leve nas porcentagens de 25%, 50%, 75% e 100%. A Figura 3.5 mostra a configuração desses corpos-de-prova para cada junta de construção. A identificação destes se deram de forma similar aos corpos-de-prova do *slant shear*, mudando somente o último caractere que representa o tipo de ensaio, sendo neste caso chamado de PS. No total, foram realizados vinte e quatro corpos-de-prova.

As dimensões de cada corpo-de-prova foram de 200 mm de largura, 450 mm de altura e 120 mm de espessura. Além disso, para investigar o desempenho do cisalhamento puro, foi deixado um espaço de 20 mm na parte superior e inferior até o centro de cada parte para auxiliar na realização do ensaio.

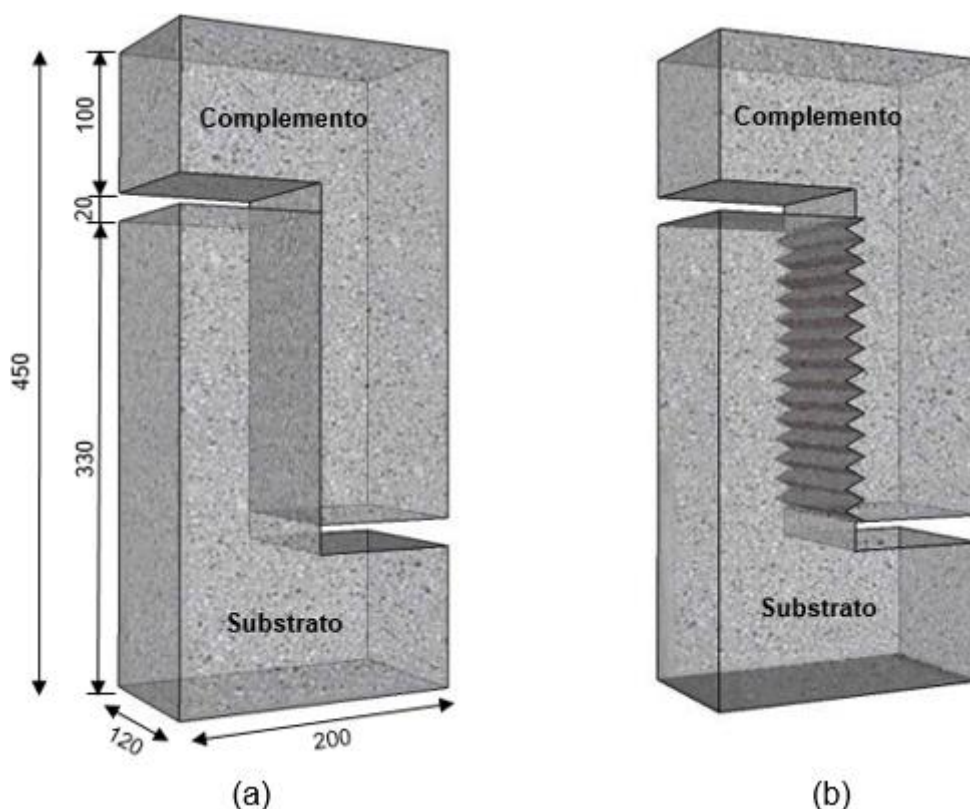


Figura 3.5 - Configuração do corpo-de-prova do tipo *push-off* para interfaces: a) como vibrada (V) e; b) rugosa (R2) (dimensões em mm).

Os corpos-de-prova para o ensaio do tipo *pull-off* seguiram a mesma forma de identificação dos *push-off*, com a diferença do acréscimo de um tipo de complemento, o concreto normal de alta resistência (AR) e de uma rugosidade da interface, ou seja, foram produzidas interfaces lisa (L), como vibrada (V) e rugosa (R2). Sendo assim, foram estabelecidos 5 grupos para este tipo de ensaio, totalizando 45 corpos-de-prova, e sua configuração está representada

na Figura 3.6. Para a identificação destes foi mudado também o último caractere, sendo neste caso chamado de PO.

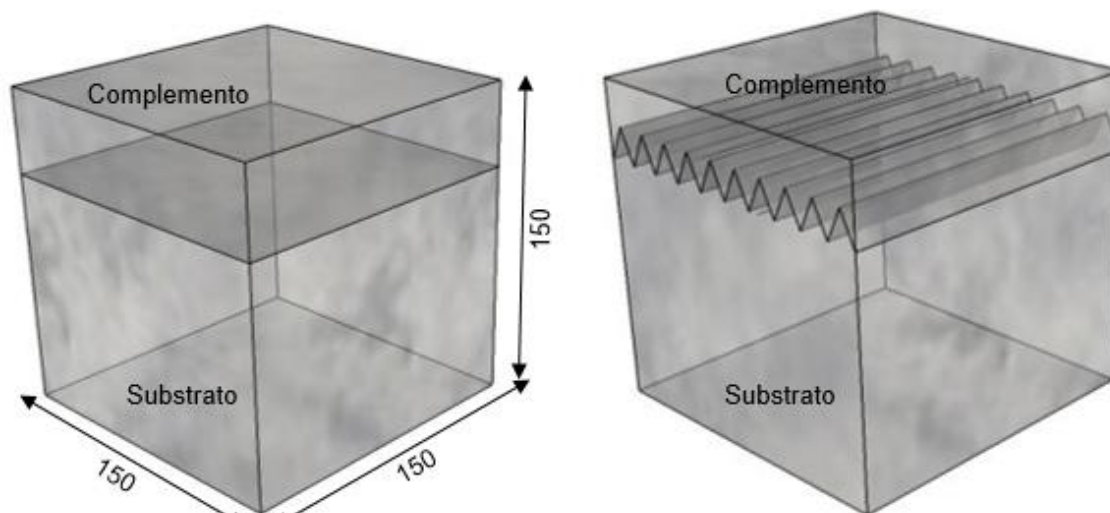


Figura 3.6 - Configuração dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *pull-off*.

### 3.4 - Formas

Segundo Zanotti e Banthia (2016), a fim de minimizar possíveis concentrações de tensão, a forma cilíndrica é preferida à prismática para ensaios do tipo *slant shear*. Apesar de não ser normalizado o autor sugere que um tubo de PVC comercial com tamanho padronizado poderia ser usado como molde. Assim, nesta pesquisa, tubos no formato circular com diâmetro interno de 140 mm foram cortados com a inclinação de  $45^\circ$  para se produzir a primeira metade dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* (Figura 3.7) e, também, cilindros com altura de 280 mm foram produzidos para que se obtivesse posteriormente o corpo-de-prova completo.



**Figura 3.7 - Formas de policloreto de vinil (PVC) para a concretagem da primeira metade dos corpos-de-prova do tipo *slant shear*.**

Para os corpos-de-prova do ensaio tipo *pull-off* foram utilizadas formas metálicas com dimensões de 150x150x500 mm que foram divididas em três partes iguais como mostrado na Figura 3.8.



**Figura 3.8 - Forma metálica para produção dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *pull-off*.**

Para os corpos-de prova do tipo *push-off* foram fabricadas formas de madeira baseadas no modelo das formas utilizadas por Krc (2015). Essas fôrmas foram feitas para que permitisse uma condição não monolítica ao longo do plano de cisalhamento, como mostrado na Figura 3.9. Ao moldar os corpos-de-prova desta maneira, o plano de cisalhamento foi totalmente exposto para permitir a preparação de sua superfície.





Figura 3.9 - Forma para o corpo-de-prova para o ensaio do tipo *push-off*.

### 3.5 - Armaduras utilizadas para os corpos-de-prova do tipo *push-off*

As armaduras foram utilizadas para os corpos-de-prova do tipo *push-off* somente como armadura auxiliar para não permitir que a ruptura ocorresse por tensões decorrentes do aparecimento de flexão nas faces externas, ou seja, não foi utilizada armadura que atravessasse o plano de cisalhamento, como mostrado nas Figuras 3.10 e 3.11.

As barras de aço nervuradas foram do tipo CA-50, com 8 mm e 4,2 mm de diâmetro nominal ( $\emptyset$ ), para armadura auxiliar.

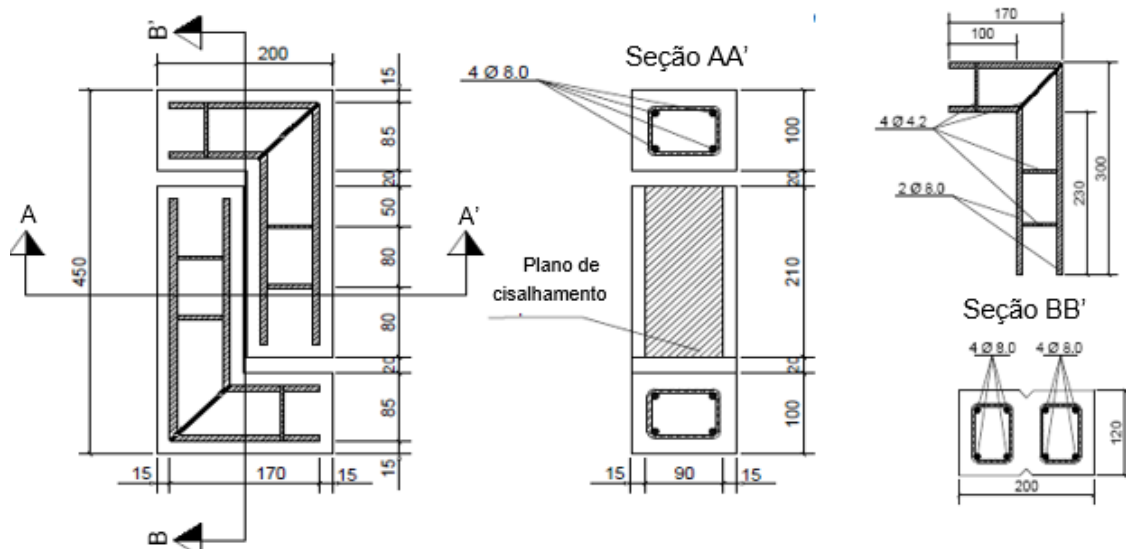


Figura 3.10 - Detalhes das dimensões e armaduras dos corpos-de-prova *push-off* (unidade em mm).

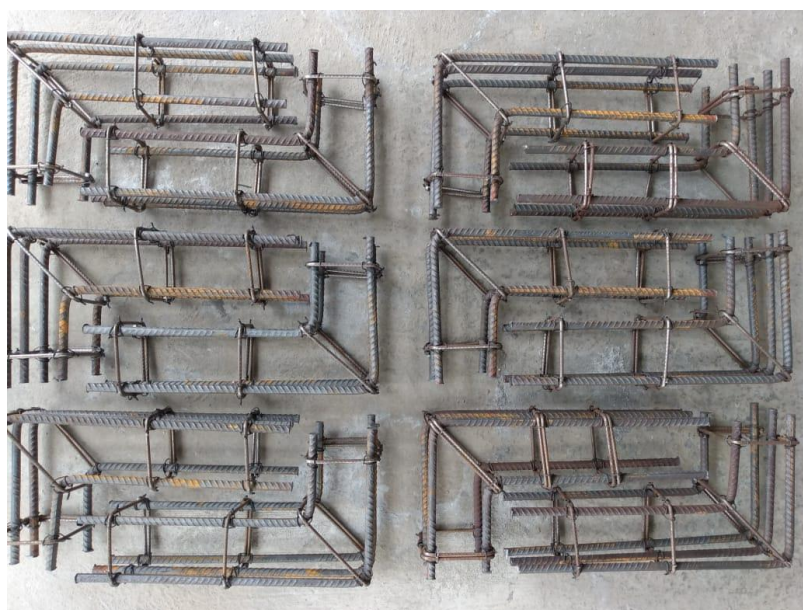


Figura 3.11 - Armaduras dos corpos-de-prova *push-off*.

### 3.6 - Moldagem dos corpos-de-prova

Para a moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *slant shear*, foram adotadas as cinco situações distintas para o tratamento da interface, nomeadamente a superfície lisa (L), tratamento como vibrado (V) e os tratamentos com rugosidade (R1, R2 e R3).

Na Fase 1, foram realizadas doze concretagens que destinou à realização do concreto do substrato para cada tipo de tratamento. As formas foram colocadas em uma mesa vibratória, que após o concreto ser aplicado, foi vibrado para obter uma boa compactação. A interface lisa (L) foi feita com uma desempenadeira de madeira (Figura 3.12a), os corpos-de-prova com interface como vibrada (V) foram deixados da forma que o concreto ficou após a vibração e as interfaces intencionalmente rugosas, R1, R2 e R3 (Figura 3.12b), eram produzidas em torno de uma hora após a moldagem dos corpos-de-prova, com um dispositivo fabricado especialmente para induzir as rugosidades nas dimensões desejadas (Figura 3.13).

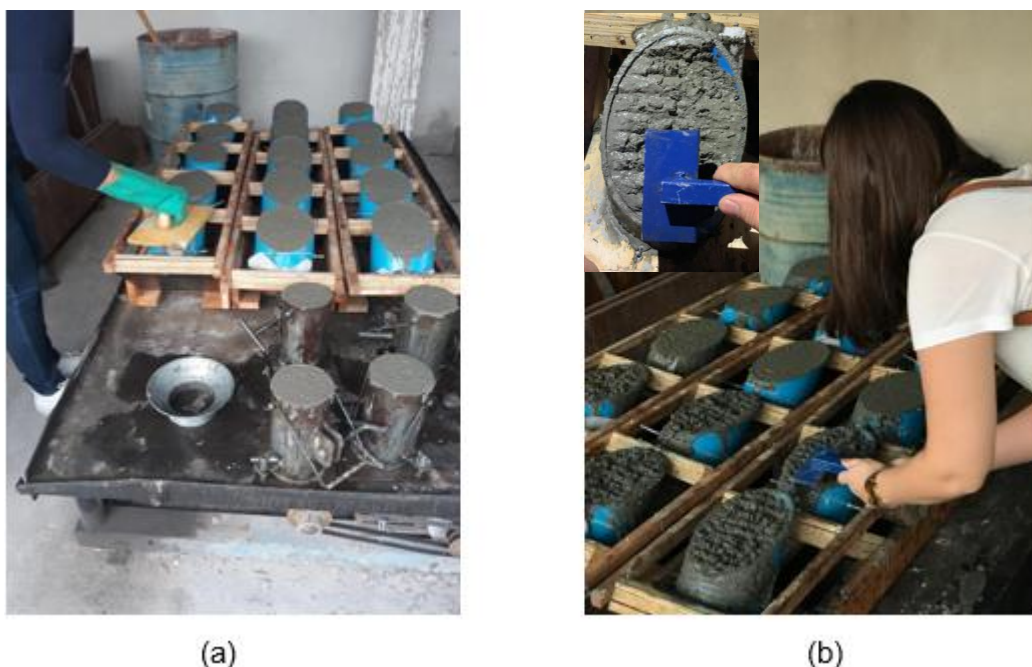


Figura 3.12 - Processo de tratamento das interfaces lisa, vibrada e rugosa.



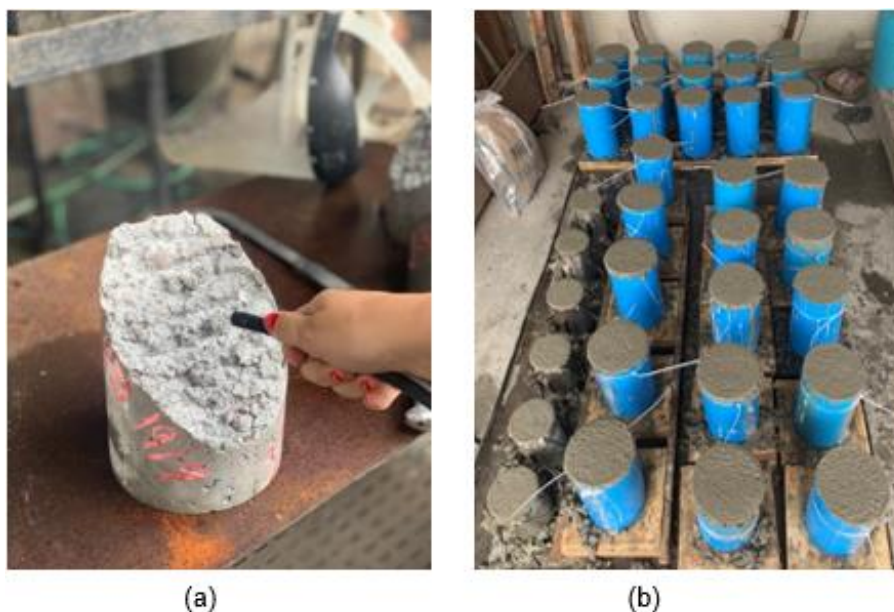
Figura 3.13 - Instrumento de indução das interfaces rugosas (R1, R2 e R3). Dimensões em mm.





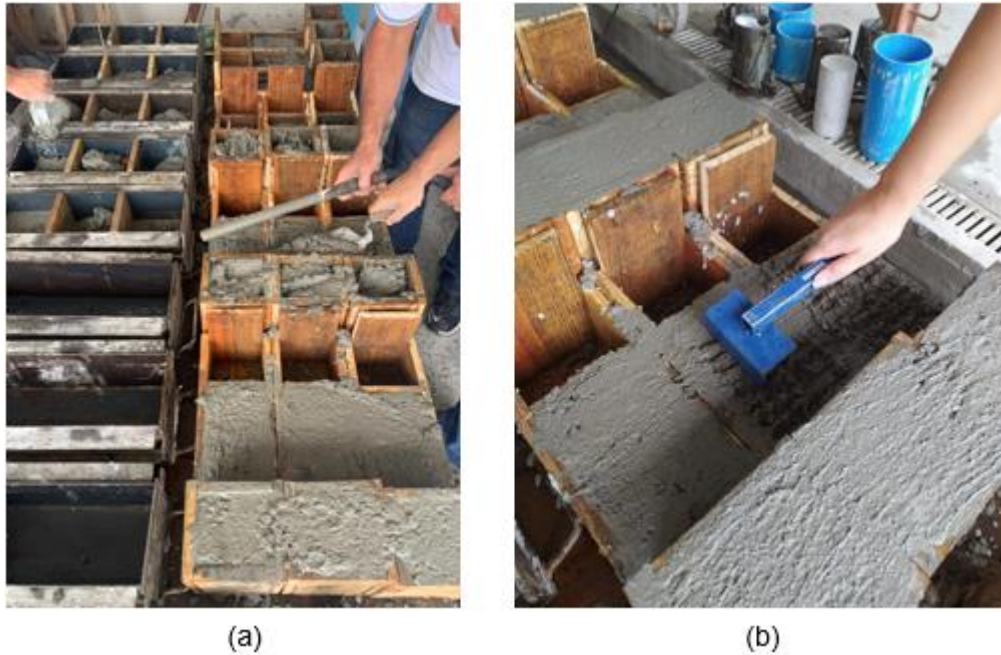
**Figura 3.14 - Superfície da interface dos corpos-de-prova *slant shear*.**

Antes de fazer a concretagem do complemento (Fase 2), foi feita a limpeza (Figura 3.15 a) usando um compressor de ar para retirar impurezas que pudessem diminuir a aderência da nova camada de concreto, e minutos antes de colocar o concreto do complemento a superfície da interface foi umedecida com água corrente. A concretagem foi efetuada após 120 dias da concretagem do substrato (Figura 3.15 b).



**Figura 3.15 - Processo de fabricação do complemento: a) limpeza, b) Concretagem do complemento dos corpos-de-prova *slant shear*.**

Os corpos de prova para os ensaios do tipo *push-off* e *pull-off* foram moldados no mesmo dia, tanto a primeira parte (substrato) quanto a segunda (complemento) (Figura 3.16 a), com exceção do grupo AR-AR para os corpos-de-prova do tipo *pull-off*, já que não tinha esta série para o ensaio do tipo *push-off*. A rugosidade foi induzida da mesma maneira para ambos corpos-de-prova, ainda com o concreto fresco, sendo que para o caso dos corpos-de-prova *push-off*, a rugosidade foi realizada perpendicular à direção da aplicação do cisalhamento (Figura 3.16 b).



**Figura 3.16 - Processo de fabricação do substrato: a) concretagem dos corpos-de-prova para os ensaios dos tipos *push-off* e *pull-off*; b) indução da rugosidade.**

Na Figura 3.17(a) mostra-se o substrato dos corpos-de-prova do tipo *push-off* com interface como vibrada (V) e na Figura 3.17(b), a rugosa (R2). Observa-se a olho nu as diferenças entre as rugosidades consideradas.

A desforma do substrato ocorreu após 24 horas e, em seguida, foram colocados em cura submersa em água com cal durante 28 dias e posteriormente armazenados no laboratório, até serem colocados novamente na forma, para a concretagem do complemento, sendo a forma modificada para a realização desta (Figura 3.18).

Após a concretagem do complemento todos os corpos-de-prova foram desmoldados com extremo cuidado, a fim de não expor a interface a esforços oriundos do processo de desmolde. Seguidamente foi realizado o mesmo procedimento supracitado de cura e, posteriormente, foram armazenados no laboratório, até o dia do ensaio.



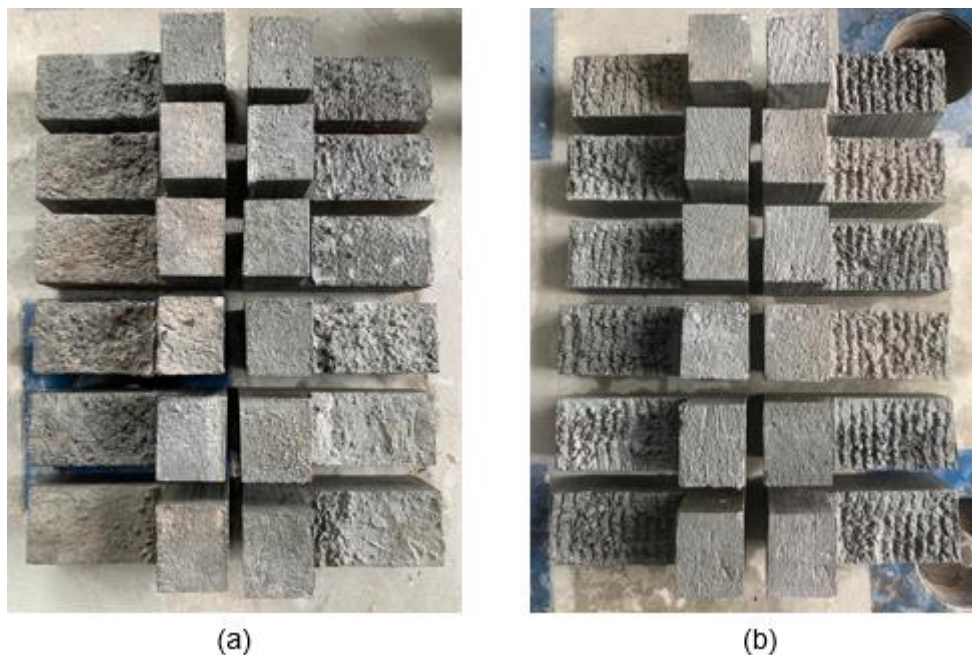


Figura 3.17 - Substratos dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *push-off* com interface: a) como vibrada (V); b) rugosa (R2).



Figura 3.18 - Formas do *push-off* e *pull-off* antes de ser concretado o complemento.

### 3.7- Medição da rugosidade

Entre a Fase 1 e a Fase 2 de concretagem dos corpos de prova para o ensaio do tipo *slant shear*, foi realizada a medição da rugosidade da interface, a fim de correlacionar os parâmetros de rugosidade na resistência ao cisalhamento da interface. Para a medição da rugosidade da interface do concreto do substrato, foi usado um sensor de deslocamento a laser. A escolha desta técnica

foi motivada pela precisão fornecida pelo sensor e automação do processo de execução do mesmo.

Foi desenvolvido um sistema composto por um sensor de deslocamento e um manipulador formado por dois motores que garantia o movimento do corpo-de-prova no plano (Figura 3.19), usando para isto a plataforma Arduino de prototipagem eletrônica de hardware livre. Com isto, foi possível desenvolver um *setup* que incluiu uma base de madeira e um suporte metálico, fixada ao manipulador para colocar os corpos-de-prova, de forma tal, que ficassem nivelados, garantindo assim que a medição realizada pelo sensor sempre representasse a rugosidade e não possíveis desnivelamentos do corpo-de-prova. Para corroborar com este nivelamento foi utilizado um nível a laser em 3D, ou seja, garantindo precisão suficiente para se obterem valores considerados fiáveis.

O sensor de deslocamento utilizado foi o High-Performance Distance Sensor, modelo CP35MHT80, da empresa Wenglor, com faixa de medição de deslocamentos entre 50 e 350 mm.

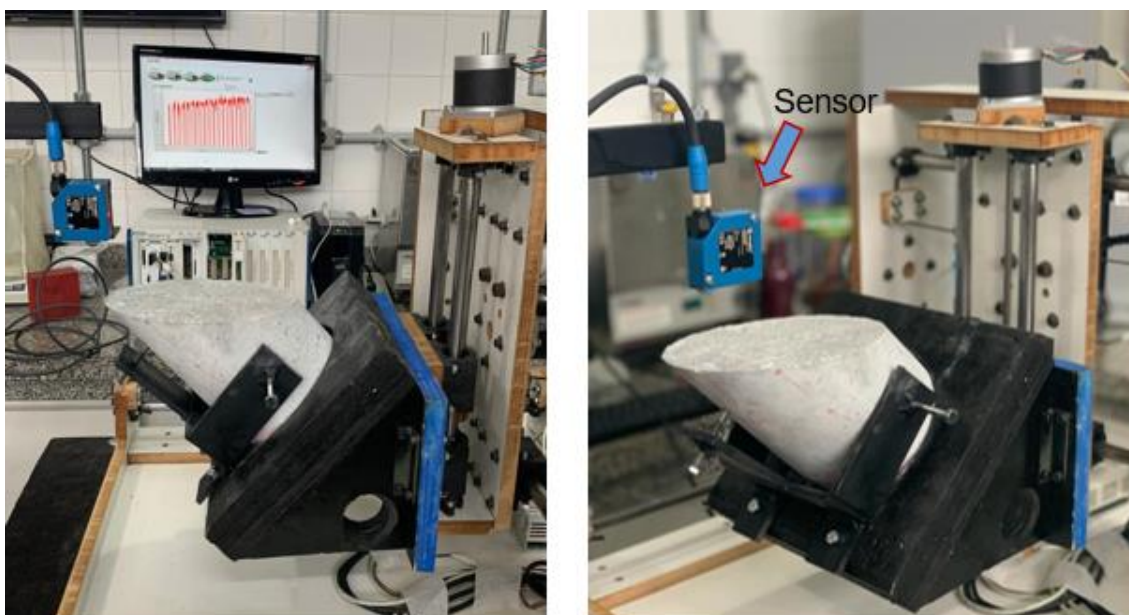
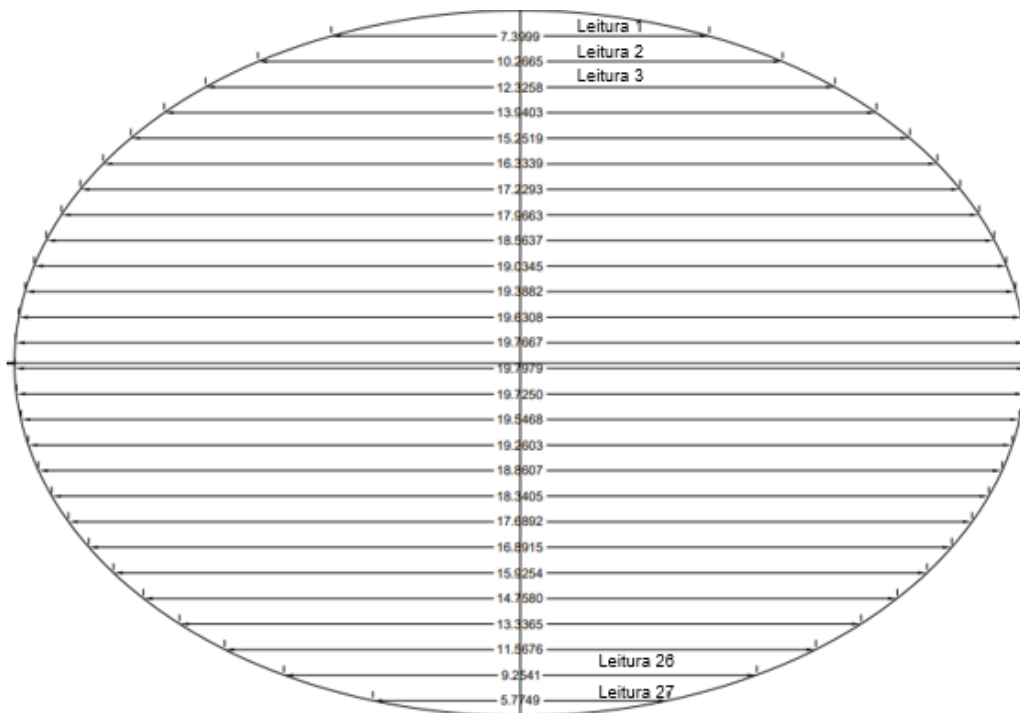


Figura 3.19 - Configuração do ensaio para medição da rugosidade com sensor de deslocamento a laser.

O manipulador foi programado para deslocar o corpo-de-prova no sentido de sua largura e comprimento, com passo de 5 mm, totalizando 27 medições

com diferentes comprimentos, devido ao fato da superfície do corpo-de-prova ser elipsoidal como mostra o esquema da Figura 3.20. Dessa forma, os valores eram aquiritados com uma frequência de 100 Hz. Essa aquisição era feita pelo software LabVIEW 2020, que através de uma programação específica desenvolvida para essa finalidade era capaz de processar os dados emitidos pelo sensor de deslocamento interligados ao computador.



**Figura 3.20 - Esquema de leitura da rugosidade com respectivos comprimentos.**

A Figura 3.21 mostra a forma como a leitura da rugosidade de cada corpo-de-prova era computada, e na Figura 3.22 mostra-se um detalhe de seis destas leituras para uma interface como vibrada (V). Nota-se que o tempo de leitura aumentou conforme aumentava o comprimento da medição.

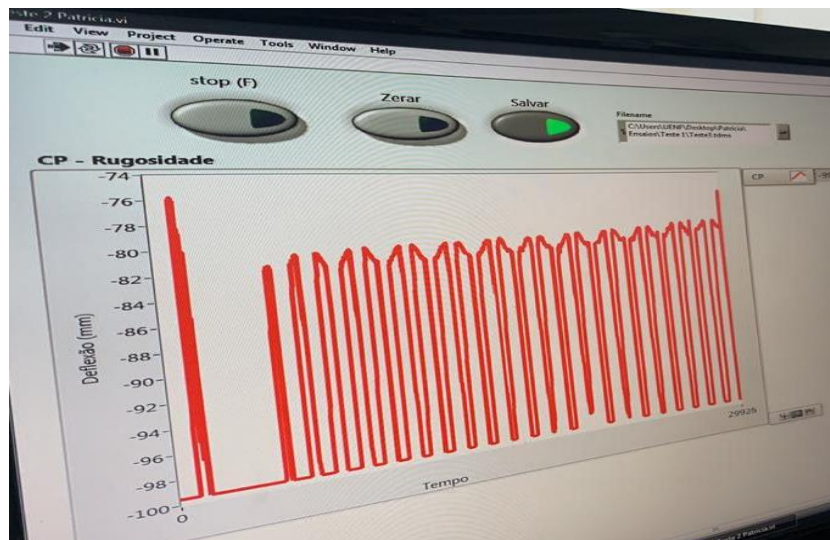


Figura 3.21 - Leitura completa da rugosidade de uma interface.

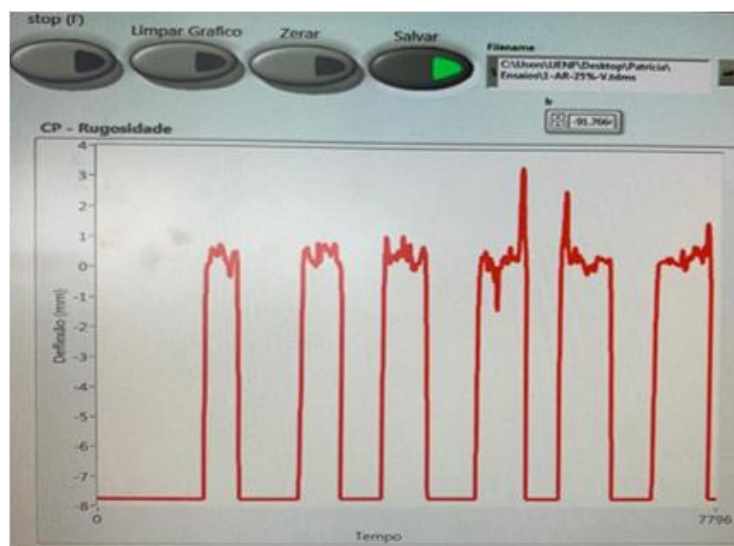


Figura 3.22 - Detalhe da leitura da rugosidade de uma interface como vibrada (V).

Após os arquivos gerados, recorreu-se à utilização do Microsoft Office Excel®, para tratamento de cada leitura, e assim foram plotados os vinte e sete gráficos para cada corpo-de-prova.

Como mencionado anteriormente, para cada situação a ser estudada teve-se três repetições de corpos-de-prova, sendo assim, uma média desses valores foram obtidos para se obter o gráfico da rugosidade de um determinado grupo para cada rugosidade.

### **3.8 - Realização dos ensaios**

Como mencionado anteriormente, para avaliar a resistência da interface concreto-concreto foram adotados três tipos de ensaio principais nesta pesquisa.

O ensaio de *slant shear*, assim como mostrado em trabalhos anteriores, é comumente utilizado para prever a resistência da interface. Neste trabalho foi proposta uma forma modificada do corpo-de-prova do tipo *slant shear* a fim de se avaliar situações diferentes de estados tensionais encontradas em elementos de concreto armado ou protendido. O ensaio de *pull-off*, utilizado para avaliar a resistência à tração na interface e o ensaio de *push-off*, para obter a resistência de cisalhamento puro entre as camadas de concreto moldadas em momentos diferentes.

#### **3.8.1- Ensaios de compressão e tração por compressão diametral**

Para a determinação das propriedades mecânicas dos concretos estudados, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A resistência à compressão dos concretos foi determinada segundo as prescrições da ABNT NBR 5739 (2018) (Figura 3.23 a) e os valores de resistência à tração por compressão diametral foram determinados segundo as prescrições da ABNT NBR 7222 (2011) (Figura 3.23 b), utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.



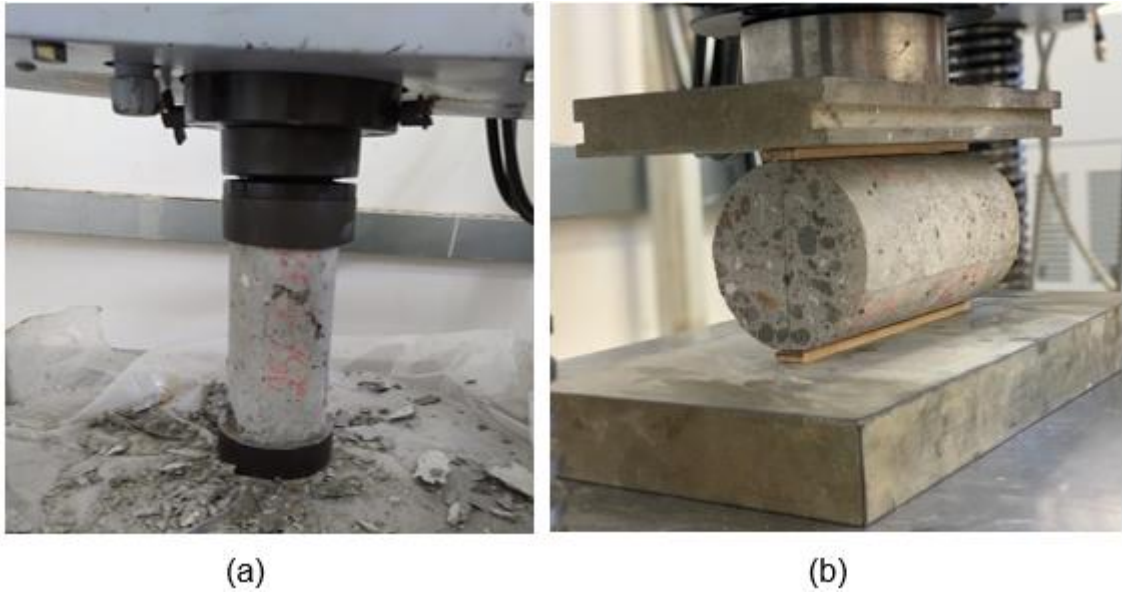


Figura 3.23 – Ensaio realizados nos concretos estudados: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral.

A seguir são apresentados com mais detalhes os ensaios realizados para avaliar a resistência da interface.

### 3.8.2 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo *slant shear*

Como mencionado no item de configuração dos corpos-de-prova, os realizados para o ensaio do tipo *slant shear*, foram concretados com formas de tubos de PVC, com diâmetro interno de 140 mm e altura de 280 mm, sendo cortados com ângulo de inclinação de  $45^\circ$  em partes iguais conforme apresentado na Figura 3.24.

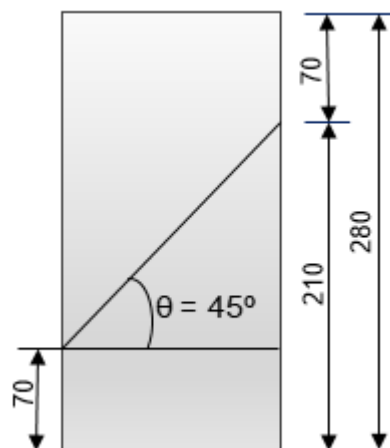


Figura 3.24 - Representação da inclinação da interface que o corpo-de-prova *slant shear* foi realizado.

De modo geral, como citado em algumas pesquisas como de Zanotti e Banthia (2016), Saldanha *et al.* (2013), Farzad *et al.* (2019) a validade da utilização deste ensaio por vezes é subjetiva sendo-lhe apontadas vantagens e desvantagens, tais como a possibilidade de representar estados de tensão reais de uma estrutura e o fato de a ruptura ser altamente condicionada pela orientação do plano da interface, como descrevem Austin *et al.* (1999). No entanto, com o objetivo de melhor representar a transferência de tensões em estruturas submetidas a esforços de flexão e cisalhamento em juntas verticais, foi proposto um corpo-de-prova de *slant shear* modificado.

Assim, o corpo-de-prova, inicialmente moldado com  $45^\circ$  de inclinação foi cortado utilizando uma serra profissional, com ângulo de inclinação de  $15^\circ$  nas partes superior e inferior (Figura 3.25), com o objetivo de se obter um *slant shear* modificado, tendo assim um ângulo de  $30^\circ$ , porém submetido a uma distribuição de esforços diferentes do *slant shear* “original”, sendo mais representativo de locais específicos de diferentes estruturas. Na Figura 3.26 mostram-se os corpos-de-prova para o *slant shear* original e modificado.

Após esse procedimento, observa-se que o corpo-de-prova ficou inclinado com relação ao eixo vertical com  $15^\circ$ , valor recomendado por pesquisadores como Tayeh *et al.* (2013), Carbonell Muñoz *et al.* (2014), Semendary e Svecova (2020), Ganesh e Ramachandra Murthy (2020).

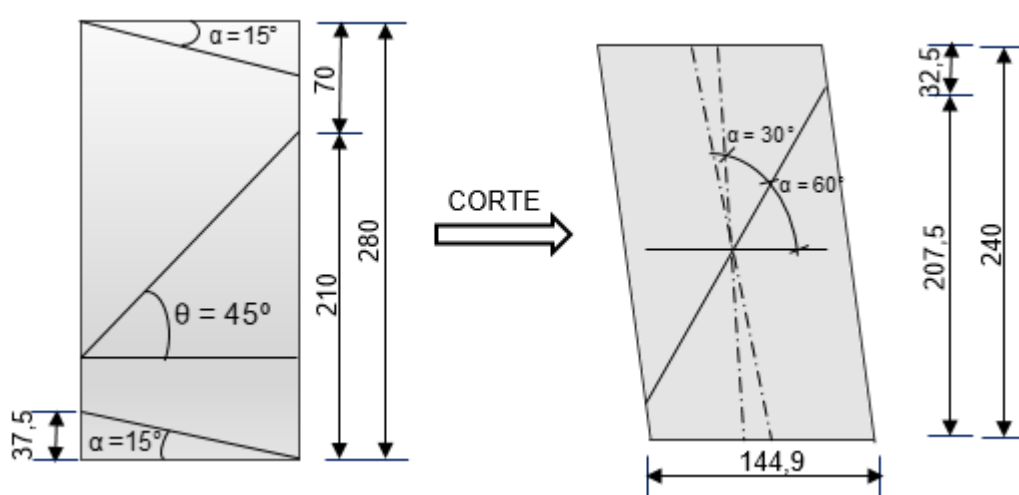


Figura 3.25 - Forma e dimensões do *slant shear* original e modificado.



Figura 3.26 - Corpos-de-prova para o ensaio *slant shear* original e modificado.

O ensaio de corpos-de-prova do tipo *slant shear* modificado, conhecido por ensaio de cisalhamento inclinado, mostrado na Figura 3.27, foi realizado na máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu UH-F500kNI do Laboratório de Engenharia Civil na UENF, com uma velocidade de 0,3 mm/s até a ruptura.



Figura 3.27- Ensaio de corpos-de-prova do tipo *slant shear* modificado com ruptura pela interface.

### 3.8.3 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off*

O ensaio do corpo-de-prova do tipo *push-off* é de cisalhamento por compressão e o mesmo consiste em duas partes de concreto, cada uma com um formato de um L, ligados através de uma interface, apresentando uma abertura em ambas as extremidades, que permite que o ensaio continue após a ruptura da interface em cisalhamento.

No ensaio do tipo *push-off* foram medidos os deslocamentos horizontais e verticais por meio de relógios comparadores digital, capazes de fazer leitura de 0 a 12,7 mm e com precisão de 0,01 mm. A leitura dos mesmos foi gravada através de uma câmera digital, começando a gravação quando se iniciou a aplicação de carga.

O ensaio foi realizado utilizando um atuador hidráulico modelo 661.23F-01 controlado pelo sistema servo-hidráulico MTS®, com capacidade de carga de 500 kN, localizado na laje de reação do Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da UENF, com velocidade de aplicação de carga de 0,3 mm/s até a ruptura.

A Figura 3.28 mostra a configuração do ensaio. Uma placa de aço foi colocada na parte superior e inferior dos corpos-de-prova para distribuição da carga, onde esta é aplicada até que a ruptura por cisalhamento aconteça, separando ambas as partes. Foram obtidas as resistências ao cisalhamento máxima, deslocamento horizontal e deslocamento vertical em função da carga aplicada. A resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) dividindo uma carga máxima (F) que provocou a ruptura pela área da interface (A), ou seja,  $\tau_0 = F / A$ .

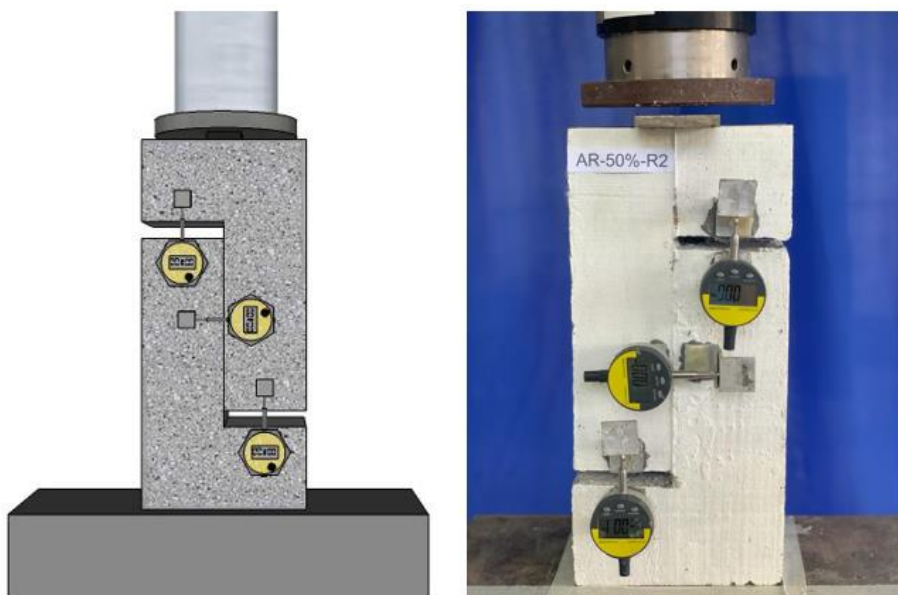


Figura 3.28 - Configuração do ensaio do tipo *push-off*.

### 3.8.4 - Ensaio dos corpos-de-prova do tipo *pull-off*

O ensaio de *pull-off* foi realizado conforme a ASTM C1583 (2013), e consiste na extração de um carote do corpo-de-prova de concreto por tração utilizando um dispositivo. O dispositivo utilizado nesta pesquisa foi um aparelho para arrancamento da empresa Solotest, que destina-se à realização de ensaio de aderência com placas metálicas coladas em superfícies planas de um substrato, com a indicação da força aplicada para tal resultado.

O carote foi executado no corpo-de-prova até se atingir uma profundidade além da interface para evitar concentração de tensões (Figura 3.29 a). Um núcleo de 40 mm de diâmetro foi perfurado no concreto adicionado até o substrato ser alcançado e se estender 15 mm além da interface na camada de substrato. A execução dos carotes de modo geral, nos corpos-de-prova do tipo *pull-off* é difícil, obtendo-se as vezes a consequente inutilização do mesmo, ou seja, algumas vezes foi preciso fazer mais de um carote para ser possível a realização do ensaio, porém essa descolagem prematura deve-se à vibração provocada pela carotadeira, associada à reduzida resistência da interface. Em seguida, foi colado na superfície do carote um disco de aço utilizando uma resina epóxi bi-componente, denominada Sikadur, da marca Sika®, que é um adesivo formulado para colagem de superfícies, tais como concreto (Figura 3.29 b).



(a) (b)  
**Figura 3.29 - Procedimentos prévios para a execução do ensaio do tipo pull-off: a) execução do carote; b) colagem do disco.**

Após o preparo dos corpos-de-prova, posiciona-se o aparelho de modo que se consiga rosquear o engate do módulo extrator do aparelho na placa colada, centralizando visualmente o aparelho em relação à amostra. Assim, aplica-se a carga girando a manivela até o desprendimento do carote, ou seja, até atingir a ruptura, e assim é possível se obter por leitura digital, a carga máxima alcançada no ensaio (Figura 3.30). Na Figura 3.31 é mostrado um corpo-de-prova após a ruptura do carote na interface.





Figura 3.30 - Processo de execução do ensaio do tipo *pull-off*.



Figura 3.31 - Ruptura de um corpo-de-prova *pull-off* na interface.

## Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são mostrados os resultados do programa experimental, fornecidos pelos ensaios de *slant shear*, *pull-off* e *push-off*.

### 4.1 - Propriedades mecânicas dos concretos

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

#### 4.1.1 - Resistência à compressão dos concretos

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão dos concretos pertencentes aos corpos-de-prova do tipo *slant shear* relativos à Fase 1, ou seja, que correspondem ao substrato. Os corpos-de-prova foram ensaiados no dia em que o complemento (Fase 2) foi moldado. Nesta fase foram realizadas doze concretagens e como cada série foi moldada individualmente, foram moldados 3 corpos-de-prova para cada concretagem.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão proveniente da Fase 2, ou seja, da segunda metade do corpo-de-prova correspondente ao complemento e ensaiados no momento em que o ensaio do tipo *slant shear* foi realizado. Na Fase 2 foram realizadas oito concretagens, sendo assim cada resultado de resistência à compressão está vinculado ao grupo a que corresponde.



**Tabela 4.1 - Resistência à compressão do substrato dos corpos-de-prova do tipo *slant shear*.**

<b>Substrato</b>	<b>Grupo</b>	<b>Carga de ruptura (kN)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>
AR	AR-AR	367,20	46,78	44,21	2,31	5,23
		342,00	43,57			
		332,00	42,29			
AR	AR- 25%	390,00	49,68	56,06	6,17	11,01
		443,50	56,50			
		486,70	62,00			
AR	AR- 50%	455,50	58,03	54,66	6,24	11,43
		372,50	47,45			
		459,20	58,50			
AR	AR- 75%	351,20	44,74	45,42	1,97	4,34
		344,50	43,89			
		374,00	47,64			
AR	AR- 100%	380,50	48,47	48,54	1,32	2,72
		391,70	49,90			
		371	47,26			
25%	25%-25%	311,70	39,71	38,52	1,95	5,06
		284,70	36,27			
		310,70	39,58			
25%	25%-50%	298,20	37,99	34,52	3,06	8,87
		262	33,38			
		252,70	32,19			
25%	25%-75%	344,70	43,91	46,53	2,30	4,94
		378,50	48,22			
		372,50	47,45			
25%	25%-100%	305,70	38,94	37,01	4,41	11,90
		251	31,97			
		315	40,13			
100%	100%-50%	175	22,29	23,60	3,04	12,88
		168,20	21,43			
		212,50	27,07			
100%	100%-75%	171,2	21,81	22,46	2,81	12,53
		200,5	25,54			
		157,2	20,03			
100%	100%-100%	185	23,57	22,82	2,05	8,97
		191,5	24,39			
		161	20,51			

**Tabela 4.2- Resistência à compressão do complemento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear*.**

Complemento	Grupo	Carga de ruptura (kN)	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR	AR-AR	371,20	47,29	45,93	1,18	2,58
		356,20	45,38			
		354,20	45,12			
25%	AR-25% e 25%-25%	385,7	49,13	46,17	3,78	8,19
		329	41,91			
		372,7	47,48			
50%	AR-50% e 25-50%	238,50	30,38	30,42	0,29	0,95
		241,20	30,73			
		236,70	30,15			
50%	100%-50%	255,20	32,51	31,62	0,89	2,82
		241,20	30,73			
		248,22	31,62			
75%	25%-75% e AR-75%	249,70	31,81	30,85	0,99	3,20
		234,20	29,83			
		242,70	30,92			
75%	100%-75%	225,00	28,66	29,88	1,10	3,67
		237,00	30,19			
		241,70	30,79			
100%	25%-100% e 100%-100%	230,50	29,36	28,66	1,00	3,49
		216,00	27,52			
		228,50	29,11			
100%	AR-100%	183,20	23,34	24,88	1,36	5,45
		203,20	25,89			
		199,50	25,41			

Uma diminuição da resistência à compressão é observada com o aumento das taxas de substituição do agregado normal pelo agregado leve. Quando o concreto com massa específica normal é submetido a tensões de compressão, a propagação das fissuras normalmente ocorre na matriz de cimento ou na interface agregado-matriz, pois, geralmente, o agregado mostra-se mais resistente do que a matriz de cimento, absorvendo uma considerável quantidade de energia acumulada. Nos concretos com agregados leves, tipicamente menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras ocorre, normalmente, nos agregados, ocasionando um acúmulo de tensões na matriz de

cimento, provocando, assim, uma ruptura brusca do concreto. Isso explica a ruptura mais frágil dos concretos leves, em comparação aos concretos tradicionais com o aumento da resistência à compressão (Rossignolo, 2003).

Os corpos-de-prova do tipo *push-off* e *pull-off* foram produzidos conjuntamente e assim determinadas suas resistências à compressão. Para a primeira parte do *push-off*, correspondente ao substrato, com concreto de alta resistência (AR), foram realizadas duas concretagens: a primeira pertencente aos corpos-de-prova com interface como vibrada (V) e a segunda com rugosidade (R2). Para o substrato do ensaio tipo *pull-off*, àqueles com interface lisa (L) e como vibrada (V) foram realizados juntamente com a primeira concretagem do *push-off* e os com interface rugosa na segunda concretagem. O ensaio de resistência à compressão do concreto do substrato dos corpos-de-prova para os ensaios do tipo *push-off* e *pull-off* foram realizados no dia em que a segunda parte foi concretada e estão apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Resistência à compressão do substrato dos corpos-de-prova *push-off* e *pull-off*.**

Concreto	Substrato	Carga de ruptura (kN)	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR	V ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> ) e L ( <i>pull-off</i> )	360,5	45,92	45,18	0,77	1,69
		355,0	45,22			
		348,5	44,39			
AR	R2	425,5	54,20	52,68	1,32	2,51
		408,7	52,06			
		406,5	51,78			

O ensaio de resistência à compressão do concreto do complemento dos corpos-de-prova do tipo *push-off* e *pull-off* foram realizados no dia dos ensaios destes e os resultados estão apresentados na Tabela 4.4. Para o ensaio do tipo *pull-off* foram utilizados todos os complementos (AR, 25%, 50%, 75% e 100%) e para o ensaio do tipo *push-off* os complementos foram de 25%, 50%, 75% e 100%.

**Tabela 4.4 - Resistência à compressão do concreto do complemento dos corpos-de-prova dos ensaios do tipo *push-off* e *pull-off*.**

Complemento	Carga de ruptura (kN)	Tensão de compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR <i>pull-off</i>	395,4	50,37	50,34	1,16	2,30
	386	49,17			
	404,2	51,49			
25% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	295,3	37,62	38,99	4,05	10,39
	327,4	43,55			
	281,1	35,81			
50% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	262,23	33,41	32,50	0,88	2,71
	248,4	31,64			
	254,7	32,45			
75% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	200,2	25,50	32,27	9,83	30,46
	214,5	43,55			
	218	27,77			
100% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	180,9	23,04	26,87	4,21	15,65
	246,3	31,38			
	205,7	26,20			

#### 4.1.2 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos

A resistência à tração por compressão diametral dos concretos foi determinada utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos para cada dosagem. As Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os resultados para o substrato do *slant shear*, complemento do *slant shear*, substrato do *push-off* e *pull-off*, e complemento do *push-off* e *pull-off*, respectivamente.

Segundo observado por Rossignolo e Oliveira (2007), a resistência à tração dos concretos leves é menor quando comparado ao concreto convencional, isso se deve aos vazios existentes nos agregados leves, chegando a 50% do volume total no caso da argila expandida. Concretos produzidos com argila expandida brasileira apresentam valores de resistência à tração por compressão diametral variando entre 6% e 9% da resistência à compressão, como observado, também, por Angelin *et al.* (2013).

**Tabela 4.5 - Resistência à tração por compressão diametral do substrato dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *slant shear*.**

Substrato	Complemento	Carga de ruptura (kN)	Resistência à tração - $f_{ct.sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR	AR	100,2	3,19	3,39	0,21	6,30
		113,6	3,62			
		106	3,38			
AR	25%	105	3,34	3,46	0,20	5,76
		105,1	3,35			
		115,9	3,69			
AR	50%	110,4	3,52	3,87	0,33	8,42
		123,3	3,93			
		130,6	4,16			
AR	75%	101,7	3,24	3,38	0,15	4,38
		106,1	3,38			
		111	3,54			
AR	100%	106	3,38	3,47	0,22	6,35
		104,2	3,32			
		117	3,73			
25%	25%	120,7	3,84	3,70	0,18	4,79
		110	3,50			
		118	3,76			
25%	50%	113	3,60	3,28	0,30	9,00
		102	3,24			
		94,60	3,01			
25%	75%	113,4	3,61	3,74	0,24	6,33
		125,9	4,01			
		112,7	3,59			
25%	100%	82,9	2,64	2,61	0,20	7,64
		75,2	2,39			
		87,6	2,79			
100%	50%	69,2	2,20	2,06	0,14	6,95
		60,2	1,92			
		65	2,07			
100%	75%	59,2	1,89	1,94	0,12	6,34
		65,4	2,08			
		58,3	1,86			
100%	100%	67,8	2,16	2,03	0,14	7,00
		59	1,88			
		64,74	2,06			

**Tabela 4.6 - Resistência à tração por compressão diametral do complemento dos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *slant shear*.**

Complemento	Grupo	Carga de ruptura (kN)	Resistência à tração - $f_{ct.sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR	AR-AR	116,5	3,71	3,36	0,48	14,39
		111,5	3,55			
		88,1	2,81			
25%	AR-25% e 25%-25%	98,3	3,13	3,43	0,28	8,04
		115,3	3,67			
		109,7	3,49			
50%	AR-50% e 25-50%	85,8	2,73	2,84	0,12	4,39
		93,4	2,97			
		88,0	2,80			
50%	100%-50%	82	2,61	2,78	0,27	9,73
		97,2	3,10			
		83	2,64			
75%	25%-75% e AR-75%	88,4	2,82	2,60	0,20	7,51
		79,9	2,54			
		76,5	2,44			
75%	100%-75%	79,8	2,54	2,67	0,11	4,21
		86,1	2,74			
		85,7	2,73			
100%	25%-100% e 100%-100%	78	2,48	2,40	0,09	3,72
		72,4	2,31			
		75,3	2,40			
100%	AR-100%	69,7	2,22	2,04	0,17	8,27
		63,8	2,03			
		59,1	1,88			

**Tabela 4.7 - Resistência à tração por compressão diametral do substrato dos corpos-de-prova para os ensaios do tipo *push-off* e *pull-off*.**

Concreto	Substrato	Carga de ruptura (kN)	Resistência à tração - $f_{ct.sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR	V ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> ) e L ( <i>pull-off</i> )	108,1	3,44	3,75	0,31	8,35
		127,8	4,07			
		117,8	3,75			
AR	R2	115	3,66	3,35	0,30	8,86
		103,9	3,31			
		96,5	3,07			

**Tabela 4.8 - Resistência à tração por compressão diametral do complemento dos corpos-de-prova para os ensaios do tipo *push-off* e *pull-off*.**

Complemento	Carga de ruptura (kN)	Resistência à tração - $f_{ct.sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
AR <i>pull-off</i>	110,4	3,52	3,72	0,18	4,81
	118,9	3,79			
	121	3,85			
25% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	100,3	3,19	3,35	0,16	4,79
	105,3	3,35			
	110,4	3,52			
50% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	87,2	2,78	2,72	0,13	4,66
	88,1	2,81			
	80,8	2,57			
75% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	68,1	2,17	2,28	0,11	4,82
	75	2,39			
	71,9	2,29			
100% ( <i>pull-off</i> e <i>push-off</i> )	55,4	1,76	1,68	0,08	4,83
	50,3	1,60			
	52,8	1,68			

A Figura 4.1 mostra os corpos-de-prova de concreto com substituição de agregado leve de 25%, 50%, 75% e 100%, após serem ensaiados à tração por compressão diametral.

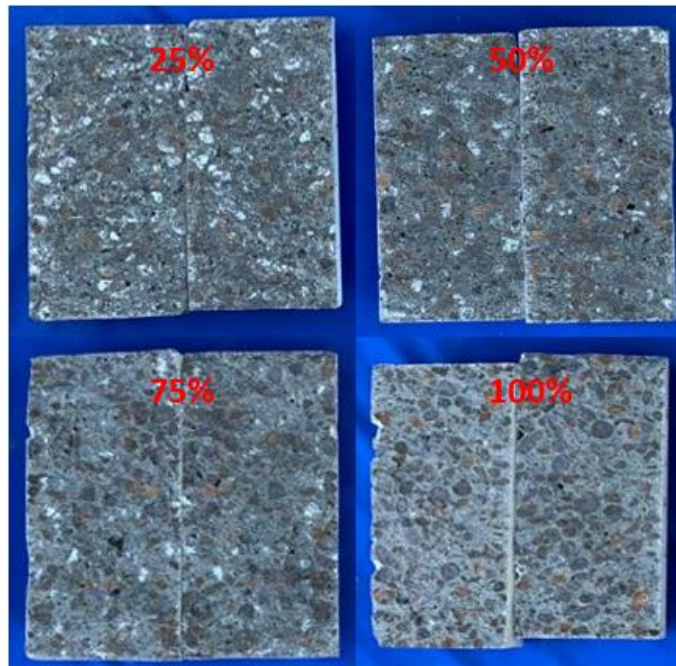


Figura 4.1 - Corpos-de-prova com substituição de agregado leve após o ensaio de tração por compressão diametral.

#### 4.1.3 - Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade dos concretos utilizados foram plotados os valores obtidos por Angelin (2014) e obtida a equação em função da resistência à compressão média do concreto, mostrada na Figura 4.2. A partir disto foram obtidos os valores dos módulos de elasticidade para os concretos utilizados.

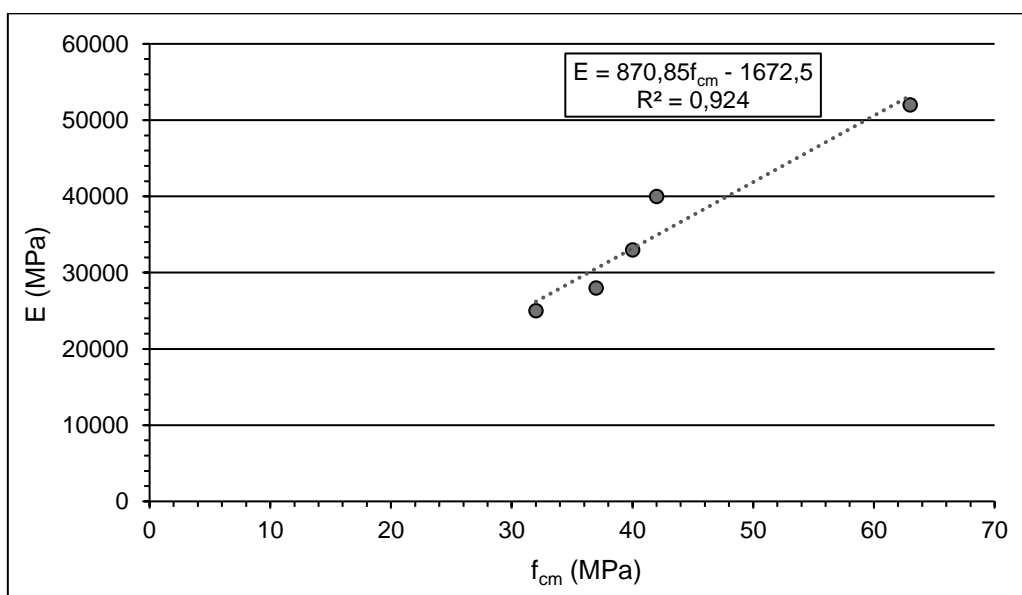


Figura 4.2 - Valores de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente por Angelin (2014).



A Tabela 4.9 apresenta o módulo de elasticidade calculado para todas as composições de concreto utilizadas nesta pesquisa. O módulo de elasticidade mostra uma diminuição em relação às taxas de substituição do agregado normal pelo leve. Isso pode ser devido ao fato do módulo de elasticidade ser influenciado principalmente pela rigidez dos agregados e, conseqüentemente, uma vez que os agregados leves possuem uma rigidez menor.

**Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade dos concretos estudados.**

Grupo		Módulo de Elasticidade (MPa)
AR-AR	Substrato	36827,78
	Complemento	38325,64
AR-25%	Substrato	47147,35
	Complemento	38534,64
AR-50%	Substrato	45928,16
	Complemento	24818,76
AR-75%	Substrato	37881,51
	Complemento	25193,22
AR-100%	Substrato	40598,56
	Complemento	19994,25
25%-25%	Substrato	31872,64
	Complemento	38534,64
25%-50%	Substrato	28389,24
	Complemento	24818,76
25%-75%	Substrato	38848,15
	Complemento	25193,22
25%-100%	Substrato	30557,66
	Complemento	23286,06
100%-50%	Substrato	18879,56
	Complemento	25863,78
100%-75%	Substrato	17886,79
	Complemento	24348,50
100%-100%	Substrato	18200,30
	Complemento	23286,06

#### 4.2- Parâmetros de rugosidade das interfaces

Como mencionado anteriormente, de acordo com a maioria dos códigos, a avaliação da rugosidade da superfície é meramente qualitativa, com base na

avaliação visual, levando, no caso do Eurocode 2 (2010), às quatro classes a seguir: muito liso, liso, rugoso e muito rugoso. Essa abordagem tem a desvantagem de ser subjetiva, pois depende da experiência do inspetor. Por esse motivo, no presente estudo, a rugosidade da superfície do substrato foi avaliada como supracitado, com a utilização de um sensor de deslocamento a laser, permitindo uma avaliação quantitativa deste último com alta confiabilidade e acurácia.

Baseado na média de vinte e sete medições para cada interface, foram determinados os seguintes parâmetros de rugosidade: rugosidade média ( $R_a$ ), altura média pico-vale ( $R_{z(DIN)}$ ), altura máxima pico-vale ( $R_{max}$ ), altura média do 3º pico-vale mais alto ( $R_{3z}$ ), altura máxima do 3º pico-vale mais alto ( $R_{3zmax}$ ), altura dos dez pontos ( $R_{z(ISO)}$ ), altura total da rugosidade ( $R_y$ ), altura média do pico ( $R_{pm}$ ), altura máxima do pico ( $R_p$ ), profundidade média do vale ( $R_{vm}$ ), profundidade máxima do vale ( $R_v$ ).

O comprimento de avaliação da rugosidade da interface utilizado para cada situação de tratamento foi igual para todos os corpos-de-prova, obtendo-se uma média para a determinação dos parâmetros de rugosidade.

Nas Figuras 4.3 à 4.7, representa-se o perfil de rugosidade obtido para as cinco situações em estudo. Na Figura 4.8 foi colocado a linha média de todos os perfis de rugosidade, coincidente com a ordenada zero, para permitir uma melhor comparação entre as cinco situações.

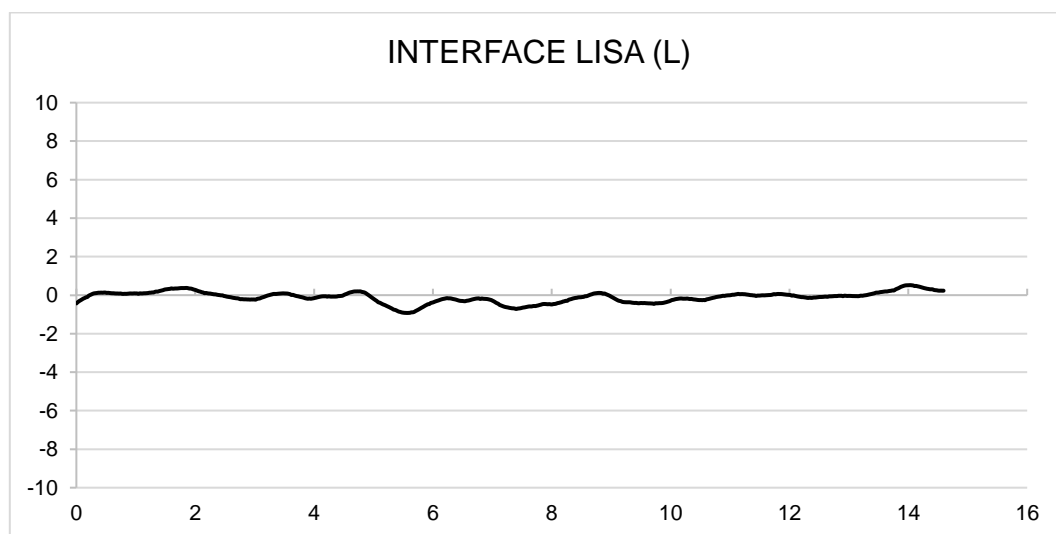


Figura 4.3 - Perfil de rugosidade da superfície com interface lisa (L).

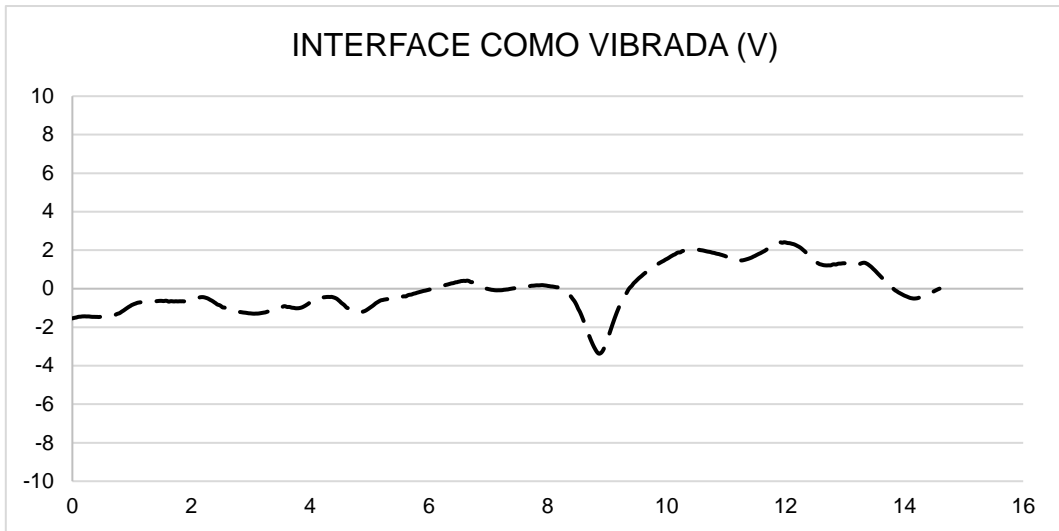


Figura 4.4 - Perfil de rugosidade da superfície com interface como vibrada (V).

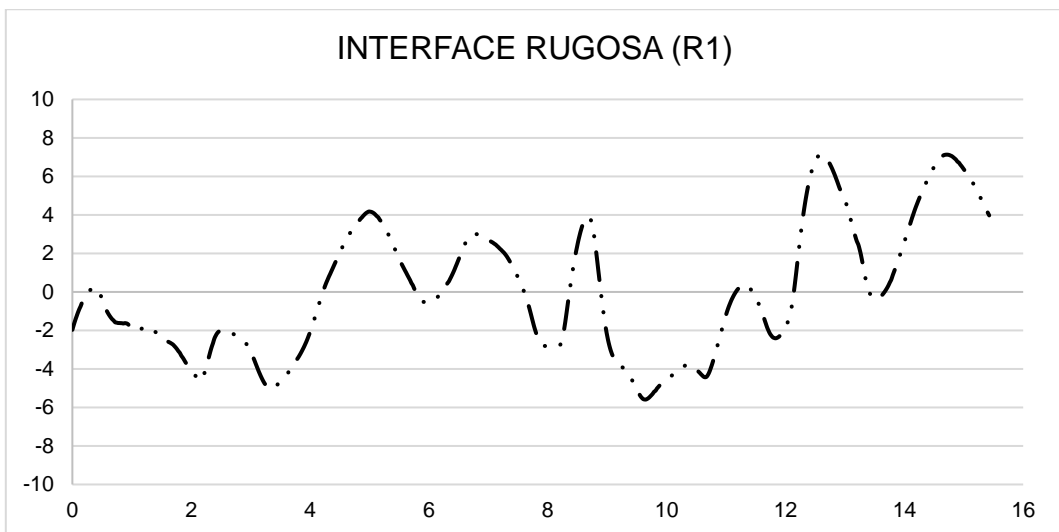


Figura 4.5 - Perfil de rugosidade da superfície com interface rugosa (R1).

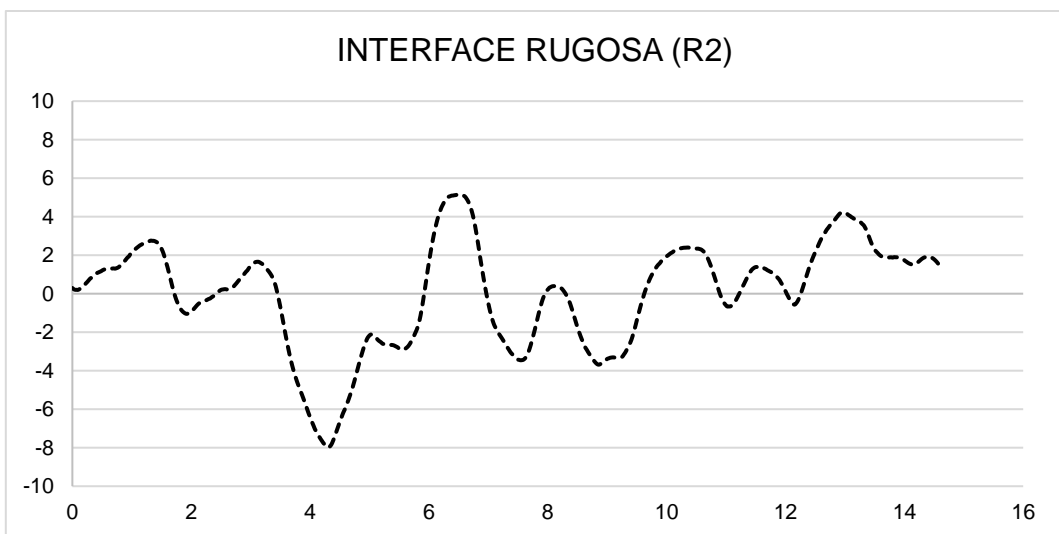


Figura 4.6 - Perfil de rugosidade da superfície com interface rugosa (R2).

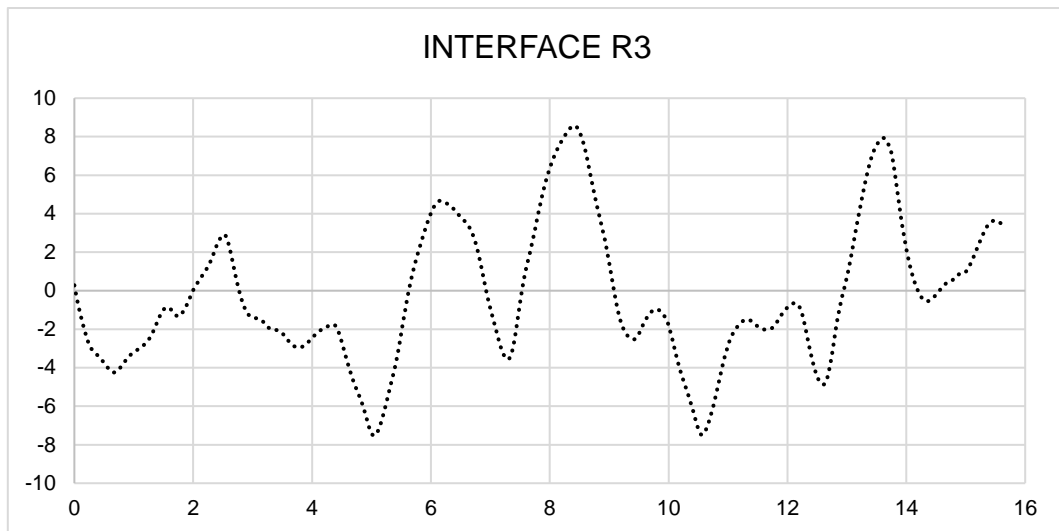


Figura 4.7 - Perfil de rugosidade da superfície com interface rugosa (R3).

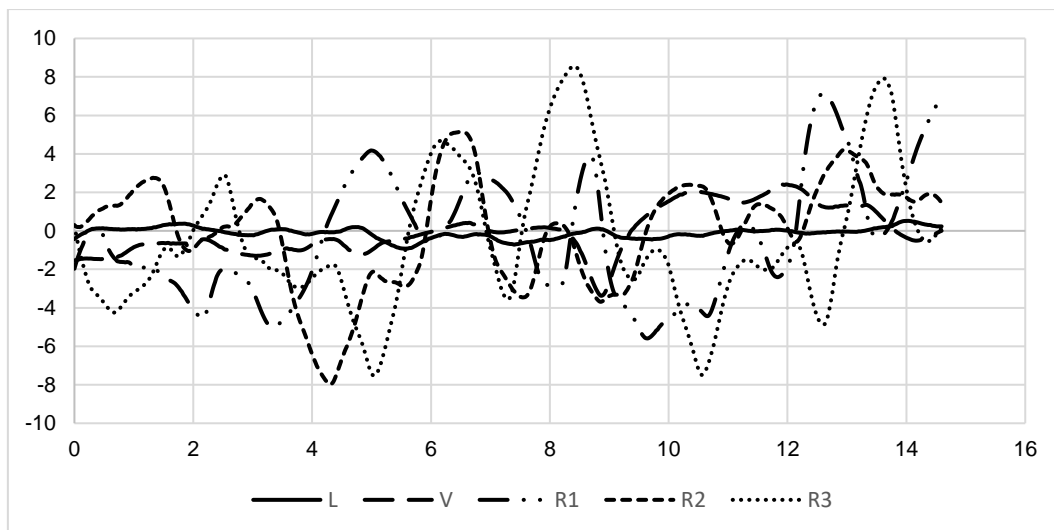


Figura 4.8 - Comparação dos perfis de rugosidade.

Como esperado, o perfil de rugosidade correspondente aos tratamentos da superfície da interface com rugosidades induzidas é o que apresenta maiores oscilações, seguindo-se o tratamento como vibrado e, por último, o perfil correspondente à interface lisa.

Como mencionado no programa experimental deste trabalho, a rugosidade na interface foi realizada no momento em que o concreto ainda estava fresco. Pela influência de temperatura, umidade, pessoa que executa o procedimento e pelo fato do concreto ser um material totalmente heterogêneo é impossível reproduzir a mesma rugosidade, usando a mesma ferramenta em corpos-de-prova diferentes, isto levou-se a ter alguma variabilidade nos

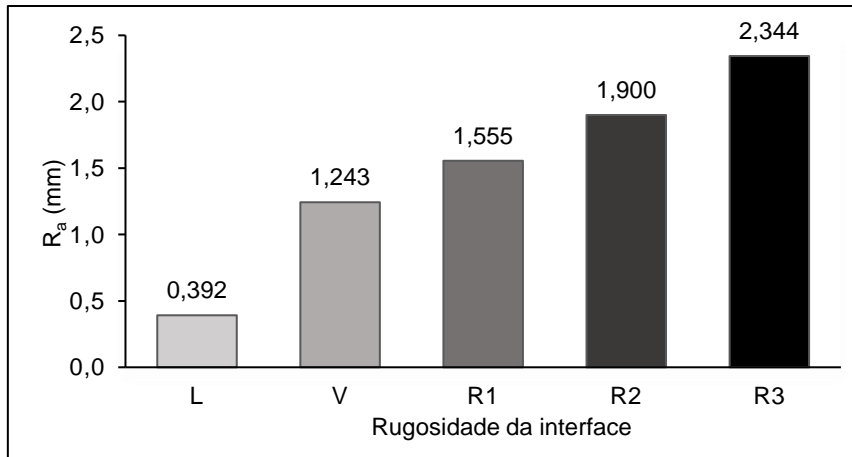
resultados para cada combinação de concreto. Sendo assim, foi calculado o valor médio dos cinco tipos de interface para cada grupo apresentados na Tabela 4.10, definindo assim o valor a ser usado para caracterizar cada rugosidade das interfaces em estudo. A apresentação do valor calculado para cada grupo se encontra no Anexo A-1 ao A-5.

Pelo fato de se ter muitos perfis de rugosidade e com o intuito de se obter o cálculo dos parâmetros de rugosidade aqui avaliados de forma rápida, foi implementado um procedimento no software MATLAB® 9.3, com entrada num arquivo no programa Excel® dos dados de cada perfil reproduzido.

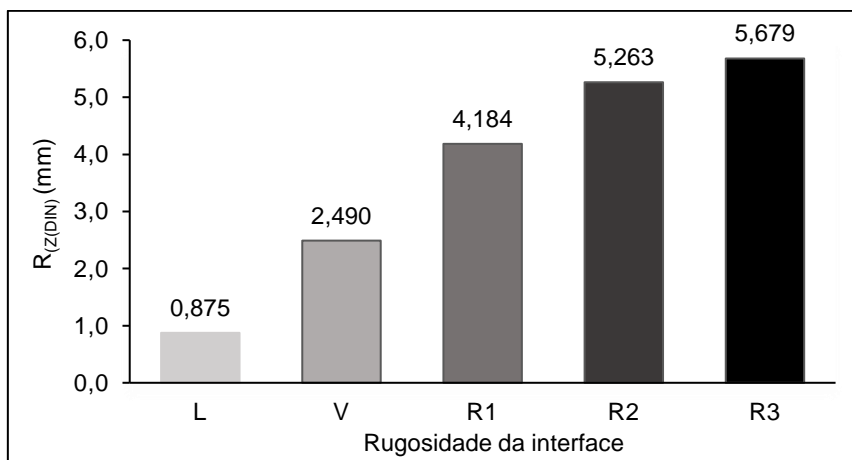
**Tabela 4.10 - Parâmetros de rugosidade média.**

Parâmetro (mm)		Tipo de tratamento da superfície				
Descrição	Símbolo	Liso (L)	Como vibrado (V)	Rugosidade de 5 mm (R1)	Rugosidade de 7,5 mm (R2)	Rugosidade de 15 mm (R3)
Rugosidade média	R <sub>a</sub>	0,392	1,243	1,555	1,900	2,344
Altura média pico-vale	R <sub>z(DIN)</sub>	0,875	2,490	4,184	5,263	5,679
Altura máxima pico-vale	R <sub>max</sub>	1,411	3,890	6,181	7,602	8,051
Altura média do 3º pico-vale mais alto	R <sub>3z</sub>	0,383	0,681	1,111	1,406	1,496
Altura máxima do 3º pico-vale mais alto	R <sub>3zmax</sub>	0,710	1,706	2,691	3,392	3,497
Altura dos dez pontos	R <sub>z (ISO)</sub>	1,575	4,153	5,177	6,211	7,101
Altura total da rugosidade	R <sub>y</sub>	0,796	2,604	3,915	5,233	5,417
Altura média do pico	R <sub>pm</sub>	0,405	1,256	2,017	2,637	2,792
Altura máxima do pico	R <sub>p</sub>	0,927	2,972	3,616	4,884	5,179
Profundidade média do vale	R <sub>vm</sub>	0,473	1,271	2,167	2,626	3,018
Profundidade máxima do vale	R <sub>v</sub>	1,096	2,900	4,156	4,837	5,494

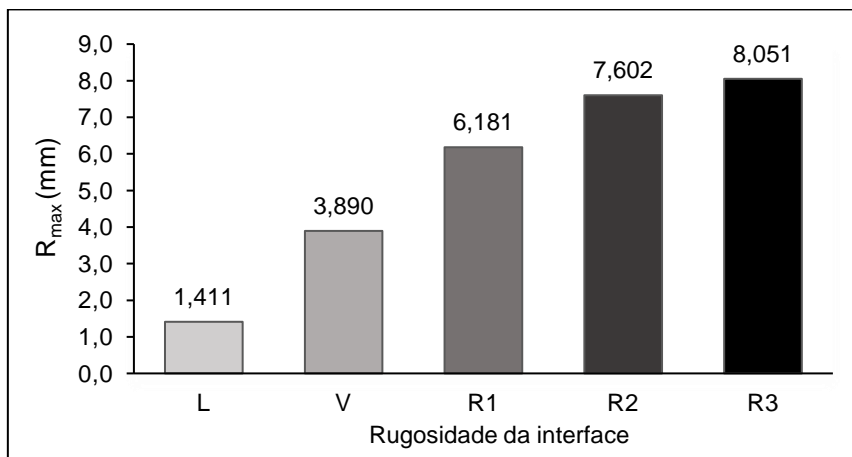
Da Figura 4.9 à 4.19 representa-se cada um dos parâmetros de caracterização da rugosidade da interface, apresentados na Tabela 4.9, para as cinco situações de tratamento da interface em estudo.



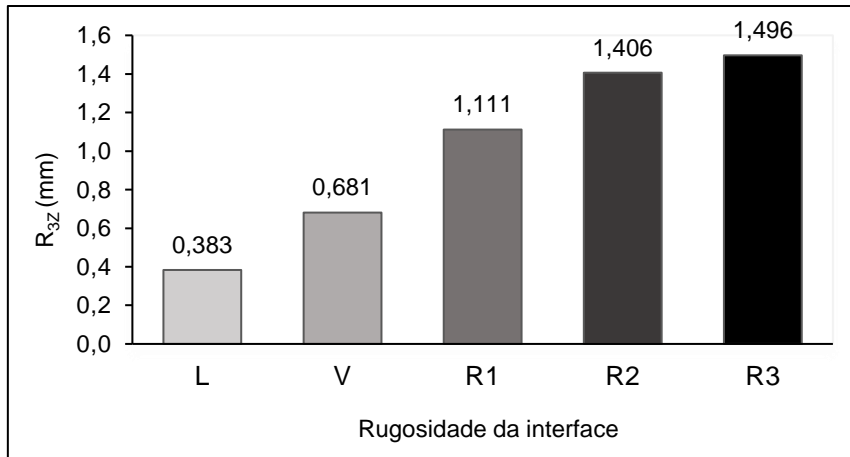
**Figura 4.9 - Rugosidade média -  $R_a$**



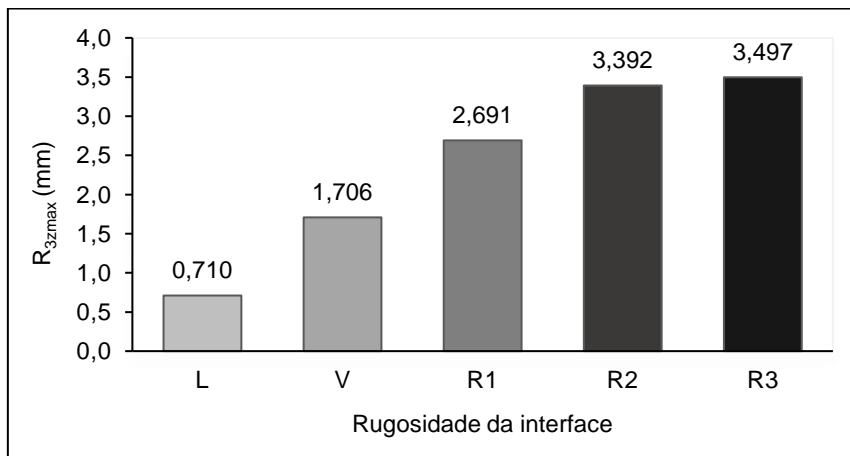
**Figura 4.10 - Altura média pico-vale -  $R_{z(DIN)}$**



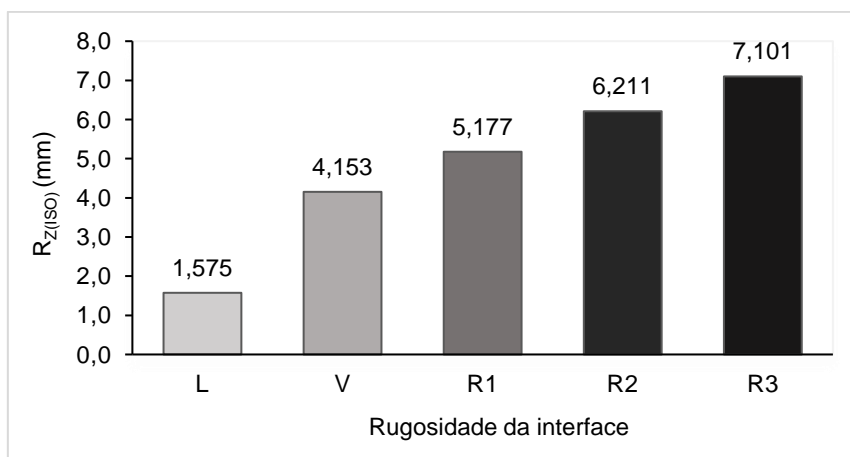
**Figura 4.11 - Altura máxima pico-vale -  $R_{max}$**



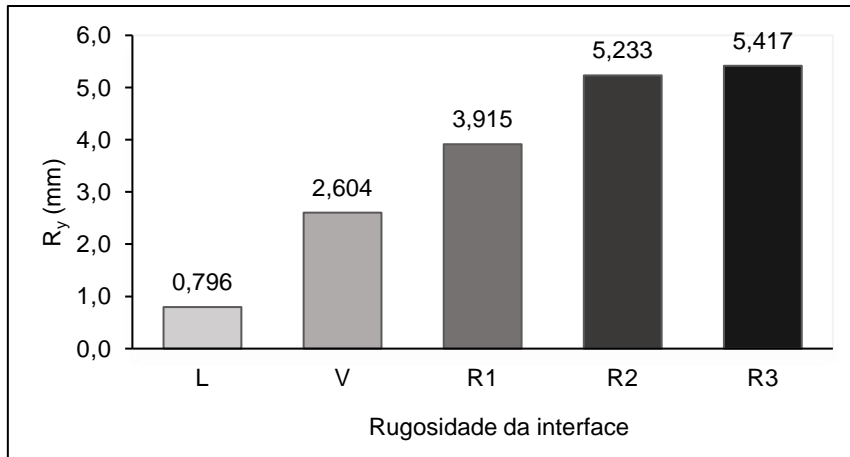
**Figura 4.12 - Altura média do 3º pico-vale mais elevado-  $R_{3z}$**



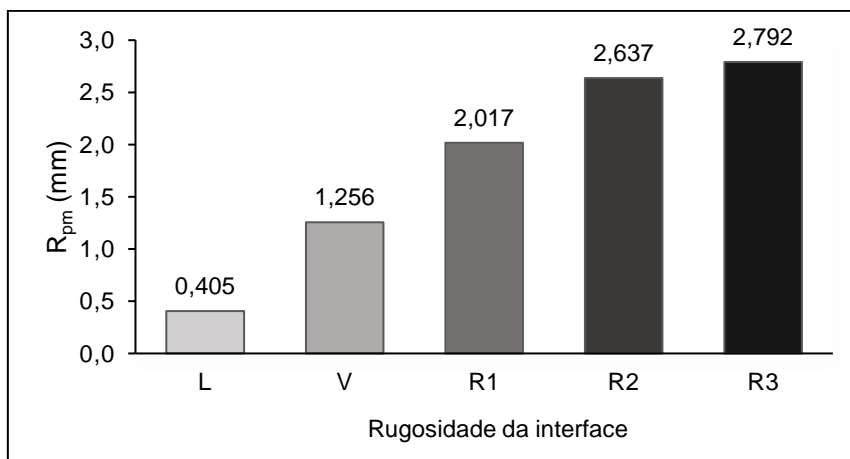
**Figura 4.13 - Altura máxima do 3º pico-vale mais elevado -  $R_{3zmax}$**



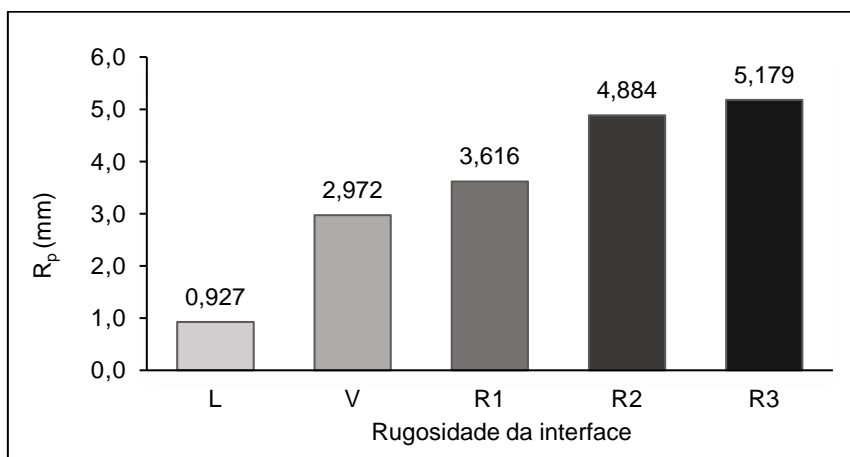
**Figura 4.14 - Altura dos 10 pontos -  $R_{z(ISO)}$**



**Figura 4.15 - Altura total da rugosidade -  $R_y$**

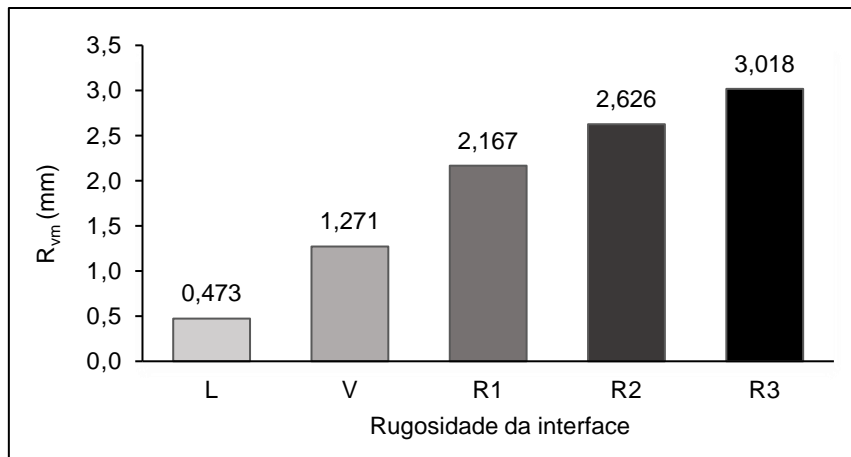


**Figura 4.16 - Altura média do pico -  $R_{pm}$**

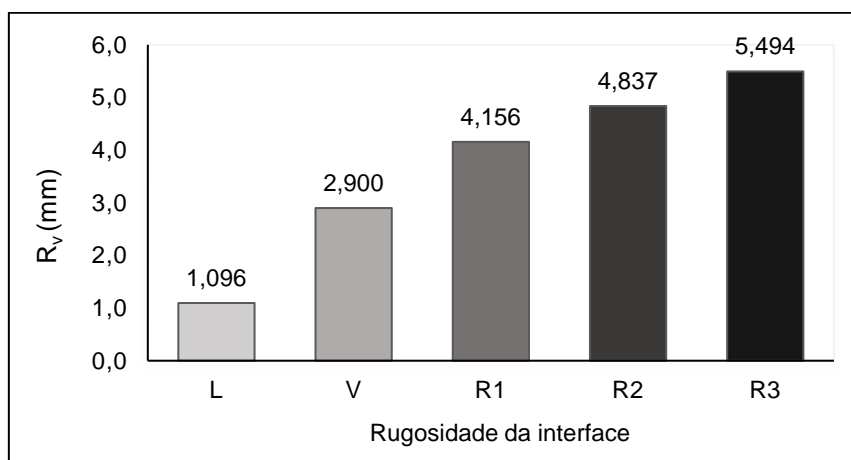


**Figura 4.17 - Altura máxima do pico -  $R_p$**





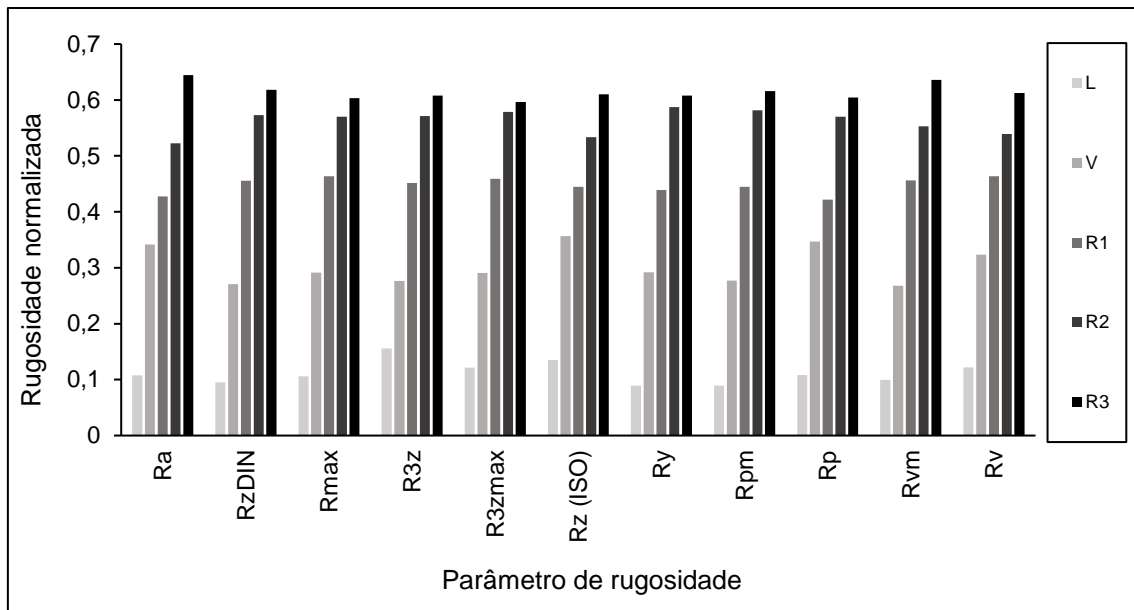
**Figura 4.18 - Profundidade média do vale -  $R_{vm}$**



**Figura 4.19 - Profundidade máxima do vale -  $R_v$**

Analisando os resultados obtidos, nota-se que os valores obtidos estão de acordo com o esperado. A interface com rugosidade lisa corresponde a um parâmetro de rugosidade baixo, enquanto que a superfície com rugosidade R3 corresponde ao valor máximo, sendo os demais valores intermediários crescentes para as interfaces como vibrada e rugosa R1 e R2. Esta observação é válida para os onze parâmetros de rugosidade avaliados.

Na Figura 4.20 são apresentados os parâmetros de rugosidade normalizados que foram obtidos dividindo-se os parâmetros originais pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores medidos, como realizado por Santos (2005).



**Figura 4.20 - Parâmetros de rugosidade normalizado.**

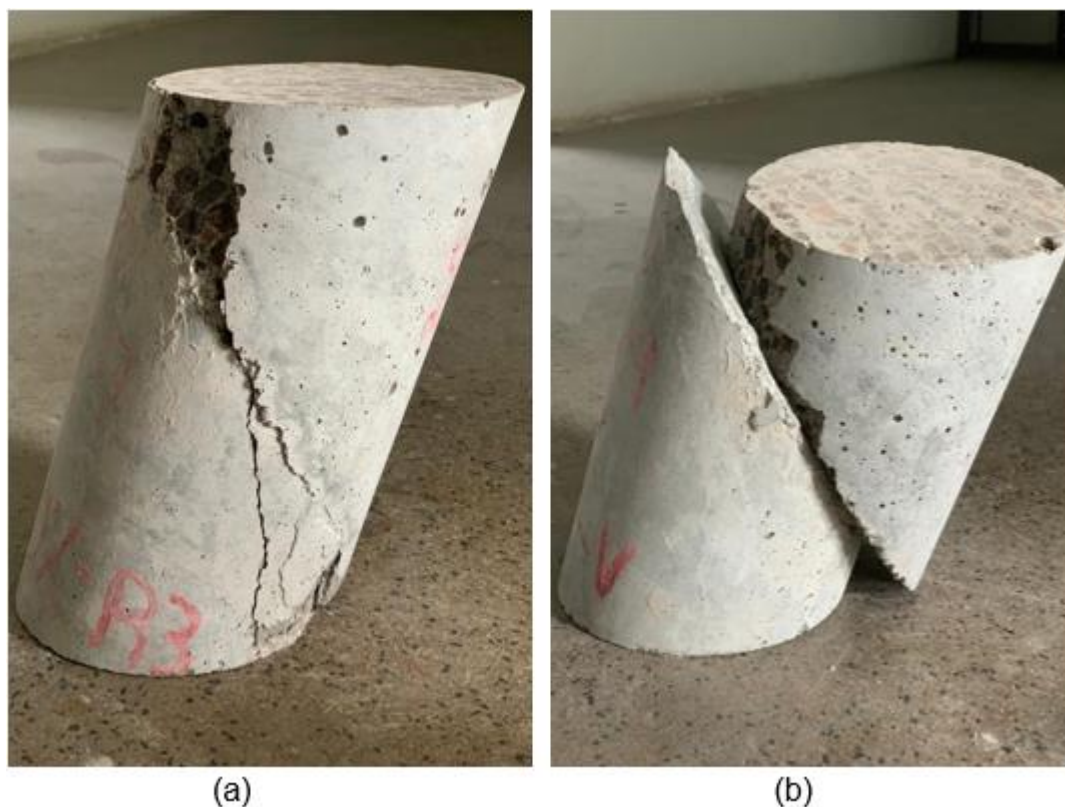
A aplicação da técnica de medição da rugosidade da superfície da interface utilizando um sensor de deslocamento a laser digital é simples e eficiente. Outra vantagem desta técnica é que, por ser efetuada antes da concretagem do complemento de concreto, não se tem o seccionamento do elemento a ser medido, como em outros métodos utilizados por exemplo por Santos (2005), sendo que quando seccionado o corpo-de-prova este pode ser danificado de forma significativa influenciando nos resultados obtidos.

### **4.3- Resistência ao cisalhamento na interface.**

#### **4.3.1 - Ensaio de *slant shear***

Para os ensaios do tipo *slant shear*, chamado de cisalhamento inclinado, foram observados dois modos de falha: falha coesa ou monolítica (Figura 4.21a) e falha adesiva, ou seja, falha na interface (Figura 4.21b). A primeira ocorreu principalmente em corpos-de-prova com alta rugosidade da superfície da interface (R1, R2 e R3) e a última foi observada principalmente em corpos-de-prova com baixa rugosidade da superfície da interface (L e V), da mesma forma que ocorreu na pesquisa de Costa (2018) e Zanotti e Randl (2019).

Quando a falha adesiva ocorre, pode-se considerar que a resistência da ligação determinada a partir deste valor é a real ligação de aderência para esta superfície. No entanto, quando as rupturas são coesivas significa que a capacidade de ligação da interface poderia resistir maiores tensões sendo limitada pelo esmagamento do concreto.



**Figura 4.21 - Ruptura coesiva e adesiva respectivamente.**

Para cada grupo de corpos-de-prova do ensaio do tipo *slant shear* foram quantificados o número de ruptura coesivas e adesivas para o substrato de concreto normal de alta resistência, mostrada na Figura 4.22, para o substrato de concreto leve com 25% de substituição na Figura 4.23 e no substrato com 100% de substituição na Figura 4.24.

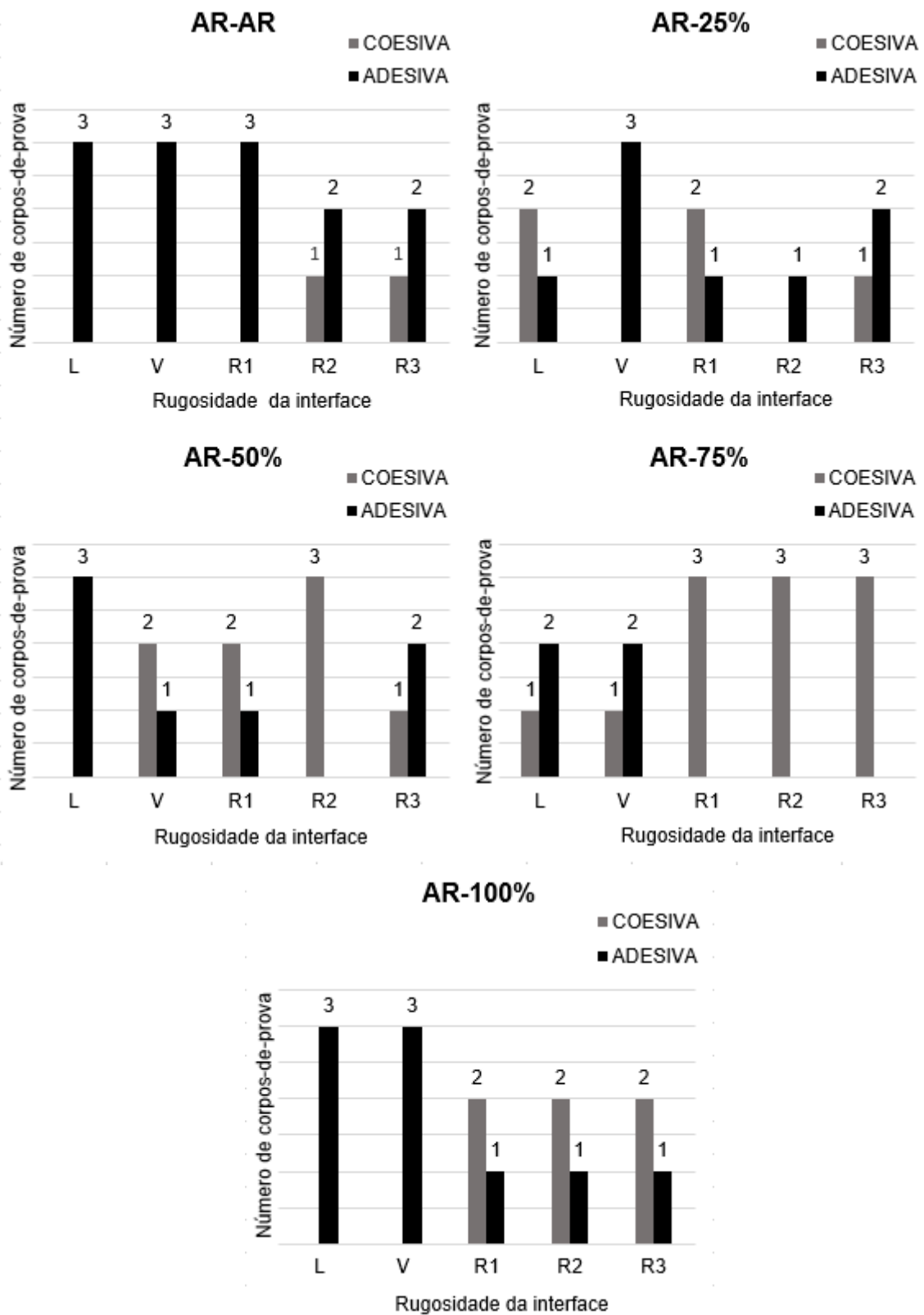


Figura 4.22 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto de alta resistência (AR).

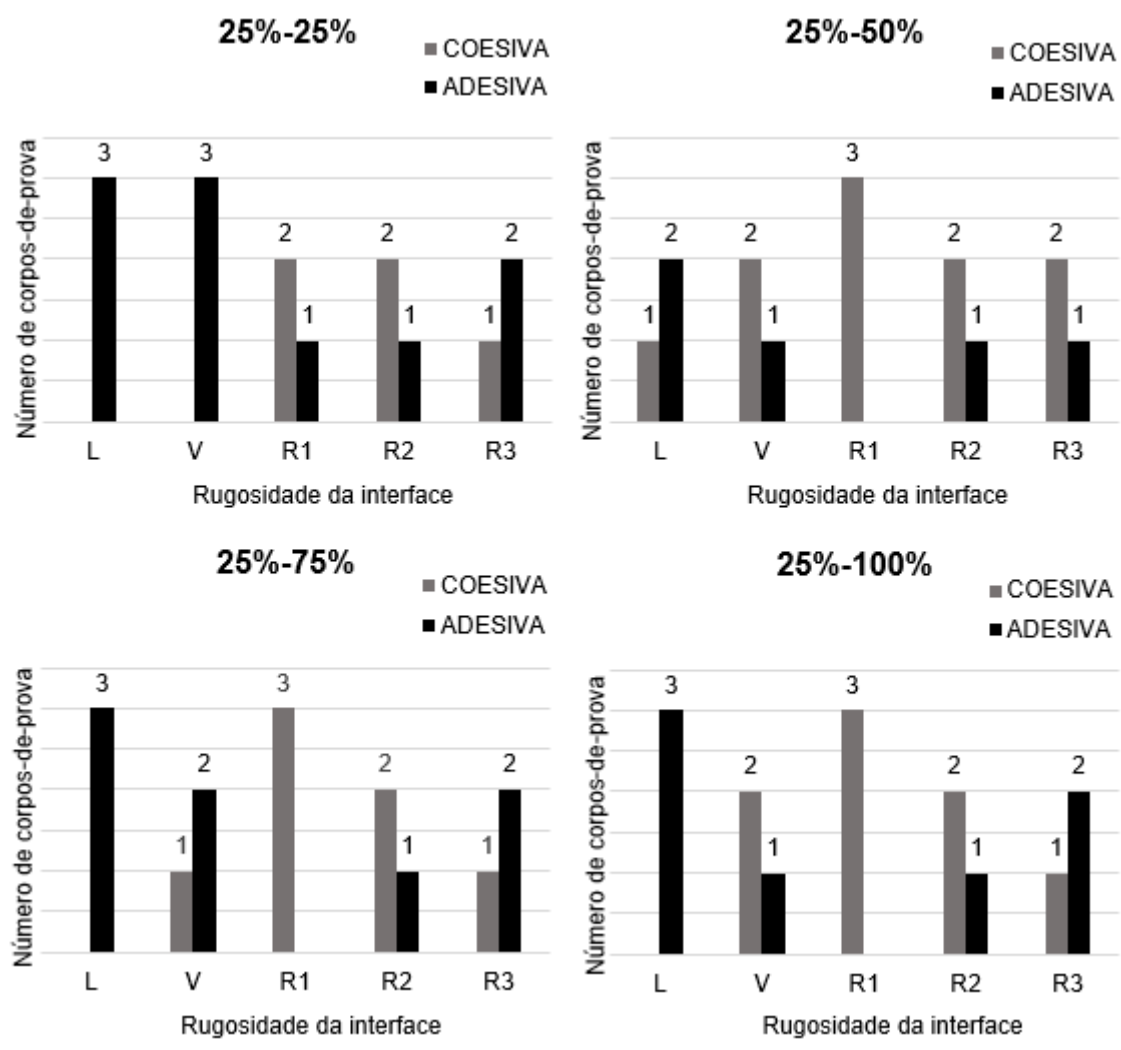


Figura 4.23 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto leve com 25% de substituição.

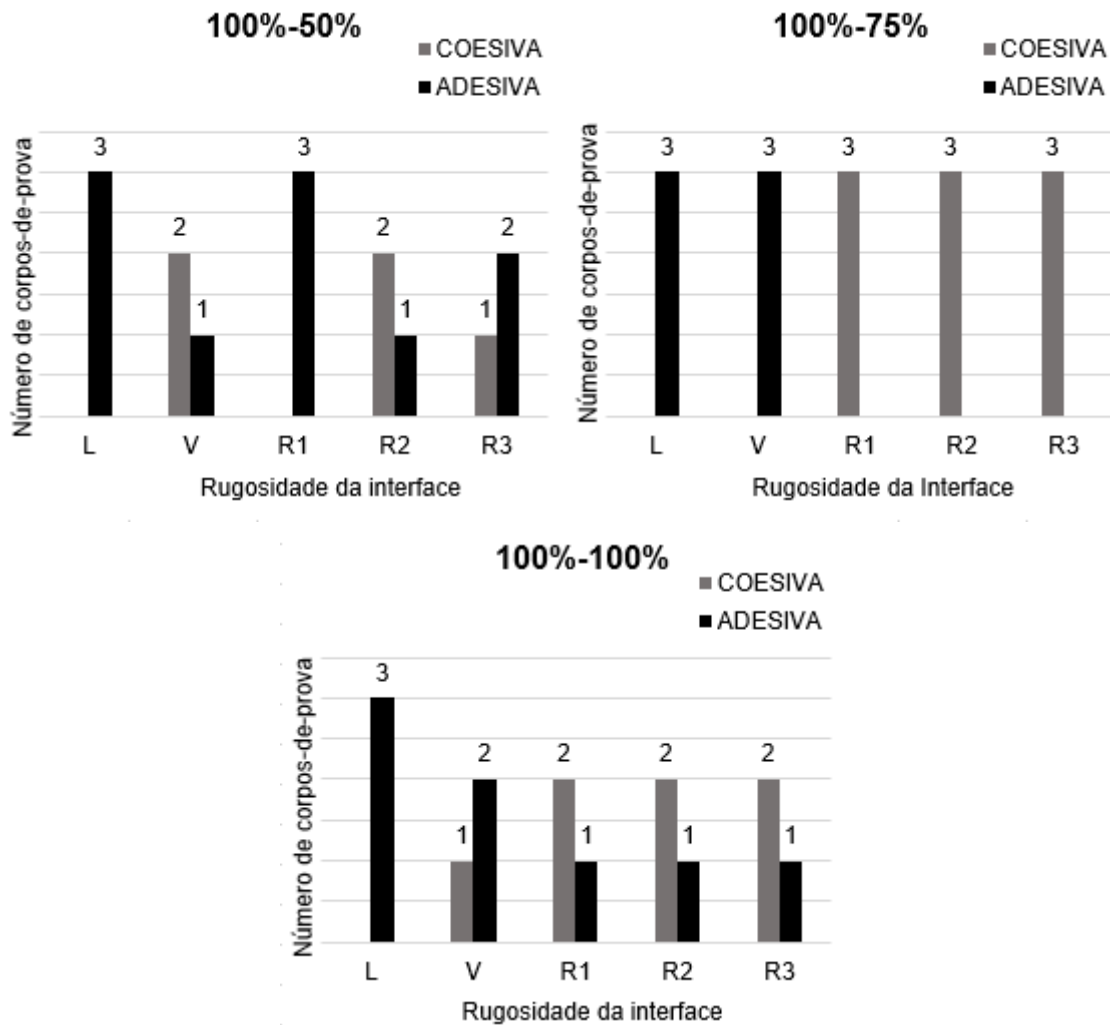


Figura 4.24 - Número de corpos-de-prova que romperam por coesão ou adesão com o substrato de concreto leve com 100% de substituição.

Neste trabalho, quando o substrato e o complemento eram de concreto de alta resistência, a predominância foi de rupturas adesivas e, na série AR-75%, pode-se notar maiores números de ruptura adesiva dentro deste grupo.

A ruptura coesiva foi observada principalmente nos corpos-de-prova com interface rugosa, ou seja, R1, R2 e R3 para todas as séries. Este comportamento deve-se, provavelmente, não só à elevada rugosidade, mas também à sua distribuição não uniforme na interface. Para os substratos de 100% de substituição esse comportamento pode também ser associado à maior resistência da matriz ligante dos concretos utilizados como complemento.

No trabalho de Zanotti e Randl (2019) para o ensaio de *slant shear* a maioria dos casos em que se utilizou concretos de alta resistência falharam sob compressão, independentemente do nível de tensão compressiva aplicada na

interface, para todos os ângulos de inclinação considerados (20°, 25° e 30°). Os autores afirmaram que a falha coesiva das amostras com complemento de alta resistência e as trincas propagaram-se através do cilindro completo na forma de fissuras verticais, atingindo a ruptura antes que as tensões de cisalhamento interfacial atingissem a máxima resistência de ligação.

Farzad *et al.* (2019) constataram três tipos de ruptura em sua pesquisa: no substrato, por descolamento da interface (adesiva), e o modo misto, ou seja, falhas parciais ocorridas no substrato e no complemento.

Para avaliar o comportamento do modelo do *slant shear* modificado proposto, foi feita uma simulação numérica levando em conta o modelo tradicional, denominado neste item como reto, e o modificado, ou seja, o corpo-de-prova proposto, em que se obteve o ângulo de 30° após o corte.

Foi utilizado o software Abaqus ® V-6.0, através de uma Análise Elástico Linear, e realizada uma simulação tridimensional, utilizando elemento quadrado, material isotrópico, com oito nós e três graus de liberdade por nó (C3D8R), com integração linear.

Para o corpo-de-prova reto, foi criado um modelo de 12000 elementos e 13671 nós para cada parte; para o inclinado, um modelo com 13122 elementos e 14630 nós. Na interação das duas partes (substrato/complemento) foi utilizado contato do tipo rugoso, sem possibilidade de deslocamento.

Na face inferior da primeira metade do corpo-de-prova, que correspondia ao substrato, as condições de contorno restringiam o movimento nos três eixos (x, y e z) e na parte do complemento, ou seja, na face superior, o movimento foi impedido nos eixos x e z e livre para o deslocamento em y, na direção da aplicação da carga.

Após a criação dos dois modelos, foi simulado para uma carga de 200kN os dois tipos de corpo-de-prova do *slant shear*, o reto e o modificado, para as doze séries em estudo.

Com o intuito de avaliar e comparar as tensões na interface concreto-concreto, tanto para o corpo-de-prova modificado, aqui nomeado de inclinado, quanto para o convencional foram simuladas as doze séries levando em conta a diferença de rigidez entre o substrato e o complemento. Nas Figuras 4.2, 4.26 e

4.27 são apresentadas as tensões de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) e normal ( $\sigma_y$ ) para os corpos de prova do tipo reto e inclinado, para três grupos, AR-AR, AR-100% e 100%-100%, respectivamente. Foram escolhidos esses três grupos por apresentarem características singulares, sendo que o primeiro apresenta alta resistência para o substrato e o complemento, e conseqüentemente rigidez similar; o segundo representa os dois extremos de resistência à compressão e conseqüentemente de rigidez; e o terceiro apresenta substrato e complemento com baixas resistências e conseqüentemente rigidez menor, porém com valores próximos.

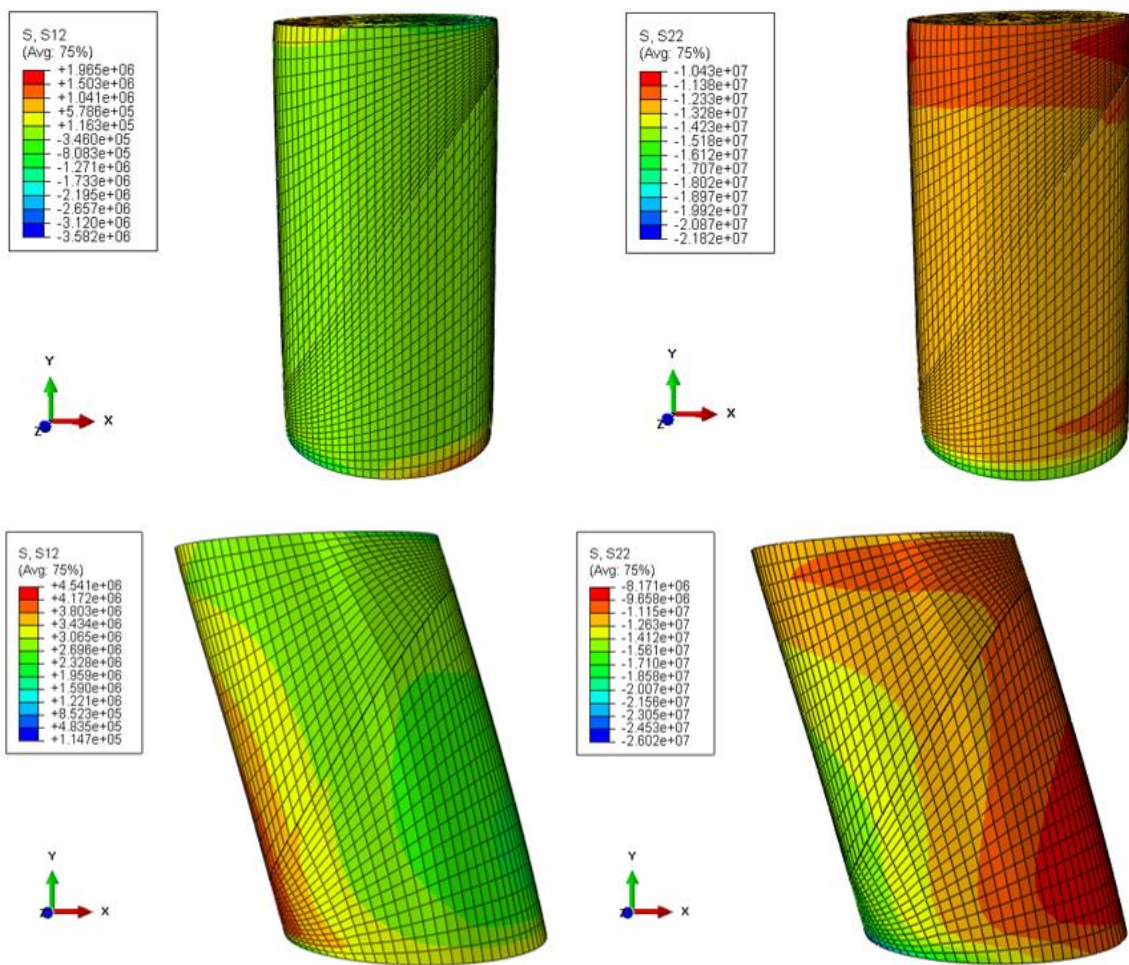


Figura 4.25 - Tensões  $\tau_{xy}$  (S12) e  $\sigma_y$  (S22) para os corpos-de-prova reto e inclinado do AR-AR sob carga de 200 kN.



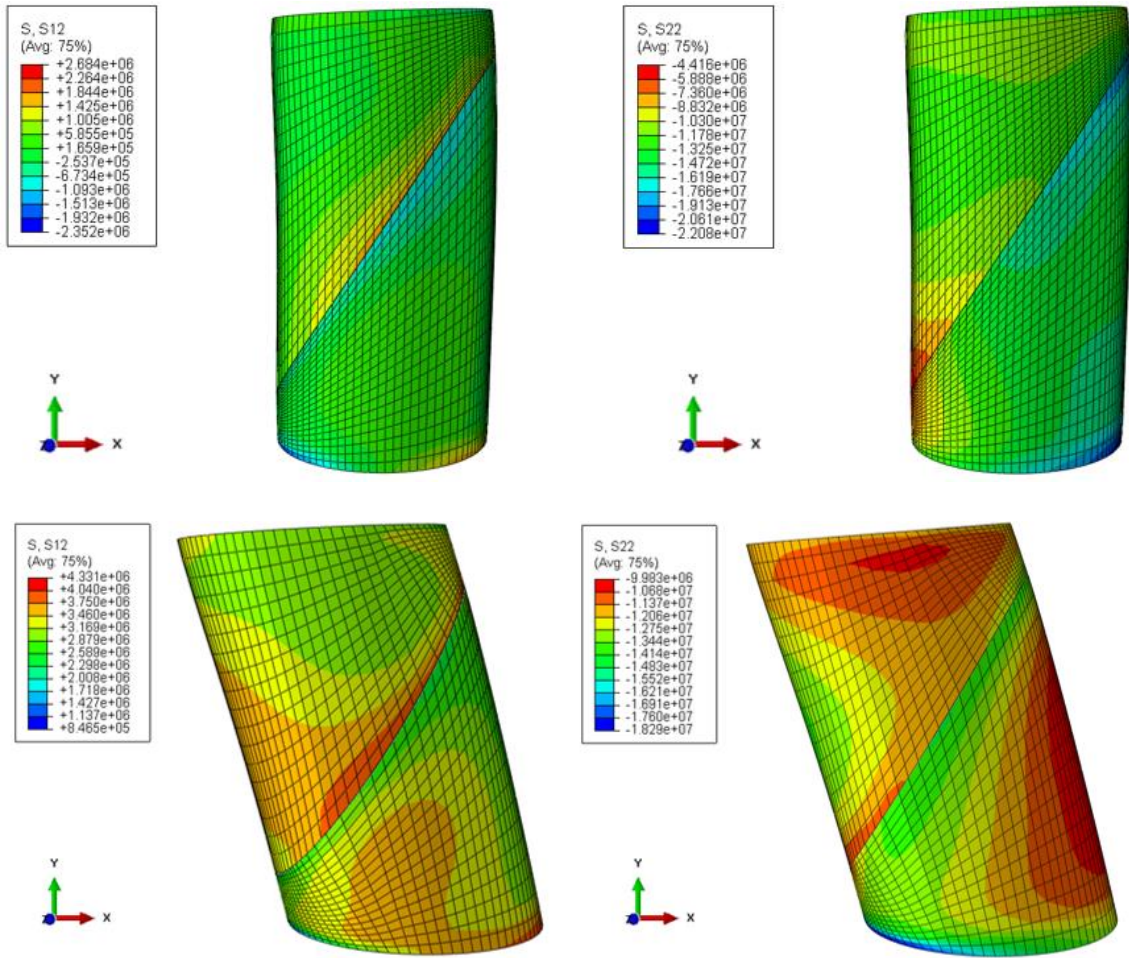
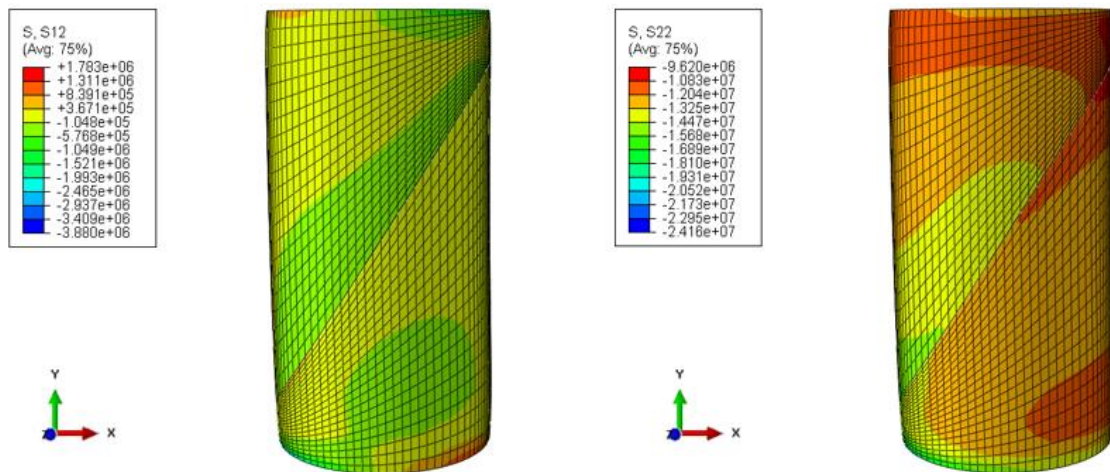
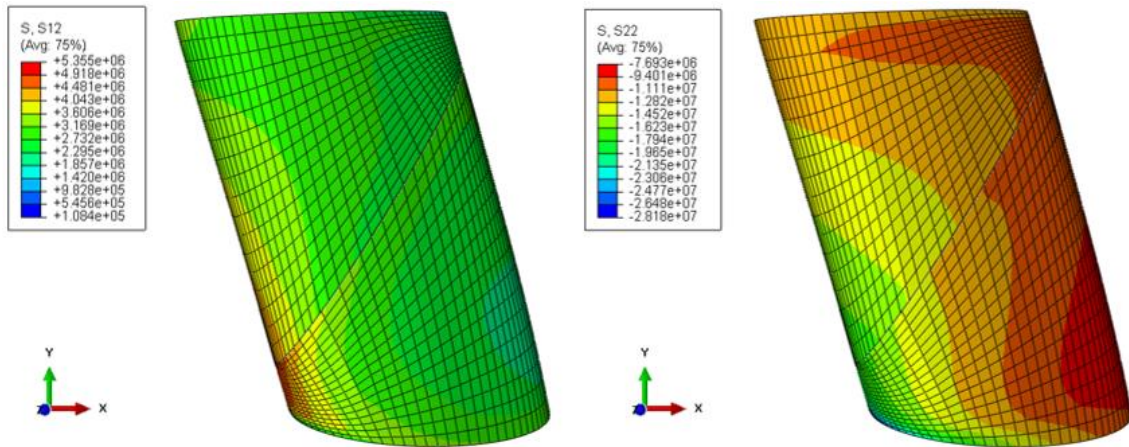


Figura 4.26- Tensões  $\tau_{xy}$  (S12) e  $\sigma_y$  (S22) para os corpos-de-prova reto e inclinado do AR-100% sob carga de 200 kN.





**Figura 4.27 - Tensões  $\tau_{xy}$  (S12) e  $\sigma_y$  (S22) para os corpos-de-prova reto e inclinado do 100%-100% sob carga de 200 kN.**

Analisando as Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, observa-se que para todos os casos foram obtidos valores maiores de tensões de cisalhamento quando considerado o corpo-de-prova do *slant shear* modificado, mesmo quando as diferenças da faixa de resistência eram similares. Por exemplo, para o grupo AR-AR em que o corpo-de-prova reto apresentou valores de tensões ( $\tau_{xy}$ ) na faixa de 1,96 MPa à -3,58 MPa e o modificado de 0,16 MPa à 4,54 MPa, o valor máximo da tensão ocorre para o corpo-de-prova modificado.

Foram plotados os valores correspondentes às tensões tangenciais e normais na interface inclinada, utiliza-se aqui o conceito de distância normalizada, pelo fato de ambos os modelos ter dimensões diferentes da interface. Nas Figuras 4.22 e 4.23 mostra-se a variação das tensões de cisalhamento e normais no plano inclinado ou interface para o modelo reto, das séries estudadas, respectivamente, e nas Figuras 4.24 e 4.25 para o modelo inclinado. A legenda apresentada mostra a relação entre a resistência à compressão do concreto do substrato e do complemento das séries estudadas.

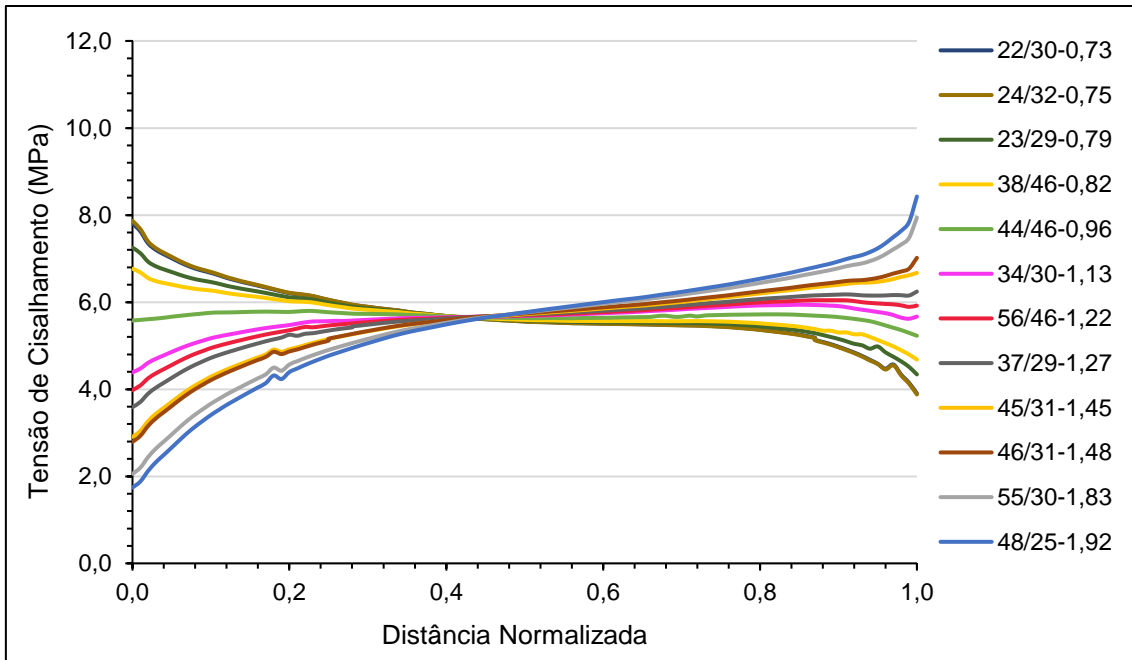


Figura 4.28 - Tensões de cisalhamento para as séries do *slant-shear* reto simuladas para uma carga de 200 kN.

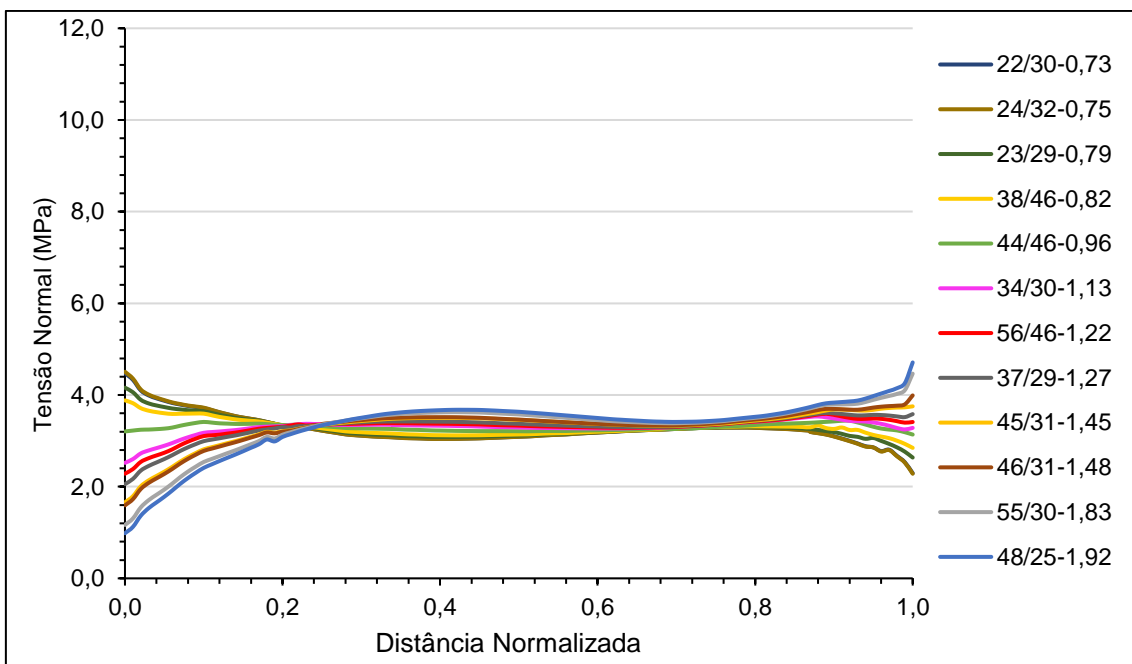


Figura 4.29 - Tensões normais para as séries do *slant-shear* reto simuladas para uma carga de 200 kN.

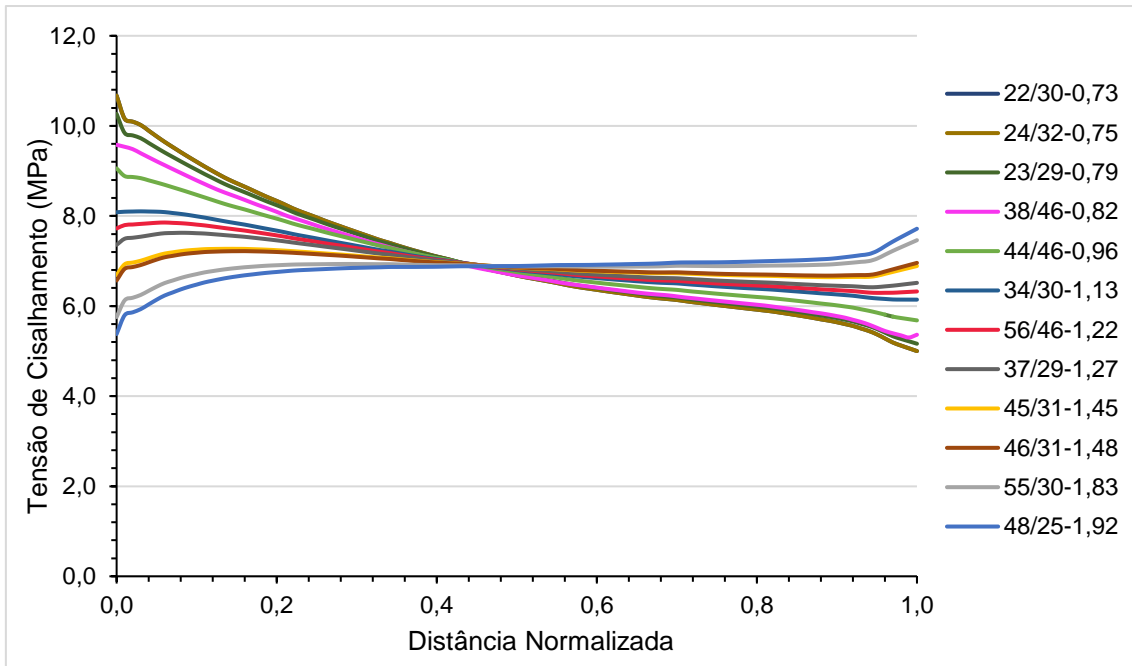


Figura 4.30 - Tensões de cisalhamento para as séries do *slant-shear* inclinado simuladas para uma carga de 200 kN.

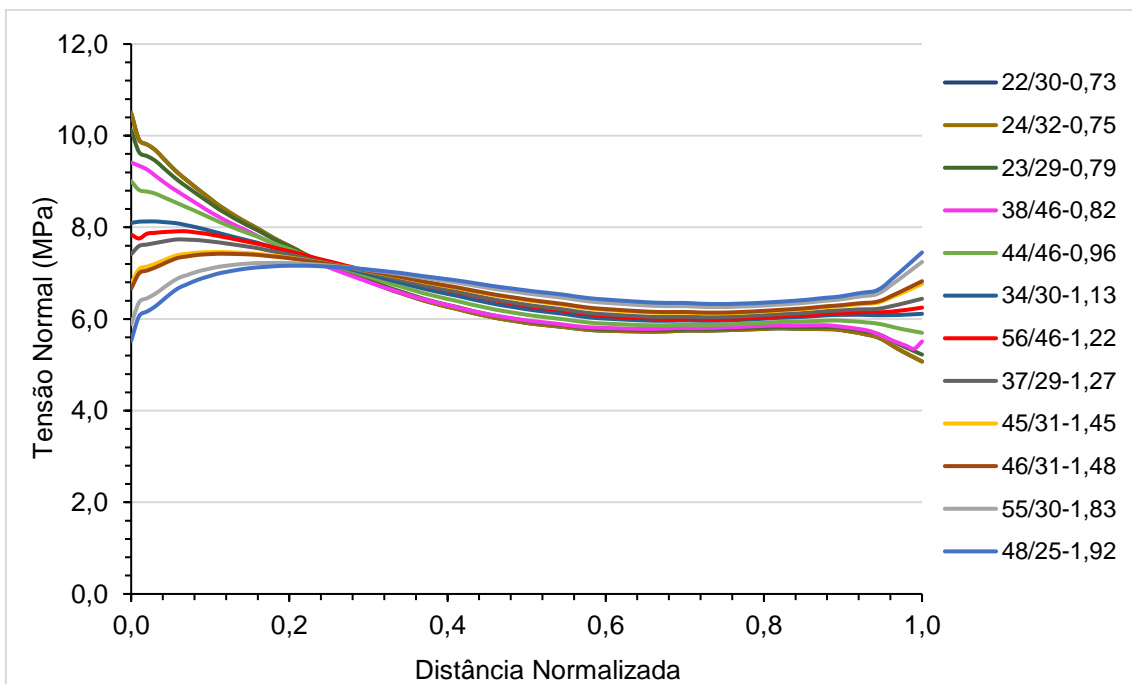


Figura 4.31 - Tensões normais para as séries do *slant-shear* inclinado simuladas para uma carga de 200 kN.

Este estudo foi feito com o intuito de avaliar o comportamento de ambos os corpos-de-prova, o *slant shear* reto e o inclinado ou modificado.

Avaliando visualmente as curvas plotadas nas Figuras 4.22 à 4.25, nota-se diferenças nas formas e na magnitude das tensões tangenciais e normais calculadas na interface de cisalhamento. Fica evidente a variabilidade destas grandezas ao longo da interface para os corpos-de-prova simulados. No caso do *slant shear* reto foi constatado que isto ocorre devido à diferença de resistência dos concretos do substrato e do complemento, ou seja, diferenças entre os módulos de elasticidade de ambas as partes do corpo-de-prova.

Nota-se que para o *slant shear* reto, levando em conta na simulação que a base inferior do corpo-de-prova é indeslocável, os valores de tensões tangenciais e normais do lado esquerdo foram menores quando o substrato possuía maior resistência e rigidez. E aqueles de substrato com resistência e rigidez menores, apresentaram maiores valores de tensão, com comportamento espelhado quando comparado ao primeiro caso. Para a borda do lado direito, considerando as mesmas condições, o comportamento foi oposto, e apresentou valores contrários.

Para a série 44/46-0,96 os valores de tensões apresentaram pequenas variações devido ao fato de terem resistências próximas. Na borda esquerda foi obtida uma diferença de tensões tangenciais e normais de 77% relativa ao valor máximo.

Para os corpos-de-prova do *slant shear* inclinado ou modificado, a variação das tensões tangenciais e normais também é evidenciado. Nota-se que, para os corpos-de-prova onde as relações de resistência à compressão do concreto do substrato e o complemento foi maior que 1,0, houve menor variação das tensões obtidas na borda esquerda e direita dos corpos-de-prova. Diferente do acontecido no *slant shear* reto. Quando a relação foi menor que 1,0 e ao mesmo tempo próximas, apresentaram as maiores diferenças, sendo esta apresentada na série 22/30-0,73 com valores de 42% e 47% para as tensões tangenciais e normais, respectivamente.

No ensaio de *slant shear* modificado foram obtidos valores menores de diferença entre as tensões tangenciais e normais máximas e mínimas, com valor de 42%. Isto evidencia que, independentemente da rigidez do corpo-de-prova o

*slant shear* modificado apresenta uma menor variabilidade das tensões na interface avaliada.

A relação média entre as tensões tangenciais e normais no *slant shear* reto foi de aproximadamente 1,73 e no inclinado de aproximadamente 1. Observa-se que, para todos os corpos-de-prova simulados, as tensões tangenciais e normais tiveram um ponto com o mesmo valor. Para ambos os modelos, as tensões tangencias ocorrem a 0,45 da distância normalizada, com valor de 5,63 MPa e 6,92 MPa, para os modelos reto e inclinado, respectivamente, sendo superior em 18,2% o *slant shear* inclinado ou modificado.

O ponto de tensão normal igual ocorre a 0,23 e 0,26 da distância normalizada, com valores de 3,30 MPa e 7,1 MPa para os modelos reto e inclinado, respectivamente. Quando comparado aos valores máximos de tensões tangencias na borda esquerda, o *slant shear* reto forneceu valor superior em 28,5%, em relação ao inclinado.

A determinação das tensões tangenciais últimas foram calculadas usando dois procedimentos. O primeiro através da Teoria da Elasticidade do Meio Contínuo e o segundo por meio da simulação no Abaqus® V-6.0, utilizando Elementos Finitos, com as configurações supracitadas.

Quando aplicada a Teoria da Elasticidade foi considerado um estado plano de tensões (2D). As tensões biaxiais são comumente utilizadas para análise de elementos no qual duas dimensões predominam com relação a outra. Seja, então, o corpo-de-prova com tensões normais e tangenciais atuando sob ele, a Figura 4.26 representa o corpo-de-prova do *slant shear* modificado em um plano genérico no eixo z.

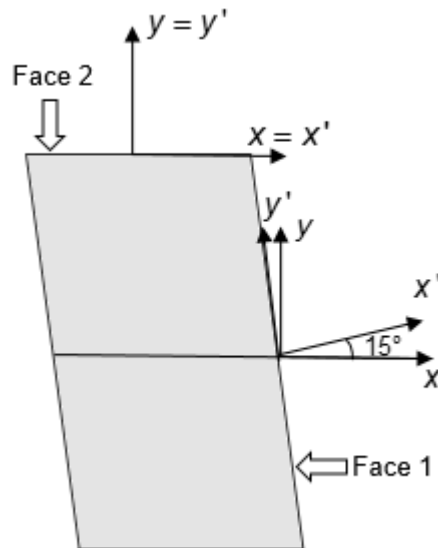


Figura 4.32 - Tensões no estado plano para o corpo-de-prova do tipo *slant shear* modificado.

As Equações 4.1, 4.2 e 4.3, foram utilizadas para levar em conta as tensões atuantes no plano  $(x',y')$ , sendo,  $\sigma_{x'x'}, \sigma_{y'y'}, \tau_{x'y'}$ ,

$$\sigma_{x'x'} = \cos^2 \alpha \cdot \sigma_x + \text{sen}^2 \alpha \cdot \sigma_y + 2 \text{sen} \alpha \cdot \cos \alpha \tau_{xy} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{y'y'} = \text{sen}^2 \alpha \cdot \sigma_x + \cos^2 \alpha \cdot \sigma_y - 2 \text{sen} \alpha \cdot \cos \alpha \tau_{xy} \quad (4.2)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{1}{2} \text{sen} 2\alpha \cdot \sigma_x + \frac{1}{2} \text{sen} 2\alpha \cdot \sigma_y + \cos 2\alpha \cdot \tau_{xy} \quad (4.3)$$

Levando em conta a Figura 4.26 para a Equação 4.1 e 4.3 na Face A, tem-se  $\alpha = 15^\circ$  e, para Equação 4.2 na Face 2, tem-se  $\alpha = 0$ . Sendo  $\sigma_{x'x'}, \tau_{x'y'}$  igual a zero, obtém-se as relações mostradas nas Equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$\sigma_x = 0,07179 \sigma_y \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = -0,2679 \sigma_y \quad (4.5)$$

$$\sigma_y = -\frac{P_u}{A_{\text{ellipse}}} \quad (4.6)$$

sendo,

$P_u$  , a força última resultante;

$A_{\text{ellipse}}$  , a área de aplicação da força, que no caso do corpo-de-prova *slant shear* modificado, é a área da elipse (15936,98 mm<sup>2</sup>).

As tensões normais e cisalhantes determinadas pela Equações 4.4, 4.5 e 4.6 representam o estado tensional para qualquer ponto do corpo-de-prova analisado. Com estes valores foram obtidas as resultantes para a interface inclinada usando as Equações 4.7, 4.8 e 4.9.

$$\rho_x = l\sigma_x + m\tau_{yx} + n\tau_{zx} \quad (4.7)$$

$$\rho_y = l\tau_{xy} + m\sigma_y + n\tau_{zy} \quad (4.8)$$

$$\rho_z = l\tau_{xz} + m\tau_{yz} + n\sigma_z \quad (4.9)$$

Os valores de l,m e n, e nas Equações 4.7, 4.8 e 4.9 representam os cossenos diretores, sendo  $l = \cos(N,x)$ ,  $m = \cos(N,y)$  e  $n = \cos(N,z)$ , determinados para encontrar o vetor resultante de tensão normal ao plano inclinado ( $\rho_N$ ), mostrado na (4.10).

$$\rho_N = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2} \quad (4.10)$$

Considerando a interface onde atua  $\rho_N$ , esta foi obtida através da Equação 4.11, e a componente cisalhante na interface é calculada através da Equação 4.12.



$$\sigma_N = l\rho_x + m\rho_y + n\rho_z \quad (4.11)$$

$$\tau_N^2 = \rho_N^2 - \sigma_N^2 \quad (4.12)$$

O procedimento de cálculo das tensões normais e cisalhantes na interface foram realizadas utilizando o Abaqus® V-6.0 e foi realizada usando o modelo definido anteriormente. Cada corpo-de-prova foi simulado considerando a carga de ruptura obtida do ensaio de *slant shear*, considerando as propriedades dos materiais do substrato e complemento, para levar em conta a concentração de tensões nas extremidades da interface dos corpos-de-prova.

O programa forneceu para cada nó da malha de elementos finitos considerada, os valores do tensor de tensões com seus nove componentes. A partir destes tensores para os nós pertencentes ao plano inclinado ou interface, foram utilizadas as Equações 4.7 a 4.12, sendo assim determinadas as tensões normais e cisalhantes resistentes neste plano.

Os valores individuais, médios, desvio padrão e o coeficiente de variação obtido para a resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova no ensaio de *slant shear* são mostrados nas Tabela 4.11 à 4.22. Estes foram obtidos considerando a Teoria de Elasticidade do Meio Contínuo (2D) e análise numérica (3D), para as diferentes condições de rugosidade da superfície da interface e diferentes tipos de concreto adicionado. Os valores obtidos da simulação numérica apresentados são os máximos obtidos no plano inclinado, ou seja, na interface.

A partir deste item, os resultados considerados para as análises foram os valores obtidos através da simulação numérica, uma vez que levando em conta a rigidez dos concretos utilizados pôde-se obter valores mais fiáveis.

**Tabela 4.11 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série AR-AR.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade						
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	
1-AR-AR-L	Adesiva	291,0	13,10		13,18					9,78		9,79			
2-AR-AR-L	Adesiva	316,0	14,23	14,66	14,31	14,74	1,81	12,28	10,62	10,94	10,63	10,95	1,35	12,33	
3-AR-AR-L	Adesiva	369,5	16,64		16,73				12,42		12,43				
1-AR-AR-V	Adesiva	302,5	13,61		13,68				10,16		10,17				
2-AR-AR-V	Adesiva	308,7	13,9	13,69	13,98	13,76	0,19	1,38	10,38	10,22	10,38	10,22	0,14	1,37	
3-AR-AR-V	Adesiva	300,8	13,55		13,62				10,11		10,12				
1-AR-AR-R1	Adesiva	257,2	11,26		11,32				8,40		8,41				
2-AR-AR-R1	Adesiva	291,7	11,78	11,27	11,84	11,33	0,51	4,50	8,79	8,41	8,80	8,42	0,38	4,51	
3-AR-AR-R1	Adesiva	297,0	10,77		10,83				8,04		8,05				
1-AR-AR-R2	Adesiva	250,0	11,58		11,65				8,65		8,65				
2-AR-AR-R2	Coesiva	261,5	13,14	12,70	13,21	12,77	0,98	7,67	9,81	9,48	9,81	9,49	0,73	7,69	
3-AR-AR-R2	Adesiva	239,2	13,37		13,45				9,98		9,99				
1-AR-AR-R3	Adesiva	246,0	11,08		11,14				8,27		8,28				
2-AR-AR-R3	Coesiva	331,0	14,91	12,87	14,99	12,94	1,94	14,99	11,13	9,60	11,13	9,61	1,44	14,98	
3-AR-AR-R3	Adesiva	280,2	12,62		12,69				9,42		9,43				

**Tabela 4.12 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-25%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade						
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	
1-AR-25%-L	Coesiva	269	10,64		10,56					9,05		9,05			
2-AR-25%-L	Coesiva	273	10,8	10,97	10,72	10,88	0,43	3,95	9,18	9,32	9,18	9,32	0,37	3,97	
3-AR-25%-L	Adesiva	289,5	11,46		11,37				9,73		9,74				
1-AR-25%-V	Adesiva	238	9,42		9,35				8,00		8,01				
2-AR-25%-V	Adesiva	233	9,22	9,18	9,15	9,11	0,26	2,85	7,83	7,80	7,84	7,80	0,22	2,82	
3-AR-25%-V	Adesiva	225	8,9		8,84				7,56		7,57				
1-AR-25%-R1	Adesiva	233,2	9,23		9,16				7,84		7,84				
2-AR-25%-R1	Coesiva	194,7	7,7	8,25	7,65	8,19	0,84	10,26	6,55	7,01	6,55	7,01	0,72	10,27	
3-AR-25%-R1	Coesiva	197,5	7,82		7,76				6,64		6,64				
1-AR-25%-R2	Adesiva	246,5	9,75		9,68				8,29		8,29				
2-AR-25%-R2	Adesiva	235	9,3	9,95	9,23	9,87	0,76	7,70	7,90	8,45	7,91	8,46	0,65	7,68	
3-AR-25%-R2	Adesiva	272,7	10,79		10,71				9,17		9,17				
1-AR-25%-R3	Adesiva	287,7	11,38		11,3				9,67		9,68				
2-AR-25%-R3	Coesiva	235,2	9,31	10,46	9,24	10,38	1,05	10,12	7,91	8,89	7,91	8,89	0,90	10,12	
3-AR-25%-R3	Adesiva	270	10,68		10,6				9,08		9,08				

**Tabela 4.13 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-50%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-AR-50%-L	Adesiva	236	8,55		8,81				7,94		7,94			
2-AR-50%-L	Adesiva	230,2	8,34	8,16	8,59	8,41	0,52	6,18	7,74	7,57	7,74	7,58	0,47	6,20
3-AR-50%-L	Adesiva	209,5	7,59		7,82				7,04		7,05			
1-AR-50%-V	Coesiva	169	6,12		6,31				5,68		5,69			
2-AR-50%-V	Coesiva	158,7	5,75	5,77	5,92	5,94	0,36	6,06	5,33	5,35	5,34	5,36	0,32	5,97
3-AR-50%-V	Adesiva	150,2	5,44		5,6				5,05		5,05			
1-AR-50%-R1	Coesiva	225,9	8,18		8,43				7,59		7,60			
2-AR-50%-R1	Coesiva	230,7	8,36	8,32	8,61	8,57	0,12	1,40	7,75	7,72	7,76	7,73	0,11	1,42
3-AR-50%-R1	Adesiva	232,5	8,42		8,67				7,81		7,82			
1-AR-50%-R2	Coesiva	223	8,08		8,32				7,50		7,50			
2-AR-50%-R2	Coesiva	228,7	8,29	8,40	8,53	8,65	0,40	4,62	7,69	7,79	7,69	7,80	0,37	4,74
3-AR-50%-R2	Coesiva	244	8,84		9,1				8,20		8,21			
1-AR-50%-R3	Coesiva	245,1	8,88		9,14				8,24		8,25			
2-AR-50%-R3	Adesiva	290,2	10,51	9,03	10,83	9,30	1,45	15,59	9,75	8,38	9,76	8,39	1,31	15,61
3-AR-50%-R3	Adesiva	212,7	7,71		7,94				7,15		7,16			

**Tabela 4.14 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo slant shear para a série AR-75%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade						
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	
1-AR-75%-L	Adesiva	189,2	7,06		6,88					6,36		6,36			
2-AR-75%-L	Adesiva	221,2	8,25	7,10	8,04	6,92	1,11	16,04	7,44	6,40	7,44	6,40	1,02	15,94	
3-AR-75%-L	Coesiva	160,5	5,99		5,83				5,39		5,40				
1-AR-75%-V	Adesiva	231	8,62		8,4				7,76		7,77				
2-AR-75%-V	Coesiva	180,2	6,72	7,32	6,55	7,13	1,10	15,43	6,06	6,59	6,06	6,60	1,02	15,45	
3-AR-75%-V	Adesiva	177	6,61		6,43				5,95		5,95				
1-AR-75%-R1	Coesiva	210,4	7,85		7,65				7,07		7,08				
2-AR-75%-R1	Coesiva	216,2	8,07	7,80	7,86	7,60	0,29	3,82	7,27	7,03	7,27	7,03	0,27	3,84	
3-AR-75%-R1	Coesiva	200,5	7,48		7,29				6,74		6,74				
1-AR-75%-R2	Coesiva	207,7	7,75		7,55				6,98		6,99				
2-AR-75%-R2	Coesiva	222,7	8,31	8,48	8,1	8,27	0,81	9,79	7,49	7,64	7,49	7,65	0,75	9,80	
3-AR-75%-R2	Coesiva	251,7	9,39		9,15				8,46		8,47				
1-AR-75%-R3	Coesiva	232,5	8,68		8,45				7,81		7,82				
2-AR-75%-R3	Coesiva	248,7	9,28	8,89	9,04	8,66	0,33	3,81	8,36	8,01	8,37	8,01	0,31	3,87	
3-AR-75%-R3	Coesiva	233,5	8,71		8,49				7,85		7,85				

**Tabela 4.15 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série AR-100%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
1-AR-100%-L	Adesiva	161,5	6,02		6,23					5,43		5,43		
2-AR-100%-L	Adesiva	154	5,74	6,31	5,94	6,53	0,79	12,10	5,18	5,69	5,18	5,70	0,69	12,11
3-AR-100%-L	Adesiva	192,5	7,17		7,43				6,47		6,48			
1-AR-100%-V	Adesiva	174,7	6,51		6,74				5,87		5,88			
2-AR-100%-V	Adesiva	175	6,51	6,54	6,74	6,77	0,05	0,74	5,88	5,90	5,89	5,91	0,04	0,68
3-AR-100%-V	Adesiva	177	6,6		6,83				5,95		5,95			
1-AR-100%-R1	Coesiva	190,7	7,11		7,36				6,41		6,42			
2-AR-100%-R1	Adesiva	177	6,6	6,74	6,83	6,98	0,34	4,87	5,95	6,08	5,95	6,08	0,29	4,77
3-AR-100%-R1	Coesiva	174,7	6,51		6,74				5,87		5,88			
1-AR-100%-R2	Coesiva	180	6,71		6,95				6,05		6,06			
2-AR-100%-R2	Coesiva	176	6,56	6,81	6,79	7,06	0,33	4,67	5,92	6,15	5,92	6,15	0,29	4,72
3-AR-100%-R2	Adesiva	192,5	7,17		7,43				6,47		6,48			
1-AR-100%-R3	Coesiva	182,7	6,81		7,05				6,14		6,15			
2-AR-100%-R3	Coesiva	191	7,12	6,96	7,37	7,20	0,16	2,22	6,42	6,28	6,43	6,28	0,14	2,23
3-AR-100%-R3	Adesiva	186,4	6,95		7,19				6,27		6,27			

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade								
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)			
1-AR-100%-L	Adesiva	161,5	6,02		6,31	6,23	6,53	0,79	12,09		5,43		5,69	5,43	5,70	0,69	12,06

2-AR-100%-L	Adesi va	154	5,74	5,94				5,18	5,18					
3-AR-100%-L	Adesi va	192,5	7,17	7,43				6,47	6,48					
1-AR-100%-V	Adesi va	174,7	6,51	6,74				5,87	5,88					
2-AR-100%-V	Adesi va	175	6,51	6,74	6,54	6,77	0,05	0,77	5,88	5,90	5,89	5,91	0,04	0,71
3-AR-100%-V	Adesi va	177	6,6	6,83				5,95	5,95					
1-AR-100%-R1	Coesi va	190,7	7,11	7,36				6,41	6,42					
2-AR-100%-R1	Adesi va	177	6,6	6,83	6,74	6,98	0,34	4,80	5,95	6,08	5,95	6,08	0,29	4,78
3-AR-100%-R1	Coesi va	174,7	6,51	6,74				5,87	5,88					
1-AR-100%-R2	Coesi va	180	6,71	6,95				6,05	6,06					
2-AR-100%-R2	Coesi va	176	6,56	6,79	6,81	7,06	0,33	4,72	5,92	6,15	5,92	6,15	0,29	4,71
3-AR-100%-R2	Adesi va	192,5	7,17	7,43				6,47	6,48					
1-AR-100%-R3	Coesi va	182,7	6,81	7,05	6,96	7,20	0,16	2,23	6,14	6,28	6,15	6,28	0,14	2,23
2-AR-100%-R3	Coesi va	191	7,12	7,37				6,42	6,43					

3-AR- 100%- R3	Adesi va	186,4	6,95	7,19	6,27	6,27
----------------------	-------------	-------	------	------	------	------



**Tabela 4.16 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 25%-25%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade						
			$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	
1-25%-25%-L	Adesiva	185	9,08		9,18					6,22		6,22			
2-25%-25%-L	Adesiva	188,2	9,24	9,06	9,34	9,16	0,19	2,07	6,33	6,21	6,33	6,21	0,13	2,09	
3-25%-25%-L	Adesiva	180,7	8,87		8,97				6,07		6,08				
1-25%-25%-V	Adesiva	302,7	14,87		15,03				10,17		10,18				
2-25%-25%-V	Adesiva	292,5	14,35	13,74	14,52	13,90	1,54	11,08	9,83	9,41	9,84	9,42	1,05	11,15	
3-25%-25%-V	Adesiva	244,5	12		12,14				8,22		8,22				
1-25%-25%-R1	Adesiva	216	10,6		10,72				7,26		7,27				
2-25%-25%-R1	Coesiva	198	9,72	10,49	9,83	10,61	0,74	6,97	6,66	7,19	6,66	7,19	0,50	6,95	
3-25%-25%-R1	Coesiva	227,5	11,16		11,29				7,65		7,65				
1-25%-25%-R2	Coesiva	233,9	11,48		11,61				7,86		7,87				
2-25%-25%-R2	Adesiva	254,5	12,49	11,31	12,64	11,44	1,30	11,36	8,55	7,74	8,56	7,75	0,88	11,35	
3-25%-25%-R2	Coesiva	202,7	9,95		10,06				6,81		6,82				
1-25%-25%-R3	Coesiva	240,1	11,78		11,92				8,07		8,08				
2-25%-25%-R3	Adesiva	236,7	11,62	11,86	11,75	12,00	0,29	2,42	7,96	8,12	7,96	8,13	0,20	2,46	
3-25%-25%-R3	Adesiva	248,2	12,18		12,32				8,34		8,35				

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade							
			$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)		
1-25%-25%-L	Adesiva	185	9,08		9,06	9,18	9,16	0,19	2,03	6,22		6,21	6,22	6,21	0,13	2,04

2-25%- 25%-L	Ades iva	188, 2	9,24		9,34					6,33		6,33			
3-25%- 25%-L	Ades iva	180, 7	8,87		8,97					6,07		6,08			
1-25%- 25%-V	Ades iva	302, 7	14,87		15,0 3					10,17		10,1 8			
2-25%- 25%-V	Ades iva	292, 5	14,35	13,7 4	14,5 2	13,9 0	1,54	11,10		9,83	9,41	9,84	9,42	1,05	11,10
3-25%- 25%-V	Ades iva	244, 5	12		12,1 4					8,22		8,22			
1-25%- 25%-R1	Ades iva	216	10,6		10,7 2					7,26		7,27			
2-25%- 25%-R1	Coes iva	198	9,72	10,4 9	9,83	10,6 1	0,74	6,93		6,66	7,19	6,66	7,19	0,50	6,95
3-25%- 25%-R1	Coes iva	227, 5	11,16		11,2 9					7,65		7,65			
1-25%- 25%-R2	Coes iva	233, 9	11,48		11,6 1					7,86		7,87			
2-25%- 25%-R2	Ades iva	254, 5	12,49	11,3 1	12,6 4	11,4 4	1,30	11,36		8,55	7,74	8,56	7,75	0,88	11,32
3-25%- 25%-R2	Coes iva	202, 7	9,95		10,0 6					6,81		6,82			
1-25%- 25%-R3	Coes iva	240, 1	11,78		11,9 2					8,07		8,08			
2-25%- 25%-R3	Ades iva	236, 7	11,62	11,8 6	11,7 5	12,0 0	0,29	2,44		7,96	8,12	7,96	8,13	0,20	2,44
3-25%- 25%-R3	Ades iva	248, 2	12,18		12,3 2					8,34		8,35			

**Tabela 4.17 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 25%-50%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-25%-50%-L	Adesiva	203,7	8,28		8,25					6,85		6,85		
2-25%-50%-L	Coesiva	212,7	8,65	8,85	8,62	8,82	0,69	7,82	7,15	7,32	7,16	7,32	0,57	7,79
3-25%-50%-L	Adesiva	236,5	9,61		9,58				7,95		7,96			
1-25%-50%-V	Coesiva	141	5,73		5,71				4,74		4,74			
2-25%-50%-V	Coesiva	152,2	6,19	6,12	6,17	6,10	0,36	5,90	5,12	5,06	5,12	5,06	0,30	5,93
3-25%-50%-V	Adesiva	158,4	6,44		6,42				5,32		5,33			
1-25%-50%-R1	Coesiva	176	7,15		7,13				5,92		5,92			
2-25%-50%-R1	Coesiva	156,7	6,37	7,07	6,35	7,05	0,67	9,50	5,27	5,85	5,27	5,86	0,55	9,39
3-25%-50%-R1	Coesiva	189,5	7,7		7,68				6,37		6,37			
1-25%-50%-R2	Coesiva	185,7	7,55		7,52				6,24		6,25			
2-25%-50%-R2	Adesiva	178,4	7,25	7,24	7,23	7,22	0,31	4,29	6,00	5,99	6,00	5,99	0,26	4,34
3-25%-50%-R2	Coesiva	170,5	6,93		6,91				5,73		5,74			
1-25%-50%-R3	Coesiva	223,8	9,1		9,07				7,52		7,53			
2-25%-50%-R3	Adesiva	216,2	8,79	8,95	8,76	8,92	0,16	1,79	7,27	7,40	7,27	7,41	0,13	1,75
3-25%-50%-R3	Coesiva	220,7	8,97		8,94				7,42		7,42			

**Tabela 4.18 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 25%-75%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-25%-75%-L	Adesiva	153	5,68		5,52					5,15		5,15		
2-25%-75%-L	Adesiva	185,2	6,87	6,64	6,68	6,45	0,84	13,02	6,23	6,01	6,23	6,01	0,78	12,98
3-25%-75%-L	Adesiva	198,2	7,36		7,15				6,66		6,67			
1-25%-75%-V	Adesiva	221	8,2		7,98				7,43		7,43			
2-25%-75%-V	Adesiva	218,5	8,11	7,81	7,89	7,60	0,58	7,63	7,34	7,08	7,35	7,08	0,54	7,63
3-25%-75%-V	Coesiva	192,2	7,13		6,94				6,46		6,47			
1-25%-75%-R1	Coesiva	187	6,94		6,75				6,29		6,29			
2-25%-75%-R1	Coesiva	172,2	6,39	6,43	6,22	6,25	0,48	7,68	5,79	5,82	5,79	5,83	0,45	7,72
3-25%-75%-R1	Coesiva	160,5	5,96		5,79				5,39		5,40			
1-25%-75%-R2	Adesiva	187,5	6,96		6,77				6,30		6,31			
2-25%-75%-R2	Coesiva	172,2	6,39	6,68	6,22	6,50	0,28	4,31	5,79	6,05	5,79	6,05	0,26	4,30
3-25%-75%-R2	Coesiva	180,1	6,69		6,5				6,05		6,06			
1-25%-75%-R3	Adesiva	205,5	7,63		7,42				6,91		6,91			
2-25%-75%-R3	Adesiva	235	8,72	8,20	8,48	7,98	0,53	6,64	7,90	7,42	7,91	7,42	0,50	6,74
3-25%-75%-R3	Coesiva	222,4	8,26		8,03				7,44		7,45			

**Tabela 4.19 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 25%-100%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-25%-100%-L	Adesiva	113,6	4,4		4,33					3,82		3,82		
2-25%-100%-L	Adesiva	116,7	4,52	4,40	4,45	4,33	0,12	2,65	3,92	3,82	3,93	3,82	0,10	2,64
3-25%-100%-L	Adesiva	110,7	4,28		4,22				3,72		3,72			
1-25%-100%-V	Adesiva	179,7	6,95		6,85				6,04		6,05			
2-25%-100%-V	Coesiva	202,2	7,82	7,38	7,71	7,27	0,43	5,91	6,80	6,41	6,80	6,42	0,38	5,90
3-25%-100%-V	Coesiva	190,5	7,37		7,26				6,40		6,41			
1-25%-100%-R1	Coesiva	163,8	6,34		6,25				5,51		5,51			
2-25%-100%-R1	Coesiva	155	6	5,98	5,91	5,90	0,36	6,11	5,21	5,20	5,21	5,20	0,32	6,08
3-25%-100%-R1	Coesiva	145	5,61		5,53				4,87		4,88			
1-25%-100%-R2	Adesiva	154,3	5,97		5,88				5,19		5,19			
2-25%-100%-R2	Coesiva	182	7,04	6,24	6,94	6,14	0,70	11,44	6,12	5,42	6,12	5,42	0,62	11,41
3-25%-100%-R2	Coesiva	147,2	5,7		5,61				4,95		4,95			
1-25%-100%-R3	Adesiva	198,2	7,67		7,56				6,66		6,67			
2-25%-100%-R3	Adesiva	147,5	5,71	6,73	5,62	6,63	0,97	14,67	4,96	5,84	4,96	5,85	0,85	14,62
3-25%-100%-R3	Coesiva	175,9	6,81		6,71				5,91		5,92			

**Tabela 4.20 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 100%-50%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{e}d}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{e}d}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-100%-50%-L	Adesiva	170,3	8,94		9,09					5,73		5,73		
2-100%-50%-L	Adesiva	178	9,34	9,16	9,5	9,31	0,21	2,26	5,98	5,87	5,99	5,87	0,13	2,21
3-100%-50%-L	Adesiva	175,2	9,19		9,35				5,89		5,89			
1-100%-50%-V	Adesiva	199,2	10,45		10,63				6,70		6,70			
2-100%-50%-V	Coesiva	207,2	10,87	10,49	11,06	10,67	0,38	3,56	6,96	6,72	6,97	6,72	0,24	3,57
3-100%-50%-V	Coesiva	193,2	10,14		10,31				6,49		6,50			
1-100%-50%-R1	Adesiva	158	8,29		8,43				5,31		5,32			
2-100%-50%-R1	Adesiva	169,2	8,88	9,02	9,03	9,17	0,81	8,83	5,69	5,77	5,69	5,78	0,51	8,82
3-100%-50%-R1	Adesiva	188,2	9,88		10,04				6,33		6,33			
1-100%-50%-R2	Coesiva	170	8,92		9,07				5,71		5,72			
2-100%-50%-R2	Adesiva	182,7	9,59	9,79	9,75	9,96	1,01	10,14	6,14	6,27	6,15	6,28	0,63	10,03
3-100%-50%-R2	Coesiva	207	10,86		11,05				6,96		6,96			
1-100%-50%-R3	Coesiva	177	9,29		9,45				5,95		5,95			
2-100%-50%-R3	Adesiva	195,4	10,25	10,11	10,43	10,28	0,77	7,49	6,57	6,47	6,57	6,48	0,49	7,56
3-100%-50%-R3	Adesiva	205,5	10,78		9,09				5,73		5,73			

**Tabela 4.21 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 100%-75%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade					
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1-100%-75%-L	Adesiva	120,5	6,3		6,41					4,05		4,05		
2-100%-75%-L	Adesiva	129,1	6,75	6,52	6,86	6,63	0,23	3,47	4,34	4,19	4,34	4,20	0,15	3,57
3-100%-75%-L	Adesiva	124,7	6,52		6,63				4,19		4,19			
1-100%-75%-V	Adesiva	170,7	8,93		9,08				5,74		5,74			
2-100%-75%-V	Adesiva	134,2	7,02	7,81	7,14	7,94	1,01	12,72	4,51	5,02	4,51	5,02	0,64	12,75
3-100%-75%-V	Adesiva	143	7,48		7,6				4,81		4,81			
1-100%-75%-R1	Coesiva	148,5	7,77		7,9				4,99		5,00			
2-100%-75%-R1	Coesiva	151,2	7,91	7,89	8,04	8,02	0,11	1,37	5,08	5,07	5,09	5,07	0,07	1,38
3-100%-75%-R1	Coesiva	152,6	7,98		8,11				5,13		5,13			
1-100%-75%-R2	Coesiva	182,7	9,56		9,72				6,14		6,15			
2-100%-75%-R2	Coesiva	154,5	8,08	8,56	8,22	8,70	0,88	10,11	5,19	5,50	5,20	5,50	0,56	10,18
3-100%-75%-R2	Coesiva	153,5	8,03		8,16				5,16		5,16			
1-100%-75%-R3	Coesiva	160	8,37		8,51				5,38		5,38			
2-100%-75%-R3	Coesiva	178,9	9,36	9,12	9,51	9,27	0,67	7,23	6,01	5,86	6,02	5,87	0,43	7,33
3-100%-75%-R3	Coesiva	184,2	9,63		9,79				6,19		6,20			

**Tabela 4.22 - Resistência normal e de cisalhamento dos corpos-de-prova do tipo *slant shear* para a série 100%-100%.**

Corpo-de-prova	Forma de ruptura	Força de ruptura (kN)	Análise Numérica						Teoria da Elasticidade						
			$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{méd}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	
1-100%-100%-L	Adesiva	155,2	7,86		7,97					5,22		5,22			
2-100%-100%-L	Adesiva	172,7	8,74	8,70	8,86	8,82	0,83	9,41	5,80	5,78	5,81	5,78	0,55	9,52	
3-100%-100%-L	Adesiva	187,7	9,5		9,63				6,31		6,31				
1-100%-100%-V	Adesiva	196,4	9,94		10,08				6,60		6,61				
2-100%-100%-V	Adesiva	171,5	8,68	9,97	8,8	10,11	1,33	13,16	5,76	6,62	5,77	6,63	0,87	13,12	
3-100%-100%-V	Coesiva	223	11,29		11,45				7,50		7,50				
1-100%-100%-R1	Coesiva	130,2	6,59		6,68				4,38		4,38				
2-100%-100%-R1	Coesiva	138,5	7,01	6,69	7,11	6,78	0,29	4,28	4,66	4,44	4,66	4,44	0,19	4,28	
3-100%-100%-R1	Adesiva	127,7	6,46		6,55				4,29		4,30				
1-100%-100%-R2	Adesiva	157	7,95		8,06				5,28		5,28				
2-100%-100%-R2	Coesiva	158,7	8,03	7,85	8,15	7,96	0,25	3,14	5,33	5,21	5,34	5,22	0,16	3,07	
3-100%-100%-R2	Coesiva	149,7	7,58		7,68				5,03		5,04				
1-100%-100%-R3	Adesiva	176	8,91		9,03				5,92		5,92				
2-100%-100%-R3	Coesiva	207,2	10,49	9,80	10,63	9,93	0,82	8,26	6,96	6,51	6,97	6,51	0,54	8,29	
3-100%-100%-R3	Coesiva	197,6	10,00		10,14				6,64		6,65				



De maneira geral, para todas as séries dos corpos-de-prova do *slant shear* modificado os valores de resistência da ligação da interface diminuíram quando diminuiu a resistência à compressão do complemento, ou seja, à medida que se utilizou concretos com maiores substituições de agregados leves. Além disso, os corpos-de-prova exibiram maiores valores de resistência quando o concreto do complemento era igual do substrato para as séries AR-AR e 25%-25%.

Quando avaliadas as interfaces rugosas (R1, R2 e R3) nota-se que para todas as séries houve um aumento da resistência à medida que se aumentou a rugosidade. No entanto, observa-se nos resultados obtidos que a ordem de grandeza entre as interfaces rugosas não acarretou aumentos significativos na capacidade de ligação da resistência da ligação.

Para as séries de substrato AR, a interface lisa apresentou na maioria dos casos valores maiores que a interface como vibrada com exceção da série AR-75%. Além disso, quando a diferença de resistência entre o substrato e o complemento eram pequenas (AR-AR e AR-25%), os valores da resistência da ligação da interface lisa foram maiores que as interfaces rugosas. No entanto, esse resultado pode ser justificado pelo fato da ocorrência de rupturas coesivas nas interfaces rugosas que acarretariam em valores superiores aos obtidos.

Para as séries AR-75%, AR-100% e 100%-75%, a resistência de ligação aumentou à medida que aumentou a rugosidade conforme esperado, ou seja, sendo manifestado um menor efeito da coesão devido ao fato da menor resistência do concreto. A Figura 4.33 representa este comportamento para as séries de substrato AR, quando correlacionado os valores da resistência ao cisalhamento com o parâmetro de rugosidade média ( $R_a$ ), uma boa correlação foi obtida para as séries AR-75% e AR-100%.

Ao contrário do substrato AR, para as séries de substrato com 25% e 100% de substituição, os valores da resistência de ligação da interface como vibrada foram maiores do que a interface lisa, com exceção da série 25%-50%. Porém a série 25%-50%-V apresentou duas rupturas coesivas e a 25-50%-V apenas uma, o que provavelmente influenciou para que o comportamento não fosse o mesmo.

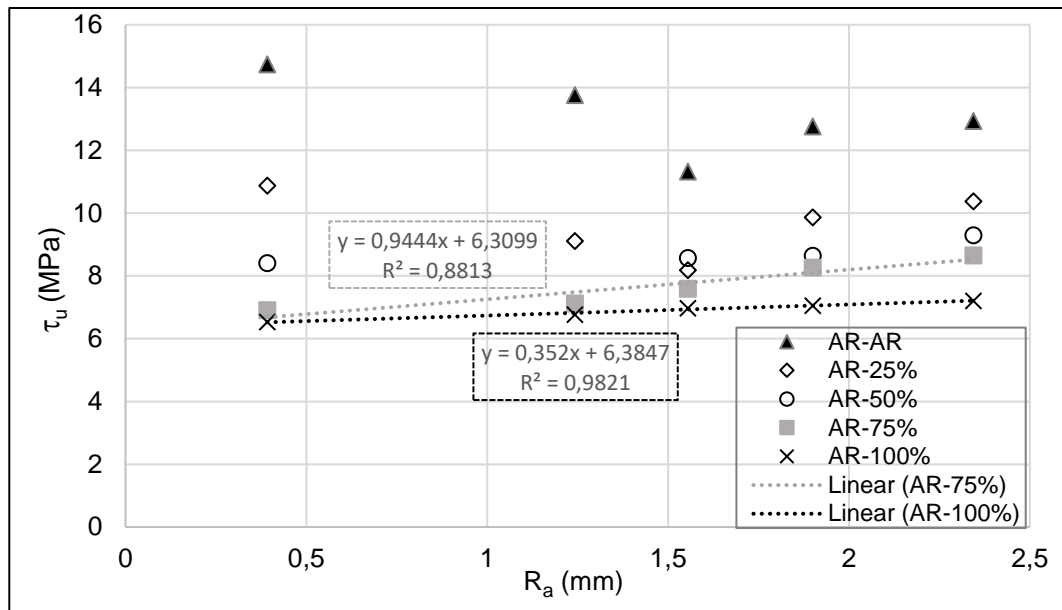


Figura 4.33 - Resistência ao cisalhamento vs rugosidade média para o corpos-de-prova de *slant shear* de substrato AR.

#### 4.3.1.1- Avaliação do efeito da rugosidade da interface nos corpos-de-prova do tipo *slant shear*

Para avaliar o efeito da rugosidade da interface na resistência ao cisalhamento dos corpos-de-prova nos ensaios do tipo *slant shear*, foram plotados os valores obtidos da resistência ao cisalhamento ( $\tau_u$ ) versus o tipo de rugosidade da interface, nomeada neste trabalho como liso (L), vibrado (V) e rugosos (R1, R2 e R3).

As Figuras 4.28 à 4.32 mostram os resultados para as séries com substrato de concreto normal de alta resistência (AR).

Os valores obtidos de resistência ao cisalhamento para cada grupo foram submetidos à análise de variância (ANOVA), complementada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os valores obtidos constam no Anexo B.1.

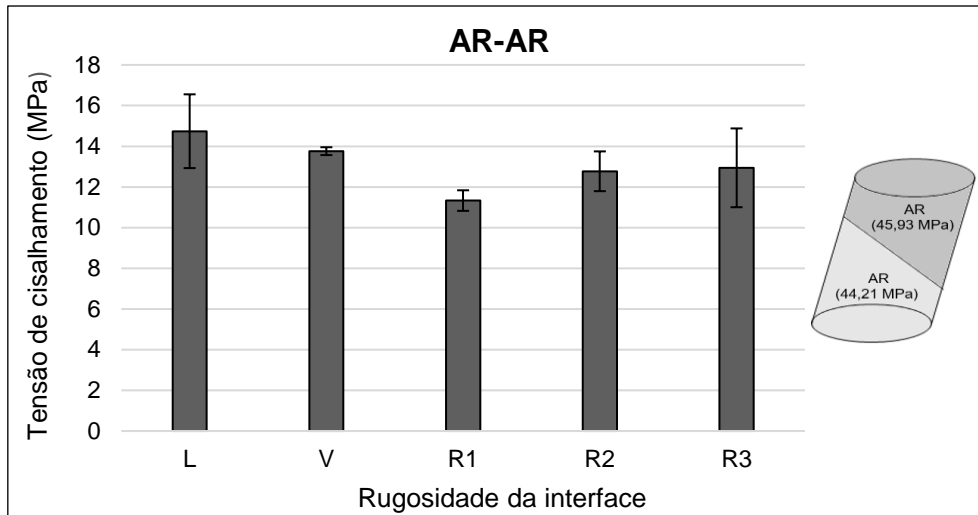


Figura 4.34 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série AR-AR.

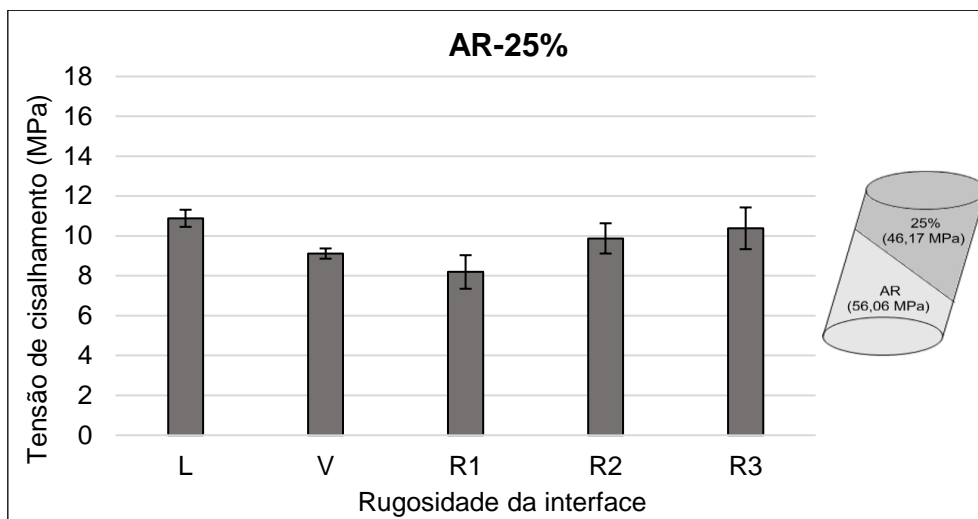


Figura 4.35 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série AR-25%.

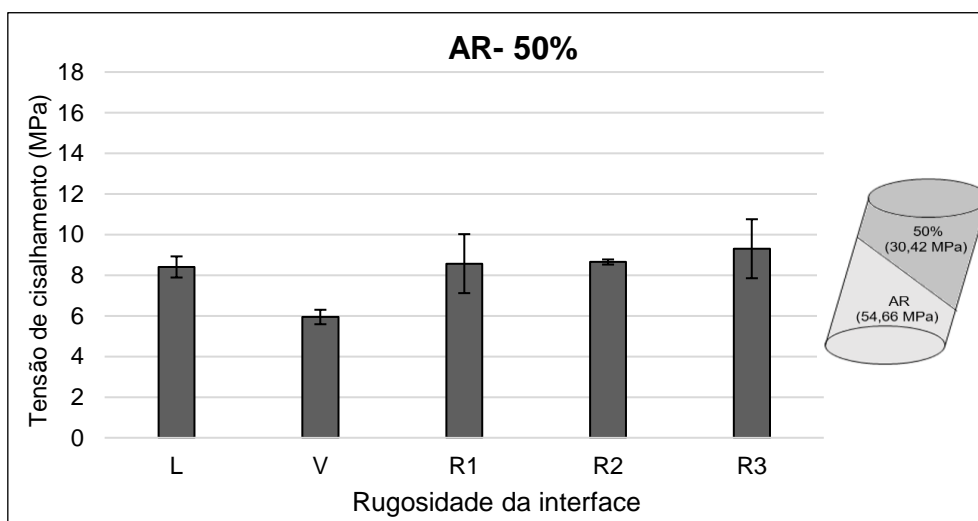
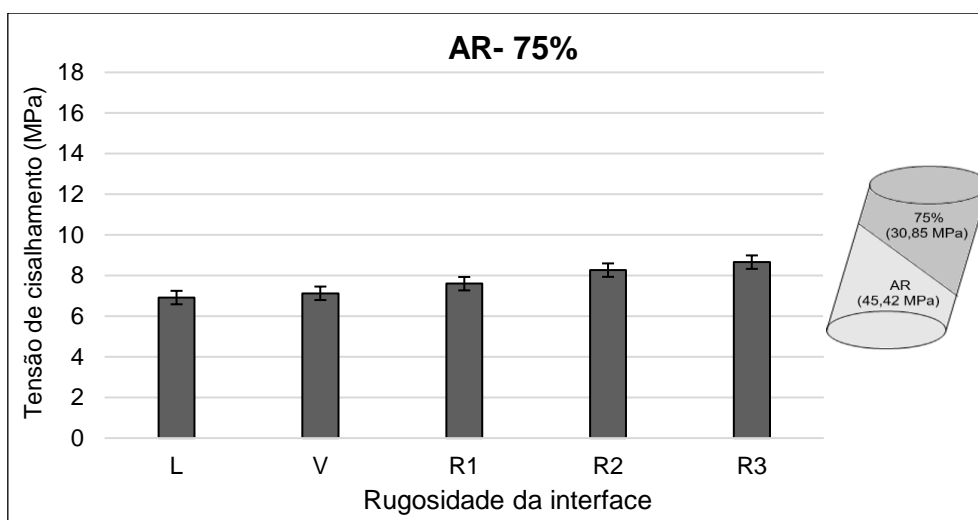
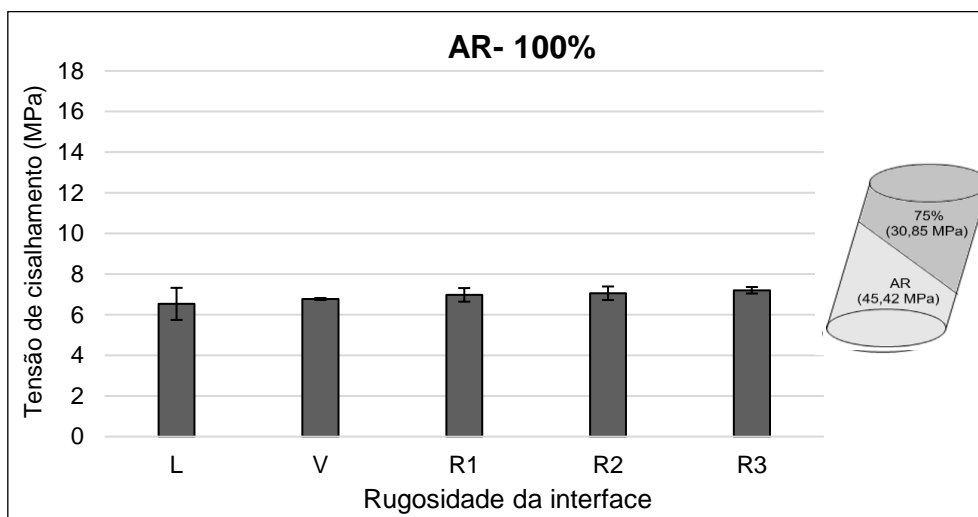


Figura 4.36 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série AR-50%.



**Figura 4.37 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série AR-75%.**



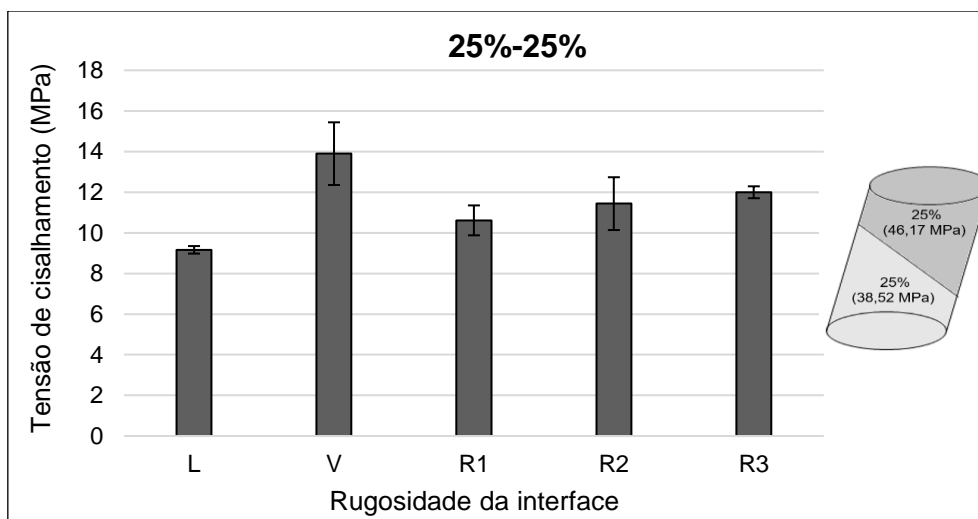
**Figura 4.38 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série AR-100%.**

A análise estatística realizada para avaliar a influência dos diferentes tipos de rugosidade mostrou que, para os corpos-de-prova com substrato de concreto de alta resistência (AR), aqueles que tiveram como complemento concreto de alta resistência (AR), concreto leve com substituição de 75% e 100%, ou seja, as séries AR-AR, AR-75% e AR-100% foram estatisticamente iguais.

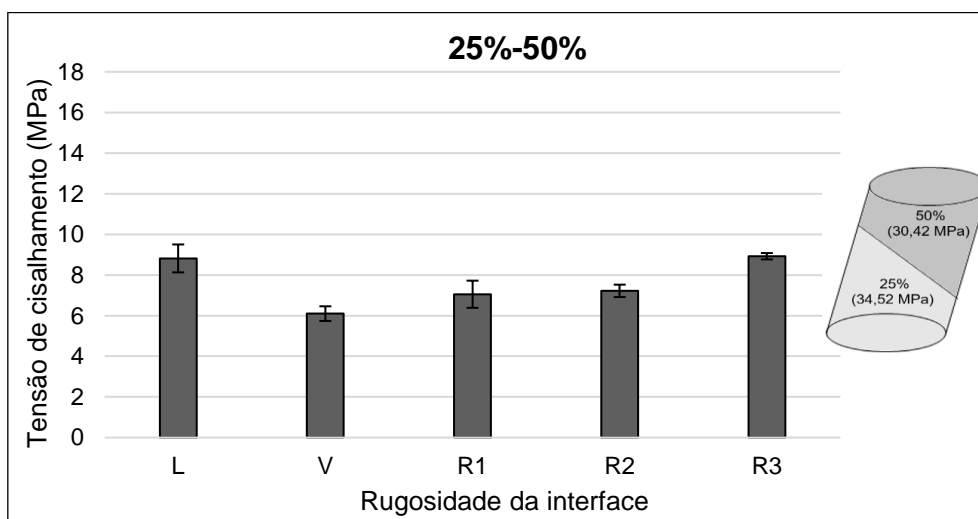
Para a série que apresentava como complemento o concreto leve com substituição de 25%, obteve-se diferenças de valores médios da interface rugosa R1 para a lisa (L) e rugosa (R3), sendo maiores 24,75% e 21,10%, respectivamente.

Na série AR-50%, com interface como vibrada (V), obteve-se diferenças significativas com valores inferiores em relação a todos as outras séries, de 29,30%, 30,65%, 31,29% e 36,12%, quando comparadas com a interfaces L, R1, R2 e R3, respectivamente.

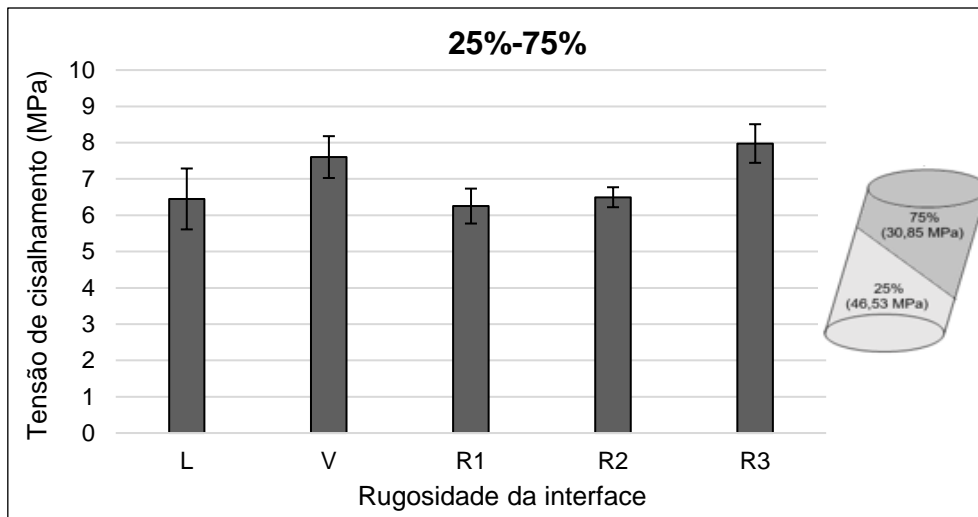
As Figuras 4.33 à 4.36 mostram os resultados para as séries com substrato de 25%.



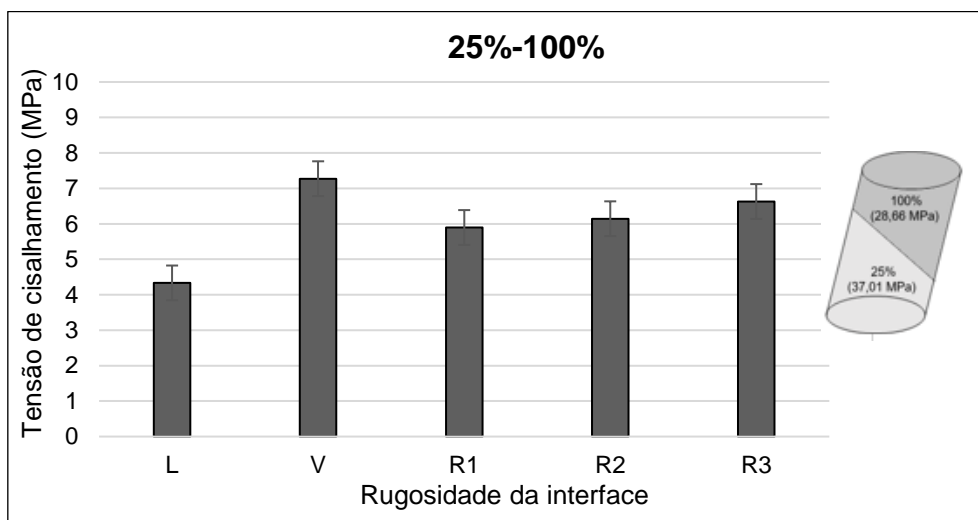
**Figura 4.39 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 25%-25%.**



**Figura 4.40 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 25%-50%.**



**Figura 4.41 - Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 25%-75%.**



**Figura 4.42- Influência da rugosidade da interface dos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 25%-100%.**

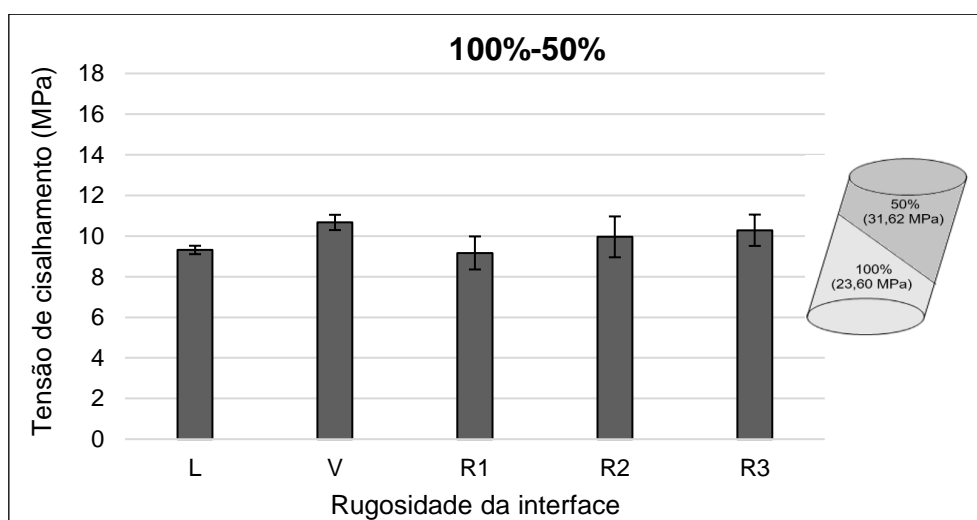
Levando em conta as quatro séries com substrato com concreto leve de 25%, todas apresentaram alguma diferença significativa média entre as rugosidades avaliadas.

Para o complemento de 25% de substituição, a série de interface como vibrado (V) obteve maiores resistências, que a interface lisa (L) e rugosa (R1) com 34,06% e 23,63%, respectivamente. Já nos corpos-de-prova de interface rugosa (R3) apresentaram valores médios de resistência ao cisalhamento 23,62% maior que aqueles de interface (L).

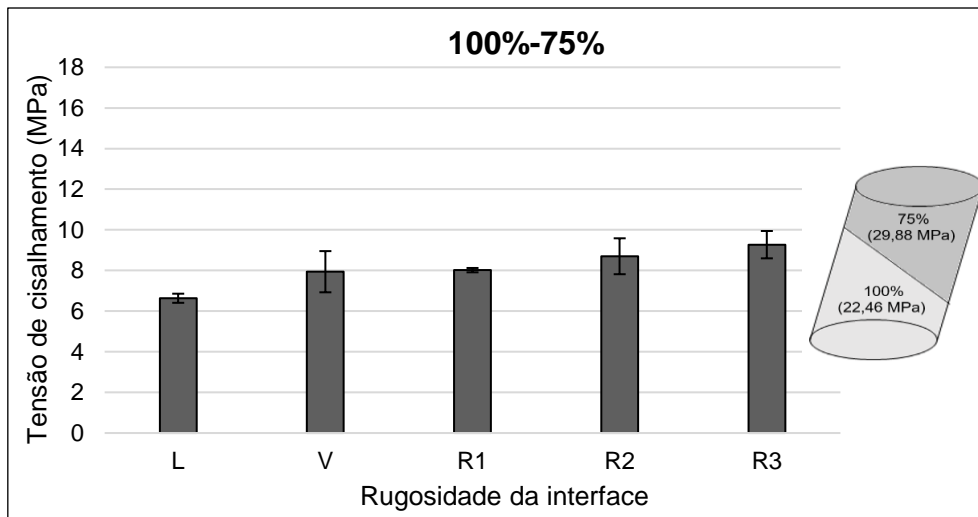
Para a série 25%-50%, os valores médios de resistência ao cisalhamento da série com interfaces lisa (L) e rugosa (R3) foram semelhantes, ambos apresentaram diferenças significativas médias para os demais grupos. A interface lisa apresentou diferenças de 30,81%, 20,00% e 18,11%, superior para as interfaces como vibrada (V), e rugosas (R1 e R2), respectivamente. A interface rugosa (R1) apresentou diferenças de 31,64%, 20,96% e 19,09, superior para as interfaces como vibrada (V) e rugosas (R1 e R2), respectivamente.

Na série de corpos-de-prova com complemento de concreto com 75% de agregado leve, houve diferença significativa média apenas entre a interface rugosa (R3) e a lisa (L) no valor 21,60%. Para o complemento de concreto com 100% de agregado leve, as diferenças significativas basearam-se em função da interface lisa (L) em relação às interfaces como vibrada (V) e rugosas, R2 e R3, com valores superiores de 40,42%, 29,46% e 34,64%. Nessa série, em que se tem uma diferença de resistência à compressão mais significativa entre o substrato e o complemento, pode-se notar que com o aumento da rugosidade a resistência ao cisalhamento também aumentou.

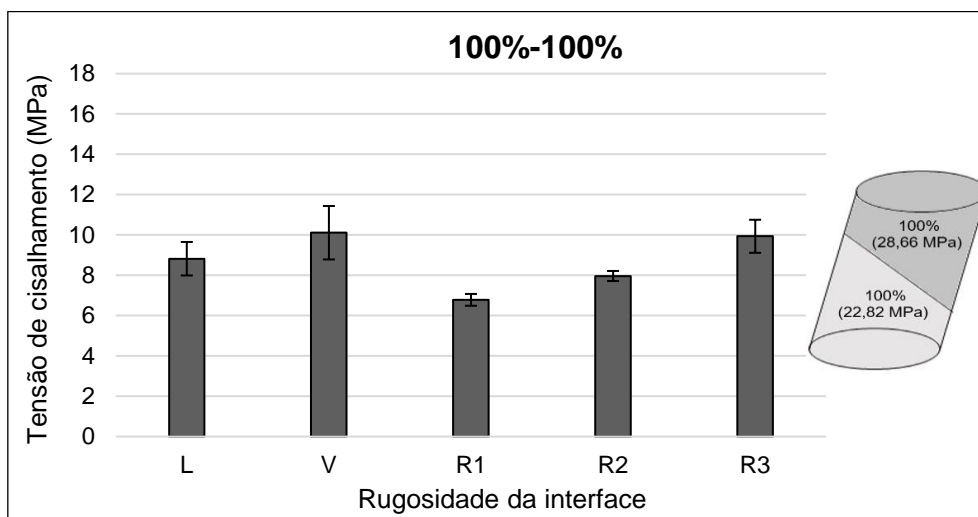
As Figuras 4.37 à 4.39 mostram os resultados para as séries com substrato de 100%.



**Figura 4.43 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 100%-50%.**



**Figura 4.44 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 100%-75%.**



**Figura 4.45 - Influência da rugosidade da interface do corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear* para a série 100%-100%.**

Para o substrato com concreto leve com 100% de substituição por agregado leve, a série de complemento 50% apresentou valores estatisticamente iguais.

Com o complemento de 75%, quando comparada a interface lisa (L) com as interfaces rugosas R2 e R3, esta apresentou diferenças médias de 28,44% e 23,75% inferiores, respectivamente quando comparadas à interface lisa.

Por fim, para o complemento de 100%, a interface rugosa (R1) apresentou valores menores de resistência ao cisalhamento que aquelas com a interface como vibrada (V) e rugosa (R3) em 32,94% e 31,74%, respectivamente.



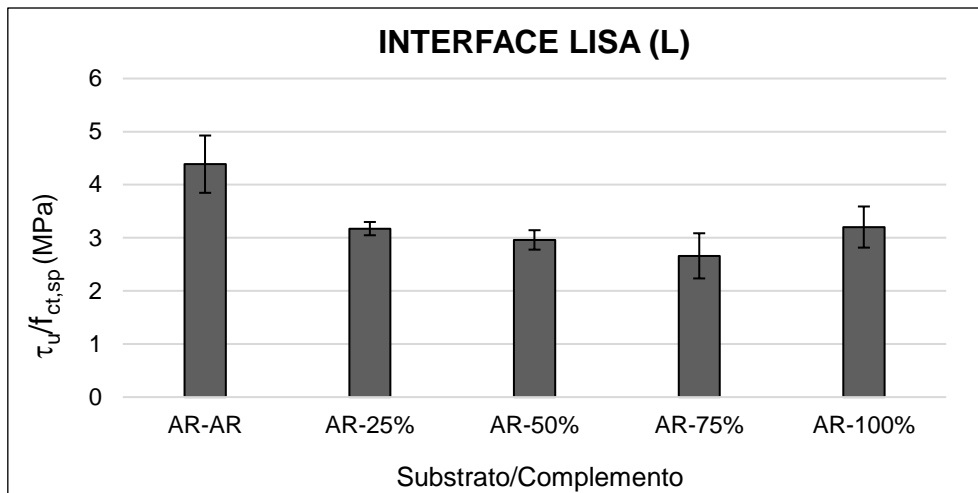
#### 4.3.1.2 - Avaliação do efeito da substituição do agregado leve nos corpos-de-prova no ensaio do tipo *slant shear*

Este item avalia o efeito da substituição do agregado graúdo por leve no complemento dos corpos-de-prova realizados com o ensaio do tipo *slant shear* levando em consideração também o complemento de referência, ou seja, concreto de alta resistência (AR). A análise está diretamente ligada ao efeito da resistência do concreto do complemento. Sendo assim, foram plotados os valores da resistência ao cisalhamento normalizada ( $\tau_u/f_{ct,sp}$ ) *versus* os tipos de complementos existente para cada tipo de ensaio. Para a avaliação, os valores da resistência ao cisalhamento foram normalizados pelo menor valor da resistência à tração por compressão diametral dos concretos correspondentes à série, pois assim foi possível avaliar a influência da composição do concreto no complemento, seja o concreto convencional de alta resistência (AR) ou os concretos realizados com diferentes porcentagens de substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida (25%, 50%, 75% e 100%).

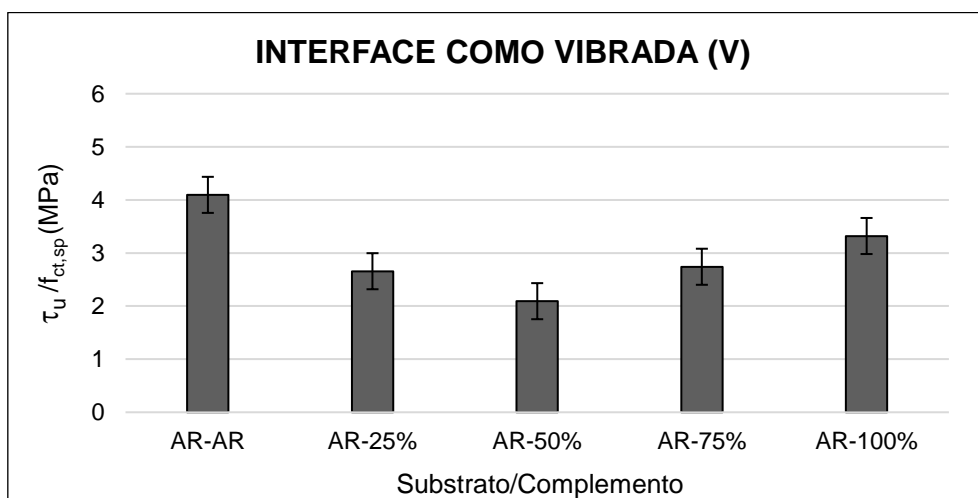
Para o ensaio do tipo *slant shear*, levando em consideração o substrato de alta resistência, cinco complementos foram utilizados com variação da rugosidade da interface; para o substrato de 25%, quatro complementos e, para o substrato de 100% de substituição, três complementos. Todos os grupos foram assim plotados para cada interface por seus respectivos valores médios de resistência ao cisalhamento normalizada ( $\tau_u/f_{ct,sp}$ ).

Para avaliar a influência do tipo de concreto do complemento, os valores obtidos de resistência ao cisalhamento para cada grupo foram submetidos à análise de variância (ANOVA), complementada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados da análise estatística gerados pelo programa Past (Paleontological Statistics) estão apresentados no Anexo B1.2.

Nas Figuras 4.40 à 4.44 são apresentados os resultados de resistência ao cisalhamento normalizada obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova do tipo *slant shear*, com substrato de concreto normal de alta resistência (AR) e seus respectivos complementos para cada rugosidade da interface estudada.



**Figura 4.46 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato AR e interface lisa.**



**Figura 4.47 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface como vibrada.**

Para a interface lisa, os corpos-de-prova do grupo AR-AR representados na Figura 4.46 apresentaram diferença significativa média superior em relação aos complementos de 25%, 50% e 75% e 100% de 27,67%, 32,52% e 39,36%, 27,00%, respectivamente.

Para a interface como vibrada (V), a série AR com complemento AR também apresentou diferença significativa média superior para todos os complementos com substituição de agregado leve de 25%, 50%, 75% e 100%, de 35,12% 48,9%, 33,07% e 18,92%, respectivamente. A série AR-25% apresentou valores médios de resistência ao cisalhamento de 21,24% maior que a série AR-50%.

O fato da resistência ao cisalhamento ser normalizado pela menor resistência à tração diametral dos concretos utilizados levou a série AR-75% ter 23,65% de resistência ao cisalhamento superior que a AR-50%; e a série AR-100% apresentou valores maiores de 19,98% e 36,97% que a AR-25% e AR-50%, respectivamente.

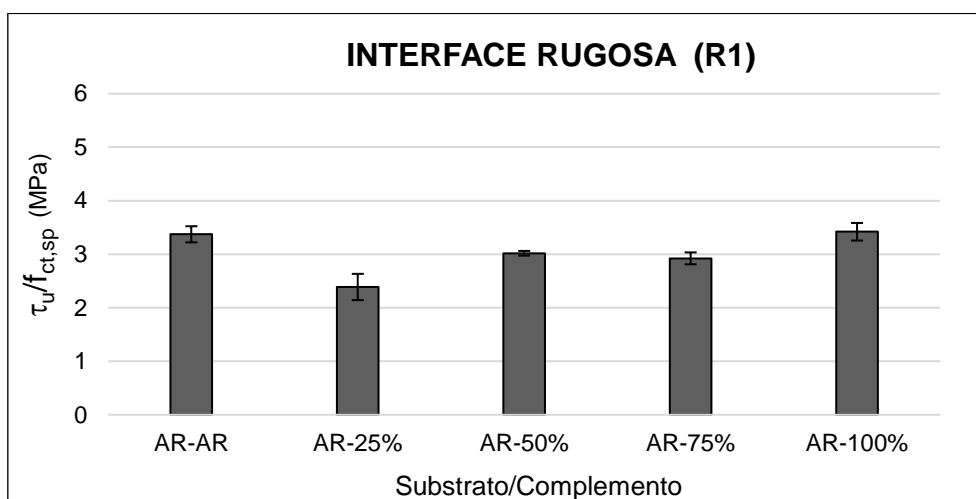


Figura 4.48 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R1).

Nos corpos-de-prova com interface rugosa a série AR-AR apresentou valores de resistência ao cisalhamento de 29,19% e 13,31% superior que AR-25% e AR-75%. Já a série AR-25% foi menor que as séries AR-50%, AR-75% e AR-100% em 20,87%, 18,31% e 30,18%. Além disso também houve diferença significativas médias entre a série AR-75% e AR-100% de 14,53%.

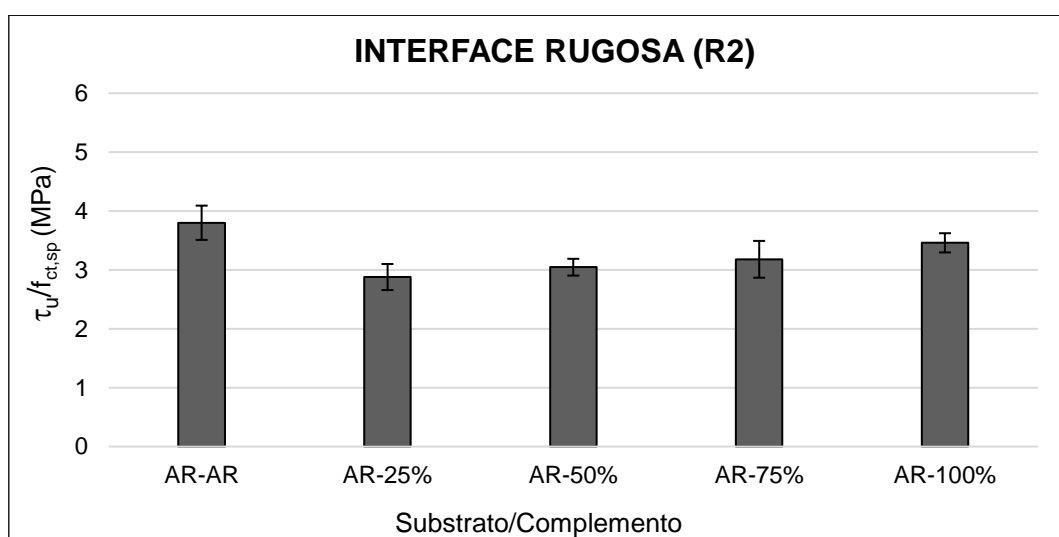
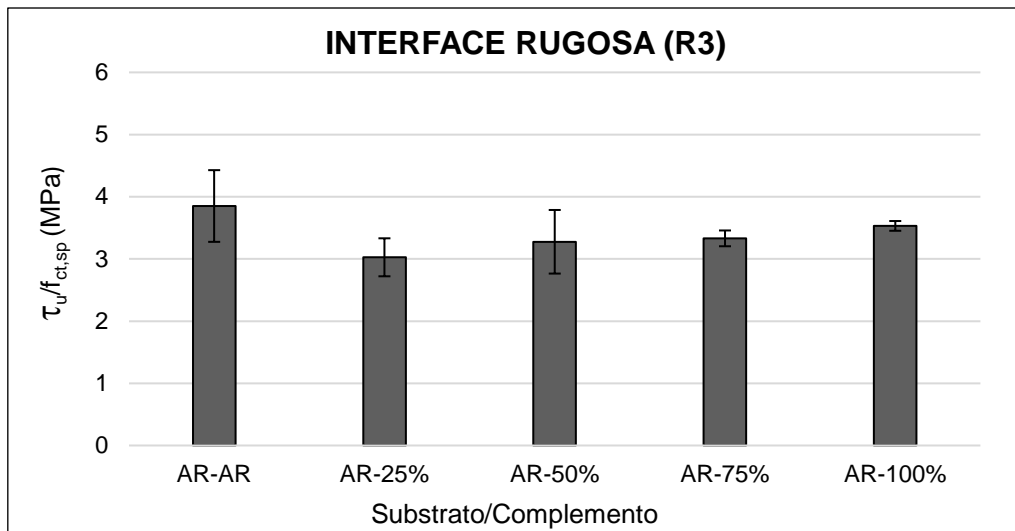


Figura 4.49 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R2).



**Figura 4.50 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de AR e interface rugosa (R3).**

Para a interface rugosa (R2), a série AR-AR, apresentou diferenças médias superior de 24,26% e 19,86% das séries AR-25% e AR-50%, respectivamente. Quando a rugosidade aumentou, ou seja, para R3, os valores obtidos foram estatisticamente iguais.

Notou-se que à medida que o complemento utilizado possuía maior substituição de agregados leves, e conseqüentemente menor resistência à compressão, os valores das tensões de cisalhamento médias diminuíram. A série AR-AR, mesmo dividindo-se os valores pela menor resistência à tração do substrato/complemento, obtiveram valores superiores. Uma exceção foi verificada quando se trata da série AR-25%, que, por possuírem resistências semelhantes e o complemento apresentar a menor substituição por agregado leve utilizada na pesquisa, esperava-se valores mais elevados.

A série AR-100% também apresentou uma ressalva que se deve ao fato de que quando se definiu o menor valor de resistência à tração entre o substrato e o complemento, o valor da resistência do complemento utilizado é significativamente menor, e assim os valores médios de cisalhamento foram um pouco maiores do que os grupos AR-50% e AR-75%.

Nas Figuras 4.45 à 4.49 são mostradas as resistências ao cisalhamento normalizadas ( $\tau_u/f_{ct,sp}$ ) obtida nos corpos-de-prova com substrato de concreto com 25% de substituição de agregado leve, para cada rugosidade da interface.

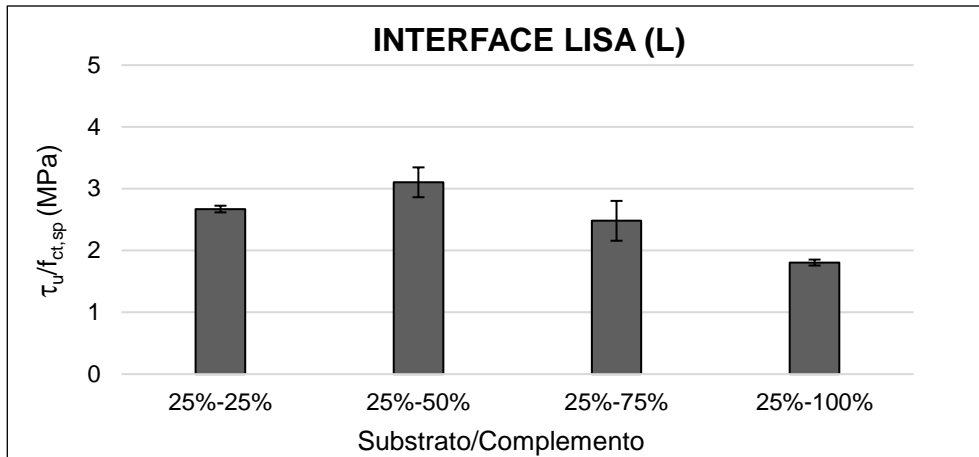


Figura 4.51 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface lisa.

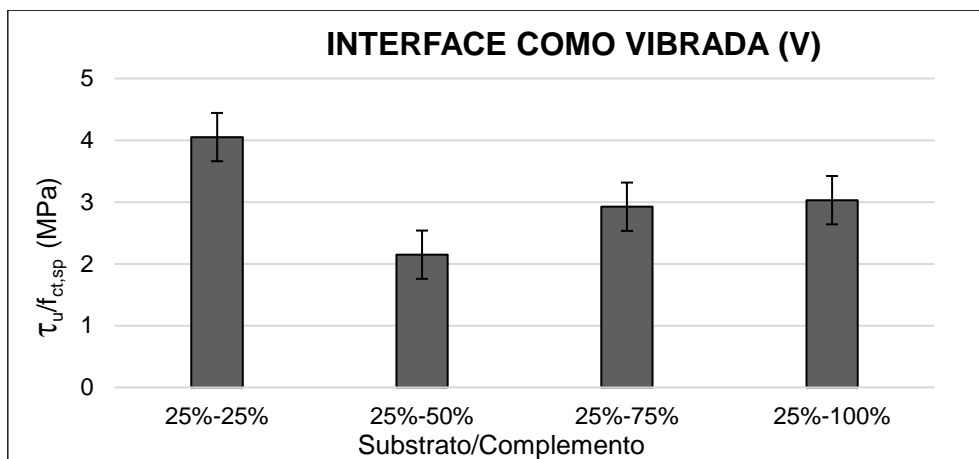


Figura 4.52 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface como vibrada.

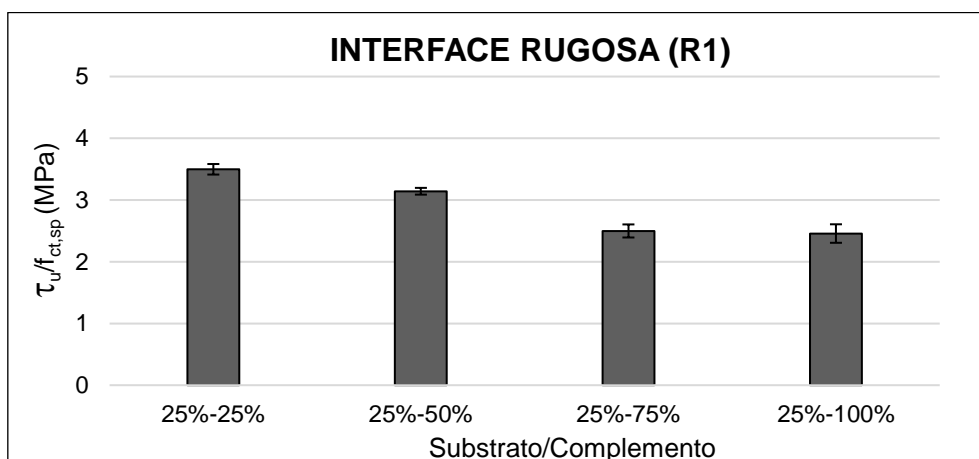
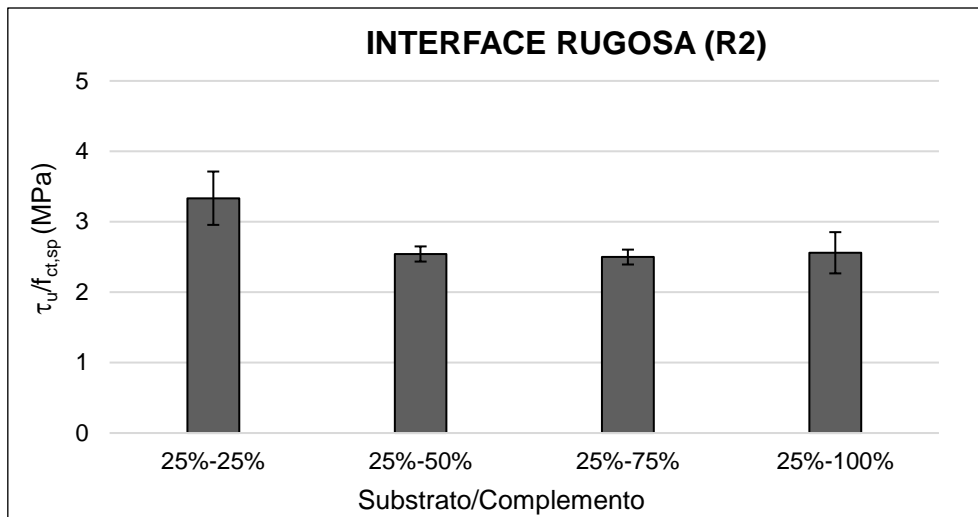
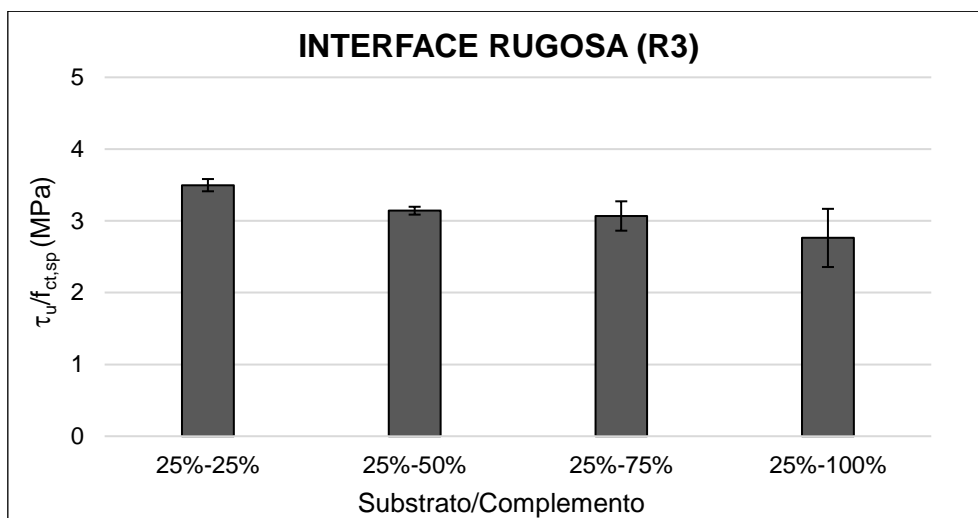


Figura 4.53 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato de 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R1).



**Figura 4.54 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R2).**



**Figura 4.55 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 25% de substituição de agregado leve e interface rugosa (R3).**

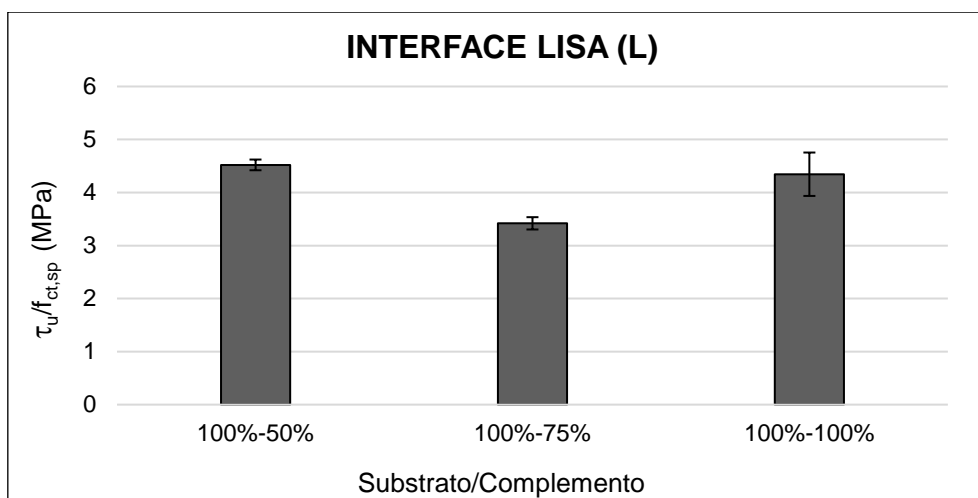
Levando em conta as séries com substrato utilizando concreto leve com substituição de 25% de agregado leve, para a interface lisa, a série 25%-50% foi maior estatisticamente com valor de 20,09% que a 25%-75%. Já a série 25%-100% foi menor que a 25%-25%, 25%-50% e 25%-75% em 32,41%, 41,84% e 27,22%, respectivamente.

Para a interface como vibrada a série 25%-25% apresentou diferenças médias superiores em 46,99%, 27,82% e 25,20% com relação às séries 25%-50%, 25%-75% e 25%-100%, respectivamente. E a série 25%-50% foi menor que a 25%-75% e 25%-100% em 26,55% e 29,13%.

As diferenças médias quando a interface foi rugosa (R1) se deram entre as séries 25%-25% de 19,74%, 22,27% e 20,60% em relação à 25%-50%, 25%-75% e 25%-100%, respectivamente. Para a interface rugosa (R2) as diferenças entre as séries foi a mesma que a rugosa (R1), da 25%-25% para 25%-50%, 25%-75% e 25%-100% nos valores de 23,75%, 25,06% e 23,23%. E para a interface rugosa (R3), somente entre as séries 25%-25% e 25%-100% existiram diferenças significativas médias de resistência ao cisalhamento de 21,02%.

Para o grupo de séries com substrato de 25%, notou-se melhor a influência da substituição do complemento por concreto com substituição de agregado leve. Novamente a série AR-AR apresentou valores maiores e as demais séries apresentaram uma notória diminuição.

As Figuras 4.50 à 4.54 representam os corpos-de-prova com substrato de concreto com 100% de substituição de agregado leve para cada rugosidade da interface.



**Figura 4.56 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição e interface lisa (L).**

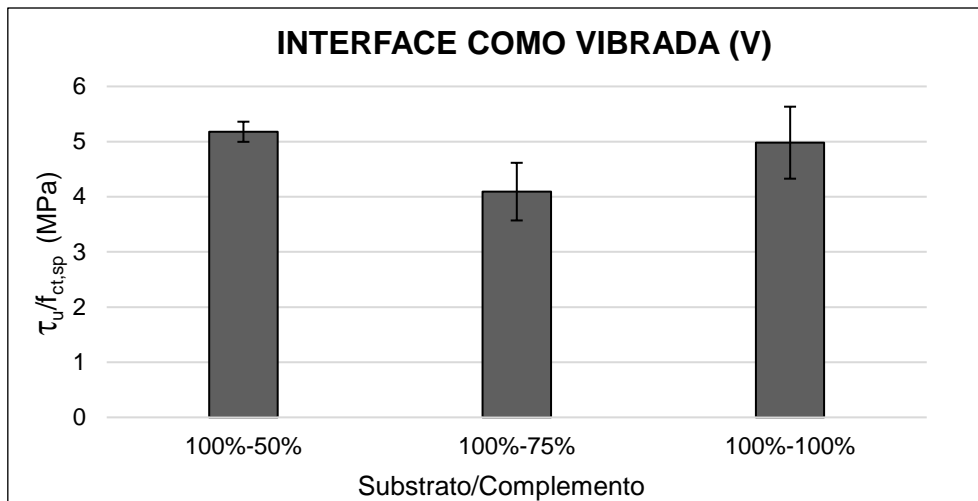


Figura 4.57 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição e interface como vibrada (V).

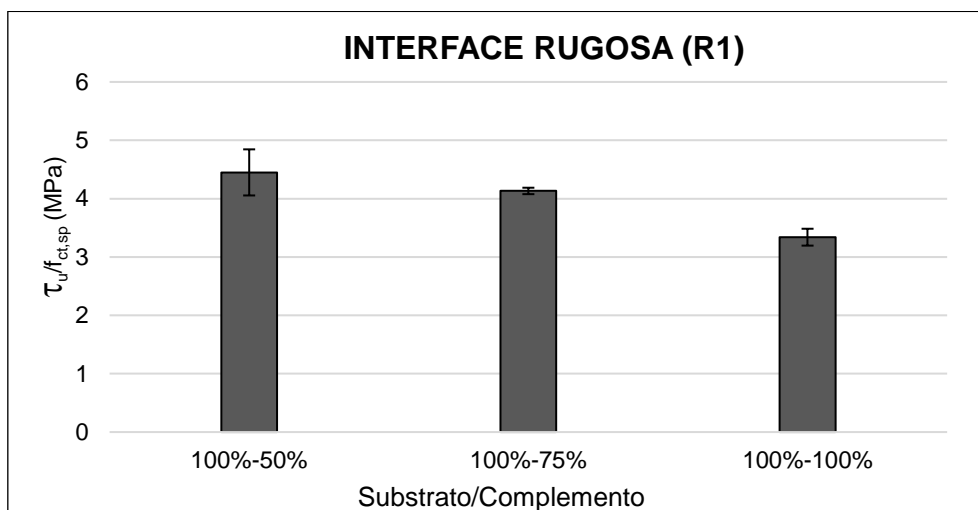


Figura 4.58 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de agregado leve e interface rugosa (R1).

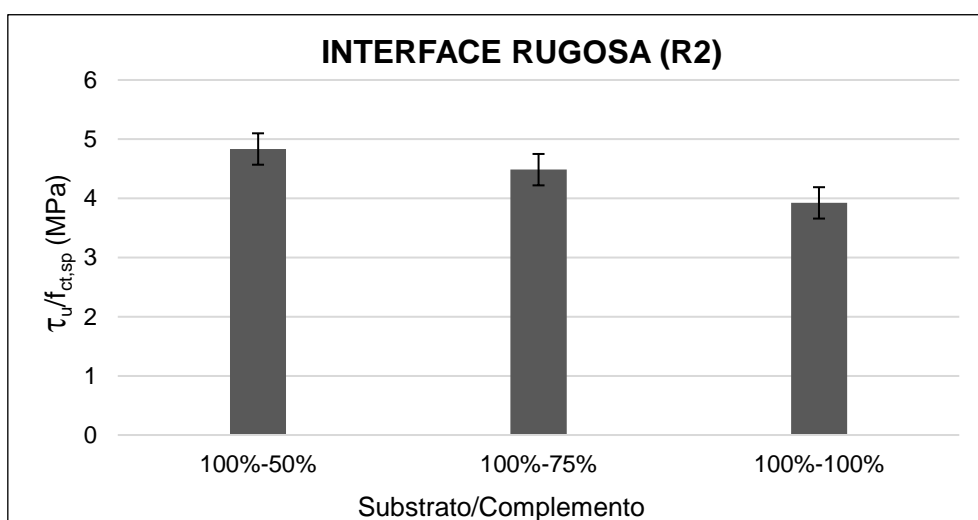
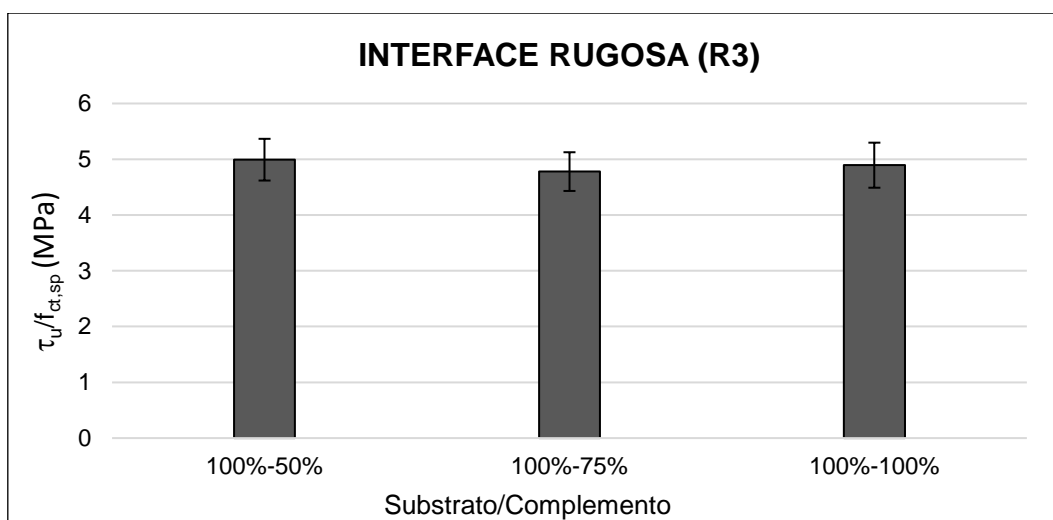


Figura 4.59 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição e interface rugosa (R2).





**Figura 4.60 - Influência da porcentagem de substituição do agregado leve no complemento para substrato com 100% de substituição e interface rugosa (R3).**

Para o grupo com substrato de 100%, a influência foi um pouco menor, justificada pelo fato do próprio substrato apresentar valores de resistência baixos, e os concretos utilizados como complemento de certa forma também.

Para a interface como vibrada (V) e rugosas (R2) e (R3) os valores obtidos foram estatisticamente iguais. Para a interface lisa, as séries 100%-50% e 100%-50% foram maiores que a 100%-75% de 24,37% e 21,30%, respectivamente. Quando levada em conta a interface rugosa (R1), houve diferenças médias da série 100%-50% e 100%-75% para a 100%-100% nos valores de 24,94% e 19,18%, respectivamente.

Uma pequena diferença foi notada quando se comparou os valores de resistências médias de cisalhamento para as diferentes interfaces, e dentro de cada interface, principalmente quando comparada a série 100%-50% com a 100%-100%. Porém, para os grupos analisados anteriormente, ou seja, com substrato de alta resistência (AR) e substituição de 25%, foi mais evidente a diferença entre a resistência ao cisalhamento, quando se trata da comparação entre os tipos de interface.

### 4.3.2- Ensaio de corpos-de-prova do tipo *push-off*

A Tabela 4.23 resume os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova do tipo *push-off*, para os grupos com interface como vibrada (V) e rugosa (R2), em termos de carga máxima, resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ), assim como, os parâmetros estatísticos e modo de ruptura. Os valores mostraram-se satisfatórios em relação ao aumento da rugosidade dentro do mesmo grupo, ou seja, houve um aumento da resistência ao cisalhamento quando comparados os valores referentes aos de interface como vibrada (V) com aqueles de interface rugosa (R2). Sendo assim, nota-se uma eficácia do aumento da rugosidade quando se avaliou esse tipo de ensaio para todos os grupos.

**Tabela 4.23 - Resultados dos ensaios de corpos-de-prova do tipo *push-off*.**

Corpos-de-prova	F(kN)	$\tau_0$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Ruptura
1-AR-25%-V	75,52	2,90				Adesão
2-AR-25%-V	76,94	2,95	2,82	0,18	6,36	Coesão
3-AR-25%-V	68,17	2,62				Coesão
1-AR-25%-R2	91,03	3,50				Coesão
2-AR-25%-R2	94,43	3,63	3,42	0,25	7,20	Coesão
3-AR-25%-R2	82,00	3,15				Coesão
1-AR-50%-V	85,20	3,27				Coesão
2-AR-50%-V	82,00	3,15	3,32	0,20	6,12	Adesão
3-AR-50%-V	92,34	3,55				Adesão
1-AR-50%-R2	97,00	3,73				Coesão
2-AR-50%-R2	95,98	3,69	3,65	0,09	2,45	Coesão
3-AR-50%-R2	92,54	3,55				Coesão
1-AR-75%-V	83,01	3,19				Coesão
2-AR-75%-V	85,40	3,28	3,32	0,16	4,94	Coesão
3-AR-75%-V	91,31	3,51				Coesão
1-AR-75%-R2	100,71	3,87				Coesão
2-AR-75%-R2	95,01	3,65	3,76	0,11	2,91	Coesão
3-AR-75%-R2	98,20	3,77				Coesão
1-AR-100%-V	69,93	2,69				Adesão
2-AR-100%-V	67,24	2,58	2,57	0,13	4,99	Adesão
3-AR-100%-V	63,30	2,43				Adesão
1-AR-100%-R2	83,36	3,20	2,96	0,21	7,17	Coesão
2-AR-100%-R2	75,30	2,89				Coesão

Nos ensaios dos corpos-de-prova do tipo *push-off* também foram observados dois modos de falha, ou seja, coesiva ou adesiva. Essa identificação foi determinada através da avaliação visual da superfície da interface após a realização do ensaio e são mostradas nas Figuras 4.55, 4.56, 4.57 e 4.58. A ruptura coesiva neste ensaio acontece de forma diferente da apresentada no *slant shear* modificado, sendo caracterizada pela presença de concreto aderida a uma das partes.

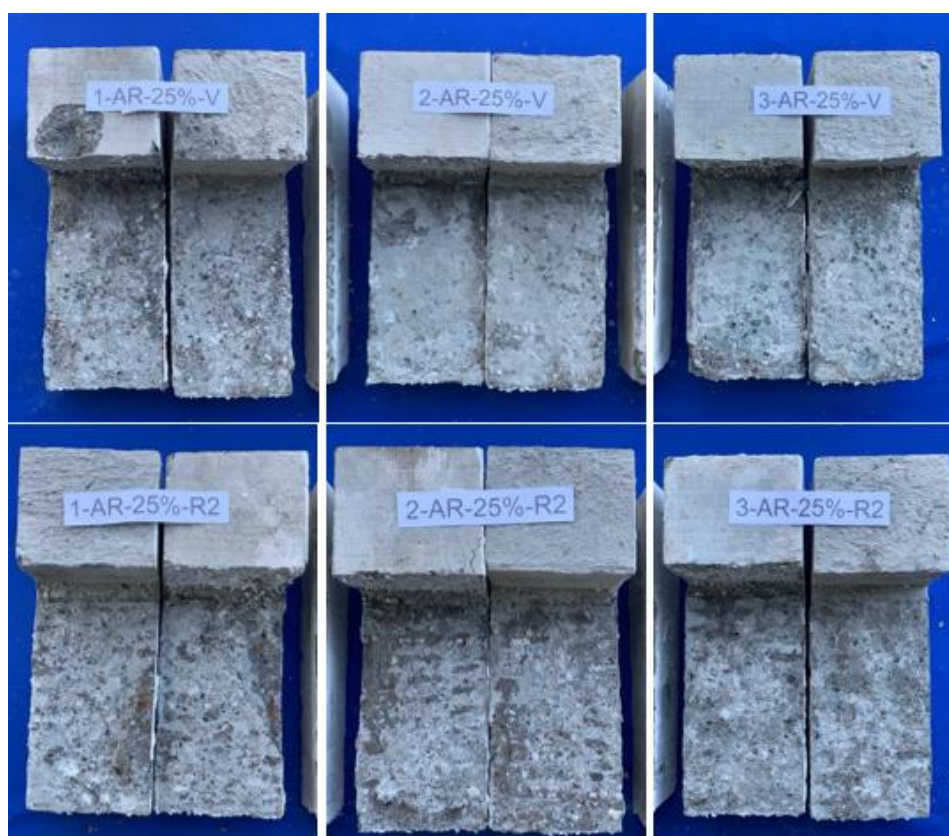


Figura 4.61 - Corpos-de-prova da série AR-25% do tipo *push-off* após ruptura.



Figura 4.62 - Corpos-de-prova da série AR-50% do tipo *push-off* após ruptura.

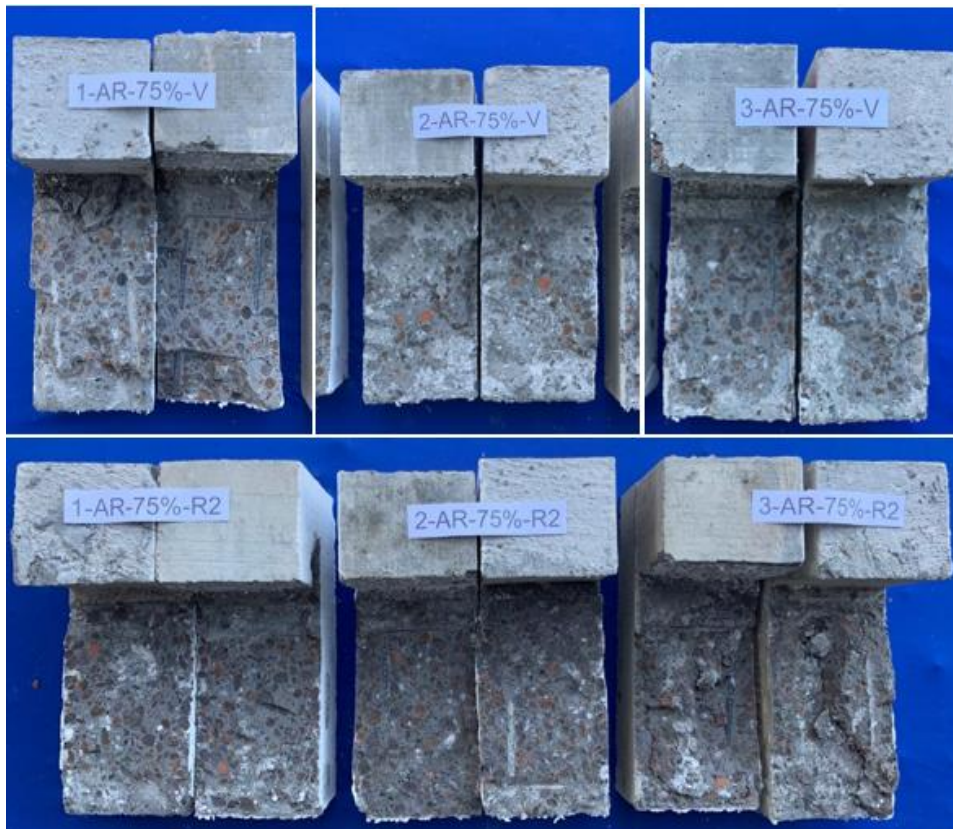


Figura 4.63 - Corpos-de-prova da série AR-75% do tipo *push-off* após ruptura.



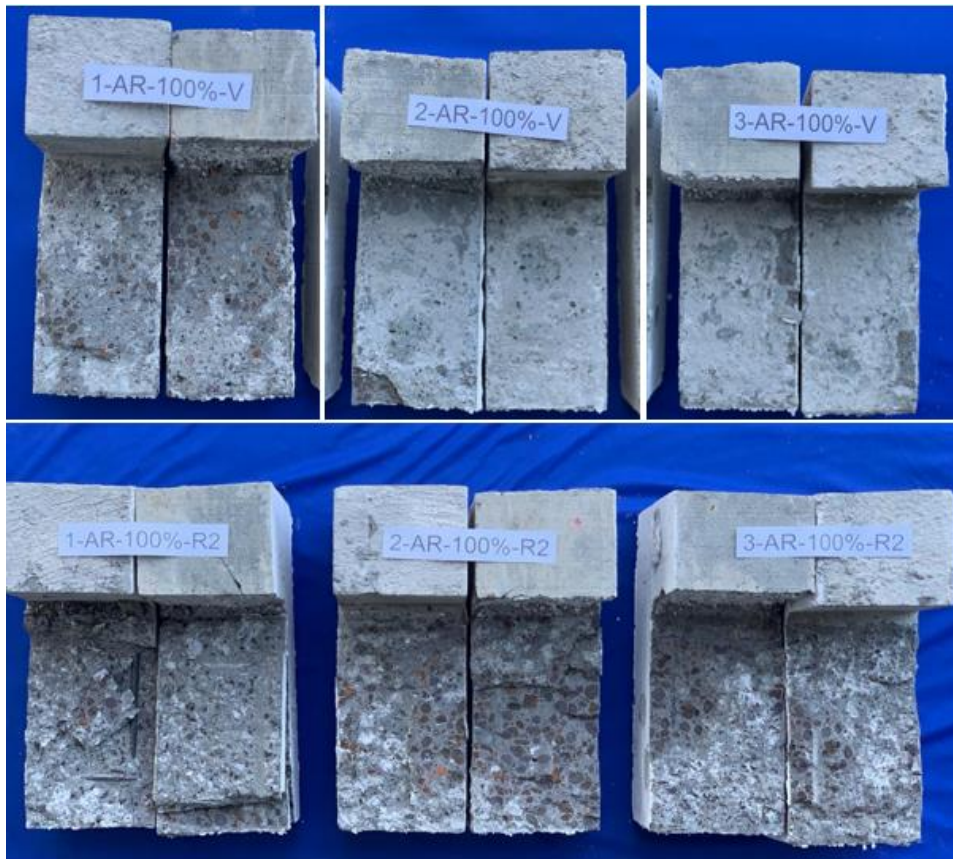


Figura 4.64 - Corpos-de-prova da série AR-100% do tipo *push-off* após ruptura.

Nos corpos-de-prova para o ensaio do tipo *push-off*, a interface de cisalhamento teve dois tipos de rugosidade, a como vibrada (V) e a rugosidade (R2), sendo igual àquelas produzidas nos corpos-de-prova do *slant shear*. A influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) para cada grupo estudado está apresentada nas Figura 4.65 à Figura 4.68.

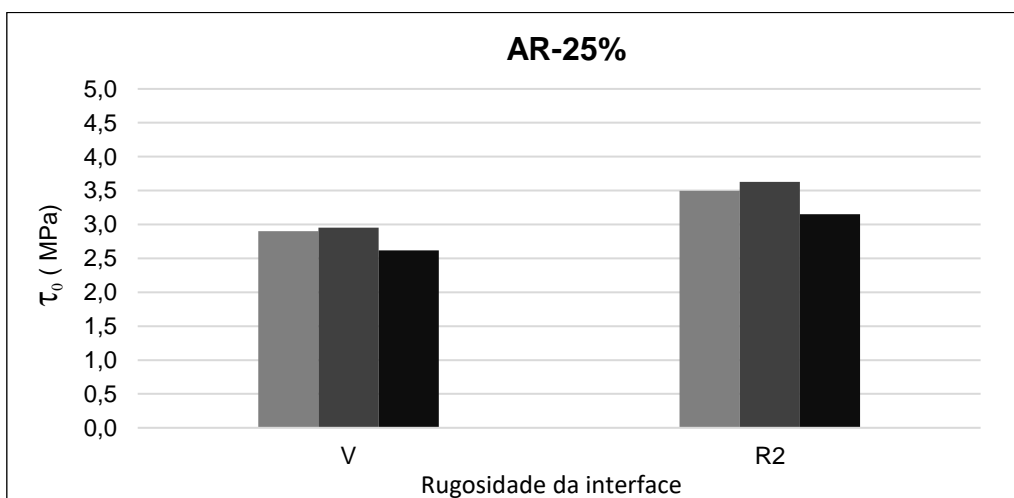


Figura 4.65 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off* para o grupo AR-25%.

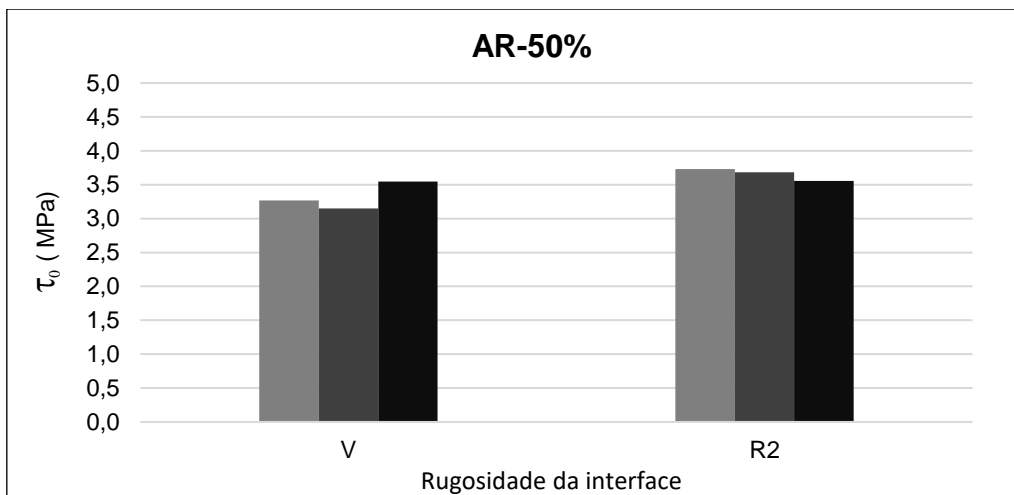


Figura 4.66 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off* para o grupo AR-50%.

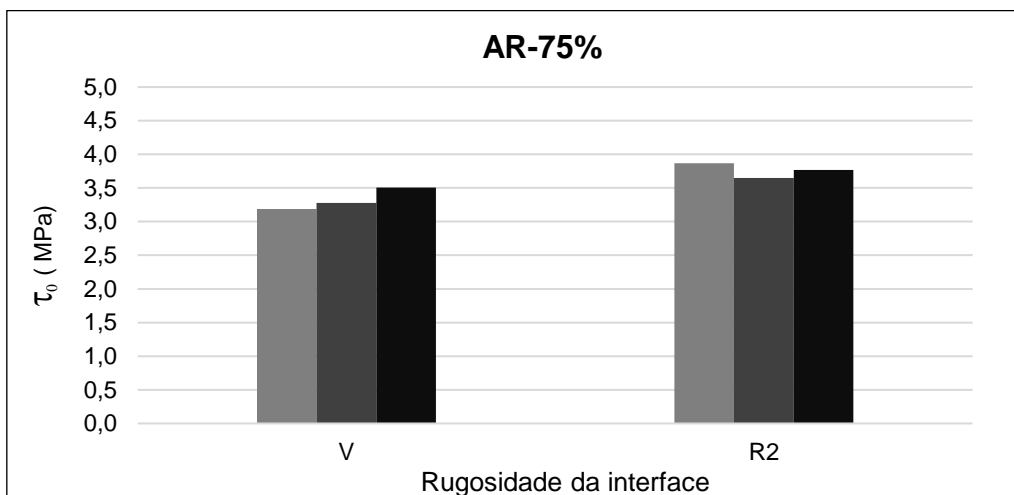


Figura 4.67 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off* para o grupo AR-75%.

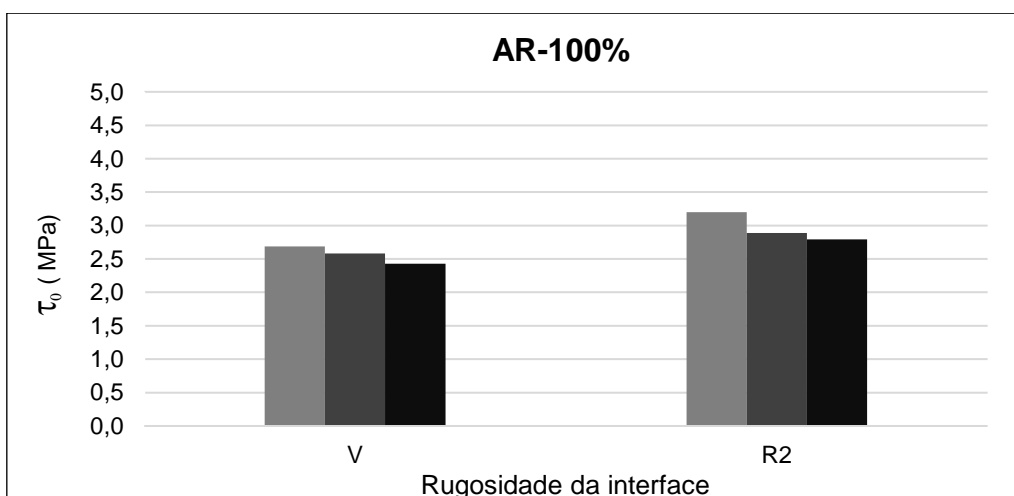


Figura 4.68 - Influência da rugosidade no ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off* para o grupo AR-100%.

Os valores obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo avaliadas a influência do tipo de rugosidade e da substituição do agregado.

A influência do tipo de rugosidade na resistência ao cisalhamento puro resultou que os complementos de 50% e 100% apresentaram valores estatisticamente iguais. Nos complementos de 25% e 75% foram estatisticamente diferentes. Para o complemento de 25% as séries apresentaram uma diferença média de 17,49 %, e para o de 75% de 11,63%.

A influência de substituição do agregado graúdo normal por leve no substrato é apresentada nas Figuras 4.63 e 4.64, para interface vibrada (V) e rugosa (R2), respectivamente.

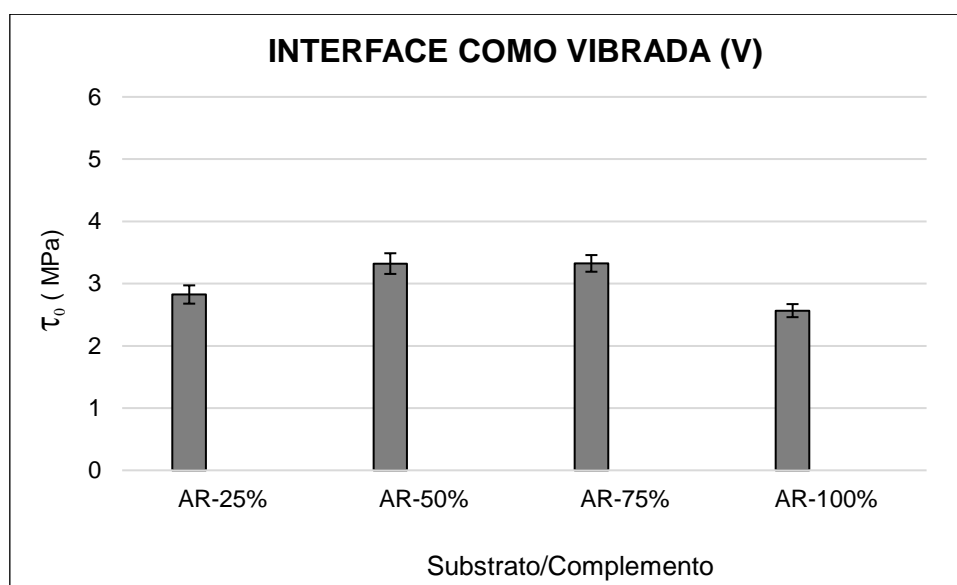


Figura 4.69 - Influência da substituição por agregado leve no ensaio de *push-off* para interface como vibrada.

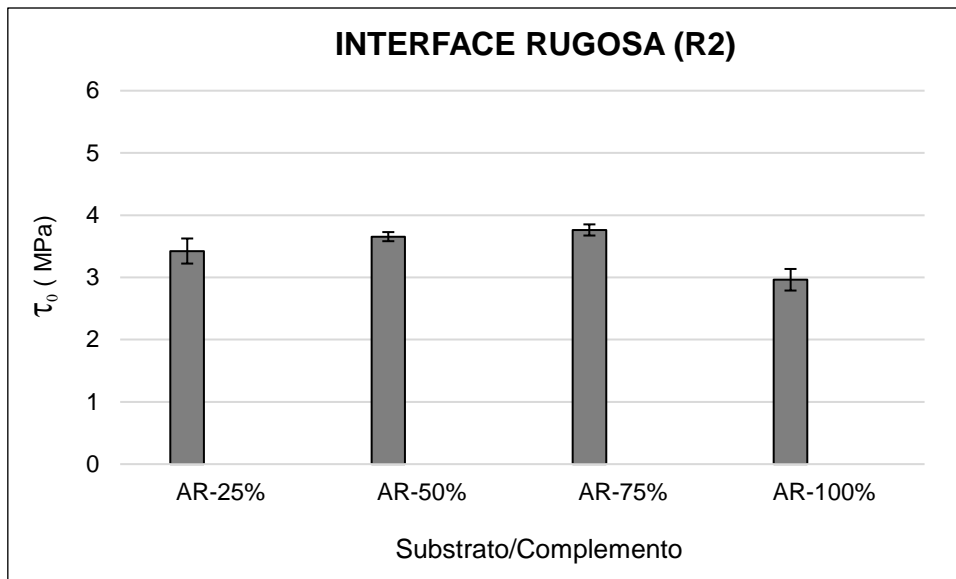


Figura 4.70 - Influência da substituição por agregado leve no ensaio de *push-off* para interface rugosa.

No ensaio dos corpos-de-prova do tipo *push-off* foram medidos os deslocamentos vertical e horizontal de todos os corpos-de-prova. As Figuras 4.65 à 4.72 mostram as respostas de deslocamento vertical, para cada grupo de corpo-de-prova ensaiado.

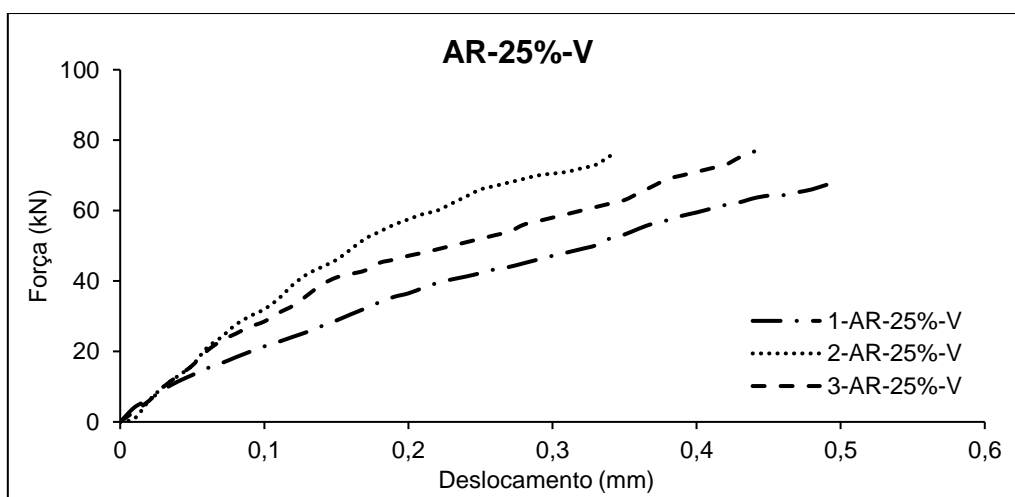


Figura 4.71 – Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-25%-V.



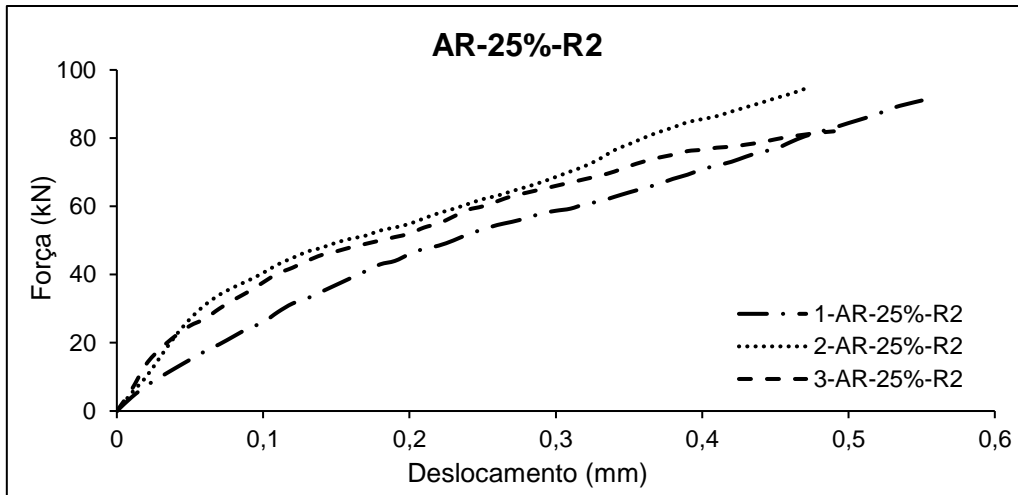


Figura 4.72 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-25%-R2.

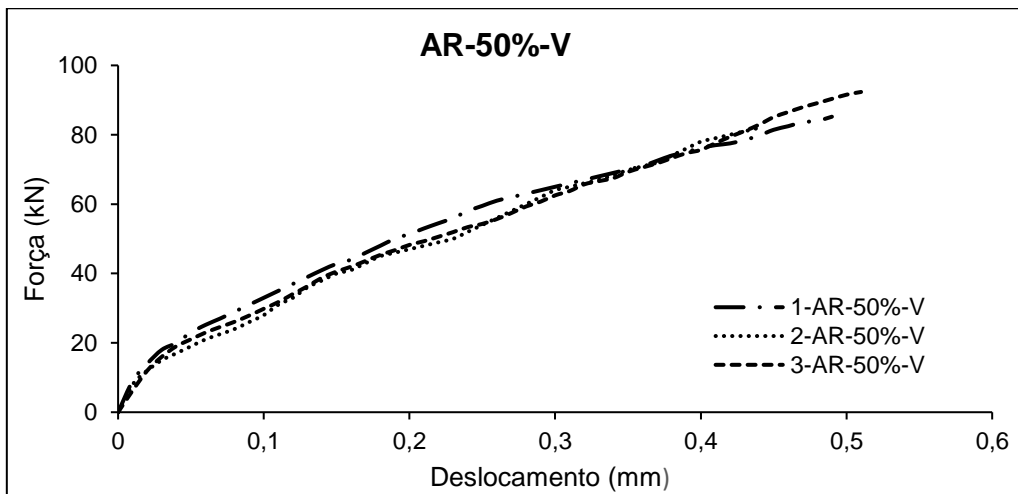


Figura 4.73 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-50%-V.

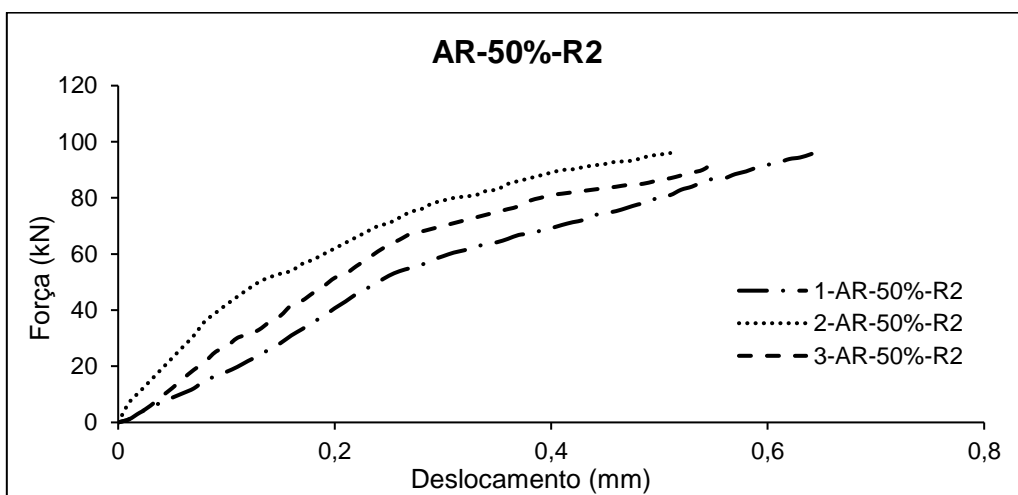
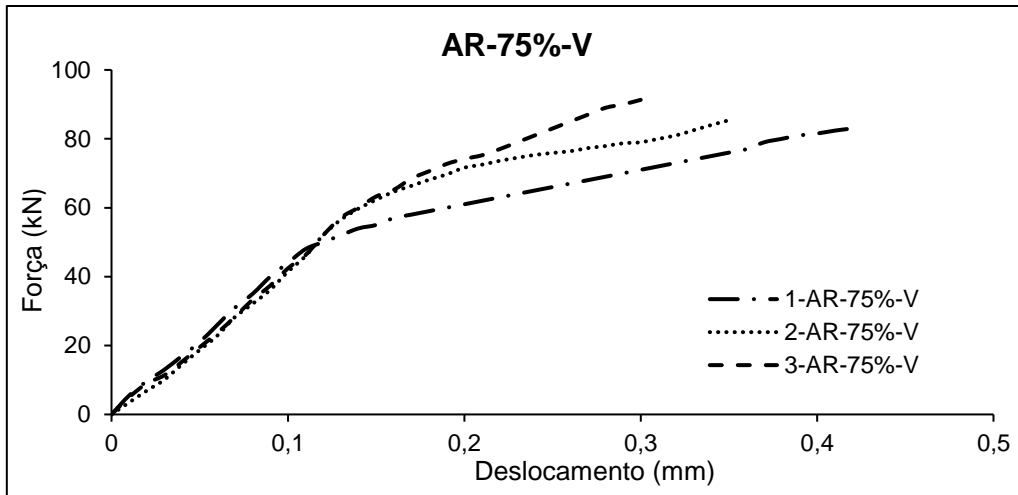
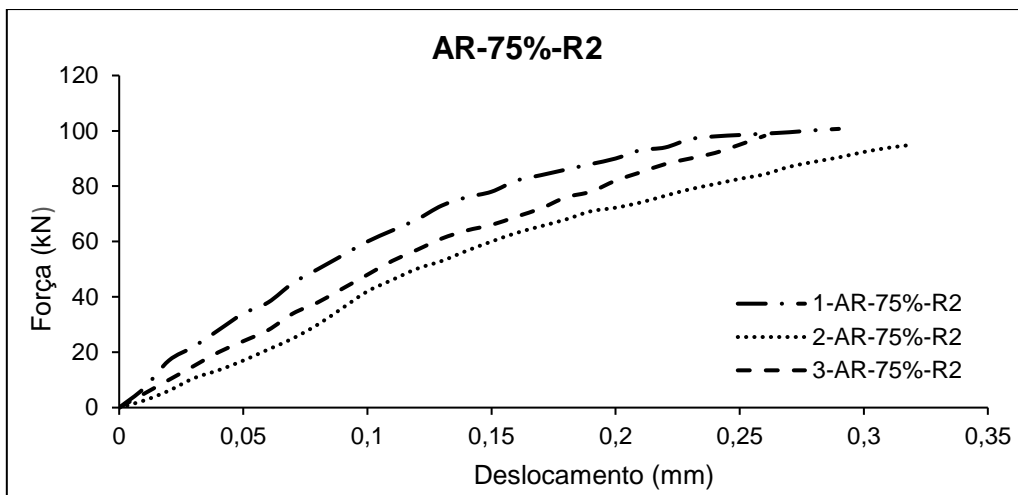


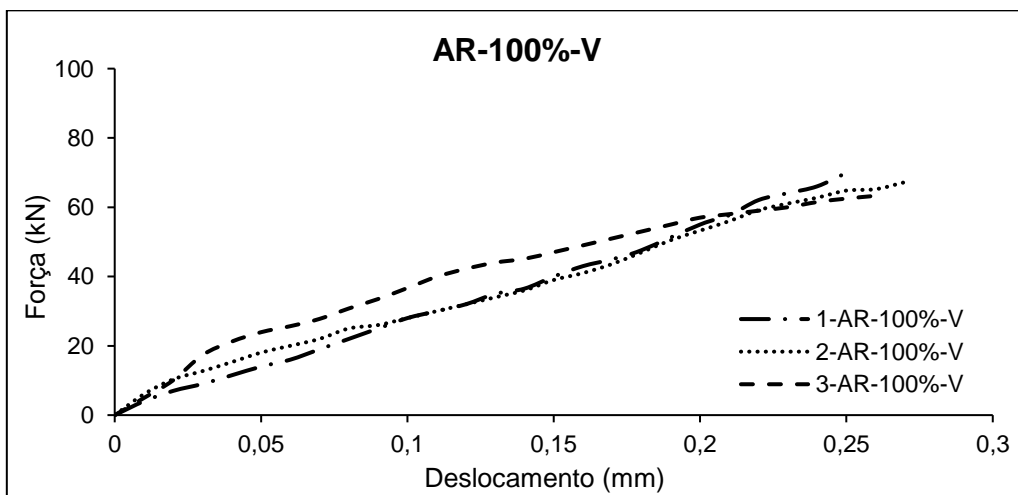
Figura 4.74 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-50%-R2.



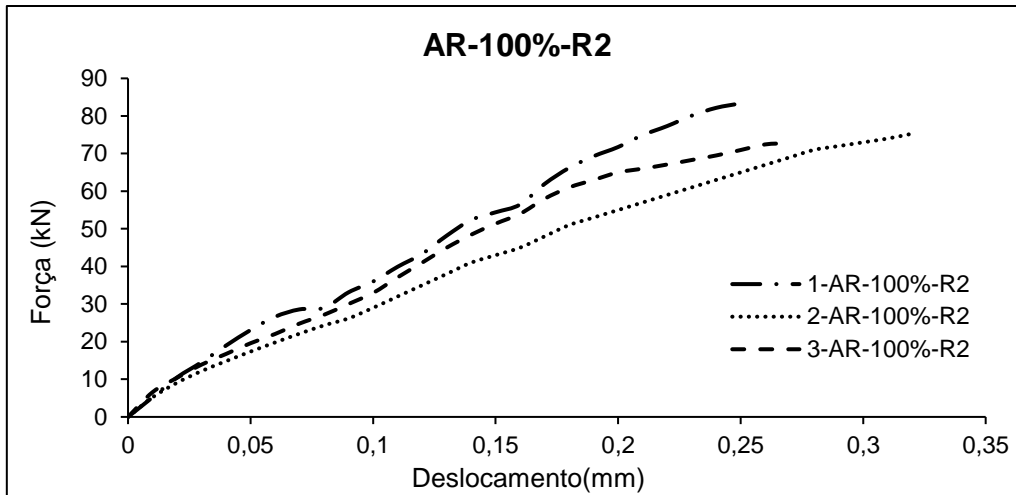
**Figura 4.75 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-75%-V.**



**Figura 4.76 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-75%-R2.**

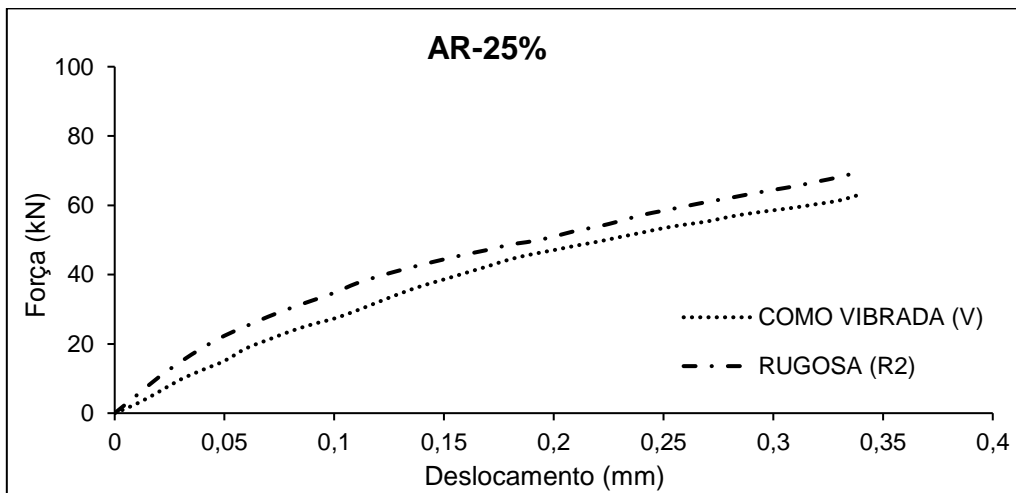


**Figura 4.77 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-100%-V.**



**Figura 4.78 - Curvas força vs deslocamento vertical da série AR-100%-R2.**

Nas Figuras 4.73 à 4.76 mostra-se uma comparação em relação aos valores médios do comportamento das séries para a interface como vibrada (V) e rugosa (R2) dos deslocamentos verticais do ensaio de *push-off*. Nota-se que em todas as séries de interface como vibrada (V) apresentaram menor rigidez conforme esperado, uma vez que apresenta menor rugosidade. Ao contrário, o efeito da rugosidade diminui o deslocamento o que fez a interface rugosa (R2) apresentar maior rigidez.



**Figura 4.79 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-25%.**

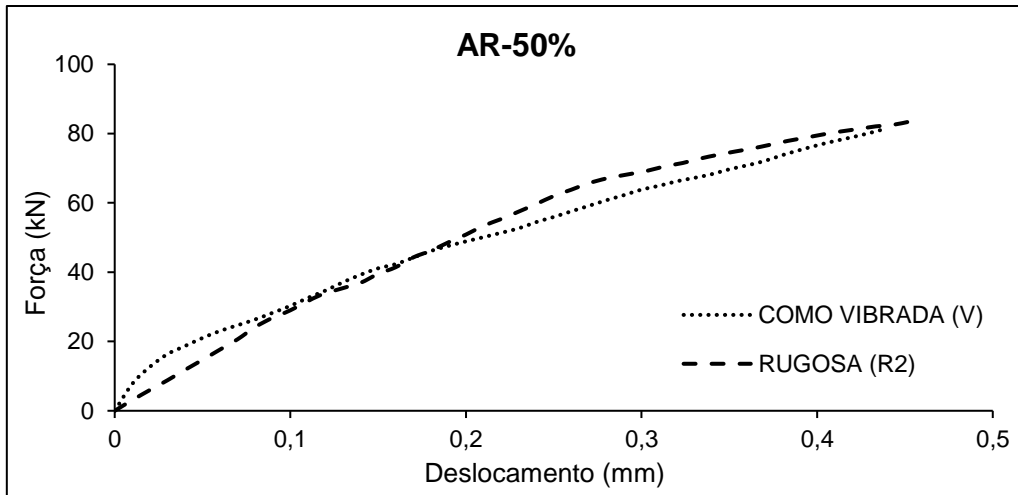


Figura 4.80 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-50%.

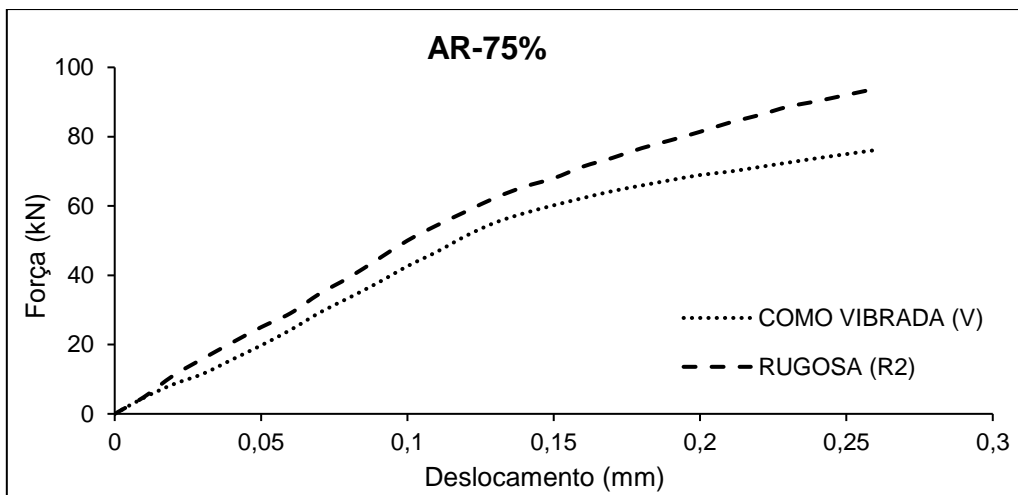


Figura 4.81 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-75%.

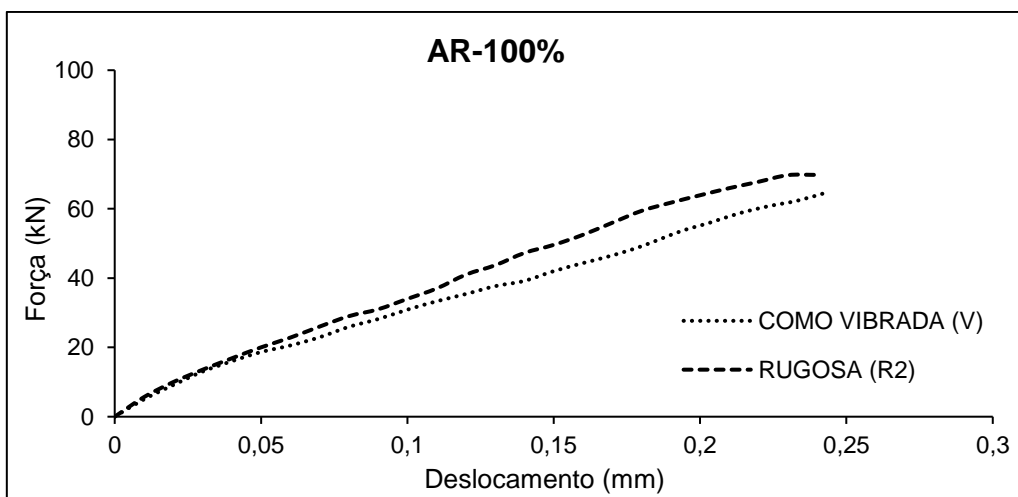


Figura 4.82 - Curvas dos valores médios de força vs deslocamento da série AR-100%.

#### 4.4 - Resistência à tração na interface usando o ensaio de corpos-de-prova do tipo *pull-off*

A resistência à tração na interface foi avaliada através do ensaio de corpos-de-prova do tipo *pull-off*. Nele foi considerado apenas o concreto de alta resistência como substrato e cinco tipos de complemento (AR, 25%, 50%, 75% e 100%), combinados com três rugosidades (L, V, R2) apresentadas e caracterizadas no programa experimental.

Na Tabela 4.24 são apresentadas as forças resistentes últimas obtidas nos ensaios, juntamente com a resistência à tração na interface ( $f_{ti}$ ), obtida esta última dividindo a força pela área do carote, a resistência à tração média na interface ( $f_{tim}$ ) e seus respectivos parâmetros estatísticos e também a forma de ruptura de cada corpo-de-prova.

Nos ensaios de *pull-off*, a ruptura adesiva, ou seja, pela interface foi predominante. Com efeito, os resultados da resistência à tração da interface foram inferiores, na maioria, ao menor valor da resistência à tração do concreto de cada uma das partes (substrato e complemento) com exceção do grupo AR-100%.

**Tabela 4.24 - Resultado de resistência à tração na interface pelo ensaio de *pull-off*.**

Corpos-de-prova	F (kN)	$f_{ti}$ (MPa)	$f_{tim}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Forma de ruptura
1-AR-AR-L-PL	377	3,00				Interface
2-AR-AR-L-PL	300	2,39	2,57	0,38	14,77	Interface
3-AR-AR-L-PL	290	2,31				Interface
1-AR-AR-V-PL	271	2,16				Interface
2-AR-AR-V-PL	195	1,55	1,82	0,31	16,94	Interface
3-AR-AR-V-PL	220	1,75				Interface
1-AR-AR-R2-PL	267	2,13				Interface
2-AR-AR-R2-PL	276	2,20	2,03	0,23	11,35	Interface
3-AR-AR-R2-PL	222	1,77				Complemento
1-AR-25%-L-PL	320	2,55				Interface
2-AR-25%-L-PL	319	2,54	2,51	0,07	2,67	Interface
3-AR-25%-L-PL	305	2,43				Interface
1-AR-25%-V-PL	228	1,82	1,93	0,11	5,66	Interface
2-AR-25%-V-PL	255	2,03				Interface

3-AR-25%-V-PL	246	1,96				Interface
1-AR-25%-R2-PL	353	2,81				Interface
2-AR-25%-R2-PL	420	3,34	3,12	0,28	8,92	Interface
3-AR-25%-R2-PL	404	3,22				Interface
1-AR-50%-L-PL	334	2,66				Interface
2-AR-50%-L-PL	306	2,44	2,53	0,11	4,49	Interface
3-AR-50%-L-PL	315	2,51				Interface
1-AR-50%-V-PL	236	1,88				Interface
2-AR-50%-V-PL	258	2,05	2,00	0,10	5,07	Interface
3-AR-50%-V-PL	258	2,05				Interface
1-AR-50%-R2-PL	263	2,09				Interface
2-AR-50%-R2-PL	250	1,99	2,14	0,18	8,40	Complemento
3-AR-50%-R2-PL	294	2,34				Complemento
1-AR-75%-L-PL	174	1,39				Interface
2-AR-75%-L-PL	145	1,15	1,20	0,16	13,39	Interface
3-AR-75%-L-PL	135	1,07				Interface
1-AR-75%-V-PL	259	2,06				Interface
2-AR-75%-V-PL	368	2,93	2,46	0,44	17,77	Complemento
3-AR-75%-V-PL	301	2,40				Substrato
1-AR-75%-R2-PL	336	2,68				Complemento
2-AR-75%-R2-PL	320	2,55	2,53	0,16	6,17	Interface
3-AR-75%-R2-PL	297	2,36				Complemento
1-AR-100%-L-PL	231	1,84				Complemento
2-AR-100%-L-PL	285	2,27	2,12	0,24	11,33	Interface
3-AR-100%-L-PL	281	2,24				Interface
1-AR-100%-V-PL	258	2,05				Complemento
2-AR-100%-V-PL	305	2,43	2,24	0,19	8,37	Interface
3-AR-100%-V-PL	280	2,23				Interface
1-AR-100%-R2-PL	260	2,07				Interface
2-AR-100%-R2-PL	359	2,86	2,41	0,41	16,88	Interface
3-AR-100%-R2-PL	288	2,29				Interface

A ruptura dos corpos-de-prova na interface determina valores reais para a resistência à tração da ligação na interface. Para Carbonell Muñoz *et al.* (2014) todas as falhas ocorreram no substrato de concreto, exceto uma que falhou na interface, e assim as tensões obtidas foram mais baixas do que o esperado.

De maneira geral, a resistência à tração diminuiu à medida que a resistência à compressão do concreto do complemento diminuiu e consequentemente o concreto possuía maior substituição de agregado leve. Para este ensaio não foi estudado o substrato de concreto leve, no entanto, Semendary e Svecova (2020), destacaram em sua pesquisa que superfícies mais lisas geram menores resistência de ligação, ou seja, menor aderência e menor área de contato. Os autores concluíram isso ao expor agregados de um concreto normal e de alta resistência, sendo esse último mais liso.

As Figuras 4.77 à 4.81 representam através das linhas vermelhas a variação das rugosidades da interface de amostras cortadas com largura de 30 mm dos corpos-de-prova do tipo *pull-off* para as séries estudadas. É possível notar visualmente a diferença entre elas, tanto para a interface lisa, como vibrada e rugosa.

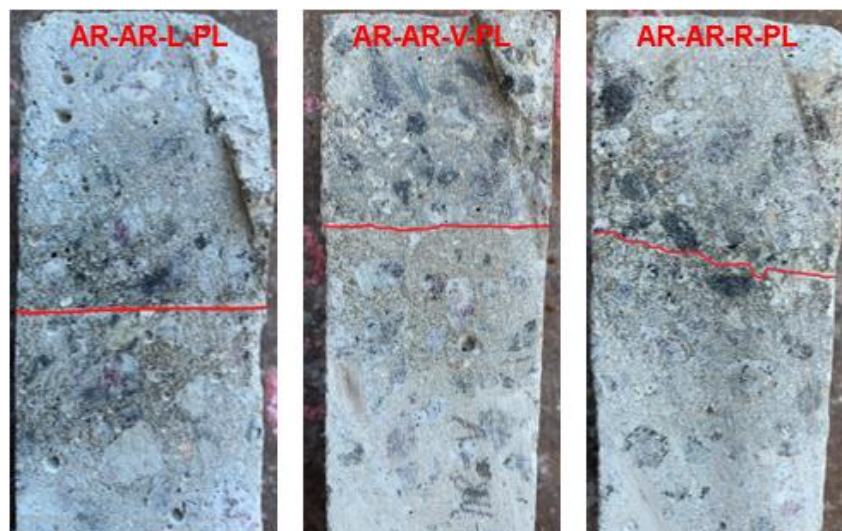


Figura 4.83 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova *pull-off* para a série AR-AR.

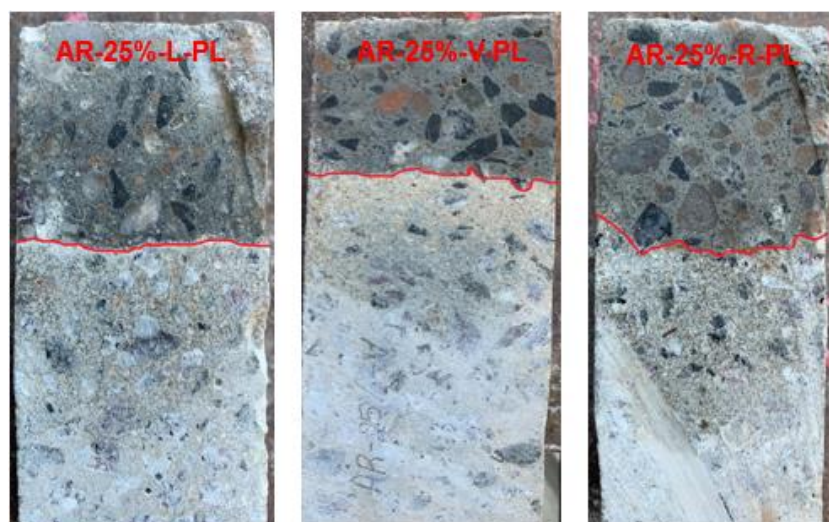


Figura 4.84 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova *pull-off* para a série AR-25%.

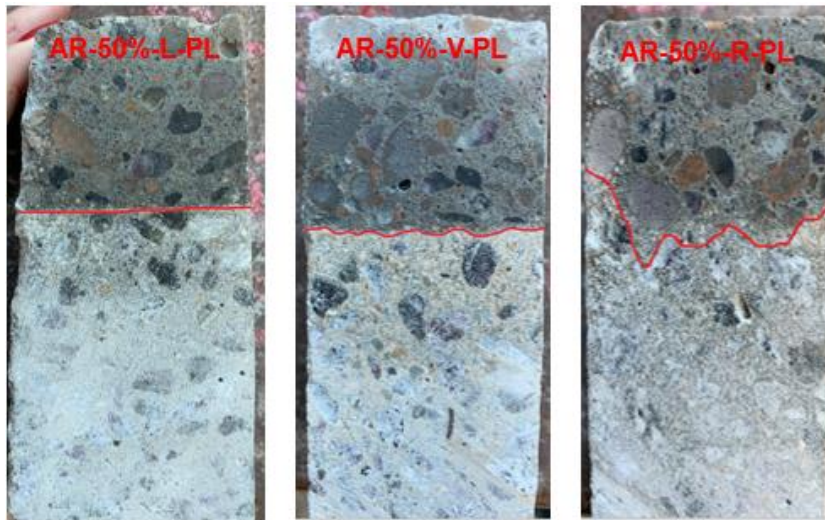


Figura 4.85 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova *pull-off* para a série AR-50%.



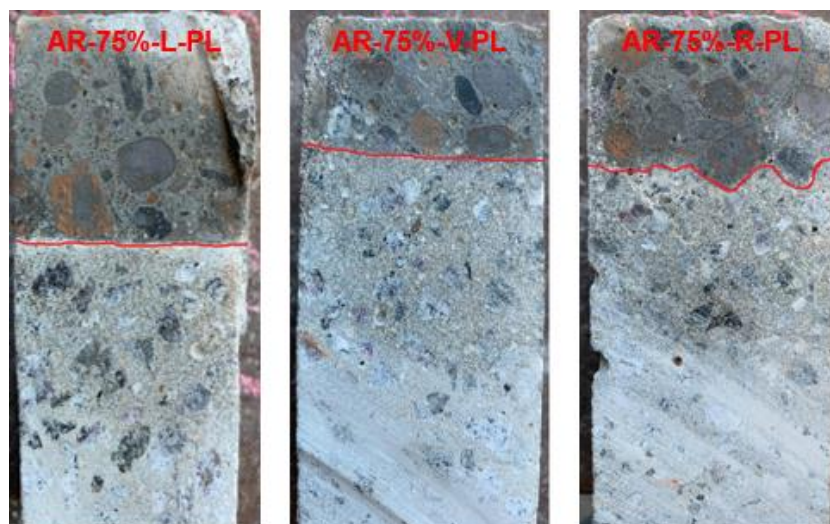


Figura 4.86 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova *pull-off* para a série AR-75%.

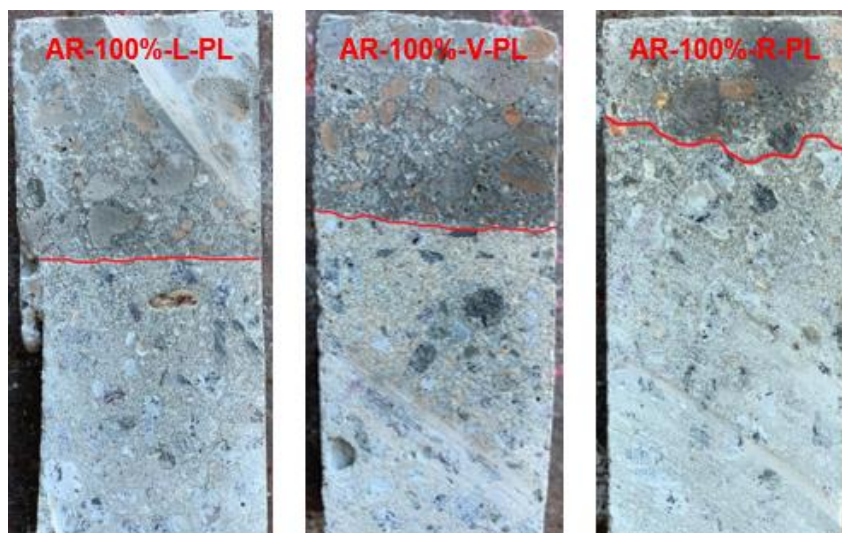
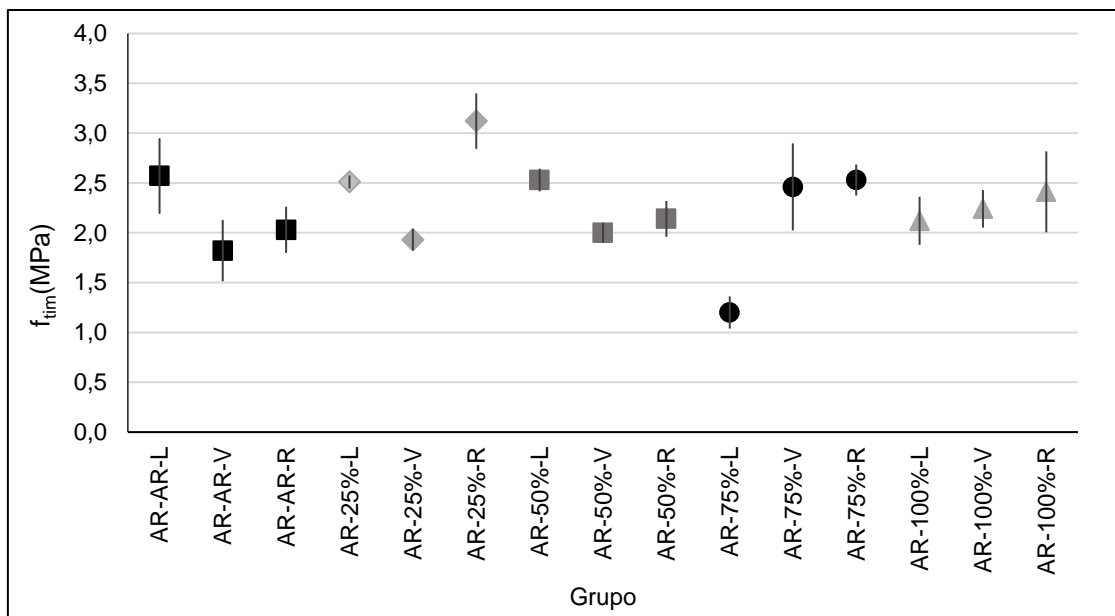


Figura 4.87 - Visualização da rugosidade da amostra de um corpo-de-prova *pull-off* para a série AR-100%.

Na Figura 4.88 são apresentados os valores médios da resistência à tração da interface ( $f_{tim}$ ), para os corpos-de-prova estudados, substrato de concreto AR, e complementos (AR, 25%, 50%, 75% e 100%) em função das rugosidades da interface (L, V e R2).



**Figura 4.88 - Valores médios de resistência à tração ( $f_{tim}$ ) para os diferentes grupos.**

A análise dos resultados revelou um aumento da resistência à tração com o aumento da rugosidade da interface para os corpos-de-prova que apresentaram complemento de 75% e 100%. Os demais grupos, ou seja, aqueles com complemento de concreto de alta resistência, e leve com 25% e 50% de substituição, apresentaram valores da resistência à tração para interface lisa maiores que o vibrado, seguidos do aumento proporcional quando analisadas a interface como vibrada e rugosa, sendo que para o complemento de alta resistência e leve com 50% de substituição, os valores da interface lisa foram inclusive maiores que da interface rugosa.

Notou-se que os corpos-de-prova que possuíam complemento com maior resistência da matriz ligante, apresentaram maior resistência à tração da interface principalmente para a interface de menor rugosidade. Verificou-se ainda que a redução da densidade do concreto leve como complemento provoca, em geral, menor resistência à tração da interface.

Quando avaliada a substituição do complemento por concretos com substituição de agregado leve, considerando o Teste de Tukey obteve-se para a interface lisa diferenças médias significativas entre a série AR-75% e as séries AR-AR, AR-25% AR-50% de 53,05%, 51,91% e 52,46%, respectivamente. Para a interface como vibrada não houve diferenças médias entre os grupos. E para a interface rugosa, o grupo com maior resistência à tração na interface foi o AR-25%, apresentando diferenças significativas médias de 35%, 31,44% e 22,94 em

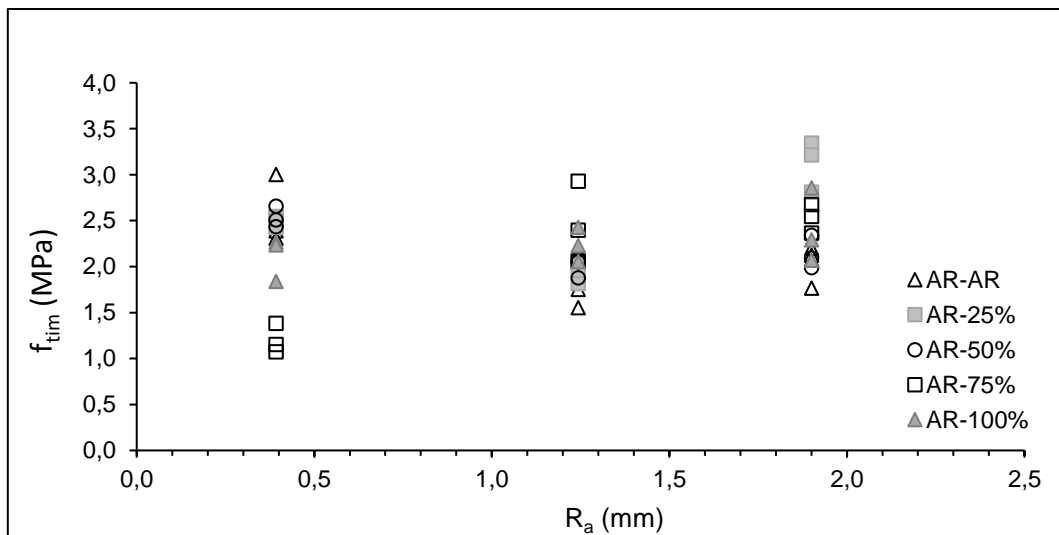
relação à série AR-AR, AR-50% e AR-100%, respectivamente. Os valores dos resultados estatísticos se encontram no Anexo B.3.1.

Quando avaliada a influência da rugosidade entre as séries, as de complemento (AR) e de 100% foram estatisticamente iguais para as combinações de rugosidade. Para o complemento de 25%, três combinações apresentaram diferenças significativas com 22,78 % entre a lisa (L) e como vibrada (V), 19,8% entre a lisa (L) e rugosa (R2) e 38,06% entre a vibrada (V) e rugosa (R2). Já para o complemento de 50%, teve diferenças significativas na interface lisa (L), em relação à como vibrada (V) de 21,26% e em relação à rugosa (R2) de 15,5%. O mesmo resultado foi obtido para o complemento de 75%, com diferenças significativas de 51,08% e 52,36% em relação à interface lisa (L) para a vibrada e rugosa, respectivamente.

Os resultados da resistência à tração média da interface ( $f_{tim}$ ) foram correlacionados com os principais parâmetros de rugosidade, obtidos nas superfícies do substrato. A Tabela 4.25 apresenta esses valores para os dois grupos que obtiveram melhores valores de correlação. Os três parâmetros de rugosidade que apresentaram melhor coeficiente de correlação com relação à resistência a tração da interface foram  $R_a$ ,  $R_p$  e  $R_v$ . Nas Figuras 4.83, 4.84 e 4.85 são plotados estes parâmetros vs a resistência à tração na interface ( $f_{tim}$ ), correspondente aos grupos avaliados. Foram plotados também os valores relativos aos parâmetros  $R_{pm}$  e  $R_{vm}$  (Figura 4.92 e Figura 4.93), uma vez que representam os valores médios destes parâmetros, podendo-se ter uma melhor análise.

**Tabela 4.25 - Coeficientes de correlação da resistência à tração ( $f_{tim}$ ) com os parâmetros de rugosidade para as séries AR-75%-PL e AR-100%-PL.**

Parâmetro	Séries	
	AR-75%-PL	AR-100%-PL
Ra	0,92	0,99
Rz(DIN)	0,81	1,00
R <sub>max</sub>	0,83	1,00
R <sub>3z</sub>	0,76	0,99
R <sub>3zmax</sub>	0,81	1,00
Rz(ISO)	0,92	0,99
R <sub>y</sub>	0,83	1,00
R <sub>pm</sub>	0,82	1,00
R <sub>p</sub>	0,90	0,99
R <sub>vm</sub>	0,81	1,00
R <sub>v</sub>	0,88	1,00



**Figura 4.89 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_a$ ).**

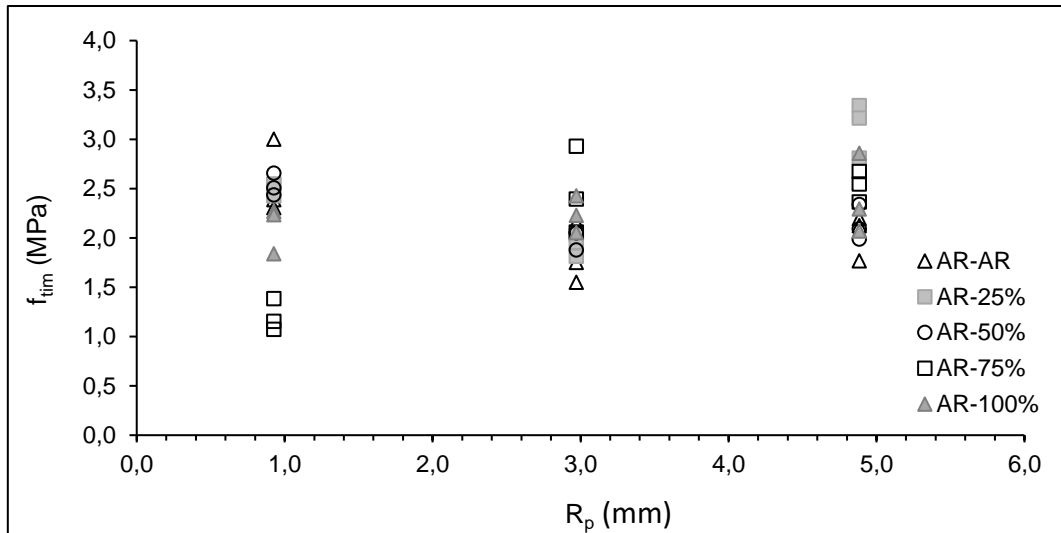


Figura 4.90- Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_p$ ).

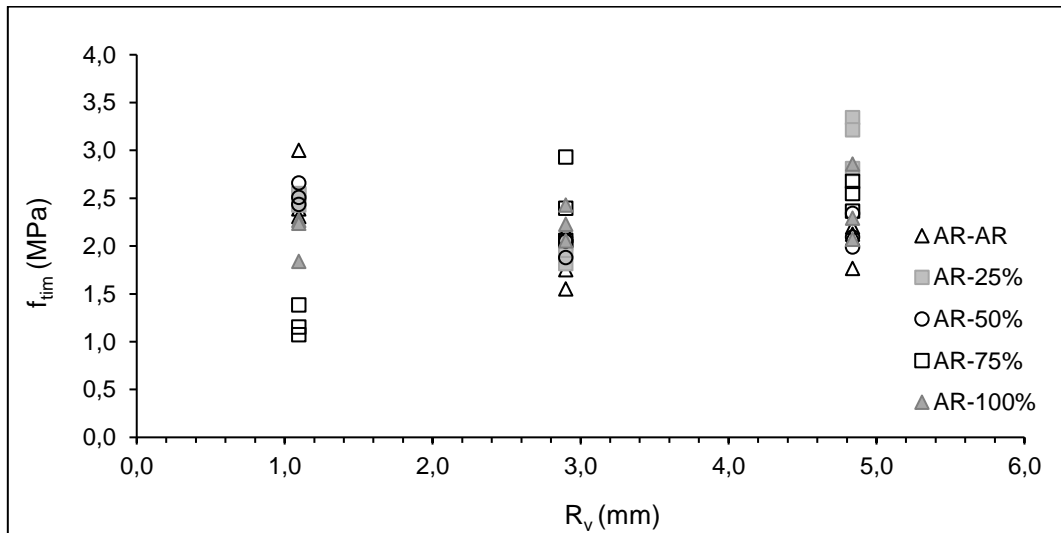


Figura 4.91 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_v$ ).

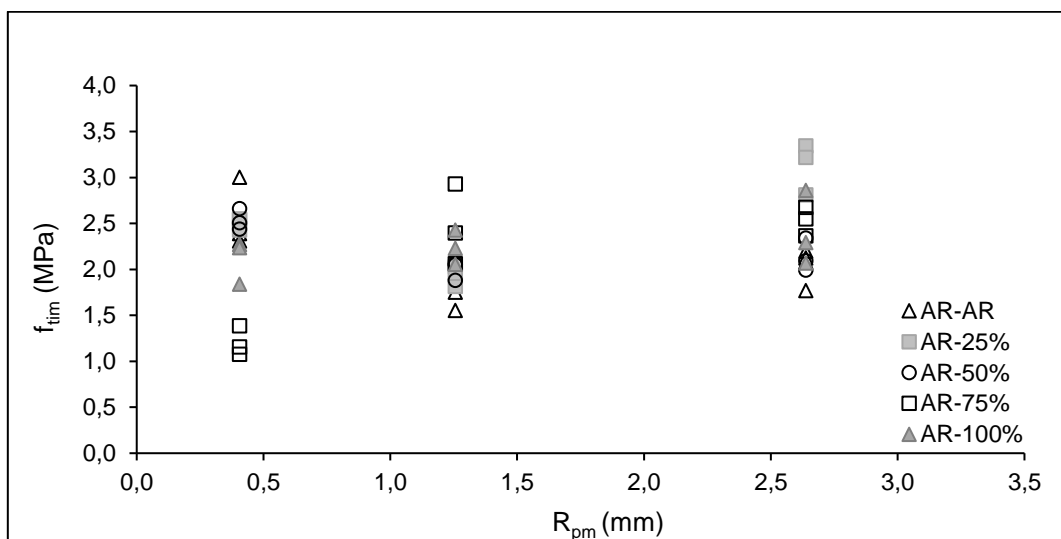


Figura 4.92 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_{pm}$ ).

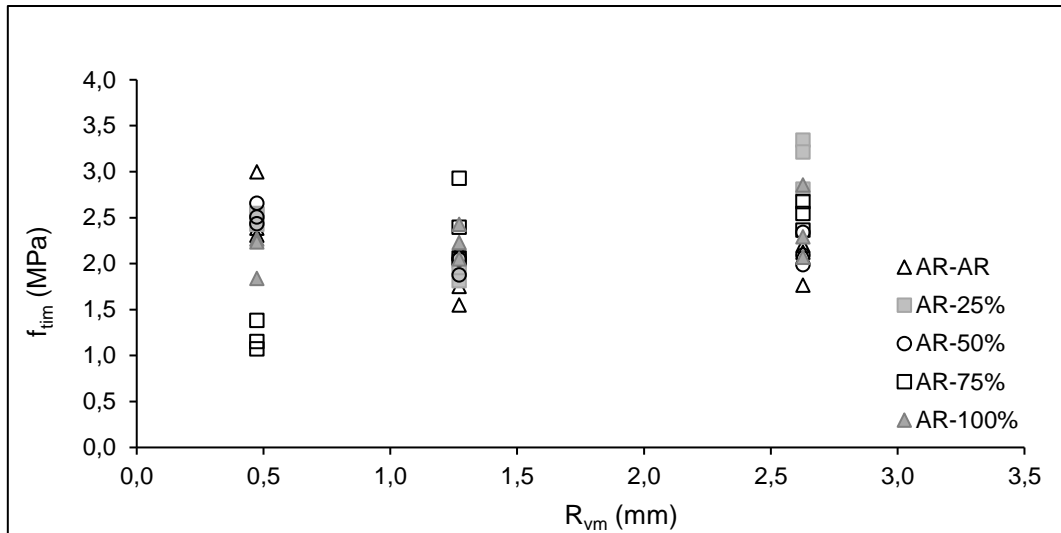


Figura 4.93 - Resistência à tração na interface vs parâmetro de rugosidade ( $R_{vm}$ ).

Com base nos resultados obtidos, relacionou-se o valor médio da resistência à tração da interface,  $f_{tim}$ , com o valor médio da resistência à tração por compressão diametral do concreto de menor resistência,  $f_{ct,sp}$ , obtendo-se um coeficiente de adesividade ( $a$ ), para as interfaces avaliadas, calculado pela Equação 4.13. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.26.

$$a = \left( \frac{f_{tim}}{f_{ct,sp}} \right) \quad (4.13)$$

Tabela 4.26- Valores do coeficiente de adesividade ( $a$ ) para os grupos do ensaio de resistência à tração na interface.

Corpos-de-prova	$a$ (adesividade)	$R_a$ (mm)	$R_{pm}$ (mm)	$R_p$ (mm)	$R_{vm}$ (mm)	$R_v$ (mm)
AR-AR-L-PL	0,69	0,39	0,40	0,93	0,47	1,10
AR-AR-V-PL	0,49	1,24	1,26	2,97	1,27	2,90
AR-AR-R-PL	0,61	1,90	2,64	4,88	2,63	4,84
AR-25%-L-PL	0,75	0,39	0,40	0,93	0,47	1,10
AR-25%-V-PL	0,58	1,24	1,26	2,97	1,27	2,90
AR-25%-R-PL	0,93	1,90	2,64	4,88	2,63	4,84
AR-50%-L-PL	0,93	0,39	0,40	0,93	0,47	1,10
AR-50%-V-PL	0,73	1,24	1,26	2,97	1,27	2,90
AR-50%-R-PL	0,79	1,90	2,64	4,88	2,63	4,84
AR-75%-L-PL	0,53	0,39	0,40	0,93	0,47	1,10
AR-75%-V-PL	1,08	1,24	1,26	2,97	1,27	2,90
AR-75%-R-PL	1,11	1,90	2,64	4,88	2,63	4,84
AR-100%-L-PL	1,26	0,39	0,40	0,93	0,47	1,10
AR-100%-V-PL	1,33	1,24	1,26	2,97	1,27	2,90
AR-100%-R-PL	1,43	1,90	2,64	4,88	2,63	4,84

Os valores obtidos relativos ao parâmetro de adesividade da interface, quando comparados com os parâmetros de rugosidade, para os três tipos de rugosidades do substrato são mostrados na Tabela 4.26. Observou-se que os valores do coeficiente de adesividade ( $a$ ), obtidos nos corpos-de-prova com substrato AR e complemento AR, foram inferiores aos correspondentes valores médios obtidos nos corpos-de-prova com os complementos leve (principalmente para as séries AR-75% e AR-100%), com exceção para apenas um corpo-de-prova da série AR-75%. Assim, estes foram agrupados em duas séries e plotados nas Figura 4.94 à Figura 4.98.

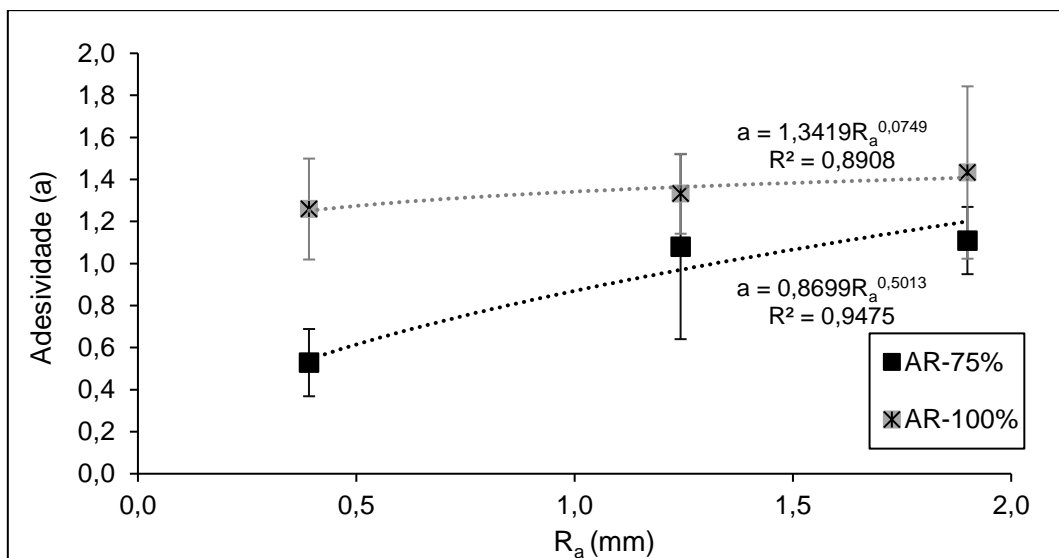


Figura 4.94 - Correlação entre o parâmetro  $R_a$  e coeficiente de adesividade.

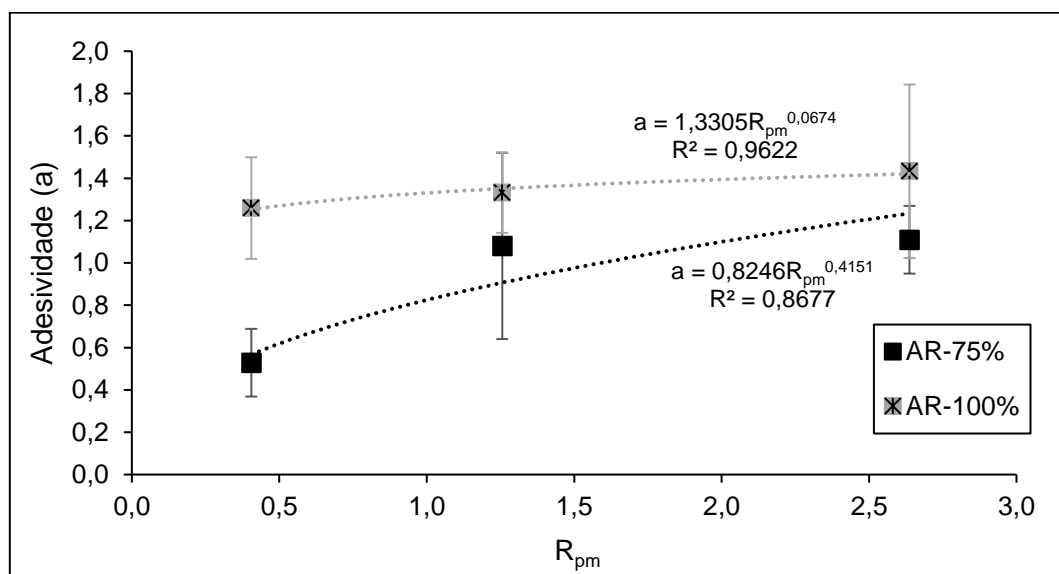


Figura 4.95 - Correlação entre o parâmetro  $R_{pm}$  e coeficiente de adesividade.

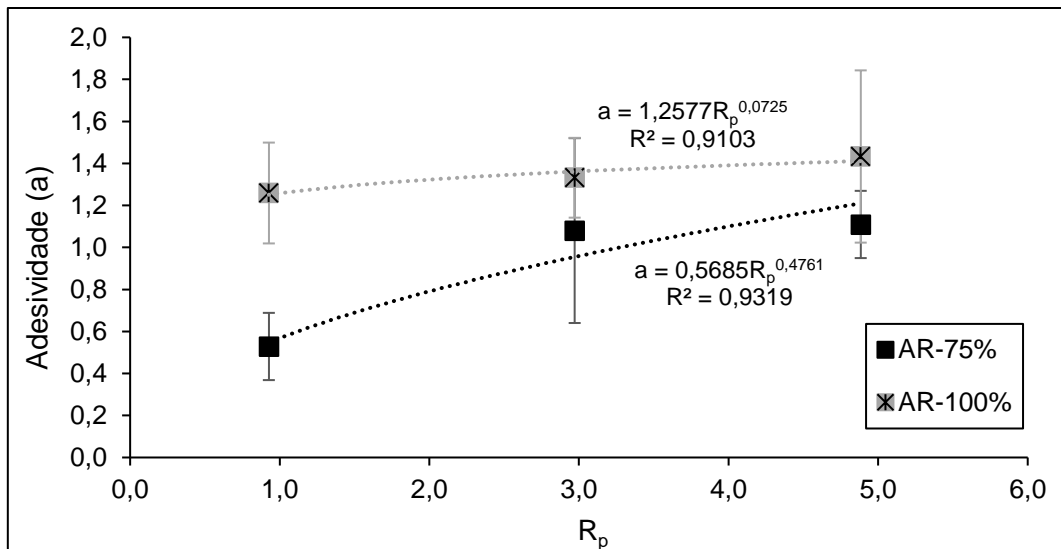


Figura 4.96 - Correlação entre o parâmetro  $R_p$  e coeficiente de adesividade.

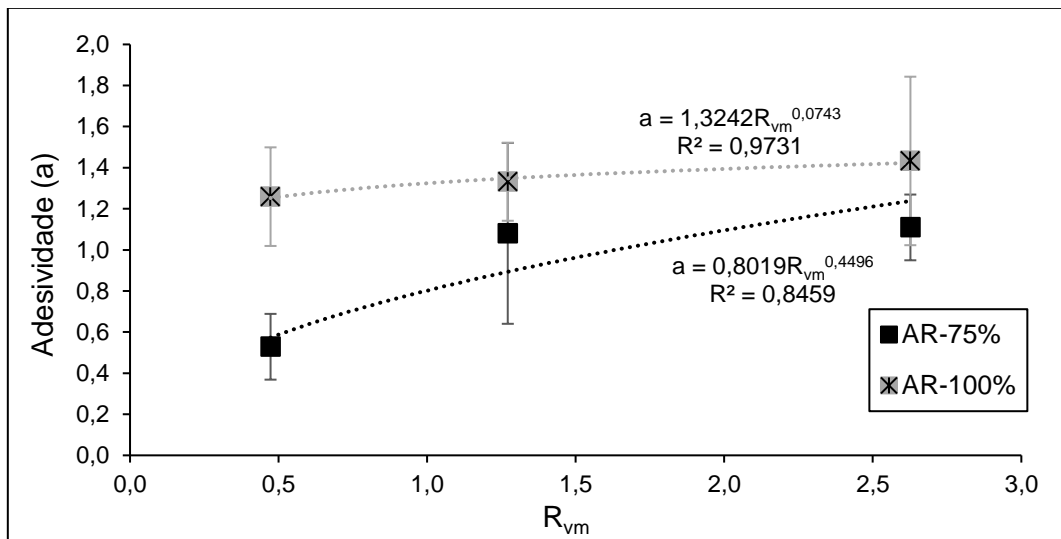


Figura 4.97 - Correlação entre o parâmetro  $R_{vm}$  e coeficiente de adesividade.

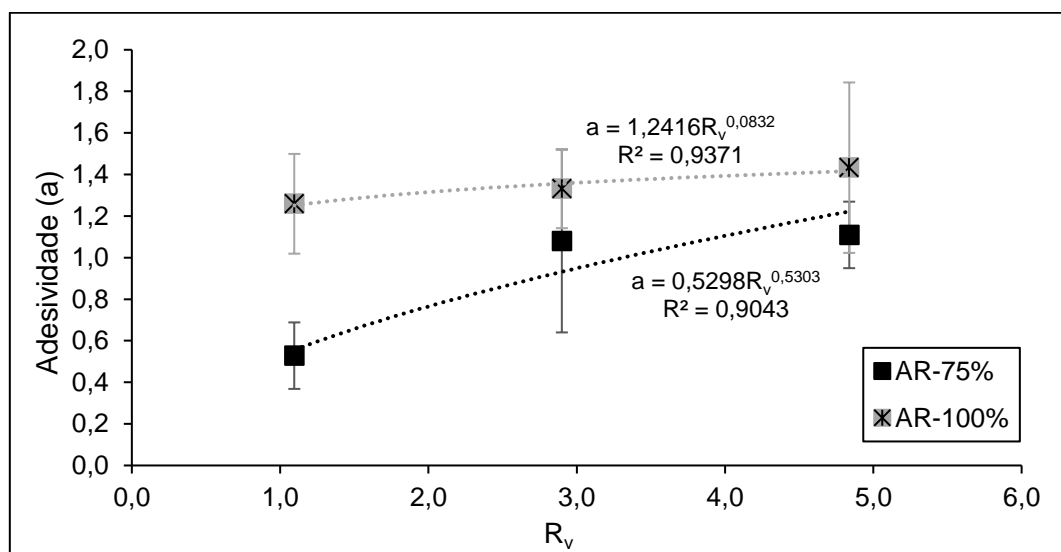


Figura 4.98 - Correlação entre o parâmetro  $R_v$  e coeficiente de adesividade.



Estudou-se também a correlação entre os valores obtidos para o coeficiente de adesividade apresentados na Tabela 4.26 e os parâmetros de rugosidade plotados para as séries AR-75% e AR-100%, os mesmos apresentaram boa correlação. Para a série AR-75% a melhor correlação foi fornecida pelo parâmetro Ra e para a série AR-100%, todos os parâmetros avaliados apresentaram uma correlação próxima a 1, como mostrado na Tabela 4.27.

**Tabela 4.27- Coeficientes de correlação entre adesividade e parâmetros de rugosidade.**

Série	Coeficiente				
	R <sub>a</sub>	R <sub>pm</sub>	R <sub>p</sub>	R <sub>vm</sub>	R <sub>v</sub>
AR-75%	0,92	0,82	0,90	0,81	0,88
AR-100%	0,98	1,00	0,99	1,00	1,00

A diferença entre as duas séries consideradas é notória, sendo propostas diferentes expressões. Assim, conclui-se que o tipo de concreto leve do complemento, 75% ou 100%, tem influência na curva de melhor ajuste que correlaciona o coeficiente de adesividade com os parâmetros de rugosidade. A diferença deve-se, provavelmente, à diferença entre as resistências da matriz ligante dos complementos avaliados.

#### **4.5 - Comparação dos ensaios de aderência**

A resistência à aderência da interface, ou seja, a ligação entre a camada concreto-concreto obtida no ensaio depende, em certa medida, da configuração de ensaio escolhido. Como já mencionado, a sensibilidade para a configuração do ensaio ocorre devido à interação de tensões normais e de cisalhamento, os diferentes estados e distribuições de tensões e possíveis efeitos de excentricidades não pretendidas. Além disso, procura-se fórmulas de conversão direta entre a resistência à tração e a tensão de cisalhamento na interface. No entanto, a dispersão dos resultados experimentais disponíveis é significativa, além da grande variedade de parâmetros relacionados ao tipo de concreto e dos fatores de preparação da superfície.

Devido à dificuldade de realizar alguns testes de ligação rotineiramente existe um interesse por parte de alguns pesquisadores como Espeche e León (2011), em definir fatores de conversão entre diferentes ensaios e, principalmente, em usar dados de ensaios de tração obtidos de ensaios como *pull-off* e *splitting test* para estimar a ligação de cisalhamento.

No entanto, esse problema é altamente sensível aos modos de ruptura e deve ser levado em conta prioritariamente em configurações de ensaio que permitam ruptura na interface ao invés de ruptura do material (substrato ou complemento).

Partindo desse pressuposto, para esta pesquisa foram correlacionados os ensaios realizados a fim de contribuir com a relação entre a resistência à tração e cisalhamento para as interfaces como vibrada (V) e rugosa (R2). A Figura 4.100 mostra os valores para os três tipos de ensaios, para as séries estudadas com interfaces em comum.

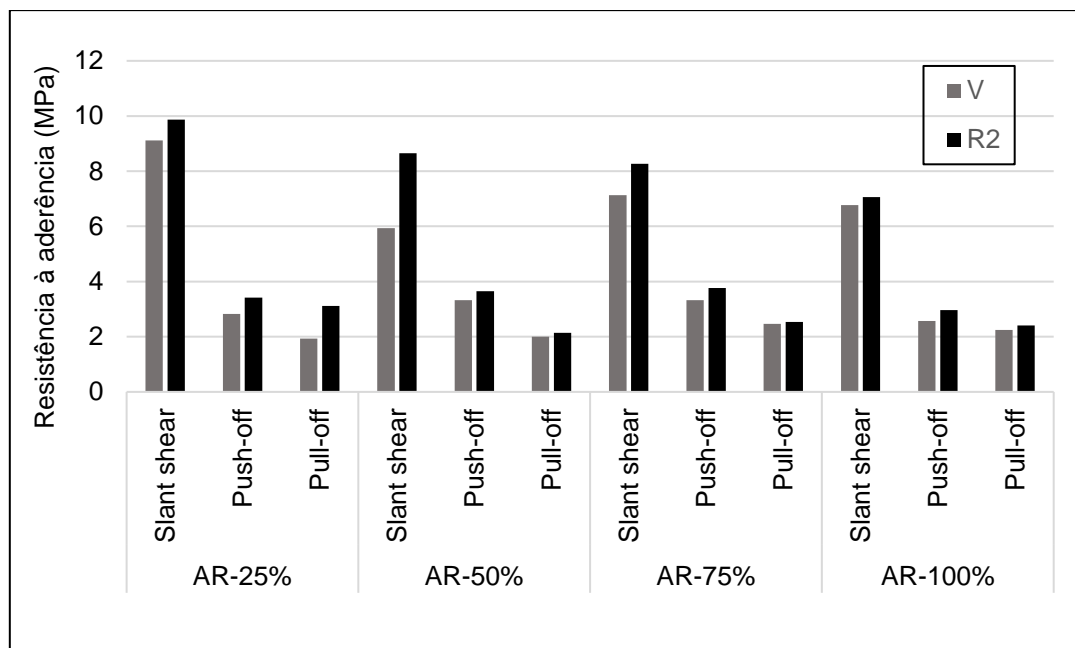


Figura 4.99 - Resultado dos ensaios para avaliação da aderência para as séries em comum.

A Tabela 4.28 apresenta a relação entre os ensaios de *slant shear* (SS), *pull-off* (PO) e *push-off* (PS). Foram calculados os valores individuais para cada série e também a média entre as séries de substrato AR e complemento de concreto com substituição de agregado leve.

**Tabela 4.28 - Relação entre os resultados dos ensaios de *slant shear*, *pull-off* e *push-off*.**

Interface	Série	SS/PS	SS/PO	PS/PO
COMO VIBRADA (V)	AR-25%	3,23	4,72	1,46
	AR-50%	1,79	2,97	1,66
	AR-75%	2,15	2,90	1,35
	AR-100%	3,02	3,02	1,15
	Média	<b>2,55</b>	<b>3,40</b>	<b>1,40</b>
RUGOSA (R2)	AR-25%	2,89	3,16	1,10
	AR-50%	2,37	4,04	1,71
	AR-75%	2,20	3,27	1,49
	AR-100%	2,39	2,93	1,23
	Média	<b>2,46</b>	<b>3,35</b>	<b>1,38</b>

Pode-se notar que quando calculado as três relações médias entre os ensaios realizados para a interface como vibrada (V) e rugosa (R2) os valores foram próximos, sendo de 2,55 e 2,46 para a relação entre os ensaios de *slant shear* e *push-off*, 3,40 e 3,35 para *slant shear* e *pull-off* e 1,40 e 1,38 entre o *push-off* e o *pull-off*. Ou seja, a maior relação foi obtida entre o ensaio de tração, no caso o *pull-off* e o ensaio de *slant shear* que é comumente utilizado para avaliar a ligação concreto-concreto.

Semendary e Svecova (2020) em seu estudo para avaliar a resistência da ligação em interfaces secas e pré saturadas de concreto normal e UHPC, correlacionou os resultados de ensaios de tração direta, cisalhamento duplo e *slant shear*. Para amostras de preparação de superfície seca, a resistência média de ligação à tração foi 1,15 vezes maior do que a resistência de cisalhamento duplo. Entretanto, a resistência ao cisalhamento através do *slant shear*, incluindo o atrito devido às tensões de compressão, foi 5,6 e 6,4 vezes maior do que a resistência à tração e ao cisalhamento duplo, respectivamente. Segundo os autores, esse valor mais elevado se deve à tensão de compressão no ensaio de *slant shear* que aumenta o atrito e leva a uma maior resistência de ligação. Para amostras de preparação de superfície saturada, a resistência média à tração de ligação foi 0,94 vezes o valor da resistência ao cisalhamento

duplo e a resistência média do *slant shear* foi 5,5 e 5,2 vezes maior do que a resistência à tração e ao cisalhamento duplo, respectivamente.

Segundo Zanotti e Randl (2019), nas investigações foi dada ênfase à validação do ensaio de *pull-off* e à correlação entre os dados do *pull-off* e a resistência de ligação ao cisalhamento, uma vez que o ensaio de *pull-off* além de ser o ensaio de ligação mais simples disponível, também permite uma análise mais rápida da qualidade da ligação entre um concreto novo e um já existente. Porém, relataram que a relação entre a resistência ao cisalhamento e à ruptura por tração é significativamente afetada pelo método usado para determinar a coesão.

A resistência à tração de ligação é menos influenciada pelo atrito e depende da coesão em comparação com a resistência ao cisalhamento, que é altamente influenciada pelo atrito. O *slant shear* proporciona maior resistência devido à existência da tensão de compressão na interface, o que melhora os mecanismos de intertravamento e atrito (Momayez *et al.*, 2005).

No trabalho de Dagenais *et al.* (2017) foi relatado que a resistência de ligação medida decrescia na seguinte ordem: *slant shear*, cisalhamento duplo (*bi-shear*), *splitting* e *pull-off*. Para Semendary e Svecova (2020) ocorreu a seguinte ordem: *slant shear*, tração direta e cisalhamento duplo ou seja, a resistência mínima de ligação ocorreu sob condição de cisalhamento puro. Entretanto, os resultados da presente pesquisa apresentaram a seguinte ordem: *slant shear*, *push-off* e *pull-off* se assemelhando com os resultados de Dagenais *et al.* (2017), indicando que a menor resistência de ligação ocorreu sob condição de tração e não de cisalhamento puro.

#### **4.6 - Abordagem analítica-experimental**

Com base na análise feita por Santos (2009) foi possível realizar uma abordagem analítica-experimental, considerando os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, foram determinados assim os valores de cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) através do critério de ruptura do Círculo de Mohr Coulomb e comparando com os valores experimentais obtidos pelo ensaio de *push-off*.

Com base no critério de ruptura de *Mohr-Coulomb*, o envelope linear de falha para o concreto do substrato e para o concreto do complemento, como mostrado na Figura 4.100, foi definido usando o valor experimental da resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), obtido das três amostras cilíndricas ensaiadas juntamente com os ensaios de *slant shear*. A resistência à tração direta ( $f_{ct}$ ) correspondente foi obtida correlacionando o ensaio de tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ). A relação estabelecida foi igual a  $f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$ .

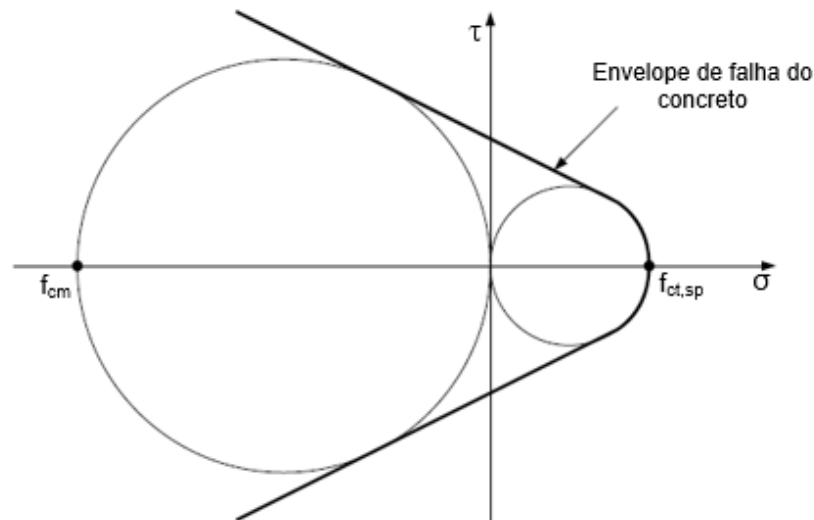
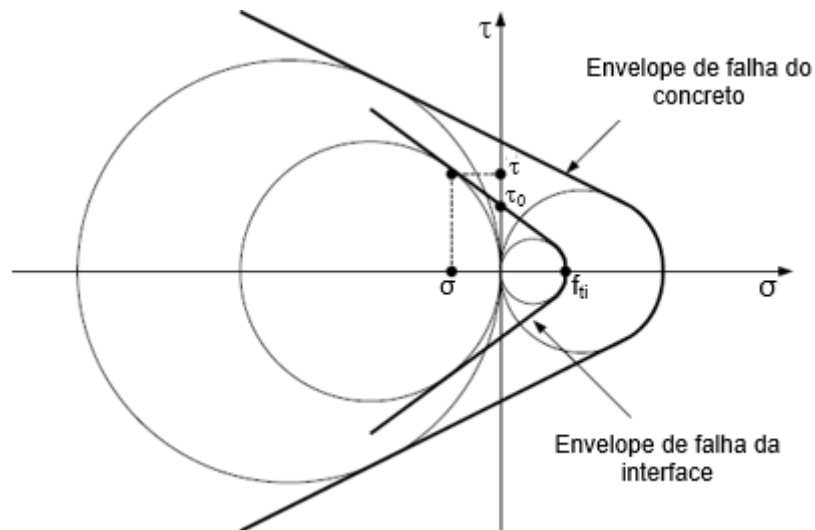


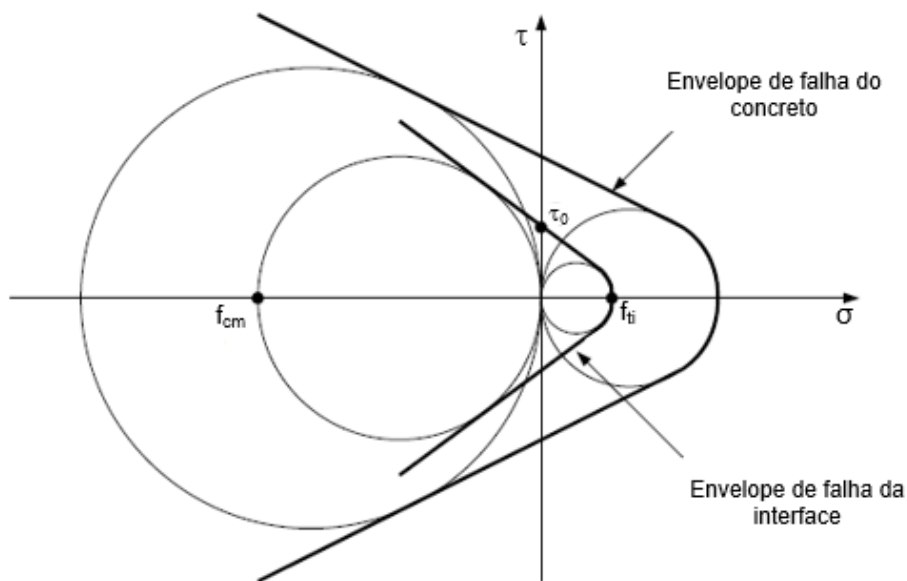
Figura 4.100 - Envelope de falha do concreto do substrato e do complemento baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Para os corpos-de-prova de *slant shear* que apresentam uma falha adesiva, o envelope de falha da interface foi definido usando os valores experimentais da resistência da interface tanto no cisalhamento ( $\sigma, \tau$ ) quanto a resistência à tração da interface ( $f_{ti}$ ), obtidas dos corpos-de-prova do ensaio de *slant shear* e do *pull-off*, respectivamente. Sendo assim, a resistência ao cisalhamento puro da interface ( $\tau_0$ ) foi calculado, como mostrado na Figura 4.101.



**Figura 4.101 - Tensão de cisalhamento puro para corpos-de-prova de *slant shear* que apresentam falha adesiva.**

Para os corpos-de-prova de *slant shear* que apresentaram uma ruptura coesiva, o envelope de falha da interface foi definido usando os valores experimentais da tensão de ruptura, tanto na compressão quanto na tração, obtidos a partir de corpos-de-prova de *slant shear* que apresentaram uma ruptura coesiva e de corpos-de-prova de tração diametral, respectivamente. O círculo de Mohr correspondente aos corpos-de-prova que apresentaram rupturas coesivas foi definido usando um único ponto sobre o eixo de tensão normal como mostra a Figura 4.102.



**Figura 4.102 - Critério de Mohr-Coulomb.**

Na Tabela 4.29 são apresentados os valores de resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ), tanto os obtidos experimentalmente para os corpos-de-prova do tipo *push-off*, quanto os calculados usando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a média para aqueles que tiveram a ruptura adesiva e para aqueles com ruptura coesiva. Esta separação foi feita para permitir uma comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) foi utilizado o software AutoCad® V 2020, onde foi plotado o círculo de Mohr para cada corpo-de-prova. Esta análise envolveu os resultados obtidos de resistência à tração média na interface ( $f_{ti}$ ), obtida pelo ensaio de *pull-off*, os valores de tensão normal ( $\sigma_u$ ) e a menor resistência à compressão e tração diametral, quando comparado a do substrato e do complemento, obtidos pelo ensaio de *slant shear*.

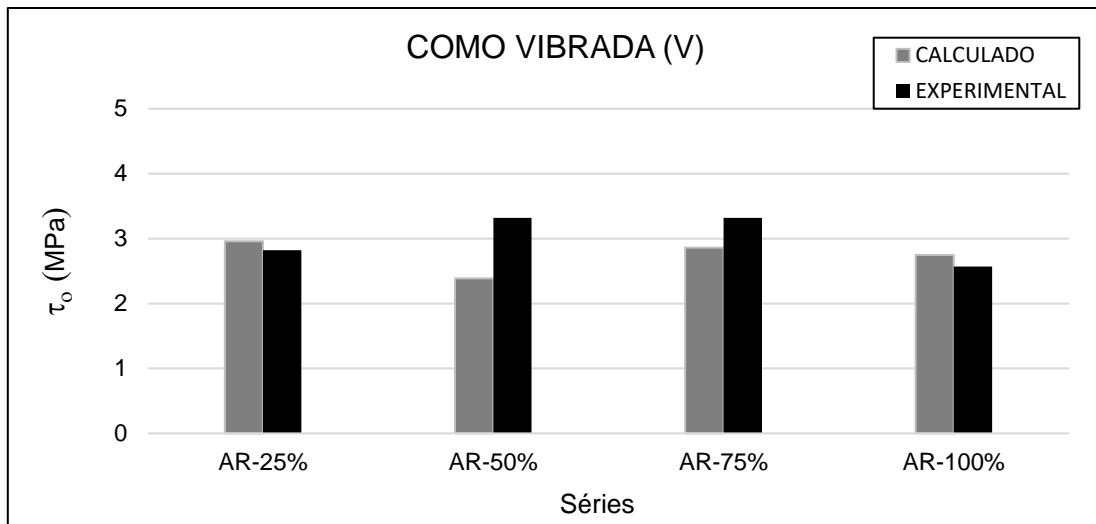
Os valores de resistência ao cisalhamento para os corpos-de-prova com interfaces lisa e rugosa (R2) também foram calculados, embora, não foi possível compará-los com os experimentais porque estes não foram experimentalmente determinados usando o ensaio do tipo *push-off*. Somente, como exposto acima, foram obtidos resultados experimentais com rugosidade como vibrada (V) e rugosa (R2).

Na Figura 4.103 é mostrada a comparação dos valores de resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) experimentais obtidos dos ensaios do tipo *push-off* e os calculados usando o critério de Mohr-Coulomb para as interfaces vibrada (V) e na Figura 4.104 para a interface rugosa (R2).

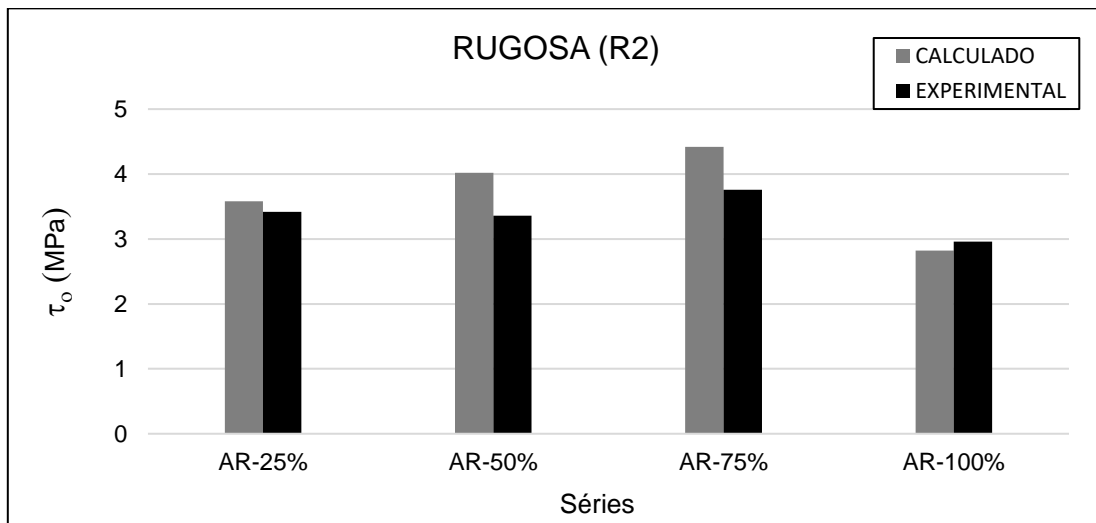
**Tabela 4.29 - Comparação dos valores de cisalhamento puro ( $\tau_o$ ) calculado pelo Critério de ruptura de Mohr-Coulomb com os valores obtidos experimentalmente.**

Número	Corpo-de-prova	Ruptura	$\tau_o$ calculado (MPa)	$\tau_o$ média adesiva (MPa)	$\tau_o$ média coesiva (MPa)	$\tau_o$ experimental (MPa)
1	1-AR-AR-L	Adesiva	4,45			
2	2-AR-AR-L	Adesiva	4,13	4,32		não ensaiado
3	3-AR-AR-L	Adesiva	4,39			
4	1-AR-AR-V	Adesiva	3,84			
5	2-AR-AR-V	Adesiva	3,27	3,52		não ensaiado
6	3-AR-AR-V	Adesiva	3,45			
7	1-AR-AR-R2	Adesiva	3,52			
8	2-AR-AR-R2	Adesiva	3,81	3,59		não ensaiado
9	3-AR-AR-R2	Adesiva	3,44			
10	1-AR-25%-L	Coesiva	5,41			
11	2-AR-25%-L	Coesiva	5,41	3,71	5,41	não ensaiado
12	3-AR-25%-L	Adesiva	3,71			
13	1-AR-25%-V	Adesiva	2,91			
14	2-AR-25%-V	Adesiva	3,05	2,96		2,82
15	3-AR-25%-V	Adesiva	2,93			
16	1-AR-25%-R2	Adesiva	3,68			
17	2-AR-25%-R2	Coesiva	6,21	3,68	6,15	3,42
18	3-AR-25%-R2	Coesiva	6,09			
19	1-AR-50%-L	Adesiva	3,42			
20	2-AR-50%-L	Adesiva	3,23	3,26	-	não ensaiado
21	3-AR-50%-L	Adesiva	3,13			
22	1-AR-50%-V	Coesiva	3,78			
23	2-AR-50%-V	Coesiva	3,95	2,39	3,87	3,32
24	3-AR-50%-V	Adesiva	2,39			
25	1-AR-50%-R2	Coesiva	3,98			
26	2-AR-50%-R2	Coesiva	3,90		4,02	3,36
27	3-AR-50%-R2	Coesiva	4,19			
28	1-AR-75%-L	Adesiva	2,19			
29	2-AR-75%-L	Adesiva	2,15	2,17	2,89	não ensaiado
30	3-AR-75%-L	Coesiva	2,89			
31	1-AR-75%-V	Adesiva	2,94			
32	2-AR-75%-V	Coesiva	4,23	2,86	4,23	3,32
33	3-AR-75%-V	Adesiva	2,78			
34	1-AR-75%-R2	Coesiva	4,55			
35	2-AR-75%-R2	Coesiva	4,43	-	4,42	3,76
36	3-AR-75%-R2	Coesiva	4,27			
37	1-AR-100%-L	Adesiva	2,39			
38	2-AR-100%-L	Adesiva	2,55	2,61		não ensaiado
39	3-AR-100%-L	Adesiva	2,88			
40	1-AR-100%-V	Adesiva	2,63			
41	2-AR-100%-V	Adesiva	2,86	2,75		2,57
42	3-AR-100%-V	Adesiva	2,76			
43	1-AR-100%-R2	Coesiva	3,59			
44	2-AR-100%-R2	Coesiva	4,22	2,92	3,91	2,96
45	3-AR-100%-R2	Adesiva	2,92			





**Figura 4.103 - Resistência ao cisalhamento puro calculado e experimental para a interface como vibrada.**



**Figura 4.104 - Resistência ao cisalhamento puro calculado e experimental para a interface rugosa.**

De forma geral nota-se que o valor de resistência ao cisalhamento puro ( $\tau_0$ ) calculado diminuiu quando o complemento possuía uma maior porcentagem de substituição de agregado leve e também comparando-se com a série AR-AR. Somente entre as séries AR-75% e AR-100% esse declínio não foi tão evidente, uma vez que os valores já são menores.

Também foi observado que com exceção da série AR-AR, para os demais casos os valores para a interface rugosa foram maiores que a interface como vibrada. A principal comparação dos valores calculados deve ser observada nos casos de ruptura adesiva, e, no entanto, os valores foram muito próximos, mostrando assim que a abordagem analítica através do critério de ruptura do

Círculo de Mohr, apresentou uma excelente relação com os valores obtidos experimentalmente para o cisalhamento puro através do ensaio de *push-off*.

#### **4.7 - Comparação entre a resistência ao cisalhamento experimental obtidas por modelos propostos por pesquisadores e normas**

Com a finalidade de avaliar o comportamento dos modelos propostos por Santos e Júlio (2012), Mohamed (2015) e Costa (2018) e as normas Model Code (2010), Eurocode (2010) foi determinada a resistência ao cisalhamento de interfaces concreto-concreto, para os corpos-de-prova do ensaio *slant shear* e os do ensaio *push-off*.

##### **4.7.1 - Corpos-de-prova *slant shear***

Nas Figuras 4.99 à 4.111 são apresentados os valores de resistência ao cisalhamento teórico vs experimental para as séries de corpos-de-prova do tipo *slant shear*. Os valores de resistência ao cisalhamento teórico foram calculados com as equações propostas pelos pesquisadores e normas, Eurocode (2010) Model Code (2010), Santos e Júlio (2012), Mohamed *et al.* (2015) e Costa (2018), com as Equações 2.15, 2.16, 2.20 e 2.26 respectivamente.

Os valores de resistência ao cisalhamento teórico obtido para cada corpo-de-prova plotados encontram-se no Anexo C.

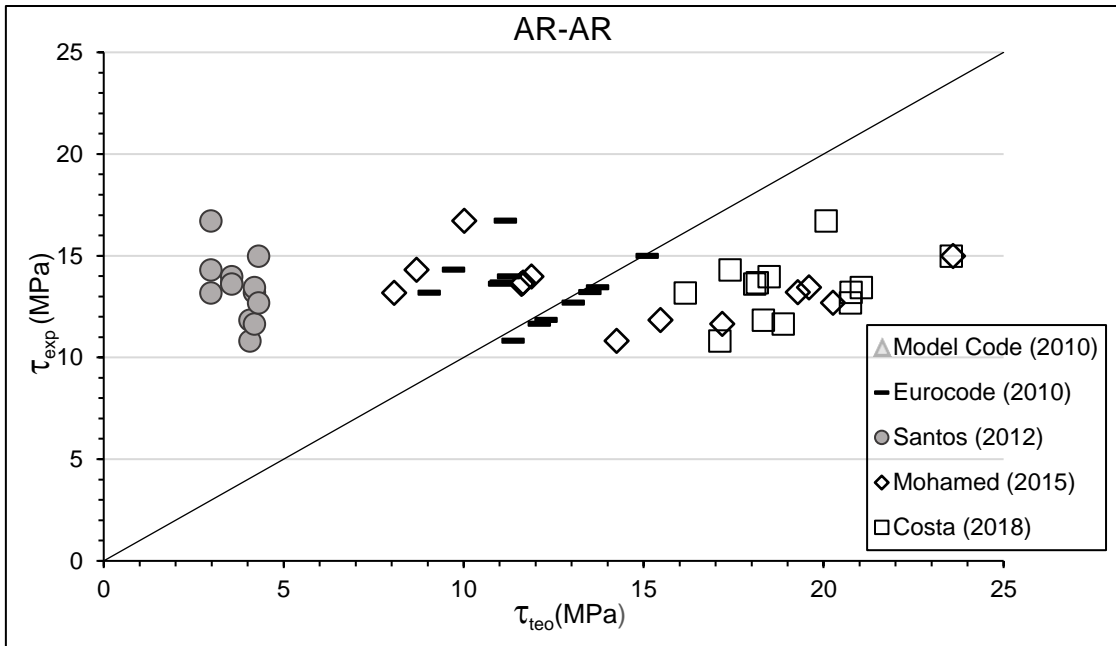


Figura 4.105 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-AR.

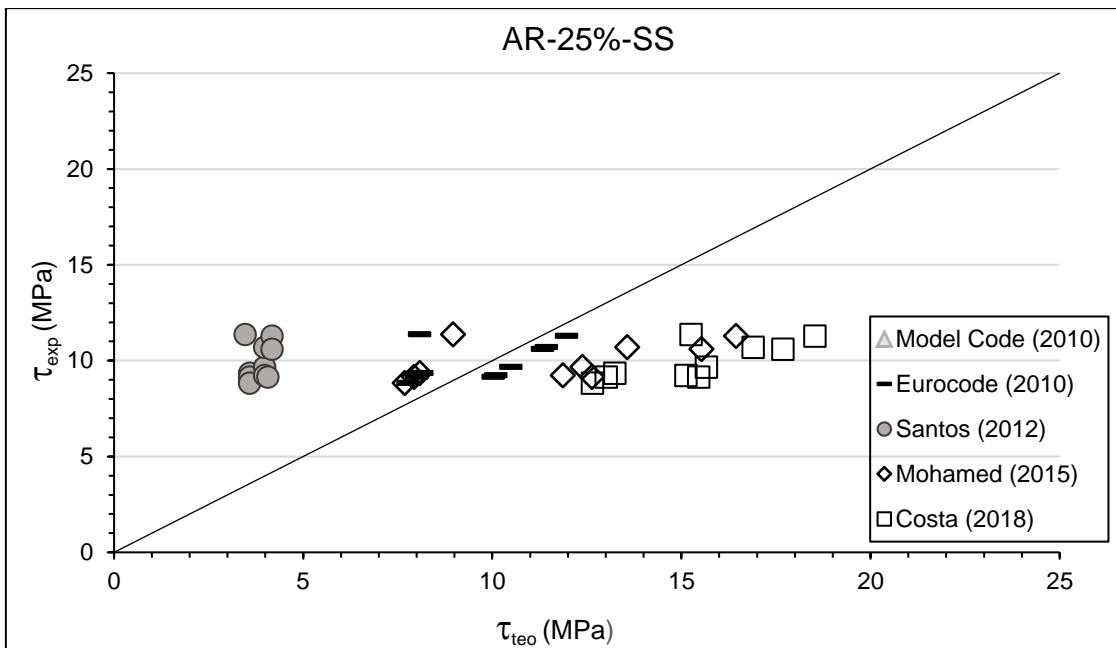


Figura 4.106 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-25%.

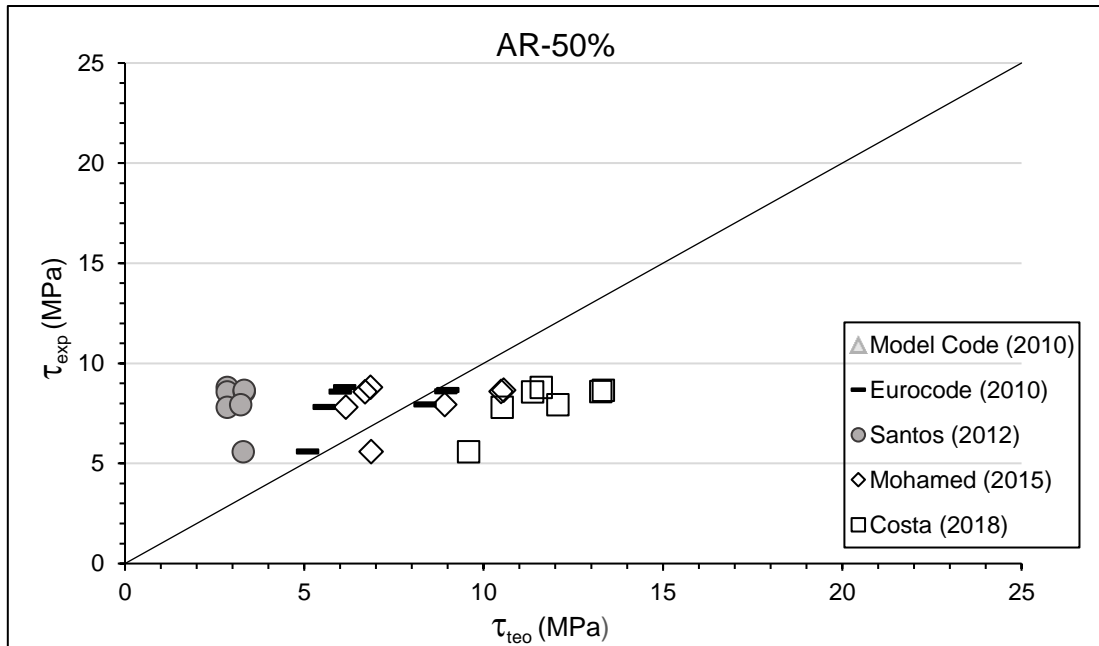


Figura 4.107 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-50%.

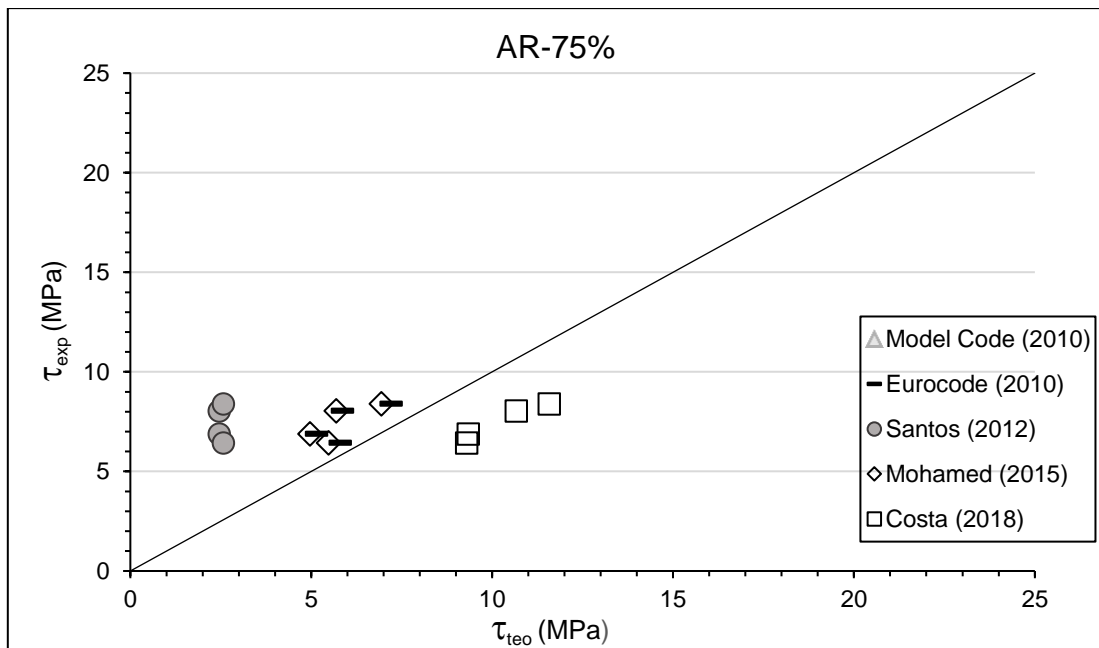
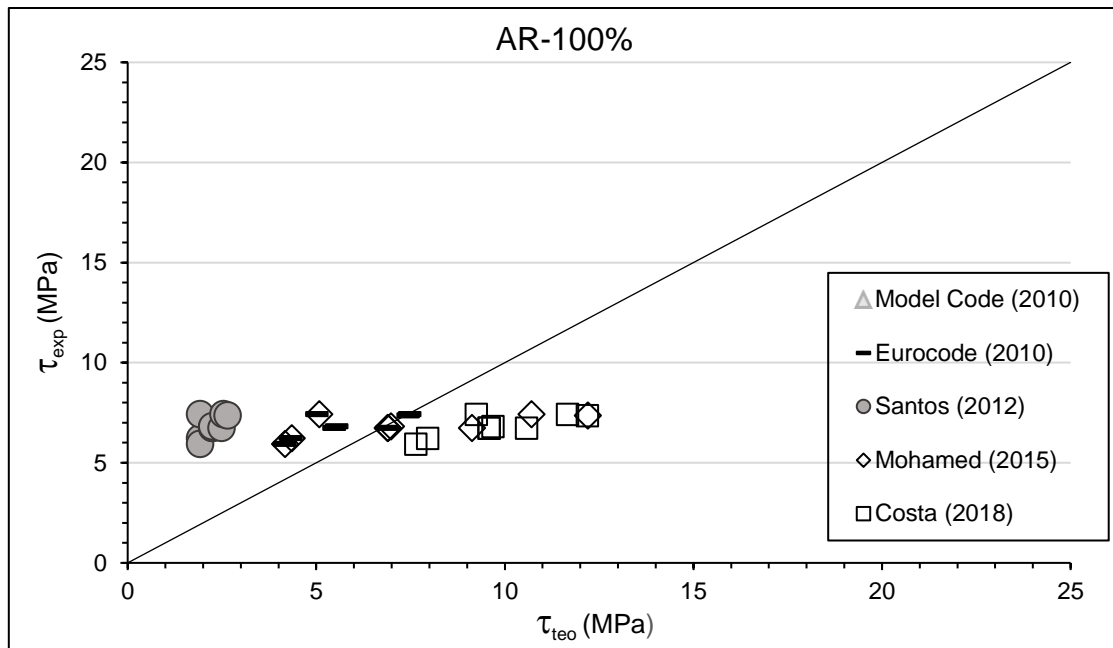
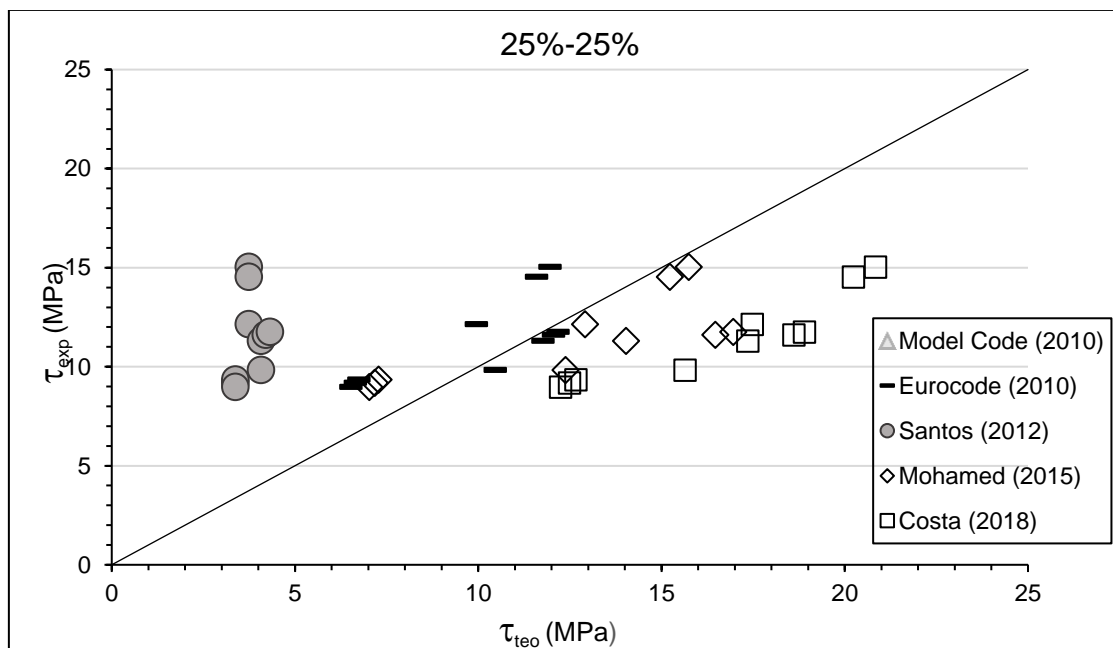


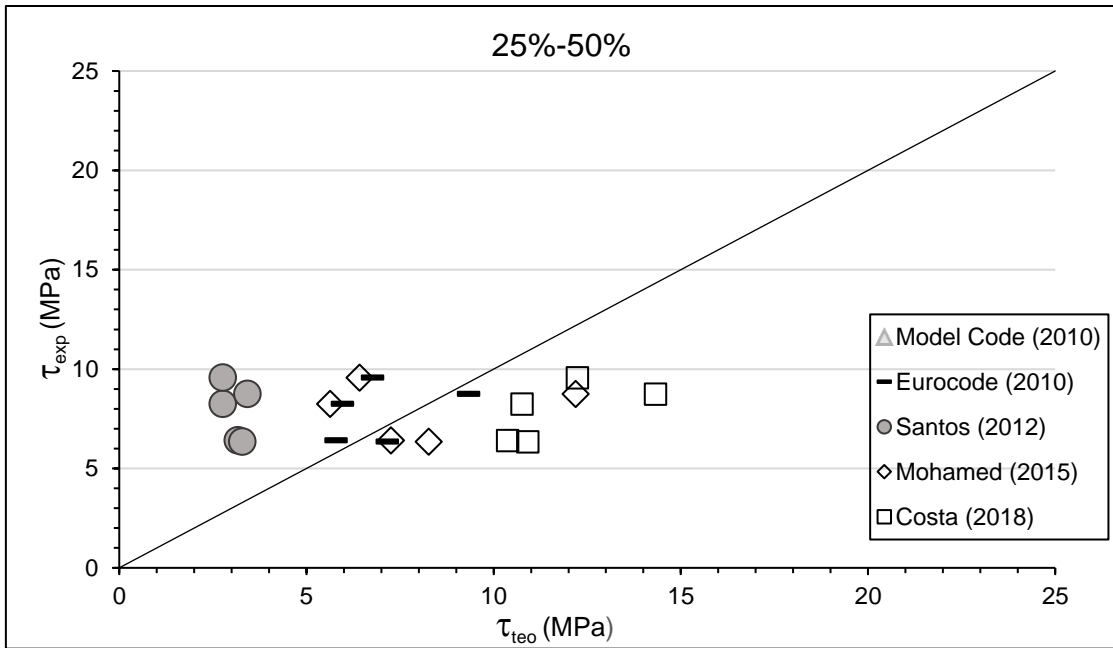
Figura 4.108 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-75%.



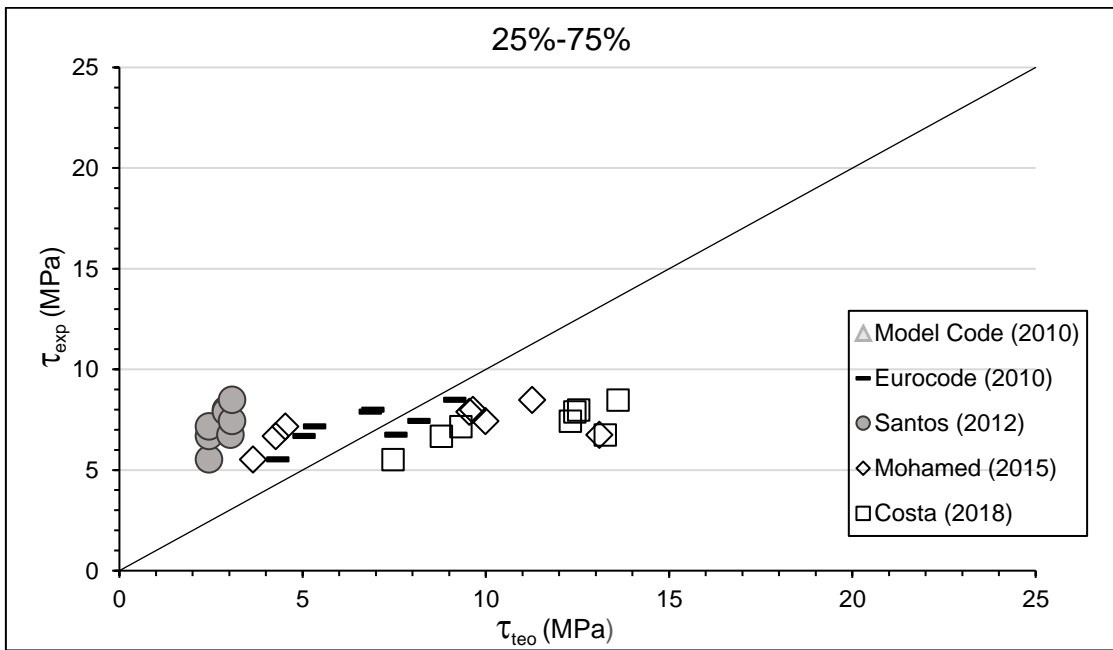
**Figura 4.109 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-100%.**



**Figura 4.110 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-25%.**



**Figura 4.111 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-50%.**



**Figura 4.112 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-75%.**

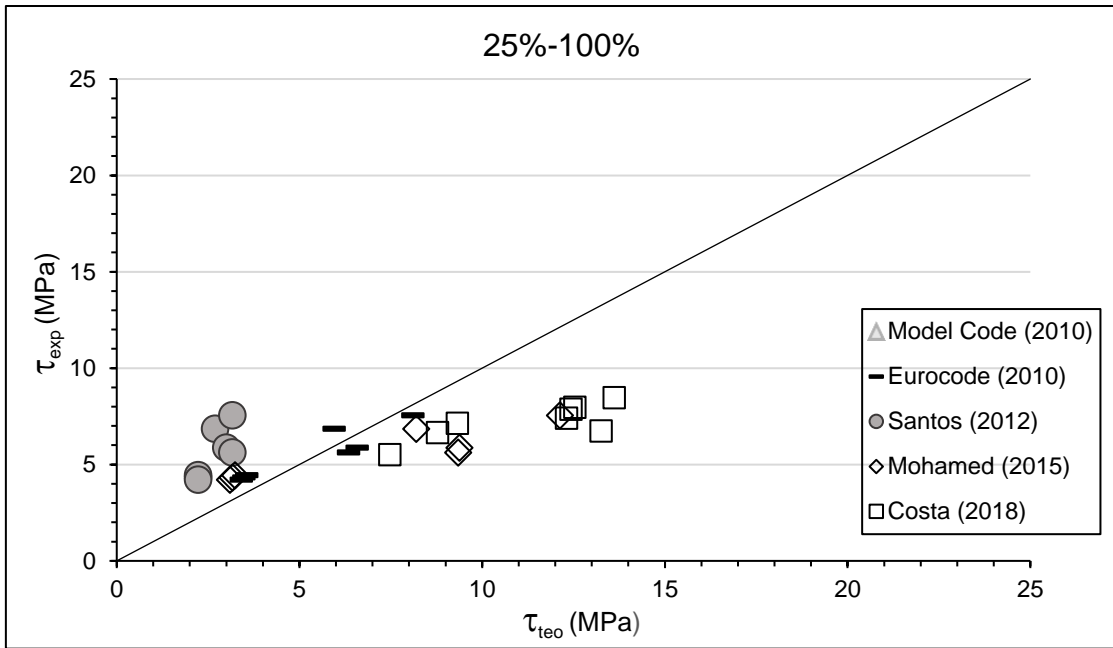


Figura 4.113 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 25%-100%.

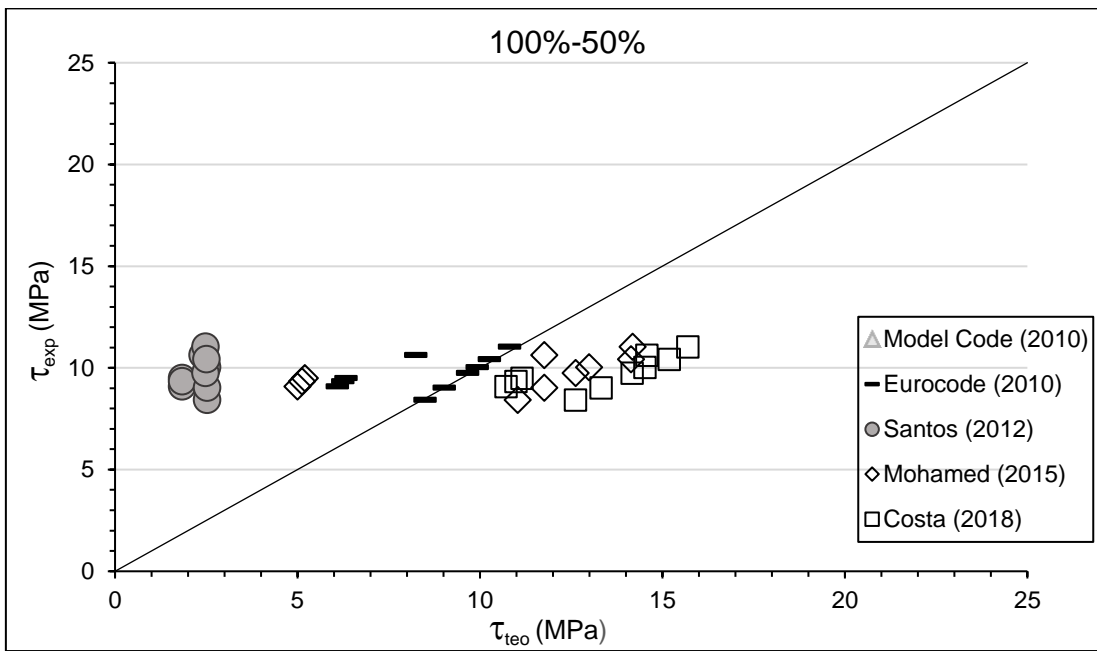


Figura 4.114 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-50%.

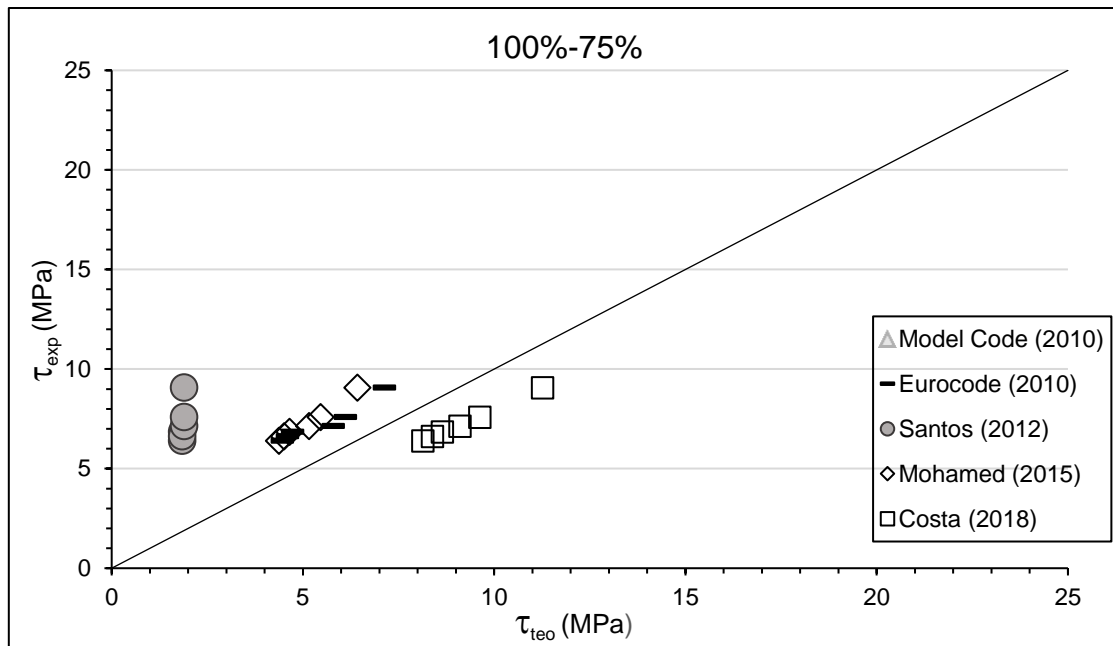


Figura 4.115 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-75%.

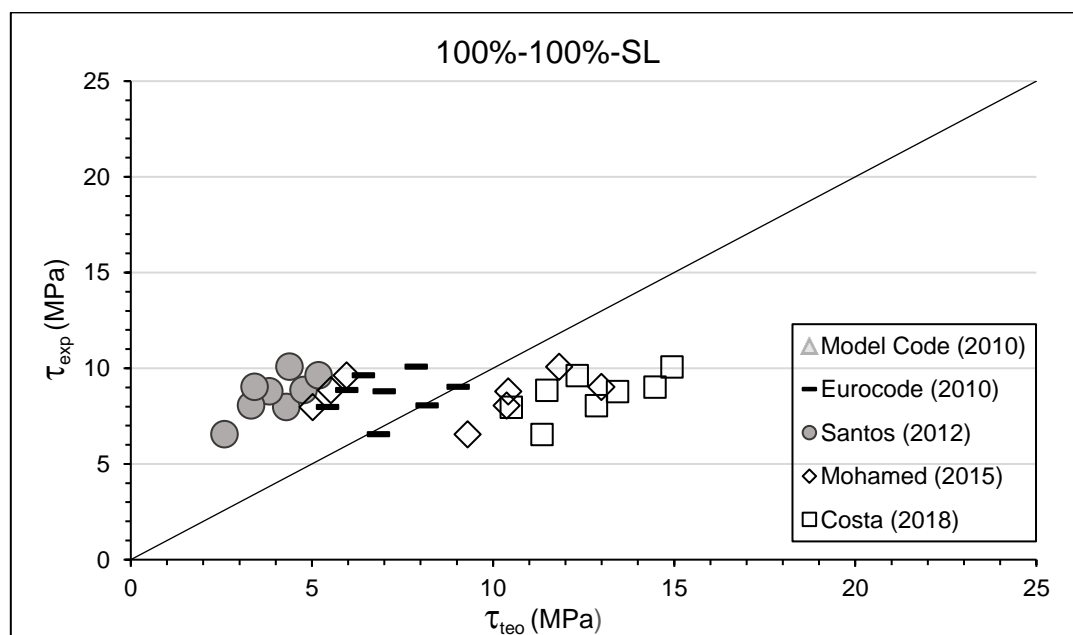


Figura 4.116 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série 100%-100%.

Com a finalidade de avaliar estatisticamente o comportamento de cada modelo são apresentadas nas Tabelas 4.30, 4.31 e 4.32 as relações entre os valores médios da resistência ao cisalhamento experimental e os valores médios da resistência ao cisalhamento teóricos calculados segundo os modelos propostos por pesquisadores e normas, avaliados para o substrato AR, 25% e 100%.



**Tabela 4.30 – Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do *slant shear* com substrato AR.**

Séries ( <i>slant shear</i> )	Parâmetros	$\tau_{exp}/$ Model Code (2010)	$\tau_{exp}/$ Eurocode (2010)	$\tau_{exp}/$ Santos e Júlio (2012)	$\tau_{exp}/$ Mohamad <i>et al.</i> (2015)	$\tau_{exp}/$ Costa (2018)
AR-AR	Média	<b>1,17</b>	<b>1,15</b>	<b>3,66</b>	<b>1,02</b>	<b>0,70</b>
	D. P. (MPa)	0,25	0,22	0,89	0,41	0,09
	C.V.(%)	21,30	18,96	24,30	40,29	12,48
AR-25%	Média	<b>1,06</b>	<b>1,04</b>	<b>2,59</b>	<b>0,92</b>	<b>0,65</b>
	D. P. (MPa)	0,19	0,16	0,29	0,23	0,06
	C.V.(%)	18,29	15,79	11,02	25,43	8,52
AR-50%	Média	<b>1,15</b>	<b>1,11</b>	<b>2,41</b>	<b>0,93</b>	<b>0,66</b>
	D. P. (MPa)	0,26	0,21	0,48	0,22	0,07
	C.V.(%)	22,77	18,58	19,85	23,92	9,96
AR-75%	Média	<b>1,16</b>	<b>1,14</b>	<b>2,89</b>	<b>1,19</b>	<b>0,71</b>
	D. P. (MPa)	0,04	0,04	0,54	0,03	0,02
	C.V.(%)	3,22	3,53	18,79	2,29	3,34
AR-100%	Média	<b>1,22</b>	<b>1,19</b>	<b>3,09</b>	<b>0,97</b>	<b>0,70</b>
	D. P. (MPa)	0,22	0,18	0,40	0,27	0,06
	C.V.(%)	17,80	15,41	12,94	28,02	8,53
<b>Média Geral</b>		<b>1,15</b>	<b>1,13</b>	<b>2,93</b>	<b>1,01</b>	<b>0,68</b>

D.P. = Desvio Padrão

C.V. = Coeficiente de Variação

**Tabela 4.31 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do *slant shear* com substrato 25%.**

Séries ( <i>slant shear</i> )	Parâmetros	$\tau_{exp}/$ Model Code (2010)	$\tau_{exp}/$ Eurocode (2010)	$\tau_{exp}/$ Santos e Júlio (2012)	$\tau_{exp}/$ Mohamad <i>et al.</i> (2015)	$\tau_{exp}/$ Costa (2018)
25%-25%	Média	<b>1,25</b>	<b>1,21</b>	<b>3,24</b>	<b>0,99</b>	<b>0,70</b>
	D. P. (MPa)	0,20	0,16	0,71	0,17	0,04
	C.V.(%)	15,89	13,37	21,95	17,59	5,96
25%-50%	Média	<b>1,18</b>	<b>1,14</b>	<b>2,47</b>	<b>1,05</b>	<b>0,66</b>
	D. P. (MPa)	0,31	0,27	0,86	<b>0,39</b>	<b>0,11</b>
	C.V.(%)	26,67	23,36	34,72	<b>37,08</b>	<b>16,15</b>
25%-75%	Média	<b>1,17</b>	<b>1,14</b>	<b>2,65</b>	<b>0,94</b>	<b>0,64</b>
	D. P. (MPa)	0,23	0,18	0,30	0,45	0,11
	C.V.(%)	19,25	16,17	11,17	48,30	16,53
25%-100%	Média	<b>1,28</b>	<b>1,20</b>	<b>2,22</b>	<b>1,10</b>	<b>0,67</b>
	D. P. (MPa)	0,15	0,06	0,46	0,37	0,05
	C.V.(%)	11,52	5,09	20,92	33,83	7,18
<b>Média Geral</b>		<b>1,22</b>	<b>1,17</b>	<b>2,64</b>	<b>1,02</b>	<b>0,67</b>

D.P. = Desvio Padrão

C.V. = Coeficiente de Variação

**Tabela 4.32 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do *slant shear* com substrato 100%.**

Séries ( <i>slant shear</i> )	Parâmetros	$\tau_{exp}/Model$ Code (2010)	$\tau_{exp}/Eurocode$ (2010)	$\tau_{exp}/Santos$ e Júlio (2012)	$\tau_{exp}/Mohamad$ <i>et al.</i> (2015)	$\tau_{exp}/Costa$ (2018)
100%-50%	Média	<b>1,22</b>	<b>1,20</b>	<b>4,10</b>	<b>1,06</b>	<b>0,73</b>
	D. P. (MPa)	0,28	0,25	0,79	0,51	0,08
	C.V.(%)	22,95	20,50	19,37	47,91	11,50
100%-75%	Média	<b>1,34</b>	<b>1,30</b>	<b>4,03</b>	<b>1,41</b>	<b>0,79</b>
	D. P. (MPa)	0,14	0,10	0,53	0,04	0,01
	C.V.(%)	10,21	7,56	13,05	2,81	1,21
100%-100%	Média	<b>1,38</b>	<b>1,35</b>	<b>4,47</b>	<b>1,10</b>	<b>0,70</b>
	D. P. (MPa)	0,17	0,13	0,69	0,44	0,07
	C.V.(%)	12,11	9,99	15,34	40,17	9,67
<b>Média Geral</b>		<b>1,31</b>	<b>1,28</b>	<b>4,20</b>	<b>1,19</b>	<b>0,74</b>

D.P. = Desvio Padrão

C.V. = Coeficiente de Variação

Quando avaliadas as Figuras 4.99 à 4.111 e os resultados apresentados nas Tabelas 4.30, 4.31 e 4.32, nota-se que o modelo de Mohamad *et al.* (2015) foi o que experimentou melhor comportamento para os corpos-de-prova avaliados, com média geral para as séries com substrato AR, 25% e 100% de 1,0, 1,02 e 1,19, respectivamente. Seguido deste modelo, foi a norma Eurocode (2010), com média geral para as séries com substrato AR, 25% e 100% de 1,13, 1,18 e 1,28, respectivamente. E por fim, o modelo da norma Model Code (2010) com média geral para as séries com substrato AR, 25% e 100% de 1,15, 1,22 e 1,31, respectivamente. E de encontro, o modelo de Santos e Júlio (2012) apresentou valores muito conservadores, para as séries com substrato AR, 25% e 100% com 2,96, 2,73 e 4,20, respectivamente. Por outro lado, o modelo de Costa (2018) forneceu valores médios gerais contra a segurança, para as séries com substrato AR, 25% e 100% com 0,68, 0,67 e 0,74, respectivamente.

#### 4.7.2 - Corpos-de-prova *push-off*

Nas Figuras 4.111 a 4.114 são apresentados os valores de resistência ao cisalhamento teórico vs experimental para as séries de corpos-de-prova do tipo *push-off*. Os valores de resistência ao cisalhamento teórico foram calculados

com as mesmas equações utilizadas nos corpos-de-prova do ensaio do tipo *slant shear*.

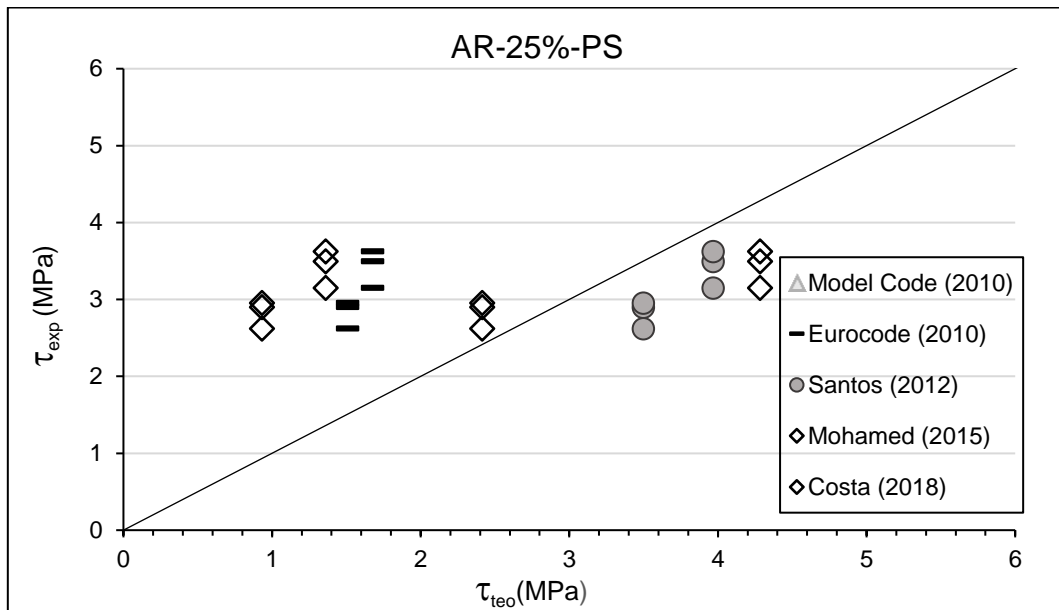


Figura 4.117 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-25%.

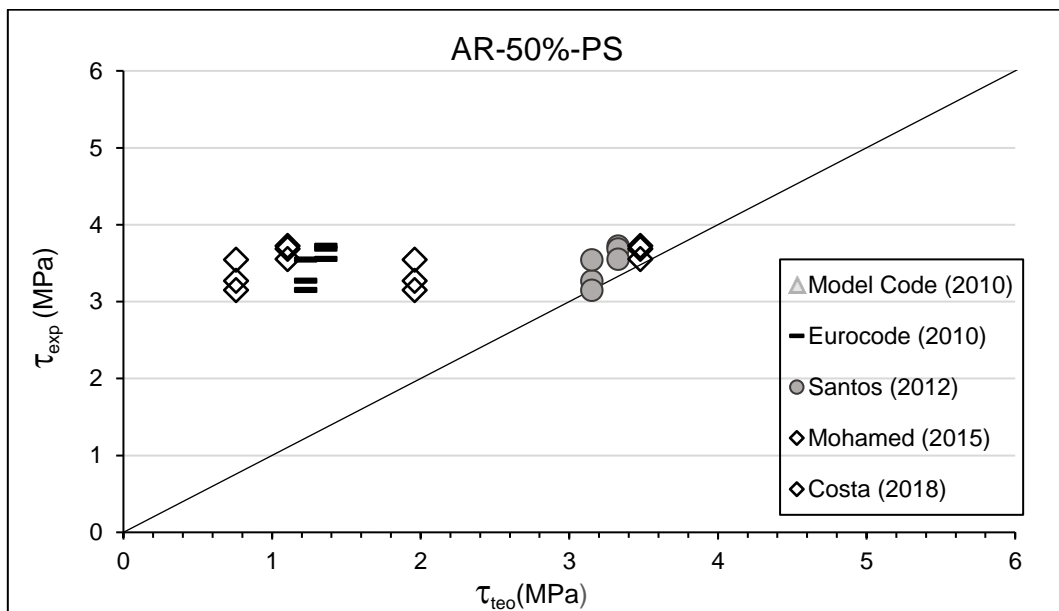


Figura 4.118 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-50%.

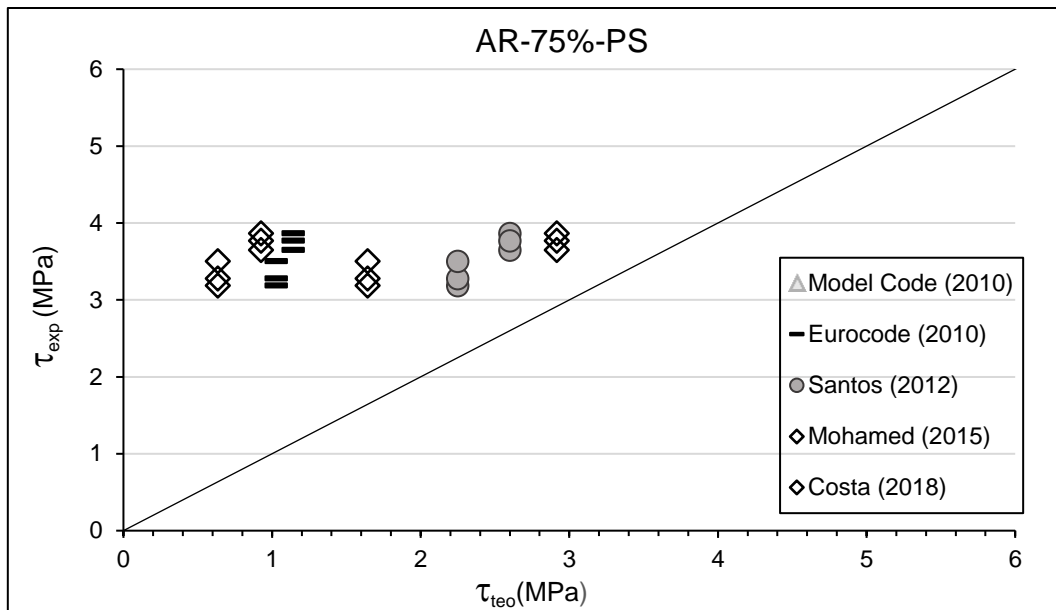


Figura 4.119 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-75%.

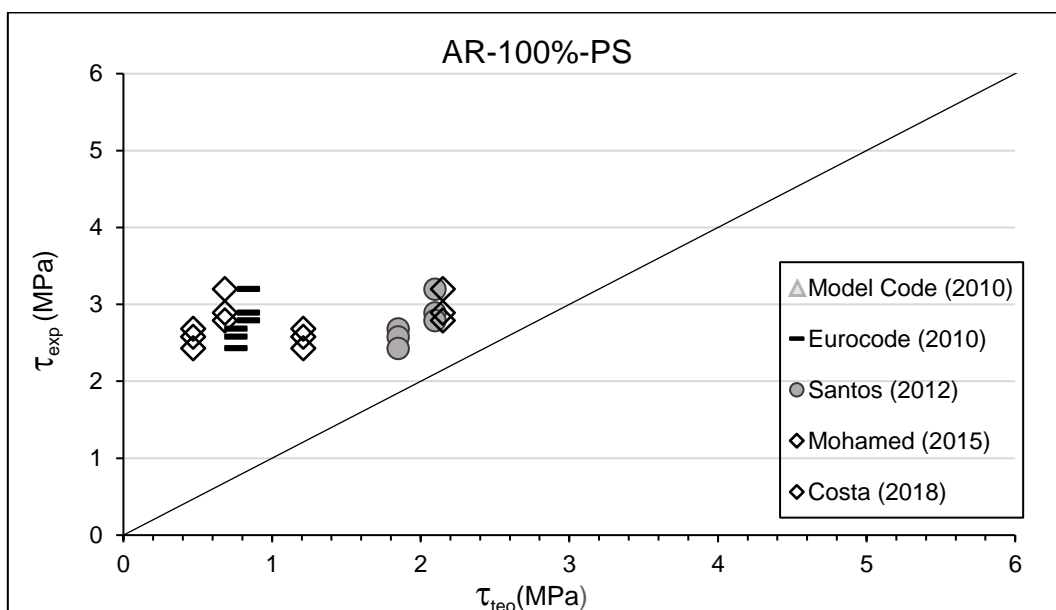


Figura 4.120 - Resistência ao cisalhamento teórica vs experimental para a série AR-100%.

Na Tabela 4.33 são apresentadas as relações entre os valores médios da resistência ao cisalhamento experimental e os valores médios da resistência ao cisalhamento teóricos calculados segundo os modelos propostos por pesquisadores e normas avaliados, para o substrato AR.

Quando avaliadas as Figuras 4.121 à 4.122 e os resultados apresentados, nota-se que o modelo de Santos e Júlio (2012) foi o que melhor comportamento

experimentou para os corpos-de-prova avaliados, com média geral de 1,0, 1,02 e 1,19, respectivamente. Seguido deste modelo, foi o da norma Eurocode (2010), com média geral 1,19. Já os demais modelos foram muito conservadores, na ordem o de Costa (2018), Eurocode (2010), Model code (2010), e Mohamad *et al.* (2015) com valores de 1,44, 2,85, 3,02 e 4,02, respectivamente.

**Tabela 4.33 - Relações entre a resistência ao cisalhamento experimental média e teórica para as séries do *push-off*.**

Séries ( <i>push-off</i> )	Parâmetros	$\tau_{exp}/$ Model Code (2010)	$\tau_{exp}/$ Eurocode (2010)	$\tau_{exp}/$ Santos e Júlio (2012)	$\tau_{exp}/$ Mohamad <i>et al.</i> (2015)	$\tau_{exp}/$ Costa (2018)
AR-25%	Média	<b>2,08</b>	<b>1,96</b>	<b>0,84</b>	<b>2,77</b>	<b>0,99</b>
	D. P. (MPa)	0,13	0,15	0,06	0,33	0,21
	C.V.(%)	6,30	7,75	7,10	11,79	21,53
AR-50%	Média	<b>2,87</b>	<b>2,70</b>	<b>1,08</b>	<b>3,85</b>	<b>1,37</b>
	D. P. (MPa)	0,24	0,11	0,05	0,62	0,36
	C.V.(%)	8,24	4,22	4,68	16,04	26,20
AR-75%	Média	<b>3,47</b>	<b>3,27</b>	<b>1,46</b>	<b>4,65</b>	<b>1,66</b>
	D. P. (MPa)	0,23	0,12	0,06	0,67	0,41
	C.V.(%)	6,59	3,75	3,83	14,37	24,60
AR-100%	Média	<b>3,67</b>	<b>3,46</b>	<b>1,40</b>	<b>4,91</b>	<b>1,75</b>
	D. P. (MPa)	0,26	0,21	0,08	0,68	0,42
	C.V.(%)	6,98	5,94	5,64	13,84	23,80
<b>Média Geral</b>		<b>3,02</b>	<b>2,85</b>	<b>1,19</b>	<b>4,05</b>	<b>1,44</b>

D.P. = Desvio Padrão

C.V. = Coeficiente de Variação

#### 4.8 - Coeficientes de coesão e atrito

A tensão de cisalhamento no plano de ruptura ou o critério de falha da ligação é definido em termos dos coeficientes de coesão e de atrito na interface utilizando o conceito da teoria de Mohr Coulomb, definida pela Equação 4.14. Uma vez que a condição da equação é satisfeita ocorre a falha da ligação.

$$\tau_n = c + \mu\sigma_n \quad (4.14)$$

Na Equação 4.14,  $\tau_n$  e  $\sigma_n$  é a tensão de cisalhamento e a tensão normal (positivo para compressão) que atuam sobre a interface de ligação,  $c$  é a

resistência de aderência (resistência ao cisalhamento puro),  $\mu = \tan(\phi)$  é o coeficiente de atrito e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno.

Esses coeficientes são altamente influenciados pelo tipo de superfície e rugosidade da interface. Sendo assim, para determinar o coeficiente de atrito, a resistência de ligação sob cisalhamento puro e a tensão de *slant shear* deve estar disponível. Se resultados do teste de cisalhamento puro não forem disponíveis, o melhor ajuste dos dados de *slant shear* entre a tensão normal e tangencial podem ser obtidos a partir de amostras ensaiadas com diferentes ângulos (Zanotti *et al.* 2014). Outros pesquisadores utilizaram parâmetros de rugosidade, tais como o altura média do pico para determinar estes coeficientes (Santos e Júlio (2012); Mohamad *et al.*(2015)).

Os coeficientes aqui determinados foram calculados através das Equações 2.24 e 2.25, onde a ligação de cisalhamento puro determinado no ensaio de *push-off* e a menor resistência à tração do concreto foi usado para definir o valor da coesão (c), enquanto o valor do atrito ( $\mu$ ) foi calculado utilizando os valores de tensão normal e tangencial do *slant shear*.

Assim, baseado nos resultados experimentais dos corpos-de-prova ensaiados para as rugosidades em comum do ensaio de *slant shear* e *push-off*, ou seja, como vibrado (V) e a (R2), foram determinados os coeficientes de coesão e atrito, propostas por Santos (2009) e são apresentados na Tabela 4.34.

**Tabela 4.34 - Estimativa dos coeficientes de coesão e atrito.**

Série	Interface	c (coesão)	$\mu$ (atrito)
AR-25%	V	0,84	0,68
	R2	1,02	0,65
AR-50%	V	1,22	0,45
	R2	1,34	0,59
AR-75%	V	1,46	0,58
	R2	1,65	0,49
AR-100%	V	1,53	0,64
	R2	1,76	0,60

Avaliando os coeficientes obtidos para uma mesma série, nota-se para todas as séries um aumento do coeficiente de coesão quando comparado os valores da interface rugosa (R2) com a como vibrada (V), e para o coeficiente de

atrito o comportamento contrário, ou seja, os valores para interface rugosa foram um pouco menores do que a como vibrada com exceção da série AR-50%.

Os coeficientes calculados foram plotados e determinada sua linha de tendência para todos os parâmetros de rugosidade. Cada coeficiente determinado teve comportamento similar para os corpos-de-prova avaliados, sendo assim, a modo de exemplificar esta tendência mostram-se nas Figuras 4.117 e 4.118 os coeficientes de coesão e atrito para o parâmetro  $R_{pm}$  e nas Figuras 4.119 e 4.120 para  $R_{vm}$ , respectivamente.

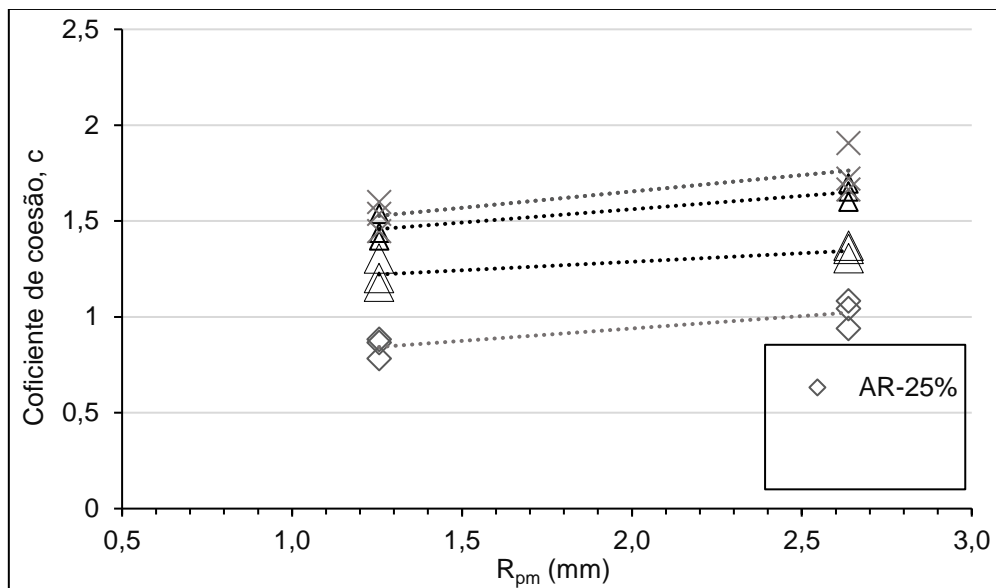


Figura 4.123 - Linhas de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade  $R_{pm}$ .

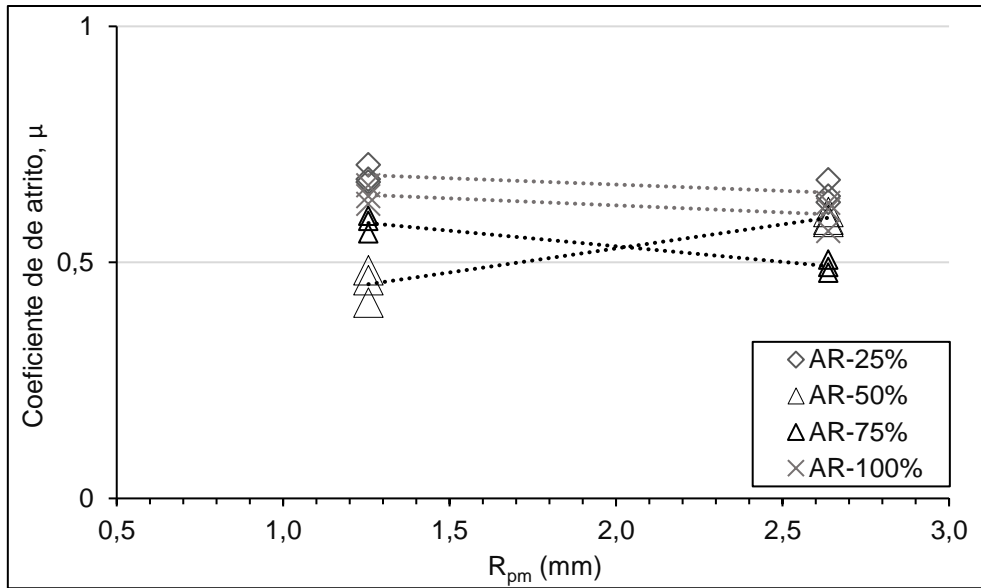


Figura 4.124 - Linha de tendência entre o coeficiente de atrito e o parâmetro de rugosidade R<sub>pm</sub>.

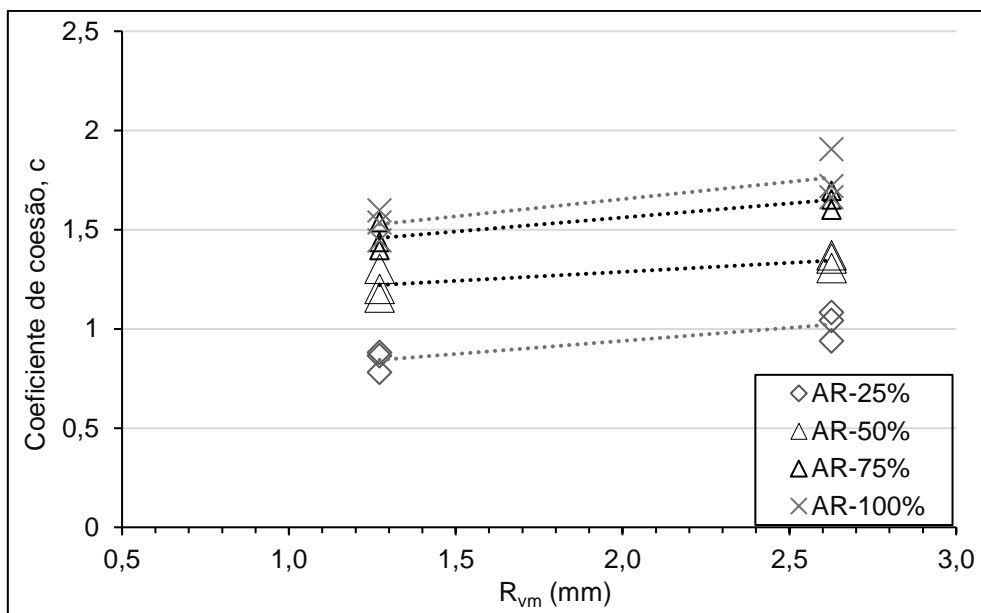


Figura 4.125 - Linha de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade R<sub>vm</sub>.



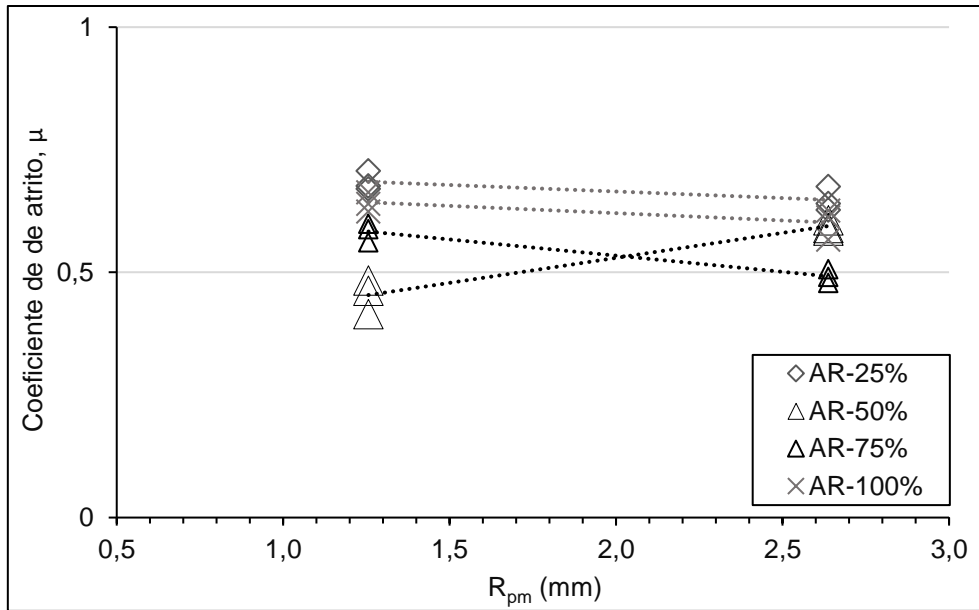


Figura 4.126 - Linha de tendência entre o coeficiente de atrito e o parâmetro de rugosidade  $R_{pm}$ .

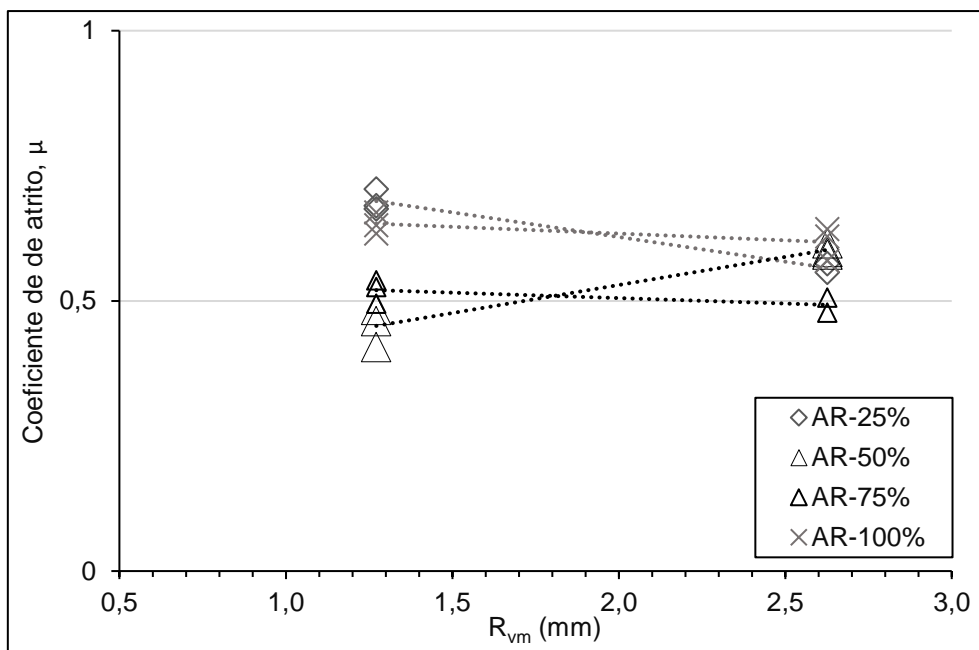


Figura 4.127 - Linha de tendência entre o coeficiente de coesão e o parâmetro de rugosidade  $R_{vm}$ .

O fato de que o programa experimental incluiu somente dois tipos de rugosidade para a determinação da resistência ao cisalhamento pura ( $\tau_0$ ), ou seja, a como vibrada (V) e a rugosa (R2), a linha de tendência obtida foi a equação de uma reta. Em Santos (2009), Santos e Julio (2012) e Mohamad et

al. (2015), a melhor equação para correlacionar estes coeficientes com parâmetros de rugosidade foi uma exponencial.

Neste estudo, o coeficiente de coesão aumentou com o aumento dos parâmetros de rugosidades  $R_{pm}$  e  $R_{vm}$ , para todos os corpos de provas avaliados. Já para o coeficiente de atrito, com o aumento dos parâmetros de rugosidade levou a uma diminuição deste, com exceção do grupo AR-50%, que experimentou tendência ao aumento.

#### **4.9 - Interação experimental de tensões normal e tangencial para os ensaios de *slant shear*, *pull-off* e *push-off*.**

A resistência da ligação entre camadas de concreto precisa ser avaliada sob diferentes condições de tensões para avaliar os dois importantes coeficientes interfaciais, a coesão e o atrito, como discutido no item anterior. Em estruturas reais a interface é submetida a esforços de compressão, tração, cisalhamento ou a estado de tensão múltipla. Portanto, a resistência da ligação precisa ser investigada sob múltiplos estados de tensão. A utilização de um método de ensaio pode não ser suficiente para uma avaliação completa da resistência da ligação interfacial.

Quando a resistência da ligação é determinada usando diferentes métodos de ensaio, é importante relacionar os resultados usando o envelope de falha da ligação. No estudo atual, a resistência da ligação foi investigada utilizando os métodos de ensaio de *pull-off*, *push-off* e *slant shear* modificado. Portanto, vários parâmetros tais como a resistência da interface sob tração, cisalhamento puro e compressão e cisalhamento são essenciais para estabelecer o envelope de falha da ligação em regiões submetidas tanto para compressão quanto para tração (Sooriyaarachchi, 2002); (Espeche e León, 2011).

Uma abordagem do envelope de falha foi levada em conta no item 4.6 considerando os modos de falha para o ensaio de *slant shear* modificado e obtendo assim um valor calculado de cisalhamento puro, calculado pelo critério de *Mohr Coulomb* modificado. Neste item, o melhor ajuste para os dados de *slant*

*shear* modificado, *push-off* e *pull-off* são mostrados nas Figuras 4.121, 4.122, 4.123 e 4.124 para as séries AR-25%, AR-50%, AR-75% e AR-100%, respectivamente. A coesão e o coeficiente de atrito foram obtidos a partir da interação entre a tensão normal e cisalhante, cisalhamento puro experimental e a resistência à tração da interface para os valores da interface como vibrada (V) e rugosa (R2). Foi observada uma boa correlação em todos os ensaios e, portanto, foi utilizado um ajuste linear simples.

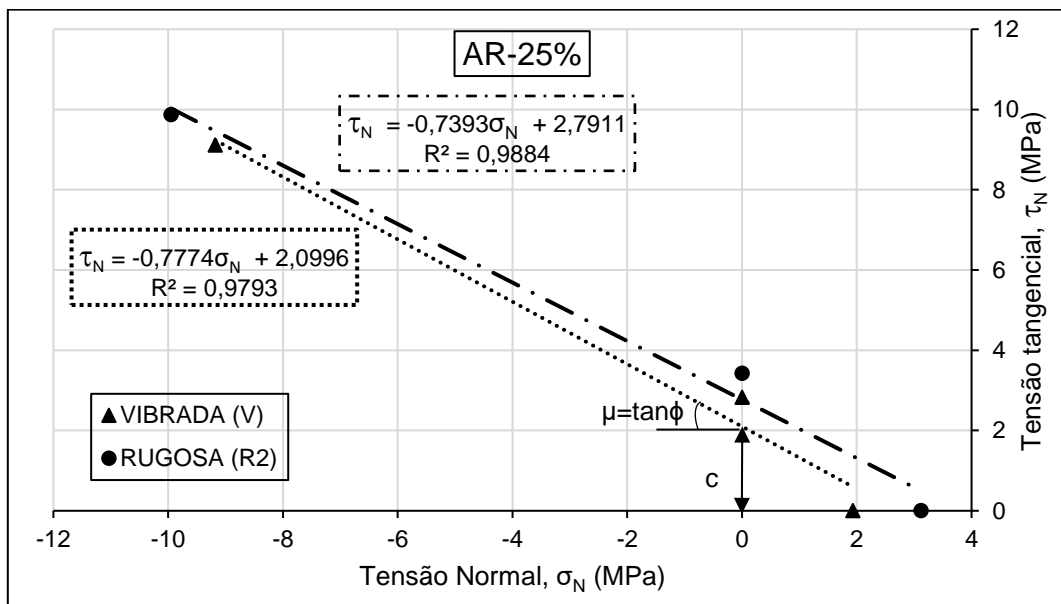


Figura 4.128 - Interação experimental entre *slant shear*, *push-off* e *pull-off* para a série AR-25%.

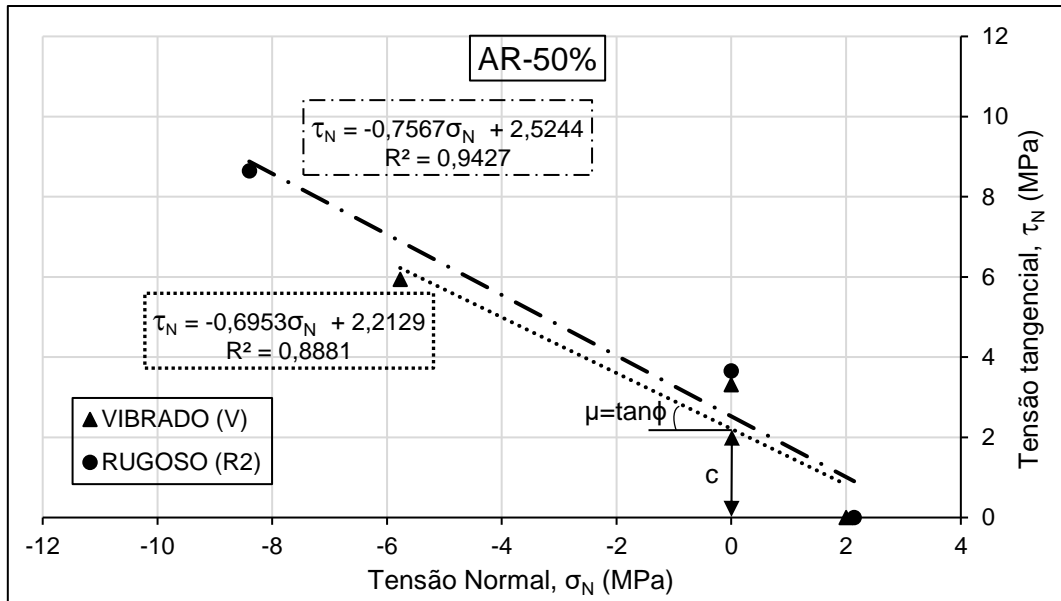


Figura 4.129 - Interação experimental entre *slant shear*, *push-off* e *pull-off* para a série AR-50%.

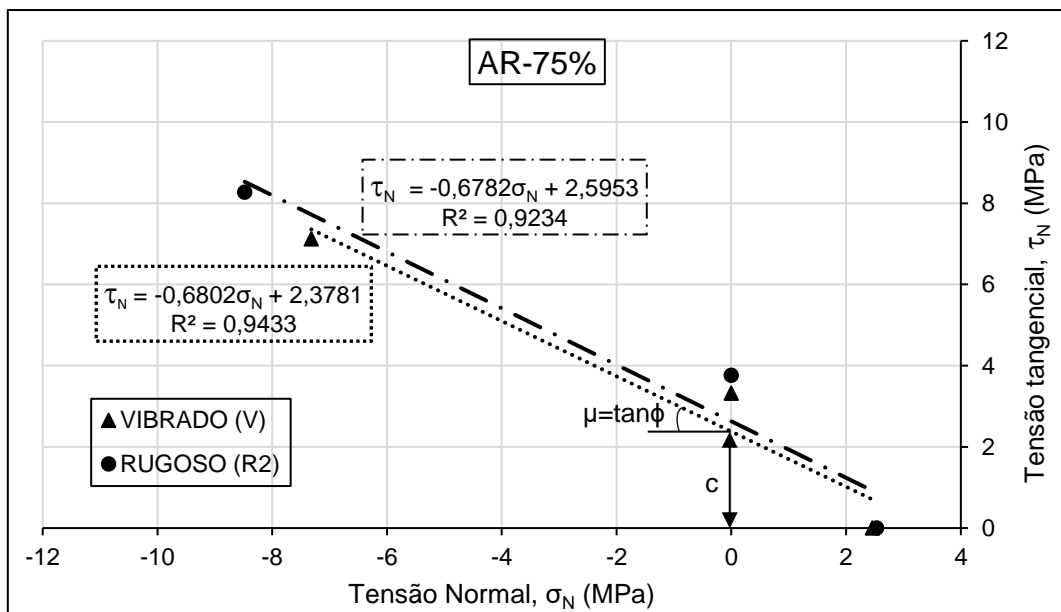
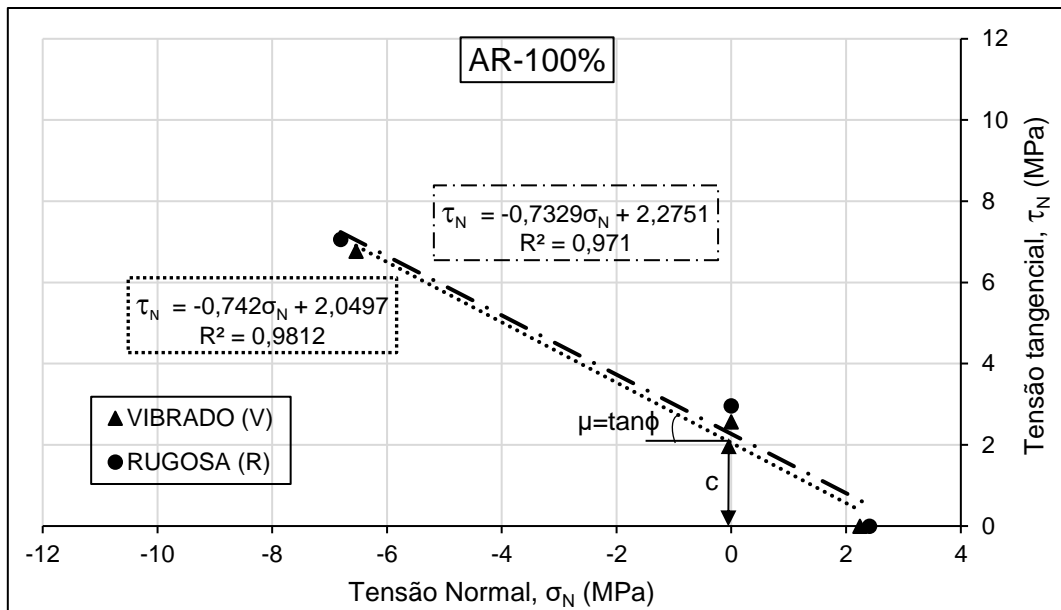


Figura 4.130 - Interação experimental entre *slant shear*, *push-off* e *pull-off* para a série AR-75%.



**Figura 4.131 - Interação experimental entre *slant shear*, *push-off* e *pull-off* para a série AR-100%.**

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos nesta pesquisa em que se realizou três ensaios distintos para avaliar a aderência, foram selecionados trabalhos experimentais como de Harris *et al.* (2011), Costa *et al.* (2018), Semendary e Svecova (2020) Zhang *et al.* (2020), que forneciam dados de ensaios similares para que assim fosse possível realizar tal comparação. Os dados das pesquisas foram agrupados por rugosidades similares às avaliadas aqui, com exceção de Semendary e Svecova (2020) que só apresentou resultados experimentais para interfaces rugosas.

Os dados foram plotados para se obter a curva de interação de melhor ajuste, sendo estes normalizados pela menor resistência à tração diametral entre o substrato e o complemento, com o objetivo de desconsiderar o efeito da resistência.

Nas Figura 4.132 e 4.126 são apresentadas as curvas de interação da presente pesquisa e dos pesquisadores supracitados para as interfaces como vibrada e rugosa (R2), respectivamente. Os valores plotados nesta análise para o presente estudo são os valores médios de todas as séries avaliadas (AR-25%, AR-50%, AR-75% e AR-100%).

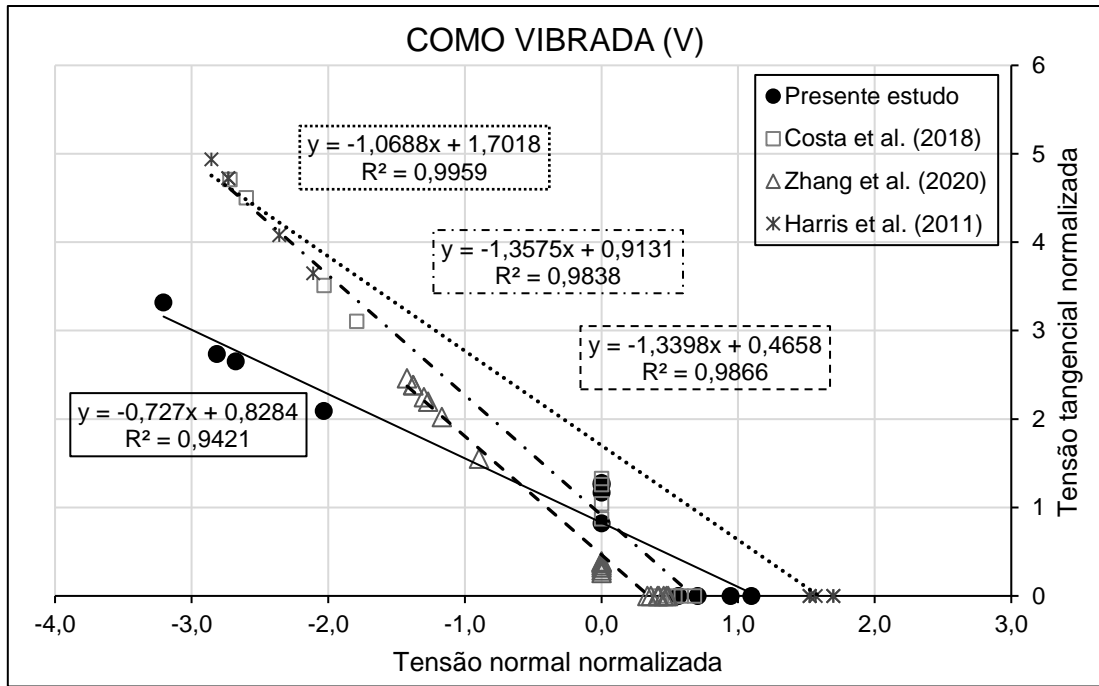


Figura 4.132 - Comparação entre as curvas de iteração de diferentes pesquisadores para interface como vibrada (V).

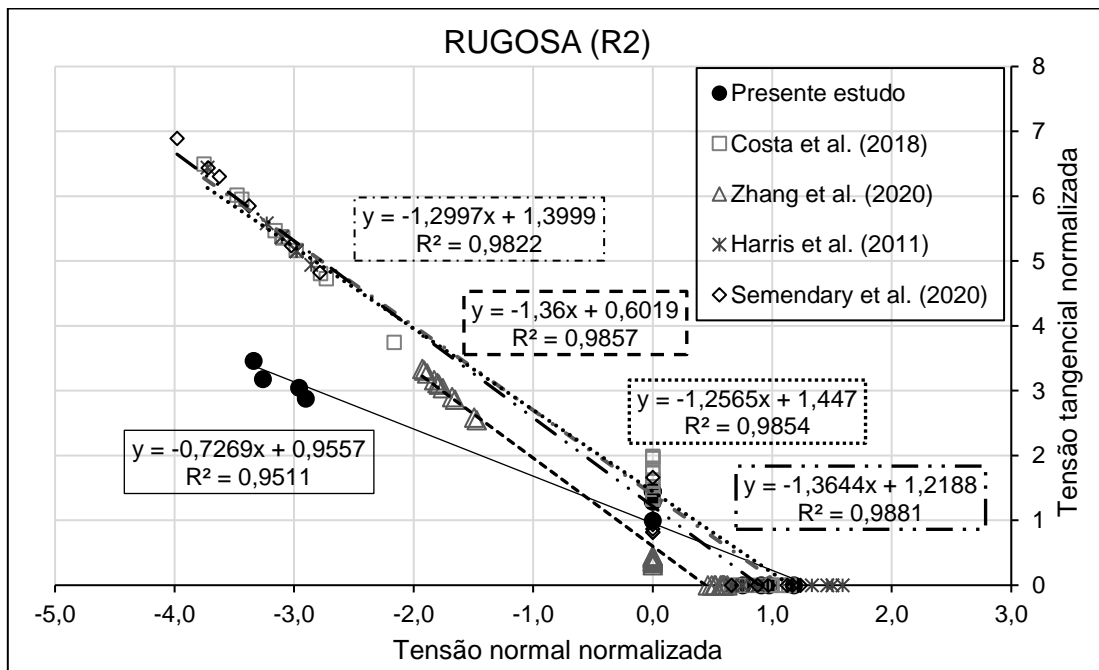


Figura 4.133 - Comparação entre as curvas de iteração de diferentes pesquisadores para interface rugosa (R2).

Na Tabela 4.35 são apresentadas as equações obtidas das curvas de melhor ajuste. Através destas equações pode-se obter as grandezas de coesão normalizada, coeficiente de atrito e ângulo de atrito.

**Tabela 4.35 - Equações obtidas da interação das tensões tangenciais e normais.**

Autores		$\left(\frac{\tau}{f_{ct,sp}}\right)^*$	$\frac{c}{f_{ct,sp}}$	$\mu$	$\phi$
Presente estudo	AR-25%-V	$-0,78\sigma + 0,60$	0,60	0,78	37,9°
	AR-50%-V	$-0,69\sigma + 0,78$	0,78	0,69	34,6°
	AR-75%-V	$-0,68\sigma + 0,91$	0,91	0,68	34,2°
	AR-100%-V	$-0,74\sigma + 1,00$	1,00	0,74	36,5°
	Média (V)	$-0,73\sigma + 0,83$	0,83	0,73	36,1°
	AR-25%-R2	$-0,74\sigma + 0,81$	0,81	0,74	36,5°
	AR-50%-R2	$-0,76\sigma + 0,89$	0,89	0,76	37,2°
	AR-75%-R2	$-0,68\sigma + 2,59$	0,99	0,68	34,2°
	AR-100%-R2	$-0,74\sigma + 2,27$	1,11	0,74	36,5°
	Média (R2)	$-0,73\sigma + 0,96$	0,96	0,73	36,1°
Harris <i>et al.</i> (2011)	V	$-1,07\sigma + 1,70$	1,70	1,07	46,9°
	R2	$-1,26\sigma + 1,45$	1,45	1,26	51,6°
Costa <i>et al.</i> (2018)	V	$-1,36\sigma + 0,91$	0,91	1,36	53,7°
	R2	$-1,30\sigma + 1,40$	1,40	1,30	52,4°
Semendary e Svecova (2020)	R2	$-1,36\sigma + 1,22$	1,22	1,36	53,7°
Zhang <i>et al.</i> (2020)	V	$-1,34\sigma + 0,47$	0,47	1,34	53,3°
	R2	$-1,36\sigma + 0,60$	0,60	1,36	53,7°

\* $\sigma$  e  $f_{ct,sp}$  em MPa

Destaca-se o fato de que as inclinações destas curvas são dependentes do tipo de *slant shear* utilizado e conseqüentemente o coeficiente de atrito e o ângulo de atrito. Nota-se que os valores obtidos nesta pesquisa foram menores quando comparados aos obtidos nas pesquisas avaliadas. No entanto, os ângulos de atrito aqui obtidos são aproximadamente iguais ao definido pelo critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* para concreto.

Os valores de coesão normalizados das pesquisas avaliadas variaram na faixa de 0,47 a 1,70. Sendo assim, os valores do presente estudo se encontram nesta faixa de variação.

## Capítulo 5 - Considerações finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos no programa experimental e as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 - Conclusões

Com o propósito de avaliar a resistência à aderência entre camadas de concreto normal e leve foram realizados ensaios de *slant shear* modificado, *push-off* e *pull-off* para diferentes substratos e rugosidades. Através dos ensaios pode-se obter valores de resistência ao cisalhamento, cisalhamento puro e tração direta. Os resultados mais relevantes obtidos no programa experimental permitiram concluir que:

- o desenvolvimento de um *setup* para obter o perfil de rugosidade forneceu resultados satisfatórios e fiáveis, mostrando-se capaz de ser utilizado para caracterizar a rugosidade da superfície de uma interface de concreto. Mesmo em superfícies em que a rugosidade não era tão grande, como no caso da interface lisa;
- os parâmetros de rugosidade definidos em função dos perfis de rugosidade obtidos, permitem avaliar a rugosidade da interface de forma quantitativa, e podem ser utilizados para a correlacionar com a resistência de ligação da interface e prever a resistência através de equações que os utilizam;
- uma análise numérica simplificada permitiu concluir que as tensões obtidas na interface através do *slant shear* modificado para uma mesma carga aplicada foram maiores do que seriam obtidas em um *slant shear* reto. Sendo assim, mesmo apresentando algumas falhas coesivas foi possível quantificar a aderência das interfaces concreto-concreto de forma efetiva;



- na simulação foi mostrado que para os corpos-de-prova do *slant shear* inclinado ou modificado a variação das tensões tangenciais e normais também é evidenciada. Notou-se que para os corpos-de-prova onde as relações de resistência a compressão do concreto do substrato e o complemento foi maior que 1,0, houve menor variabilidade das tensões obtidas nas bordas dos corpos-de-prova;
- os corpos-de-prova de *slant shear* modificado apresentaram uma diminuição nos valores da resistência da ligação da interface quando diminuiu a resistência à compressão do complemento, ou seja, à medida que se utilizou concretos com maiores substituições de agregados leves. E, exibiram maiores valores de resistência quando o concreto do complemento era o mesmo do substrato (AR-AR e 25%-25%);
- os parâmetros de rugosidade obtidos foram melhor correlacionados com a resistência ao cisalhamento quando o concreto do complemento apresentou menores valores de resistência à compressão, sendo para séries com 75% e 100% o complemento mais efetivo. Além disso para estes complementos obteve-se um aumento na capacidade resistente da ligação à medida que aumentou a rugosidade (levando em conta as cinco interfaces);
- para as interfaces rugosas (R1, R2 e R3) à medida que aumentou a rugosidade houve um aumento da resistência ao cisalhamento na interface para todas as séries. Porém, a ordem de grandeza entre elas não acarretou aumentos significativos na capacidade de ligação;
- o aumento da rugosidade da interface dos corpos-de-prova do tipo *push-off* contribuiu para o aumento da resistência ao cisalhamento puro na interface quando comparadas as interfaces como vibrada (V) e rugosa (R2);
- com base no critério de Mohr-Coulomb, efetuou-se um estudo do estado de tensão de cisalhamento na interface. Para as rupturas adesivas foram utilizadas as tensões tangenciais e normais e a resistência à tração média

na interface. Já para as rupturas coesivas as resistências à compressão e tração indireta do concreto, obtendo-se a estimativa da tensão de cisalhamento puro para cada situação. Os valores encontrados pelo modelo para as rupturas adesivas assemelharam-se aos valores obtidos pelo ensaio de *push-off*,

- nos ensaios de *pull-off*, a ruptura adesiva foi predominante e os resultados da resistência à tração da interface foram inferiores, na maioria, ao menor valor da resistência à tração do concreto de cada uma das partes (substrato e complemento), o que determina valores mais reais, com exceção do grupo AR-100%;
- os corpos-de-prova que possuíam complemento com maior resistência à compressão, apresentaram maior resistência à tração da interface principalmente para a interface de menor rugosidade. Verificou-se ainda que a redução da densidade do concreto leve como complemento provoca, em geral, menor resistência à tração da interface;
- a correlação entre os ensaios realizados a fim de contribuir com a relação entre a resistência à tração e cisalhamento para as interfaces como vibrada (V) e rugosa (R2) apresentaram valores próximos para as duas interfaces, sendo de 2,55 e 2,46 para a relação entre os ensaios de *slant shear* e *push-off*, 3,40 e 3,35 para *slant shear* e *pull-off* e 1,40 e 1,38 entre o *push-off* e o *pull-off*. Além disso, foi constatado que a resistência de ligação medida decrescia na seguinte ordem: *slant shear*, *push-off* e *pull-off*;
- a resistência ao cisalhamento na interface segundo o *slant shear* modificado prevista pelas normas e modelos avaliados verificou que o Eurocode 2 (2010), o Model Code (2010) e o modelo de Mohamad *et al.* (2015) representaram um melhor resultado dos ensaios. No entanto, para o ensaio de *push-off* foi o modelo de Santos e Júlio (2012) o mais representativo, sendo os três citados anteriormente muito conservadores.

## 5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros, a fim de entender e avaliar melhor a resistência da ligação entre camadas de concreto-concreto:

- produzir o corpo-de-prova com a geometria do *slant shear* modificado porém com ângulos menores que 45°;
- avaliar a resistência à aderência através do ensaio de *splitting* e correlacioná-lo com o ensaio de *pull-off*;
- complementar a pesquisa realizada para todas as rugosidades analisadas em relação ao cisalhamento puro e tração;
- avaliar o efeito da condição de umidade da superfície da interface para diferentes ensaios.

## Capítulo 6 - Referências

Abu-Tair, A.I, Rigden,S.R., Burley, E. Testing the bond between repair materials and concrete substrate. ACI Materials Journal 93 (6), p. 553–558, 1996.

Abu-Tair, A. I. Lavery, D. Nadjai, A. Rigden, S.R. Ahmed, T.M.A. A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening. Construction and Building Materials 14, p. 171–176, 2000.

ACI 318 – “ACI Manual of Concrete Practice, Part 3 – 1994, Use of concrete in buildings – Design, Specifications, and Related Topics”, American Concrete Institute, 2014.

Anderson, A.R. - Composite designs in precast and cast-in-place concrete, Progressive Architecture, Vol. 41, No. 9, pp. 172-179, September,1960.

Angelin, A.F.; Ribeiro, L.C.L.J.; Pires, M.S.G.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Lintz, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. Effects of Consumption of Cement in Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Brazilian Expanded Clay. Applied Mechanics and Materials, v. 368-370, p. 925-928, 2013.

Angelin, A. F. Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. Dissertação de mestrado, p. 98, 2014.

Akazawa, T. - Tension test method for concretes, Bulletin No. 16, International Association of Testing and Research Laboratories, pp. 11-23, Paris, November 1953.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9062- Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM C1583: Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-Off Method), ASTM International, 2013.

ASTM C 496 - Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, American Society for Testing Materials, 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428, USA, 2004.

Beushausen H. The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength. Magazine Concrete Researche, p. 845–852,2010.

Birkeland, P.W. e Birkeland, H. W. Connections in precast concrete construction. American Concrete Institute, Journal of the American Concrete Institute, v. 63, p. 345–368, 1966.

Bissonnette B, Vaysburd A, von Fay K. Best practices for preparing concrete surfaces prior to repairs and overlays, No. MERL 12-17; 2012.

Bonaldo, E., Barros, J. A. O., and Lourenco, P. B. Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(6), 463–474, 2005.

Carbonell Muñoz, M. A. et al. Bond Performance between Ultrahigh-Performance Concrete and Normal-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 8, p. 04014031, 2014.

Carneiro, F.L.L.B., Barcellos, A. - Concrete tensile strength, Bulletin No. 13, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, pp. 97-123, Paris, March, 1953.

Ceia, F. et al. Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 139–145, 2016.

Chmielewska, B. On the methods of bond strength measurements in concrete repair systems, European Materials Research Society, Fall Meeting, Warsaw University of Technology, Warsaw, September, 11 p, 2005.

Costa, H.; Carmo, R. N. F.; Júlio, E. Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 519–530, 2018.

Costa, H.; Santos, P.; Júlio, E. Bond Strength of Normal-to-Lightweight Concrete Interfaces. n. September, 2011.

De La Varga, I.; Haber, Z. B.; Graybeal, B. A. Enhancing Shrinkage Properties and Bond Performance of Prefabricated Bridge Deck Connection Grouts: Material and Component Testing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 4, p. 04018053, 2018.

De la Varga, I., Munoz J.F., Bentz, D.P., and Graybeal, B.A. Effect of the interface moisture content on the bond performance between a concrete substrate and a non-shrink cement-based grout. National Accelerated Bridge Construction Conference (Dec. 7-8, 2015), Miami, FL, 2015.

Diab, A. M.; Abd Elmoaty, A. E. M.; Tag ELDIN, M. R. Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, v. 130, p. 73–82, 2017.

EN 12390-6 - Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, Portuguese Institute for Quality, January 2004, 14 p. (in Portuguese).

Erhard D, Chorinsky G. Repair of concrete floors with polymer modified cement mortars. Adhesion between polymers and concrete/Adh sion entre polym res et b ton. Boston; p. 230–41,1986.

Eurocode 2, EN 1992-1-1: Design of concrete structures: Part 1–1: General rules and rules for buildings, 259 p, March 2010.

Espeche, A. D.; Le n, J. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 3, p. 1222–1235, 2011.

Farzad, M.; Shafieifar, M.; Azizinamini, A. Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and Ultra High-Performance Concrete (UHPC). *Engineering Structures*, v. 186, n. February, p. 297–305, 2019.

Ganesh, P.; Ramachandra Murthy, A. Simulation of surface preparations to predict the bond behaviour between normal strength concrete and ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 250, p. 118871, 2020.

Garbacz, A., G rka, M., Courard, L. On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems, 2004

Gohnert, M. Horizontal shear transfer across a roughened surface. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 3, p. 379–385, 2003.

Issa, M. A. Fractal dimension – a measure of fracture roughness and toughness of concrete. v. 70, p. 125–137, 2003.

Júlio, E. N. B. S.; Branco, F. A. B.; Silva, V. D. Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 9, p. 675–681, 2004.

Júlio, E.; et al.; “Accuracy of design code expressions for estimating longitudinal shear strength of strengthening concrete overlays”; *Engineering Structures*, Elsevier, vol. 32: p. 2387-2393, 2010.

Kahn, L. F.; Mitchell, A. D. Shear friction tests with high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, v. 99, n. 1, p. 98–103, 2002.

Krc, K. An investigation of shear-friction of lightweight aggregate concretes. *Dissertação (mestrado)*, Missouri University of Science and Technology, 2015.

Kriegh, J.D. Arizona slant shear test: a method to determine epoxy bond strength, American Concrete Institute, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 73, nº 3, pp. 372-373, 1976.

Lukovic M, Ye G. Effect of moisture exchange on interface formation in the repair 521 system studied by X-ray absorption. *Materials (Basel)*, 2017.

Maerz, N. -Feasibility study: Concrete roughness measuring device, Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla, 1999



Maerz, N., Chepur, P., Myers, J., Linz, J. Concrete roughness characterization using laser profilometry for fiber-reinforced polymer sheet application, Transportation Research Board, 80<sup>th</sup> Annual Meeting, Paper No. 01-0139, Washington, January, 2001

Maerz, N.H., Franklin, J.A. Roughness scale effects and fractal dimension. University of Waterloo, Ontario, Canada, 1990

Maerz, N.H., Franklin, J.A., Bennett, C.P. Joint roughness measurement using shadow profilometry. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 27, pp. 329-343, 1990

Maerz, N., Nanni, A., Myers, J., Galecki, G. Laser profilometry for concrete substrate characterization prior to FRP laminate application. Concrete Repair Bulletin, pp. 4-8 May/June, 2001.

Mansur, M. A.; Vinayagam, T.; Tan, K. H. Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 20, n. 4, p. 294–302, 2008.

Model Code 2010, Final Draft – Vol. 1, International Federation for Structural Concrete (fib), 311 p. March, 2012

Mohamad, M. E. et al. Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond. Cement and Concrete Composites, v. 56, p. 1–14, 2015.

Momayez, A. et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 4, p. 748–757, 2005.

Mummery, L. Surface texture analysis – The handbook, Hommelwerke GMBH, Thyssen, 2000

Randl N., Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010, Structural Concrete 14 (3) ,p. 230–241,2013.

Randl N., Steiner M., Peyerl M., Sustainable strengthening of RC members with high performance concrete overlays, p.1308–1315, 2016.

Robins P.J., Austin S.A. A unified failure envelope from the evaluation of concrete repair bond tests. Magazine of Concrete Research, p. 57–68,1995.

Rossignolo, J.A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura. Tese (doutorado), Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Rossignolo, J.A.; Oliveira, I.L. Efeito do Metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural. Acta Scientiarum - Technology, v.29, 2007.

Saldanha, R. et al. A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure. Construction and Building Materials, v. 41, p. 673–680, 2013.

Santos, P.M.D. (2005). *Influência da rugosidade da superfície da interface betão/betão na sua resistência ao corte longitudinal*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Universidade de Coimbra, 202p.

Santos, P. M. D.; Júlio, E. N. B. S. Development of a laser roughness analyser to predict in situ the bond strength of concrete-to-concrete interfaces. Magazine of Concrete Research, v. 60, n. 5, p. 329–337, 2008.

Santos, P. M. D.; Júlio, E. N. B. S. Effect of filtering on texture assessment of concrete surfaces. ACI Materials Journal, v. 107, n. 1, p. 31–36, 2010.

Santos, P. M. D.; Júlio, E. N. B. S. A state-of-the-art review on shear-friction. Engineering Structures, v. 45, p. 435–448, 2012.

SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S.; SILVA, V. D. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 8, p. 1688–1695, 2007.

SEMENDARY, A. A.; SVECOVA, D. Factors affecting bond between precast concrete and cast in place ultra high performance concrete (UHPC). *Engineering Structures*, v. 216, n. August 2019, 2020.

Costa, H. S.S. Betões estruturais de agregados leves. aplicações em prefabricação e reforço de estruturas. Dissertação de mestrado. Universidade de Coimbra. p. 98, 2012.

Sooriyaarachchi HP, Nishimura T, Misra S, Uomoto T. An Experimental Study to Evaluate Failure Surface of the Concrete-Repair Material Interface. *Seisan Kenkyu*;54(6):414–7, 2002.

Takorabet, N. “Influence des interfaces sur le comportement des structures composites en béton armée. Modélisation numérique par la méthode des elementsfinis”, Thèse de doctorat de l’Ecole Central de Paris, 1989.

Vaysburd, A. M., Bissonnette, B., Thomassin, M. M., von Fay, K. F., Harrell, S. J., and Robertson, B. (2016). Concrete Substrate Moisture Requirements for Effective Concrete Repairs. Report ST-2016-2886-01, p. 62, September, 2016.

Wall, J.S. Shrive N.G., Factors effecting bond between new and old concrete, *ACI Materials Journal*, p.117–125,1988.

Zanotti C., Talukdar S., Banthia N., A state-of-the-art on concrete repairs and some thoughts on ways to achieve durability in repairs, *Infrastructure Corrosion and Durability- a Sustainability Study*, 2014.

Zanotti, C.; Banthia, N. Modified slant shear cylinder test for inherent characterization of bond in concrete repairs. 2016.

Zanotti, C.; Banthia, N.; Plizzari, G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement and Concrete Research*, v. 63, p. 117–126, 2014.

Zanotti, C.; Randl, N. Are concrete-concrete bond tests comparable? *Cement and Concrete Composites*, v. 99, n. November 2018, p. 80–88, 2019.

Zilch, K., Reinecke, R. Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks”; in *Proc. of “fib International Symposium on High Performance Concrete”*, Orlando, 2000.

## ANEXO A

Tabela A-1- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface lisa.

Parâmetros	INTERFACE LISA (L)												Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	AR-AR-SS	AR-25%-SS	AR-50%-SS	AR-75%-SS	AR-100%-SS	25%-25%-SS	25%-50%-SS	25%-75%-SS	25%-100%-SS	100%-50%-SS	100%-75%-SS	100%-100%-SS			
<b>R<sub>a</sub></b>	0,342	0,564	0,747	0,359	0,306	0,491	0,353	0,289	0,290	0,181	0,465	0,313	<b>0,392</b>	0,152	38,876
<b>R<sub>zdin</sub></b>	0,596	1,276	1,263	0,846	0,879	1,140	0,895	0,711	0,758	0,555	0,881	0,699	<b>0,875</b>	0,240	27,461
<b>R<sub>max</sub></b>	0,988	1,984	1,971	1,237	1,508	1,910	1,475	1,100	1,197	0,893	1,625	1,040	<b>1,411</b>	0,394	27,931
<b>R<sub>3z</sub></b>	0,248	0,510	0,474	0,380	0,339	0,480	0,367	0,343	0,366	0,280	0,469	0,342	<b>0,383</b>	0,083	21,684
<b>R<sub>3zmax</sub></b>	0,465	0,885	0,910	0,670	0,654	1,045	0,696	0,586	0,702	0,471	0,803	0,633	<b>0,710</b>	0,175	24,582
<b>R<sub>z (ISO)</sub></b>	1,284	2,349	2,764	1,510	1,262	1,931	1,433	1,289	1,210	0,776	1,785	1,302	<b>1,575</b>	0,549	34,887
<b>R<sub>y</sub></b>	0,629	0,846	1,046	0,855	0,802	1,087	0,760	0,691	0,663	0,521	0,962	0,686	<b>0,796</b>	0,172	21,640
<b>R<sub>pm</sub></b>	0,311	0,570	0,589	0,399	0,443	0,545	0,373	0,277	0,354	0,246	0,408	0,342	<b>0,405</b>	0,113	27,900
<b>R<sub>p</sub></b>	0,809	1,228	1,462	0,940	0,864	1,219	0,741	0,703	0,659	0,478	1,150	0,872	<b>0,927</b>	0,285	30,691
<b>R<sub>vm</sub></b>	0,285	0,706	0,674	0,446	0,437	0,595	0,557	0,434	0,404	0,309	0,472	0,356	<b>0,473</b>	0,135	28,554
<b>R<sub>v</sub></b>	0,962	1,580	2,048	1,022	0,977	1,332	1,186	0,883	0,812	0,657	0,974	0,713	<b>1,096</b>	0,396	36,123

Tabela A-2- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface como vibrada.

Parâmetros	INTERFACE COMO VIBRADO (V)												Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	AR-AR-SS	AR-25%-SS	AR-50%-SS	AR-75%-SS	AR-100%-SS	25%-25%-SS	25%-50%-SS	25%-75%-SS	25%-100%-SS	100%-50%-SS	100%-75%-SS	100%-100%-SS			
R <sub>a</sub>	0,958	0,893	1,045	0,533	1,284	1,459	1,557	1,185	1,508	1,661	0,658	1,681	<b>1,243</b>	0,396	31,855
R <sub>zdin</sub>	1,732	1,577	3,501	1,214	2,485	2,556	2,758	3,090	2,836	3,513	0,906	3,394	<b>2,490</b>	0,940	37,765
R <sub>max</sub>	2,676	2,400	4,594	1,850	3,908	4,493	4,652	4,827	4,313	5,435	1,472	4,903	<b>3,890</b>	1,433	36,834
R <sub>3z</sub>	0,413	0,455	0,755	0,396	0,659	0,611	0,553	0,946	0,601	0,927	0,454	0,974	<b>0,681</b>	0,261	38,387
R <sub>3zmax</sub>	1,060	1,124	1,673	0,880	1,669	1,768	1,664	2,321	1,743	2,183	0,817	2,343	<b>1,706</b>	0,652	38,201
R <sub>z (ISO)</sub>	3,391	3,021	3,961	2,154	4,217	4,829	5,192	4,496	4,367	5,369	1,849	5,443	<b>4,153</b>	1,274	30,671
R <sub>y</sub>	2,086	1,446	3,548	1,277	2,585	3,401	3,117	4,032	2,464	2,518	1,039	3,160	<b>2,604</b>	1,019	39,109
R <sub>pm</sub>	0,761	0,691	1,681	0,614	1,257	1,337	1,339	1,636	1,621	1,603	0,493	1,831	<b>1,256</b>	0,496	39,471
R <sub>p</sub>	2,504	1,811	2,729	1,373	3,031	3,876	3,852	3,778	3,066	3,127	1,250	4,015	<b>2,972</b>	1,021	34,350
R <sub>vm</sub>	0,972	0,886	1,819	0,600	1,273	1,219	1,419	1,455	1,461	1,910	0,573	1,563	<b>1,271</b>	0,447	35,116
R <sub>v</sub>	2,449	2,050	3,227	1,446	2,893	3,024	3,394	2,980	3,660	3,711	1,067	3,707	<b>2,900</b>	0,993	34,257

Tabela A-3- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface com rugosidade R1.

Parâmetro	INTERFACE COM RUGOSIDADE (R1)												Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	AR-AR-SS	AR-25%-SS	AR-50%-SS	AR-75%-SS	AR-100%-SS	25%-25%-SS	25%-50%-SS	25%-75%-SS	100%-25%-SS	100%-50%-SS	100%-75%-SS	100%-100%-SS			
<b>R<sub>a</sub></b>	1,657	1,393	1,537	1,339	2,158	1,645	1,502	1,115	1,711	1,719	1,346	1,545	<b>1,555</b>	0,261	16,762
<b>R<sub>zdin</sub></b>	4,629	3,768	3,817	3,679	5,180	4,110	3,746	3,608	4,586	5,026	3,568	4,495	<b>4,184</b>	0,574	13,728
<b>R<sub>max</sub></b>	6,813	5,010	5,751	5,280	7,073	5,692	5,789	5,745	7,286	7,405	5,635	6,692	<b>6,181</b>	0,822	13,292
<b>R<sub>3z</sub></b>	1,612	0,789	1,182	1,211	1,121	1,061	1,051	0,628	1,110	1,157	1,181	1,235	<b>1,111</b>	0,239	21,547
<b>R<sub>3zmax</sub></b>	4,127	1,851	2,899	2,417	3,262	2,651	2,557	1,441	2,816	2,490	2,828	2,952	<b>2,691</b>	0,670	24,898
<b>R<sub>z</sub> (ISO)</b>	5,365	4,996	5,506	4,217	6,794	5,032	5,024	4,374	5,927	5,764	3,954	5,171	<b>5,177</b>	0,787	15,192
<b>R<sub>y</sub></b>	3,486	3,690	4,126	4,025	5,016	3,782	3,823	3,457	3,815	3,910	3,651	4,197	<b>3,915</b>	0,416	10,615
<b>R<sub>pm</sub></b>	2,199	1,929	1,890	1,761	2,527	1,945	1,904	1,676	2,104	2,339	1,720	2,216	<b>2,017</b>	0,262	12,999
<b>R<sub>p</sub></b>	3,239	3,528	3,975	3,575	4,860	3,312	3,918	3,135	3,441	3,540	3,154	3,717	<b>3,616</b>	0,477	13,193
<b>R<sub>vm</sub></b>	2,430	1,839	1,927	1,918	2,653	2,165	1,842	1,932	2,482	2,687	1,848	2,279	<b>2,167</b>	0,327	15,097
<b>R<sub>v</sub></b>	4,596	3,183	4,417	3,201	4,432	4,507	3,744	3,565	5,319	5,085	3,489	4,336	<b>4,156</b>	0,709	17,063

Tabela A-4- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface com rugosidade R2.

Parâmetros	INTERFACE COM RUGOSIDADE (R2)												Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	AR-AR-SS	AR-25%-SS	AR-50%-SS	AR-75%-SS	AR-100%-SS	25%-25%-SS	25%-50%-SS	25%-75%-SS	25%-100%-SS	100%-50%-SS	100%-75%-SS	100%-100%-SS			
R <sub>a</sub>	2,188	1,459	2,143	1,009	2,097	1,980	1,642	1,466	2,489	1,781	2,574	1,973	<b>1,900</b>	0,452	23,808
R <sub>zdin</sub>	5,952	4,397	5,267	3,294	6,010	5,407	4,842	4,835	6,174	4,733	6,523	5,728	<b>5,263</b>	0,902	17,145
R <sub>max</sub>	8,279	6,640	7,591	4,636	8,594	7,822	6,913	6,823	9,596	6,603	9,180	8,549	<b>7,602</b>	1,370	18,026
R <sub>3z</sub>	1,382	1,257	1,842	0,636	1,469	1,274	1,174	1,248	1,877	1,368	1,870	1,478	<b>1,406</b>	0,350	24,918
R <sub>3zmax</sub>	3,293	2,747	3,835	1,502	3,600	3,433	2,511	3,156	5,442	2,860	4,377	3,945	<b>3,392</b>	0,992	29,255
R <sub>z (ISO)</sub>	6,858	5,032	6,358	3,869	6,851	6,493	6,068	5,503	7,667	5,218	7,981	6,634	<b>6,211</b>	1,158	18,643
R <sub>y</sub>	6,737	4,962	5,690	3,267	5,779	5,393	4,484	4,787	4,945	4,838	6,372	5,545	<b>5,233</b>	0,911	17,406
R <sub>pm</sub>	2,941	2,285	2,618	1,664	2,995	2,699	2,538	2,354	3,092	2,334	3,438	2,688	<b>2,637</b>	0,460	17,450
R <sub>p</sub>	5,893	4,476	5,623	2,725	5,232	5,148	4,076	3,754	5,526	4,454	6,547	5,150	<b>4,884</b>	1,042	21,340
R <sub>vm</sub>	3,010	2,113	2,649	1,630	3,014	2,708	2,303	2,481	3,082	2,399	3,086	3,040	<b>2,626</b>	0,460	17,519
R <sub>v</sub>	4,99	3,375	5,165	2,679	6,145	4,991	3,996	4,284	6,211	4,584	5,532	6,086	<b>4,837</b>	1,115	23,048



Tabela A-5- Resultado dos parâmetros de rugosidade para os corpos-de-prova de interface com rugosidade R3.

INTERFACE COM RUGOSIDADE (R3)															
Parâmetros	AR-AR-SS	AR-25%-SS	AR-50%-SS	AR-75%-SS	AR-100%-SS	25%-25%-SS	25%-50%-SS	25%-75%-SS	25%-100%-SS	100%-50%-SS	100%-75%-SS	100%-100%-SS	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
<b>R<sub>a</sub></b>	2,976	1,995	2,434	2,182	2,722	2,209	2,088	1,475	3,026	2,158	2,785	2,081	<b>2,344</b>	0,457	19,507
<b>R<sub>zdin</sub></b>	7,233	5,025	3,084	2,272	8,178	6,056	4,885	4,233	7,726	5,238	7,200	7,018	<b>5,679</b>	1,878	33,063
<b>R<sub>max</sub></b>	10,573	7,506	4,709	2,277	11,433	8,242	7,540	5,750	11,449	7,818	9,833	9,485	<b>8,051</b>	2,780	34,532
<b>R<sub>3z</sub></b>	1,877	1,322	0,767	2,093	1,881	1,348	1,318	0,974	1,757	1,829	1,537	1,254	<b>1,496</b>	0,402	26,861
<b>R<sub>3zmax</sub></b>	4,814	2,805	2,275	2,187	5,026	3,678	3,411	2,118	4,693	4,730	3,516	2,707	<b>3,497</b>	1,099	31,420
<b>R<sub>z</sub> (ISO)</b>	9,055	6,834	7,046	1,926	9,767	7,189	6,681	5,025	9,034	5,727	9,396	7,529	<b>7,101</b>	2,202	31,012
<b>R<sub>y</sub></b>	7,022	5,640	3,244	1,696	8,419	5,939	4,866	3,388	6,127	4,174	7,825	6,662	<b>5,417</b>	2,007	37,046
<b>R<sub>pm</sub></b>	3,593	2,739	1,509	1,825	4,092	2,817	2,446	2,094	3,348	2,646	3,434	2,957	<b>2,792</b>	0,756	27,090
<b>R<sub>p</sub></b>	6,731	5,177	4,694	1,996	7,133	4,871	5,098	3,327	5,775	4,926	7,254	5,165	<b>5,179</b>	1,503	29,025
<b>R<sub>vm</sub></b>	3,641	2,566	1,575	1,608	4,086	3,239	2,439	2,138	4,505	2,592	3,766	4,062	<b>3,018</b>	1,000	33,135
<b>R<sub>v</sub></b>	6,998	4,251	4,750	2,301	7,215	5,277	4,359	3,681	8,814	5,372	6,651	6,254	<b>5,494</b>	1,786	32,515

## ANEXO B

No Anexo B são apresentados os valores estatísticos resultados da avaliação da rugosidade e do efeito da substituição do agregado leve para os três tipos de ensaios apresentados no item 4.3.1.1 e 4.3.1.2 deste trabalho. Os valores foram obtidos através do programa Past (*Paleontological Statistics*).

A obtenção dos resultados foi avaliada em duas etapas. Primeiro, foi feita a análise de variância (ANOVA), no entanto os valores obtidos através desta, apenas representam se existe ou não diferenças significativas não indicando quais são os tratamentos que se diferem. Já o teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade, permite identificar as diferenças entre as médias amostrais.

Para cada análise feita, serão apresentadas as duas etapas de avaliação. Quando os valores de  $F_{\text{calculado}}$  estiverem destacados significa que existe diferença significativa entre os tratamentos, ou seja,  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ . E os valores realçados na matriz, indicam que o tratamento da linha difere significativamente do tratamento da coluna.

### B.1. Influência da rugosidade

**Tabela B.1 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-AR.**

AR-AR						
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	$F_{\text{calculado}}$	Probabilidade	
Entre as amostras	19,1768	4	4,7942			
Dentro das amostras	16,5786	10	1,6578	2,892	0,0789	
Total	35,7554	14				

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,8781	0,3882	0,05392	0,4688
B	V	0,8781		0,8743	0,2182	0,9308
C	R1	0,3882	0,8743		0,6583	0,9998
D	R2	0,05392	0,2182	0,6583		0,567
E	R3	0,4688	0,9308	0,09998	0,567	

**Tabela B.2 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-25%.**

AR-25%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	13,5488	4	3,3872	6,436	0,007887
Dentro das amostras	5,2632	10	0,5263		
Total	18,812	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,07996	0,4725	0,007443	0,9087
B	V	0,07996		0,7068	0,5518	0,2768
C	R1	0,4725	0,7068		0,09999	0,9067
D	R2	0,007443	0,5518	0,09999		0,02673
E	R3	0,9087	0,2768	0,9067	0,02673	

**Tabela B.3 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-50%.**

AR-50%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	20,0664	4	5,0165	9,348	0,002068
Dentro das amostras	5,3664	10			
Total	25,4328	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,01404	0,5852	0,9934	0,9986
B	V	0,01404		0,001731	0,007681	0,009345
C	R1	0,5852	0,001731		0,8068	0,7379
D	R2	0,9934	0,007681	0,8068		0,9999
E	R3	0,9986	0,009345	0,7379	0,9999	

**Tabela B.4 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-75%.**

AR-75%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	6,5821	4	1,6455	2,498	0,1096
Dentro das amostras	6,5886	10	0,6588		
Total	13,1708	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,9975	0,3163	0,8358	0,1374
B	V	0,9975		0,4647	0,9485	0,2175
C	R1	0,3163	0,4647		0,8471	0,973
D	R2	0,8358	0,9485	0,8471		0,5293
E	R3	0,1374	0,2175	0,973	0,5293	

**Tabela B.5 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo AR-100%.**

AR-100%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,8176	4	0,2044		
Dentro das amostras	1,7507	10	0,175	1,168	0,3814
Total	2,57	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,9513	0,5668	3485	0,6987
B	V	0,9513		0,9155	0,7202	0,9728
C	R1	0,5668	0,9155		0,9918	0,9992
D	R2	3485	0,7202	0,9918		0,96
E	R3	0,6987	0,9728	0,9992	0,96	

**Tabela B.6 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-25%.**

25%-25%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	36,6298	4	9,1574		
Dentro das amostras	9,4551	10	0,94551	9,685	0,001808
Total	46,09	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,001142	0,0326	0,411	0,09676
B	V	0,001142		0,1943	0,01369	0,06747
C	R1	0,0326	0,1943		0,4532	0,9507
D	R2	0,411	0,01369	0,4532		0,833
E	R3	0,09676	0,06747	0,9507	0,833	

**Tabela B.7 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-50%.**

25%-50%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	17,7665	4	4,4416	19,06	0,0001135
Dentro das amostras	2,3298	10	0,2329		
Total	20,10	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,0004446	0,9987	0,008273	0,01556
B	V	0,000445		0,0003583	0,1872	0,09998
C	R1	0,9987	0,0003583		0,005596	0,01035
D	R2	0,008273	0,1872	0,005596		0,9923
E	R3	0,01556	0,09998	0,01035	0,9923	

**Tabela B.8 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-75%.**

25%-75%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	7,2646	4	1,8161	5,585	0,01259
Dentro das amostras	3,2516	10	0,3251		
Total	10,5164	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,1722	1	0,9923	0,05104
B	V	0,1722		0,1989	0,09157	0,9242
C	R1	1	0,1989		0,983	0,05961
D	R2	0,9923	0,09157	0,983		0,02655
E	R3	0,05104	0,9242	0,05961	0,02655	

**Tabela B.9 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 25%-100%.**

25%-100%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	14,4359	4	3,6089	10,21	0,001479
Dentro das amostras	3,53587	10	0,3535		
Total	17,9718	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
--------	------------	---	---	---	---	---

A	L	0,001024	0,05593	0,02549	0,005712
B	V	0,001024	0,101	0,2133	0,6834
C	R1	0,05593	0,101	0,9847	0,5788
D	R2	0,02549	0,2133	0,9847	0,8487
E	R3	0,005712	0,6834	0,5788	0,8487

**Tabela B.10 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-50%.**

100%-50%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	4,8519	4	1,2129		
Dentro das amostras	4,9051	10	0,4905	2,473	0,112
Total	9,76	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,2018	0,9989	0,4772	0,7906
B	V	0,2018		0,139	0,9586	0,7294
C	R1	0,9989	0,139		0,3522	0,6517
D	R2	0,4772	0,9586	0,3522		0,9765
E	R3	0,7906	0,7294	0,6517	0,9765	

**Tabela B.11 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-75%.**

100%-75%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	11,7355	4	2,9338		
Dentro das amostras	4,6473	10	0,4647	6,313	0,008416
Total	16,38	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,2073	0,005659	0,02608	0,1702
B	V	0,2073		0,1953	0,6607	0,9999
C	R1	0,005659	0,1953		0,8389	0,2371
D	R2	0,02608	0,6607	0,8389		0,737
E	R3	0,1702	0,9999	0,2371	0,737	

**Tabela B.12 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o grupo 100%-100%.**

100%-100%					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	23,2512	4	5,8128	8,8128	8,897
Dentro das amostras	6,5331	10	0,6533		
Total	29,78	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	L		0,3514	0,6984	0,06824	0,4821
B	V	0,3514		0,05316	0,003663	0,9987
C	R1	0,6984	0,05316		0,4274	0,08033
D	R2	0,06824	0,003663	0,4274		0,005339
E	R3	0,4821	0,9987	0,08033	0,005339	

**B.2.- Influência da substituição do concreto com agregado leve****Tabela B.13 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface lisa.**

Interface lisa (L)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	5,1882	4	1,297	9,669	0,00182
Dentro dos grupos	1,3414	10	0,1341		
Total	6,53	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	AR-AR		0,01537	0,005395	0,001432	0,01786
B	AR-25%	0,01537		0,9493	0,4671	1
C	AR-50%	0,005395	0,9493		0,8478	0,9216
D	AR-75%	0,001432	0,4671	0,8478		0,4167
E	AR-100%	0,01786	1	0,9216	0,4167	

**Tabela B.14 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface como vibrada.**

Interface como vibrada (V)						
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade	
Entre os grupos	6,9216	4	1,7304	41,95	3,22E-06	
Dentro dos grupos	0,4124	10	0,04124			
Total	7,33	14				

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	AR-AR		0,0001995	0,0001762	0,0002223	0,006291
B	AR-25%	0,0002		0,03994	0,9874	0,01733
C	AR-50%	0,000176	0,03994		0,019	0,000305
D	AR-75%	0,000222	0,9874	0,019		0,03638
E	AR-100%	0,006291	0,01733	0,000305	0,03638	

**Tabela B.15 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R1).**

Interface rugosa (R1)						
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade	
Entre os grupos	1,404	4	0,351	3,417	0,05235	
Dentro dos grupos	1,02733	10	0,1027			
Total	2,43	14				

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	AR-AR		0,0347	0,3319	0,2011	0,6978
B	AR-25%	0,0347		0,5687	0,7732	0,2446
C	AR-50%	0,3319	0,5687		0,9954	0,9518
D	AR-75%	0,2011	0,7732	0,9954		0,8176
E	AR-100%	0,6978	0,2446	0,9518	0,8176	

**Tabela B.16 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R2).**

Interface rugosa (R2)						
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade	
Entre os grupos	2,3693	4	0,5923	24,37	3,86E-05	
Dentro dos grupos	0,243	10	0,0243			
Total	2,61	14				



Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	AR-AR		0,0002597	0,1518	0,03476	0,7252
B	AR-25%	0,00026		0,003093	0,01232	0,0001905
C	AR-50%	0,1518	0,003093		0,8652	0,02238
D	AR-75%	0,03476	0,01232	0,8652		0,005351
E	AR-100%	0,7252	0,0001905	0,02238	0,005351	

**Tabela B.17 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato AR e interface rugosa (R3).**

Interface rugosa (R3)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	1,4087	4	0,3521	3,742	0,04121
Dentro dos grupos	0,9412	10	0,09412		
Total	2,35	14			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D	E
A	AR-AR		0,04993	0,04734	0,3	0,4639
B	AR-25%	0,04993		1	0,7434	0,5446
C	AR-50%	0,04734	1		0,7248	0,5257
D	AR-75%	0,3	0,7434	0,7248		0,996
E	AR-100%	0,4639	0,5446	0,5257	0,996	

**Tabela B.18 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface lisa.**

Interface lisa (L)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	2,6293	3	0,8764	20,9	0,000385
Dentro dos grupos	0,3355	8	0,04194		
Total	2,96	11			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D
A	25%-25%		0,1188	0,6769	0,00386
B	25%-50%	0,1188		0,02413	0,0004323
C	25%-75%	0,6769	0,02413		0,01595
D	25%-100%	0,00386	0,0004323	0,01595	

**Tabela B.19 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface com vibrada.**

Interface como vibrada (V)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	5,4974	3	1,8324	24,47	0,0002203
Dentro dos grupos	0,5991	8	0,07489		
Total	6,10	11			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D
A	25%-25%		0,000326	0,004513	0,008041
B	25%-50%	0,000326		0,03425	0,01793
C	25%-75%	0,004513	0,03425		0,9625
D	25%-100%	0,008041	0,01793	0,9625	

**Tabela B.20.19 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R1).**

Interface rugosa (R1)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	2,3189	3	0,7729	70,28	4,33E-06
Dentro dos grupos	0,08798	8	0,01099		
Total	2,41	11			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D
A	25%-25%		0,01372	0,0002334	0,0002322
B	25%-50%	0,01372		0,0004992	0,0003898
C	25%-75%	0,000233	0,0004992		0,9597
D	25%-100%	0,000232	0,0003898	0,9597	

**Tabela B.20 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R2).**

Interface rugosa (R2)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	0,877	3	0,2923	5,282	0,02665
Dentro dos grupos	0,4428	8	0,0553		
Total	1,32	11			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D
A	25%-25%		0,05176	0,02932	0,09049
B	25%-50%	0,05176		0,9756	0,9775
C	25%-75%	0,02932	0,9756		0,8506
D	25%-100%	0,09049	0,9775	0,8506	

**Tabela B.22- One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 25% e interface rugosa (R3).**

Interface rugosa (R3)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	1,08256	3	0,3608	3,999	0,05193
Dentro dos grupos	0,7219	8	0,0902		
Total	1,80	11			

Séries	Rugosidade	A	B	C	D
A	25%-25%		0,04825	0,7073	0,1698
B	25%-50%	0,04825		0,2189	0,8065
C	25%-75%	0,7073	0,2189		0,6183
D	25%-100%	0,1698	0,8065	0,6183	

**Tabela B.23 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface lisa.**

Interface lisa (L)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	2,1017	2	1,05085	16,5	0,003641
Dentro dos grupos	0,3821	6	0,06368		
Total	2,48	8			

Séries	Rugosidade	A	B	C
A	100%-50%		0,004362	0,6855
B	100%-75%	0,004362		0,009986
C	100%-100%	0,6855	0,009986	

**Tabela B.2421 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface como vibrada.**

Interface como vibrada (V)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	2,0044	2	1,0022	4,104	0,07531
Dentro dos grupos	1,4652	6	0,2442		
Total	3,47	8			

Séries	Rugosidade	A	B	C
A	100%-50%		0,08037	0,8787
B	100%-75%	3,804		0,1499
C	100%-100%	0,6929	3,111	

**Tabela B.2522 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R1).**

Interface rugosa (R1)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	1,1175	2	0,5587	5,752	0,04027
Dentro dos grupos	0,5828	6	0,0971		
Total	1,70	8			

Séries	Rugosidade	A	B	C
A	100%-50%		0,4499	0,1765
B	100%-75%	0,4499		0,03513
C	100%-100%	0,1765	0,03513	

**Tabela B.26 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R2).**

Interface rugosa (R2)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	4,2967	2	2,1483	17,5	0,003135
Dentro dos grupos	0,7366	6	0,1227		
Total	5,03	8			

Séries	Rugosidade	A	B	C
A	100%-50%		0,2562	0,003009
B	100%-75%	0,2562		0,01684
C	100%-100%	0,003009	0,01684	

**Tabela B.27 - One-way ANOVA e Teste de Tukey para o substrato 100% e interface rugosa (R3).**

Interface rugosa (R3)					
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>calculado</sub>	Probabilidade
Entre os grupos	1,0741	2	0,537	3,982	0,07933
Dentro dos grupos	0,8092	6	0,1348		
Total	1,8833	8			

Séries	Rugosidade	A	B	C
A	100%-50%		0,1257	0,9784
B	100%-75%	0,1257		0,09741
C	100%-100%	0,9784	0,09741	

## ANEXO C

**Tabela C.1. - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de *slant shear* com ruptura adesiva do substrato AR.**

Grupo ( <i>slant shear</i> )	$\tau_{exp.}$ (MPa)	$\tau_{calc.}$ Model Code (2010)	$\tau_{calc.}$ Eurocode (2010)	$\tau_{calc.}$ Santos (2012)	$\tau_{calc.}$ Mohamad (2015)	$\tau_{calc.}$ Costa (2018)
1-AR-AR-L	13,18	8,53	9,04	2,97	8,07	16,15
2-AR-AR-L	14,31	9,21	9,71	2,97	8,69	17,40
3-AR-AR-L	16,73	10,66	11,16	2,97	10,02	20,07
1-AR-AR-V	13,68	10,87	11,04	3,55	11,65	18,15
2-AR-AR-V	13,98	11,07	11,24	3,55	11,88	18,48
3-AR-AR-V	13,62	10,83	11,00	3,55	11,61	18,08
2-AR-AR-R1	13,21	13,51	13,51	4,06	17,10	19,95
3-AR-AR-R1	13,45	13,71	13,71	4,06	17,37	20,22
1-AR-AR-R2	11,32	11,81	11,81	4,19	16,75	18,49
2-AR-AR-R2	11,84	12,28	12,28	4,19	17,45	19,12
3-AR-AR-R2	10,83	11,37	11,37	4,19	16,09	17,89
2-AR-AR-R3	14,99	15,10	15,10	4,30	23,60	23,54
3-AR-AR-R3	12,69	13,04	13,04	4,30	20,26	20,75
3-AR-25%-L	11,37	7,56	8,08	3,46	8,96	15,25
1-AR-25%-V	9,35	7,97	8,14	3,58	8,08	13,24
2-AR-25%-V	9,15	7,83	8,00	3,58	7,93	13,01
3-AR-25%-V	8,84	7,60	7,77	3,58	7,69	12,64
1-AR-25%-R1	9,68	10,49	10,49	3,98	12,38	15,65
2-AR-25%-R1	9,23	10,09	10,09	3,98	11,87	15,12
3-AR-25%-R1	10,71	11,43	11,43	3,98	13,56	16,89
1-AR-25%-R2	9,16	10,02	10,02	4,06	12,63	15,45
1-AR-25%-R3	11,3	11,96	11,96	4,18	16,45	18,53
3-AR-25%-R3	10,6	11,33	11,33	4,18	15,53	17,68
1-AR-50%-L	8,81	5,70	6,12	2,85	6,84	11,60
2-AR-50%-L	8,59	5,57	6,00	2,85	6,69	11,37
3-AR-50%-L	7,82	5,12	5,55	2,85	6,16	10,51
3-AR-50%-V	5,6	4,94	5,09	3,29	6,86	9,58
2-AR-50%-R1	10,83	10,88	10,88	3,32	12,92	15,82
3-AR-50%-R1	7,94	8,36	8,36	3,32	9,76	12,49
3-AR-50%-R3	8,67	9,00	9,00	3,22	9,65	12,90
1-AR-75%-L	6,88	4,76	5,15	2,46	4,97	9,33
2-AR-75%-L	8,04	5,47	5,86	2,46	5,69	10,66
1-AR-75%-V	8,4	7,07	7,20	2,56	6,93	11,58
3-AR-75%-V	6,43	5,67	5,80	2,56	5,48	9,29
1-AR-100%-L	6,23	4,02	4,33	1,92	4,35	7,95
2-AR-100%-L	5,94	3,85	4,16	1,92	4,18	7,63
3-AR-100%-L	7,43	4,71	5,02	1,92	5,08	9,24
1-AR-100%-V	6,74	5,37	5,48	2,24	6,90	9,58

Continua						
2-AR-100%-V	6,74	5,37	5,48	2,24	6,90	9,58
3-AR-100%-V	6,83	5,44	5,54	2,24	6,99	9,68
3-AR-100%-R1	7,43	7,47	7,47	2,50	9,97	11,37
3-AR-100%-R2	7,19	7,28	7,28	2,54	10,41	11,39
2-AR-100%-R3	6,83	6,96	6,96	2,66	11,41	11,55

**Tabela C.2. - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de *slant shear* com ruptura adesiva do substrato 25%.**

Grupo ( <i>slant shear</i> )	$\tau_{exp.}$ (MPa)	$\tau_{calc.}$ Model Code (2010)	$\tau_{calc.}$ Eurocode (2010)	$\tau_{calc.}$ Santos (2012)	$\tau_{calc.}$ Mohamad (2015)	$\tau_{calc.}$ Costa (2018)
1-25%-25%-L	9,18	6,13	6,65	3,38	7,17	12,48
2-25%-25%-L	9,34	6,23	6,74	3,38	7,28	12,67
3-25%-25%-L	8,97	6,01	6,52	3,38	7,03	12,25
1-25%-25%-V	15,03	11,78	11,95	3,75	15,74	20,84
2-25%-25%-V	14,52	11,42	11,59	3,75	15,23	20,23
3-25%-25%-V	12,14	9,77	9,94	3,75	12,92	17,47
2-25%-25%-R1	11,75	12,17	12,17	4,07	14,56	17,90
3-25%-25%-R1	12,32	12,68	12,68	4,07	15,20	18,57
1-25%-25%-R2	10,72	11,26	11,26	4,21	15,33	17,55
2-25%-25%-R3	12,64	12,96	12,96	4,32	18,11	19,95
1-25%-50%-L	8,25	5,54	5,96	2,77	5,64	10,75
3-25%-50%-L	9,58	6,33	6,76	2,77	6,42	12,24
3-25%-50%-V	6,42	5,64	5,79	3,17	7,26	10,37
2-25%-50%-R1	8,76	9,33	9,33	3,30	11,01	13,79
2-25%-50%-R3	7,23	7,95	7,95	3,43	10,27	12,47
1-25%-75%-L	5,52	3,93	4,32	2,45	3,64	7,47
2-25%-75%-L	6,68	4,64	5,03	2,45	4,27	8,78
3-25%-75%-L	7,15	4,94	5,33	2,45	4,53	9,32
1-25%-75%-V	7,98	6,78	6,91	2,92	9,65	12,53
2-25%-75%-V	7,89	6,72	6,85	2,92	9,55	12,43
1-25%-75%-R1	6,77	7,56	7,56	3,04	13,13	13,28
1-25%-75%-R3	7,42	8,17	8,17	3,08	9,98	12,30
2-25%-75%-R3	8,48	9,15	9,15	3,08	11,27	13,61
1-25%-100%-L	4,33	3,12	3,48	2,23	3,17	6,15
2-25%-100%-L	4,45	3,19	3,55	2,23	3,24	6,28
3-25%-100%-L	4,22	3,05	3,41	2,23	3,10	6,02
1-25%-100%-V	6,85	5,83	5,95	2,69	8,19	10,81
1-25%-100%-R2	5,88	6,57	6,57	3,00	9,38	10,79
1-25%-100%-R3	7,56	8,10	8,10	3,17	12,13	13,02
2-25%-100%-R3	5,62	6,34	6,34	3,17	9,35	10,64

**Tabela C.1 - Resistência ao cisalhamento teórico obtido para os corpos-de-prova de *slant shear* com ruptura adesiva do substrato 100%.**

1-100%-50%-L	9,09	5,78	6,09	1,85	5,00	10,71
2-100%-50%-L	9,5	6,02	6,33	1,85	5,20	11,15
3-100%-50%-L	9,35	5,93	6,24	1,85	5,13	10,98
1-100%-50%-V	10,63	8,14	8,24	2,40	11,76	14,57
1-100%-50%-R1	8,43	8,49	8,49	2,52	11,04	12,61
2-100%-50%-R1	9,03	9,02	9,02	2,52	11,76	13,32
3-100%-50%-R1	10,04	9,92	9,92	2,52	12,99	14,52
2-100%-50%-R2	10,43	10,26	10,26	2,48	13,43	14,96
3-100%-50%-R2	10,97	10,73	10,73	2,48	14,09	15,60
2-100%-50%-R3	9,75	9,66	9,66	2,51	13,29	14,39
1-100%-75%-L	6,41	4,17	4,46	1,85	4,37	8,14
2-100%-75%-L	6,86	4,44	4,73	1,85	4,65	8,64
3-100%-75%-L	6,63	4,30	4,59	1,85	4,51	8,38
1-100%-75%-V	9,08	7,03	7,12	1,90	6,42	11,26
2-100%-75%-V	7,14	5,69	5,79	1,90	5,16	9,10
3-100%-75%-V	7,6	6,01	6,11	1,90	5,46	9,62
1-100%-100%-L	7,97	5,12	5,43	1,86	5,02	10,50
2-100%-100%-L	8,86	5,65	5,95	1,86	5,52	11,47
3-100%-100%-L	9,63	6,11	6,41	1,86	5,95	12,32
1-100%-100%-V	10,08	7,77	7,87	2,30	11,82	14,93
2-100%-100%-V	8,8	6,89	6,99	2,30	10,42	13,43
1-100%-100%-R1	8,06	8,17	8,17	2,43	10,37	12,85
3-100%-100%-R2	6,55	6,83	6,83	2,53	9,30	11,35
1-100%-100%-R3	9,03	9,03	9,03	2,64	12,99	14,46